#### TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen Lehrstuhl für Produktentwicklung

# Architekturgesteuerte

# Elektrik/Elektronik Baukastenentwicklung im Automobil

#### Laura Sophie Brandt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

#### **Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg

Die Dissertation wurde am 28.08.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 18.03.2016 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleiti	ang und Motivation des Forschungsvorhabens	1
1.1. M	otivation und Herausforderungen	1
1.1.1.	Endogene Herausforderungen für die automotive E/E Entwicklung	4
1.1.2.	Exogene Herausforderungen für die automotive E/E Entwicklung	17
1.1.3.	Reaktionen auf endogene und exogene Herausforderungen	31
1.2. Zi	elsetzung und Forschungsleitende Fragestellung	34
1.2.1.	Forschungsleitende Fragestellung	35
1.2.2.	Einordung und Abgrenzung der Arbeit	37
1.3. Au	ıfbau der Arbeit	39
2. Forsch	ungsdesign und Forschungsmethoden	43
2.1. W	issenschaftstheoretischer Ordnungsrahmen	43
2.1.1.	Wissenschaftstheoretische Grundposition	44
2.1.2.	Forschungsziele	47
2.1.3.	Forschungsmethoden	50
2.2. M	ethodisches Rahmenkonzept des Forschungsvorhabens	51
2.3. Me	ethoden des Forschungsvorhabens	53
2.3.1.	Explorative Forschung (Exploration)	54
2.3.2.	Theoriebasierte Exploration	55
2.3.3.	Qualitativ-empirische Exploration	56
2.4. Zu	sammenfassung	58
3. Grundl	agen der automotiven E/E Entwicklung	61
3.1. Au	ntomotive E/E Bordnetzarchitektur	61
3.1.1.	Entwicklung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur	62
3.1.2.	Systemebenen-Model einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur	65
3.2. E/	E Funktionen	68
3.2.1.	Systemfunktionen versus Kundenfunktionen	70
3.2.2.	Logische Funktions-Architektur	73
3.3. So	ftware	75
3.3.1.	Software-Architektur Standardisierung.	75
3.3.2.	Software-Architektur Standardisierung gemäß AUTOSAR	76
3.4. Sto	euergeräte	79
3 4 1	Steuergerätehardware	80

	3.4	.2.	Steuergerätearten und Vernetzungstechnologien	82
	3.5.	Au	comotive E/E Bordnetzarchitektur – Gestaltung	85
	3.5	.1.	Funktionsorientierungsansatz	87
	3.5	.2.	Zentralisierungsansatz	89
	3.5	.3.	Domänenansatz	91
	3.5	.4.	Vergleich automotiver E/E Bordnetzarchitektur Gestaltungsansätze	94
	3.6.	Au	comotiver E/E Baukasten	96
	3.6	.1.	Allgemeiner Baukastenbegriff	98
	3.6	.2.	Charakterisierung automotiver Baukästen	99
	3.6	.3.	Definition automotiver E/E Baukasten	103
	3.7.	Zus	ammenfassung	104
4.	Gru	ındla	gen und methodisches Vorgehen zur Modellbildung	107
	4.1.	Mo	delle	107
	4.2.	Opt	imierungsmodelle	110
	4.2	.1.	Optimierungsprobleme und -modelle	111
	4.2	.2.	Optimierungsverfahren zur Modelllösung	115
	4.2	.3.	Optimierungsmodellbildung im Operations Research	121
	4.3.	Ref	Perenzmodelle	122
	4.4.	Zus	ammenfassung	129
5.	Fur	nktio	nspartitionierung in einer E/E Bordnetzarchitektur	132
	5.1.	Vo	gehen zur Optimierungsmodellbildung	132
	5.2.	Pro	blemidentifikation und -analyse	135
	5.3.	Zie	ldefinition	137
	5.4.	Des	skriptives Modell	140
	5.4	.1.	Definition der grundlegenden automotiven Struktur	140
	5.4	.2.	Betrachtungsgegenstand des Optimierungsmodells	148
	5.5.	Ma	thematisches Modell	156
	5.6.	Dat	enbeschaffung	163
	5.7.	Lös	sungsfindung und Bewertung inkl. optimale Lösung	166
	5.7	.1.	Computerbasierte Lösung des Optimierungsproblems	166
	5.7	.2.	Validierung des Optimierungsmodells	173
	5.8.	Zus	ammenfassung	177
6.	Arc	hitel	turgesteuerte E/E Baukastenentwicklung	185
	6.1.	Vo	gehen zur Referenzmodellbildung	185

6	6.2. Zieldefinition			
6	.3.	Kon	nstruktion des Ordnungsrahmens	188
6	.4.	Mod	dellierung der Struktur	189
	6.4.	1.	Systemelement 1 – Anforderungen	189
	6.4.	2.	Systemelement 2 – Harmonisierung	193
	6.4.	3.	Systemelement 3 – Ausleitung	202
6	.5.	Kon	nsolidierung und Komplettierung	204
	6.5.	1.	Schnittstellen der Systemelemente	204
	6.5.	2.	Validierung des Referenzmodells	212
6	.6.	Zus	ammenfassung	216
7.	Zus	amm	enfassung und Ausblick	221
7	.1.	Eino	ordnung der Arbeit	221
7	.2.	Fors	schungsziele und -ergebnisse	222
7	.3.	Aus	sblick und weiterer Forschungsbedarf	224
I.	Abk	ürzu	ingsverzeichnis	I
II.	Abb	oilduı	ngsverzeichnis	V
III.	For	melv	erzeichnis	XIII
IV.	Lite	ratur	verzeichnis	XIV

#### 1

# 1. Einleitung und Motivation des Forschungsvorhabens

# 1.1. Motivation und Herausforderungen

Mit Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E)<sup>1</sup> von über 95 Milliarden Euro<sup>2</sup> im Jahr 2014 hat sich die Automobilindustrie,<sup>3</sup> neben der Elektronik- und Computerbranche sowie der Gesundheitsindustrie, zu einem der weltweit stärksten Innovationstreiber entwickelt [OICA 2014, o. S.; JARUZELSKI et al. 2014, S. 38f.; VDA 2014, S. 17]. Moderne Automobile zählen zu den innovativsten und technologieintensivsten Produkten der heutigen Zeit [SCHÖNMANN 2012, S. 1; VDA 2014, S.15]. Als Konsequenz sind Umfang, Komplexität<sup>4</sup> und Dynamik<sup>5</sup> der

Die zentralen Rollen in der Automobilindustrie übernehmen Automobilhersteller und Zulieferer, die sich abhängig vom Grad und Tiefe ihrer Wertschöpfungsaktivitäten unterscheiden lassen [WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 1]. Automobilhersteller sind nach Schönmann "[...] jene Unternehmen, die in Eigenfertigung und mit Einsatz zugelieferter Systeme, Komponenten, Module sowie möglicher Entwicklungsleistungen Automobile herstellen und an den Märkten anbieten" [SCHÖNMANN 2012, S. 32]. Zulieferer übernehmen hingegen die Aufgabe "[...] einem produzierenden Unternehmen Vorprodukte, Rohmaterialien oder Dienstleistungen (zu) liefern, welche in das Endprodukt einfließen oder zu dessen Herstellung benötigt werden" [MEINIG 1995, S. 486]. Zulieferer lassen sich aufgrund ihrer hierarchischen Positionierung in der Wertschöpfungskette in drei Klassen (engl.: "Tier") einteilen: Third-Tier-Zulieferer (zumeist Rohstoff-, Halbfabrikat- und Normteillieferanten), Second-Tier-Zulieferer (Komponentenlieferanten an First-Tier-Zulieferer oder OEMs), First-Tier-Zulieferer (Komponenten- und Systemlieferanten an OEMs) [BECKER 2007, S. 167 ff.].

Die F&E in der Automobilindustrie lässt sich in vier aufeinander aufbauende Aktivitäten aufteilen: Grundlagenforschung, Technologieentwicklung, Vorentwicklung sowie Produkt- und Prozessentwicklung [SCHÖNMANN 2012, S. 68]. Ziel der verschiedenen F&E Aktivitäten ist es mittels systematischer Suche sowohl neues wissenschaftliches als auch technisches Wissen zu generieren [BUND 2000, S. 9].

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Gemäß Jahresbericht 2012 des Verbands der Automobilindustrie (VDA), stieg im Jahr 2013 der Anteil an **Investitionen in F&E** in der deutschen Automobilindustrie im Vergleich zum Vorjahr gemäß Planzahlen um weitere sechs Prozent, d.h. ca. 18,3 Milliarden Euro, an. Die Investitionen deutscher Automobilhersteller in externe F&E-Aktivitäten in 2011 beliefen sich auf etwa 5 Milliarden Euro. Damit nehmen die Automobilhersteller den Platz der innovativsten Branche in Deutschland ein [VDA 2014, S. 17].

Die Automobilindustrie umfasst gemäß VDA alle "Hersteller von Kraftwagen und deren Motoren, Sattelzugmaschinen, Anhänger, Aufbauten, Kraftfahrzeugteilen und –Zubehör" [VDA 2000, S. 6]. Diese, auf den Wertschöpfungsbereich der Fahrzeugentwicklung und -produktion fokussierende Definition, kann gemäß Diez et al. um die Bereiche Vermarktung, Instandhaltung und Entsorgung ergänzt werden. Demnach umfasst die Automobilindustrie "[...] alle Unternehmen, die überwiegend mit der Herstellung, der Vermarktung, der Instandhaltung sowie Entsorgung von Automobilen und Automobilteilen beschäftigt sind" [DIEZ ET AL. 1994, S. 13].

Allgemein gefasst ist **Komplexität** eine Eigenschaft eines Systems (z.B. Prozess, Produkt oder Unternehmen), die sich über die Anzahl von Systemelementen, Beziehungen der Systemelemente untereinander sowie Systemzuständen charakterisieren lässt. Vereinfacht ist bei Lindemann die Rede von einer Intransparenz eines Systems [LINDEMANN 2008, S. 1ff.]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist Komplexität als die im Rahmen einer Entwicklungsaufgabe beinhaltete Anzahl von zu vereinbarenden Teilaufgaben und Prozesspartnern zu verstehen. Je höher diese Anzahl ist, desto höher ist auch die Komplexität einer Entwicklungsaufgabe [GÖPFERT 1998, S. 67f.; LINDEMANN 2008, S. 8f.]. Die **Beherrschung von Komplexität** gilt als elementar für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Wird dieser Zustand nicht erreicht, besteht das Risiko zusätzlicher unkontrollierbarer und gravierender Kosten, die sich nachteilig auf die Profitabilität und damit auch mittel- bis langfristig auf die Wettbewerbsfähigkeit des betroffenen Unternehmens auswirken können [FRANZ/KAJÜTER 1997, S. 1ff.].

Die Dynamik beschreibt das Ausmaß der Abweichungen des Arbeitsablaufs und erzielten Ergebnisses vom definierten Soll-Zustand einer Entwicklungsaufgabe im Rahmen des gesamten Entwicklungsprozesses. Dabei

mit der Automobilentwicklung<sup>6</sup> verbundenen Aufgaben über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg kontinuierlich angestiegen [Broy et al. 2011, S 42; Hoffmann 2010, S. 1f. u. S. 27]. Der automotiven Elektrik/Elektronik<sup>7</sup> (E/E) Entwicklung kommt hierbei eine exponierte Rolle zu: Seit den 1970er Jahren steigt der prozentuale Anteil von E/E Umfängen am Gesamtfahrzeug an, insb. in der Ober- und Luxusklasse (vgl. Abbildung 1-1) [Broy 2006, S. 33; SAAD/WEINMANN 2004, S. 1; SCHÄUFFELE/ZURWAKA 2013, S. 4f.]. Dieser Trend ist weiter ansteigend. [Broy et al. 2007, S. 356; Broy et al. 2011, S 42; Hoffmann 2010, S. 35; Pretschner et al. 2007, S. 1].

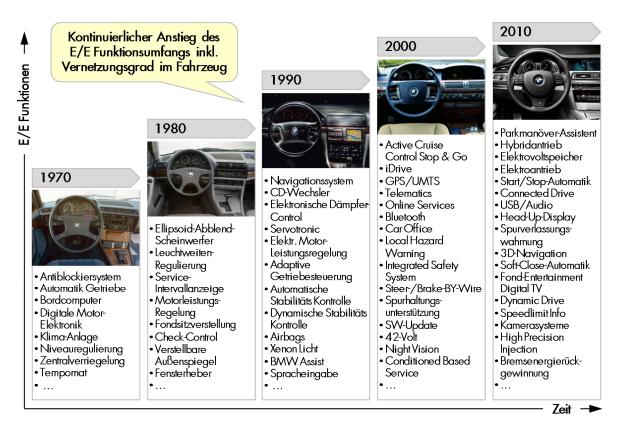


Abbildung 1-1: Exponentieller Anstieg von E/E Funktionen seit den 1970er Jahren am Bsp. der BMW 7er Baureihe, eigene Darstellung.

Damit hat sich die E/E Entwicklung als der zentrale technologische Veränderungstreiber und die maßgebliche Quelle für zukunftsweisende Schlüsseltechnologien in der Automobilindustrie herausgebildet [Broy 2005, S. 143; Jaensch 2012, S. 1f.; Saad/Weinmann 2004, S. 1; Voget 2003, S. 2; Wallentowitz et al. 2009, S. 31; Ziegenbein et al. 2005, S. 1]. Die Realisierung der Funktionalität eines modernen Automobils ist ohne E/E und Software nicht mehr möglich:

wird die Dynamik einer Entwicklungsaufgabe maßgeblich durch Herausforderungen der Umwelt (z.B. Marktoder Kundenanforderungen) beeinflusst [GÖPFERT 1998, S. 67f.].

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Die Automobilentwicklung lässt sich in die vier Entwicklungsbereiche Antrieb, Fahrwerk, Karosserie und Interieur sowie Elektrik/Elektronik untergliedern.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird **Elektrik/Elektronik** mit E/E abgekürzt. Unter **Elektrik** ist hierbei das elektromechanische Wirkprinzip (z.B. Relais) zu verstehen. Hinter **Elektronik** verbergen sich elektronische Wirkprinzipien (z.B. Steuergeräte) [JAENSCH 2012, S. 13]. Dabei werden heute kaum mehr rein E/E-basierte Funktionen, sondern vornehmlich softwarebasierte E/E Funktionen (Software-Komponenten) im Fahrzeug implementiert [BROY ET AL. 2007, S. 356; BROY ET AL. 2011, S 42; HOFFMANN 2010, S. 35; PRETSCHNER ET AL. 2007, S. 1]. Als **Software** sind elektronisch gespeicherte Programme (z.B. Funktionen eines Steuergeräts) zu verstehen [JAENSCH 2012, S. 13].

E/E Umfänge und Software werden in allen Bereichen des Fahrzeugs eingesetzt und übernehmen dedizierte Antriebs-, Fahrwerks-, Karosserie-, Komfort-, Sicherheits-, Fahrerassistenz- und Infotainmentfunktionen (vgl. Abbildung 1-1) [BROY ET AL. 2011, S. 45; SCHÄUFFELE/ZURWAKA 2013, S. 4f. WALLENTOWITZ/REIF 2010, S.1]. Bspw. werden immer präzisere und effizientere Motorsteuergeräte eingesetzt, um eine Verbrauchsminimierung, Wirkungsgradsteigerung und Emissionsreduzierung von Motoren zu erzielen. Aktive Sicherheitssysteme, wie etwa das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), mindern das Unfallrisiko für Fahrzeuginsassen und Passanten präventiv. Passive Sicherheitssysteme, zu denen u.a. Airbags, Gurtstraffer oder aktive Kopfstützen zählen, reduzieren das Schadensausmaß in Unfallsituationen. Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer in verschiedensten Park- und Fahrsituationen: Parkassistenzsysteme helfen z.B. beim Parkplatz-suchen oder bei Einparkmanövern. Infotainmentsysteme unterhalten und informieren Fahrzeuginsassen während der Fahrt [GÄRTNER ET AL. 2013, S. 82ff.].

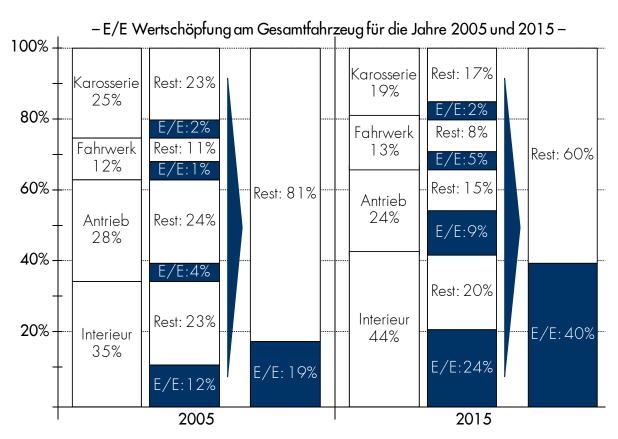


Abbildung 1-2: Entwicklung des E/E Wertschöpfungsanteils am Produktionswertes des Gesamtfahrzeug am Bsp. Oberklassefahrzeuge, eigene Darstellung [HARDUNG ET AL. 2004, S. 203; PRETSCHNER ET AL. 2007, S. 1; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 19].

Die exponierte Rolle<sup>8</sup> der automotiven E/E Entwicklung wird durch verschiedene Prognosen unterstrichen, denen gemäß der relative und absolute Anteil der E/E Wertschöpfung am Gesamtfahrzeug weiter signifikant ansteigen wird [HARDUNG ET AL. 2004, S. 203; PRETSCHNER ET AL. 2007, S. 1]: Die Umsetzung innovativer E/E Umfänge fördert den jährlichen Anstieg des

Gründe für die wachsende **Bedeutung von E/E und Software** im modernen Automobil sind insbesondere in steigenden Gesetzes- und Kundenanforderungen bzgl. Komfort, Sicherheit, Fahrerassistenz und Infotainment zu finden. Ferner führen Forderungen nach einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches und der Emissionen zu anspruchsvolleren und komplexeren Regelkreisen und Steuerungen im Fahrzeug. Auch lässt dies die Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Elektromobilität steigen.

E/E Anteils an der Wertschöpfung. So wird bis zum Jahr 2020 ein weiteres Wachstum des E/E Wertschöpfungsanteils für Verbrennerfahrzeuge der Mittelklasse auf ca. 30 Prozent und der Oberklassefahrzeuge auf ca. 40 Prozent<sup>9</sup> angenommen (vgl. Abbildung 1-2) [HARDUNG ET AL. 2004, S. 203; PRETSCHNER ET AL. 2007, S. 1]. Für Hybrid- und Elektrofahrzeuge wird bis zum Jahr 2020 ein E/E Wertschöpfungsanteil von bis zu 70 Prozent prognostiziert, was auf die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zurück zu führen ist [JAENSCH 2012, S. 2; VDA 2003, S. 18, WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 18f.].

Mit den aufgezeigten Trends gehen neue Herausforderungen, Problemstellungen und daraus resultierende Handlungsbedarfe für den Betrachtungsgegenstand der automotiven E/E Entwicklung einher, mit denen sich OEMs verstärkt auseinander setzen müssen. Zur Strukturierung dieser verschiedenen Einflussgrößen, wird im Forschungsvorhaben eine Differenzierung nach endogenen¹⁰ und exogenen¹¹ Herausforderungen vorgenommen (vgl. Kapitel 1.1.1 und 1.1.2). Lösungsansätze bzw. Reaktionen von Automobilherstellern (engl.: Original Equipment Manufacturer, kurz: OEM¹²) auf diese Herausforderungen, werden anschließend diskutiert und in den Kontext des Forschungsvorhabens eingeordnet (vgl. Kapitel 1.1.3).

# 1.1.1. Endogene Herausforderungen für die automotive E/E Entwicklung

Die Zunahme von Software und E/E Umfängen inkl. entsprechender Varianten<sup>13</sup> hat einen signifikanten Einfluss auf die Produktstruktur<sup>14</sup>, Systemkomplexität und Kosten des E/E Gesamtsystems<sup>15</sup> eines modernen Automobils. Damit wirkt sich diese Mehrung auf die gesamte E/E Entwicklung sowie alle weiteren Bereiche der Automobilentwicklung aus [BROY ET AL. 2011, S. 43]. Als Folge kommt es zu diversen Veränderungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses und allen Phasen des Fahrzeuglebenszyklus. Die aktive Bewältigung dieser direkten Einflüsse innerhalb der E/E Entwicklung ist für OEMs mit großen endogenen Herausforderungen verknüpft. Die einzelnen Umwelteinflüsse auf die E/E Entwicklung werden an dieser Stelle näher betrachtet und resultierende Herausforderungen abgeleitet. Die

<sup>9</sup> Gründe für einen E/E **Produktionswert** von 40 Prozent bei Oberklassefahrzeugen liegen insb. darin, dass diese Fahrzeugklasse hohe Verbauraten von Fahrerassistenz-, Sicherheits- und Infotainmentsystemen aufweist HARDUNG ET AL. 2004, S. 203; PRETSCHNER ET AL. 2007, S. 1].

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> **Endogene Herausforderungen**, Problemstellungen und resultierende Handlungsbedarfe sind direkt in der automotiven E/E Entwicklung zu verorten und dort aktiv zu adressieren.

Exogene Herausforderungen, Problemstellungen und resultierende Handlungsbedarfe sind durch OEMs nicht beeinflussbar und wirken von außen auf die automotive E/E Entwicklung ein.

Automobilhersteller werden in der englischen Sprache als Original Equipment Manufacturer (OEM) bezeichnet [WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S.1]. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden "Automobilhersteller" und "OEMs" synonym verwendet.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Eine **Variante** ist eine sich unterscheidende Alternative von einem ansonsten vergleichbaren bzw. ähnlichen Produkt [Franke et al. 2002, S. 53]. Varianten eines Produkts weisen einen hohen Anteil identischer Komponenten sowie Ähnlichkeiten bzgl. Geometrie, Material oder Technologie auf [LINGAU 1994, S. 23f.].

Die Produktstruktur, auch Erzeugnis-Struktur oder Erzeugnis-Gliederung genannt, ist gemäß Schuh "[...] die strukturierte Zusammensetzung des Produktes aus seinen Komponenten. Baugruppen und Einzelteile führen dabei zu Strukturstufen, indem sie Komponenten aus tieferer Ebene in der Produktstruktur zusammenfassen." [SCHUH 2005, S. 119]. Damit ist unter Optimierung der Produktstruktur die Verbesserung der strukturierten Zusammensetzung der einzelnen Produktkomponenten zu verstehen.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> In der vorliegenden Arbeit wird als E/E System die Komposition aller Funktionsbeiträge mindestens einer Funktion mit deren dazu notwendigen E/E Komponenten definiert. Entsprechend ist das E/E Gesamtsystem die logische Komposition aller Funktionsbeiträge aller in einem Fahrzeug implementierten Funktion mit deren dazu notwendigen E/E Hardware- und Softwarekomponenten sowie Daten- und Energiebordnetz.

Zusammenfassung aus Trends, Einflussgrößen und Herausforderungen ist den Karteikarten je Teilabschnitt zu entnehmen (vgl. Abbildung 1-3).

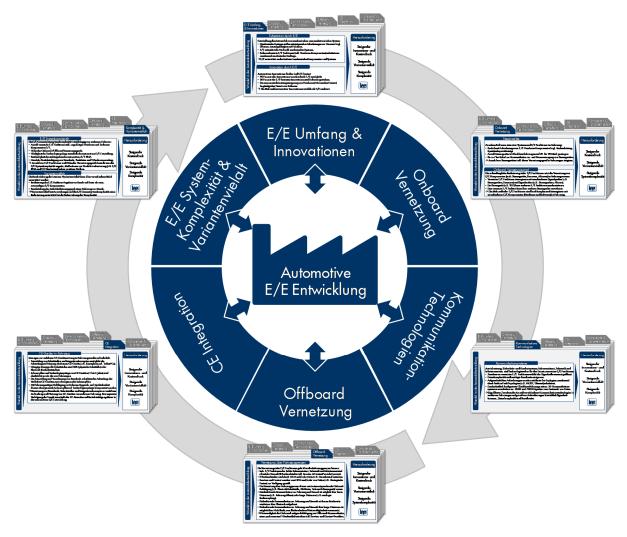


Abbildung 1-3: Endogene Herausforderungen der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

#### Zunehmender E/E Anteil und Innovationen im Automobil

Das Automobil hat sich vom mechanischen<sup>16</sup> zum mechatronischen<sup>17</sup> System weiterentwickelt: Vernetzte softwarebasierte E/E Funktionen und Komponenten<sup>18</sup> unterstützen oder substituieren einen immer größeren Anteil mechanischer Komponenten bzw. (Teil-) Systeme (vgl. Abbildung 1-1 und Abbildung 1-4) [BROY ET AL. 2011, S. 42; CZICHOS 2008; S. 3f.]. Bspw. führen Türsteuergeräte (TSG) bei Daimler, neben intelligenter Fensterheber-Ansteuerung oder

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> In der vorliegenden Arbeit werden unter **Mechanik** mechanische aber auch hydraulische und pneumatische Wirkprinzipien (z.B. passive Federung) zusammengefasst [JAENSCH 2012, S. 13].

Mechatronik ist ein interdisziplinäres Feld innerhalb der Ingenieurwissenschaften, dass sich der Mechanik, Elektrotechnik und Informatik bedient, um Funktionalität und Integration technischer Systeme zu verbessern [FRIEDRICH 2011, S. 9] In der vorliegenden Arbeit werden unter Mechatronik auch mechanische Wirkprinzipien mit elektronischer Regelung (z.B. Automatikgetriebe) zusammengefasst [JAENSCH 2012, S. 13].

Unter Komponenten sind zu physischen Einheiten gruppierte verschiedene mechanische, mechatronische, elektrische und/oder elektronische Teile zu verstehen, die zwecks Funktionserfüllung abstrahiert werden. Eine E/E Komponente ist entsprechend eine elektrische und/oder elektronische Komponente, die eine dedizierte Funktionalität im Fahrzeug umsetzt [JAENSCH 2012, S. 13f.].

komfortablem Öffnen und Schließen der Fenster über Funkfernbedienung, noch weitere Funktionen aus. Dazu zählen etwa das Verstellen von Außenspiegeln, Ansteuern der Blinker in Außenspiegeln oder die Zentralverriegelung von Fahrzeugtüren [HOUDEK/ PAECH 2002, S. 8; REIF 2009, S. 253]. Wenige Innovationen in der Automobilentwicklung finden ohne E/E und Software statt (vgl. Abbildung 1-4): Bis zu 90 Prozent der im Automobil implementierten Innovationen<sup>19</sup> sind E/E basiert [BURKERT, 2013, S. 21; BROY ET AL. 2011, S. 49; Wallentowitz et al. 2009, S. 19, Wallentowitz/Reif 2010, S. 187]. Wovon bis zu 80 Prozent allein softwaregetriebene E/E Innovationen sind [HARDUNG ET AL. 2004, BROY 2006, S. 2; S. 203; HOFFMANN 2010, S. 35; WEINMANN 2002, S. 4]. Dieser signifikante Einsatz von Software und softwarebasierter E/E Funktionen wird u.a. durch exponentielle Leistungssteigerung von Hardware<sup>20</sup> ermöglicht. Zudem stoßen rein mechanische Systeme aufgrund steigender Anforderungen an Grenzen hinsichtlich Effizienz, Leistungsfähigkeit und Präzision [GRAF ET AL. 2013, S.194ff.].

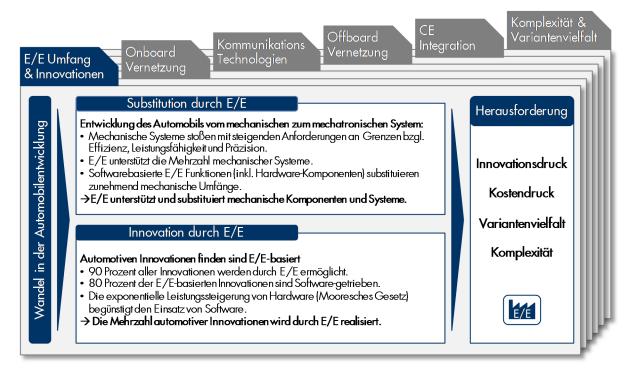


Abbildung 1-4: Endogene Herausforderungen bzgl. steigendem E/E Umfang inkl. Innovationen führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Ein Vorteil softwarebasierter E/E Funktionen ist, dass deren Entwicklung inkl. Fehlerbehebung sowie funktionaler Erweiterung, in vielen Fällen schneller und effizienter umzusetzen ist im Vergleich zu rein mechanischen Systemen. Darüber hinaus kann der vermehrte Einsatz von Software zu Gewichtsreduzierung und Kosteneinsparungen durch Wiederverwendung führen [BORGEEST 2014, S. 1; BROY 2005, S. 145; JAENSCH 2012, S. 1f.]. Für die Entwicklung inkl.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Als **Innovation** oder auch Produktinnovation wird die Einführung eines Produktes verstanden, dessen Produkteigenschaften und –nutzen unter objektiven Gesichtspunkten als neuartig bewertet werden kann [LINGAU 1994, S. 111].

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Gemäß Aussage von Gordon E. Moore ("Moore's Law") verdoppelt sich alle 18-24 Monate die Rechenleistung von Mikroprozessoren.

Test, Absicherung, Implementierung sowie Wartung von Software-Komponenten fallen zwar Aufwände an, jedoch keine Herstellkosten [Broy 2005, S. 145].

Der Einsatz softwarebasierter E/E Funktionen kann positive Auswirkungen auf die Variantenvielfalt von E/E Umfängen haben: Auf baugleichen Steuergeräten können z.B. unterschiedliche Softwareversionen implementiert werden. Dadurch lassen sich Hardwarevarianten minimieren.

Unterschiedliche Lebenszyklen von Software, Hardware und Gesamtfahrzeug können Softwareupdates innerhalb eines Fahrzeuglebenszyklus notwendig werden lassen. Dies setzt eine Befähigung zur Updatefähigkeit von Steuergeräten und Funktionen im Fahrzeug voraus.

<u>Herausforderung:</u>	Die E/E Substitution mechanischer (Teil-) Systeme, der Einsatz komplexer vernetzter
	Softwarefunktionen und die Befähigung einer Vielzahl von Innovation durch E/E führen
	zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie wachsender Komplexität und
	Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

### Steigender Vernetzungsgrad im Fahrzeug (Onboard)

Softwareintensive E/E (Teil-) Systeme bzw. E/E Funktionen steigern den Bedarf an vernetzten E/E Hardware-Komponenten mit entsprechender Rechenleistung und Speicherkapazität (vgl. Abbildung 1-5) [BURKERT, 2013, S. 21; VOLLMER 2009, S. 18ff.]. Bspw. erhöhte sich die Anzahl von Steuergeräten im Segment der Oberklassefahrzeuge in den letzten fünf Jahren um fast 30 Prozent auf 70 bis 90 Stück (vgl. Abbildung 1-5) [BROY ET AL. 2011, S. 43; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 4F.; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 12].

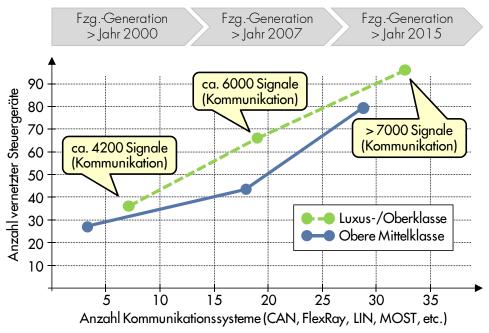


Abbildung 1-5: Anzahl von Steuergeräten und Kommunikationssystemen am Beispiel von drei durchschnittlich ausgestatteten Fahrzeuggenerationen der Luxus-/Oberklasse und oberen Mittelklasse in Anlehnung an [TRAUB 2010,S. 2; NÖRENBERG 2012, S. 5; JAENSCH 2012, S. 4].

Mit wachsender Steuergeräteanzahl geht eine stetige Zunahme des Vernetzungsgrads von E/E Funktionen inkl. zugehöriger E/E Hardware- und Software-Komponenten einher: Zur Realisierung einer Vielzahl von E/E Funktionen ist eine hochkomplexe Vernetzung inkl. Verkabelung notwendig [DREW/HILLEBRAND 2007, S. 128; WEINMANN 2002, S. 2; ZIEGENBEIN ET

AL. 2005, S. 1]. In Oberklassefahrzeugen werden bspw. bis zu 7 km Kabel verbaut, um die Kommunikation und Stromversorgung im Fahrzeug zu realisieren [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 12; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 179].

Als Beispiel für die Vernetzung von E/E Funktionen im modernen Fahrzeug dient das o.g. TSG von Daimler, welches die Synchronisation von Blinkern oder die Zentralverriegelung von Türen übernimmt. Es ist in den Türen verortet und über Bussysteme vernetzt. Die Beherrschung der vom TSG zu regelnden Abläufe setzt u.a. den Verbau leistungsstarker Prozessoren, genügend Speicher und entsprechende Vernetzungstopologie im Fahrzeug voraus [HOUDEK/PAECH 2002, S. 8; REIF 2009, S. 253].

Herausforderung:

Die Zunahme von Anzahl und Vernetzungsgrad der E/E Funktionen inkl. Hardwareund Softwarekomponenten im Fahrzeug führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie wachsender Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

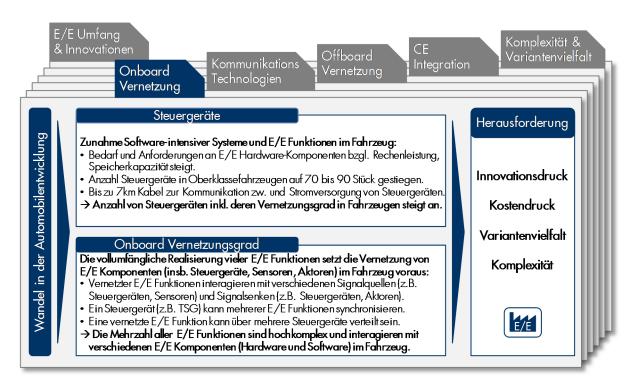


Abbildung 1-6: Endogene Herausforderungen bzgl. der Onboard Vernetzung führen zu steigendem Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

## Wachsende Anforderungen an Kommunikationstechnologien

Zentrale Technologietreiber für den Einsatz von E/E Funktionen und zusätzlicher Steuergeräte im Fahrzeug waren etwa die Antriebsstrangsteuerung oder Sicherheits- und Komfortsysteme. Zu den heutigen Technologietreibern zählen zusätzlich die Felder der Fahrerassistenz, Telematik und Infotainment [HOFFMANN 2010, S. 39; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 12]. Diese drei Felder tragen signifikant zur Erhöhung des Signalaufkommens<sup>21</sup>, der Datenkomplexität sowie

In durchschnittlich konfigurierten Luxus-/Oberklasse-Fahrzeuge sind bis zu 70 vernetzte Steuergeräte implementiert, die über ca. 20 Kommunikationssysteme bis zu 6000 Signalen zwecks Austausch von Daten (Kommunikation) versenden [BROY ET AL. 2011, S. 43; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 4f.; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 12].

der benötigten Bandbreite im Automobil bei. Bspw. werden heute in Fahrzeugen der Oberklasse zw. 6000 und 7000 Signale zur Kommunikation ausgetauscht (vgl. Abbildung 1-5 und Abbildung 1-7). Zu diesen Signalen zählt die Echtzeitübertragung von Streaming-Daten für Audio / Video (z.B. Rearseat-Entertainment) oder Kamerasysteme (z.B. Rückfahrkamera).

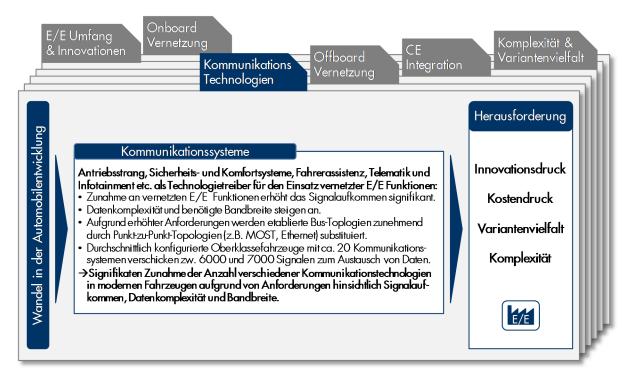


Abbildung 1-7: Endogene Herausforderungen bzgl. Kommunikationstechnologien führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Aus Datenkomplexität und Bandbreitebedarf ergeben sich Anforderungen an die Onboard-Kommunikationstechnologien und deren Topologieauslegung [SCHÄUFFELE/ ZURAWKA 2010, S.5]: Neben etablierten Bus-Topologien<sup>22</sup> werden zunehmend Punkt-zu-Punkt-Topologien wie Media Oriented System Transport (MOST) oder Ethernet eingesetzt [JONES 2009, S. 50; TRAUB 2010, S. 1; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 13].

Herausforderung:	Mit neuen Anforderungen an Onboard-Kommunikationstechnologien nehmen Signal- aufkommen, Datenkomplexität und Bandbreite zu und führen zu steigendem Inno-
	vations- und Kostendruck sowie wachsender Komplexität und Variantenvielfalt inner- halb der automotiven E/E Entwicklung.

#### Steigender Vernetzungsgrad über Fahrzeuggrenzen hinaus

Insbesondere in den Feldern Fahrerassistenz, Telematik und Infotainment sind E/E Funktionen nicht ausschließlich innerhalb des Fahrzeugs (Onboard) vernetzt, sondern auch mit der Umwelt (Offboard) (vgl. Abbildung 1-9). Immer mehr E/E Funktionen finden anteilig in der IT Infrastruktur statt und greifen auf nutzenstiftende Inhalte von Service- und Contentprovidern zurück.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Zu etablierten **Bus-Topologien** zählen bspw. Local Interconnection Network (LIN), Controller Area Network (CAN) oder FlexRay (vgl. Kapitel 3.4.2).

Die Vernetzung über die Fahrzeuggrenzen hinweg, setzt eine entsprechende hardwareseitige Befähigung (SIM-Karte, Telematik-Steuergerät, etc.) eines Fahrzeugs zur uni- oder bidirektionalen Kommunikation voraus (vgl. Abbildung 1-8) [MEKHAIEL ET AL. 2012, S. 86ff.; HOFFMANN 2010, S. 40]. Ergänzend ist eine IT Infrastruktur mit Anbindung von Service- und Content-Providern sicherzustellen sowie eine flächendeckende Mobilfunknetzverfügbarkeit durch Mobilfunkprovider erforderlich [HOFFMANN 2010, S. 39; SCHÄUFFELE/ZURWAKA 2013, S. 5; TUROWSKIE/POUSTTCHI 2004, S. 7ff.]. Ein Beispiel für eine solche E/E Funktion mit Onund Offboard-Anteilen ist die Routenberechnung unter Einbeziehung von Echtzeit-Verkehrsdaten (Real Time Traffic Information (RTTI)) im Navigationsgerät.



Abbildung 1-8: Drahtlose Offboard-Kommunikation, Darstellung nach HOFFMANN [HOFFMANN 2010, S. 40].

#### Herausforderung:

Mit zunehmender E/E Funktionsvernetzung über die Fahrzeuggrenzen wachsen die Anforderungen an die hardwareseitige Befähigung der Fahrzeugflotte zur Kommunikation (Offboard-Kommunikation) und eine performante IT-Backend-Infrastruktur. Dies führt zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie wachsender Komplexität innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

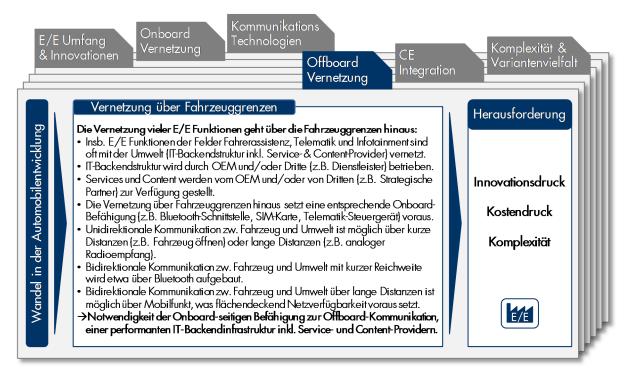


Abbildung 1-9: Endogene Herausforderungen bzgl. der Offboard-Vernetzung führen zu steigendem Innovationsund Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

### Anbindung und Integration von Consumer Electronics (CE) im Fahrzeug

Integrierte Telematik- und Infotainmentsysteme zählen inzwischen zur Standardausstattung. Um Kunden zusätzlich eine nahtlose Integration inkl. Nutzung mobiler Endgeräte – Consumer Electronics (CE)<sup>23</sup> – zu ermöglichen, werden entsprechende Integrationskonzepte bzw. Schnittstellen entwickelt (vgl. Abbildung 1-10) [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 709f.; ESCH 2013, S. 25ff.]. Dazu gehören etwa Standardschnittstellen wie Universal Serial Bus (USB)<sup>24</sup> oder drahtlose Verbindungen (z.B. Bluetooth) mit kurzen Reichweiten<sup>25</sup> [STEGLICH/FUHRHOP 2013, S. 12f; BURKERT 2013, S. 24].

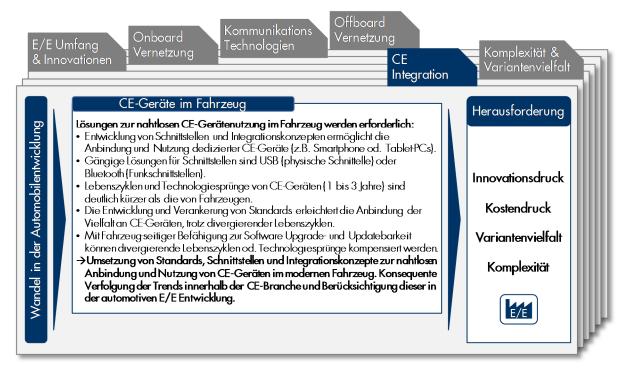


Abbildung 1-10: Endogene Herausforderungen bzgl. Anbindung und Integration von CE-Geräten führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Herausforderungen resultieren aus dem breiten Angebot an CE-Geräten: Bei einer Fahrzeugentwicklung ist eine fahrzeugseitige Integration oder Befähigung zur Nutzung aller am Markt existierenden Lösungen nicht umsetzbar. Dies liegt an den deutlich kürzeren Lebenszyklen mit jeweils signifikanten Technologiesprüngen von CE-Geräten im Vergleich zum Fahrzeug (vgl. Abbildung 1-16). Daher müssen OEMs mindestens die gängigsten und stabilsten Schnittstellen implementieren, um die Integration von CE-Geräten unterschiedlicher Generationen innerhalb eines Fahrzeuglebenszyklus zu ermöglichen [BARON ET AL. 2006, S. 13; HOFFMANN 2010, S. 39]. Entsprechend wesentlich für die Wettbewerbsfähigkeit im Bereich Telematik und Infotainment sind die Nutzung von Standards sowie die fahrzeugseitige Befähigung zur Upgrade- und Updatefähigkeit von Software. Darüber hinaus sind Trends der CE-Branche konsequent zu ver-

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Zu **mobilen Endgeräten**, auch Consumer Electronics (CE) genannt, zählen Tablet-PCs oder Mobiltelefone.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Der Universal Serial Bus (USB) dient z.B. zur Integration von USB-fähigen MP3-Playern oder USB-Speichermedien.

Drahtlose Verbindungen (Funkschnittstellen) mit kurzen Reichweiten sind etwa über ein Wireless Personal Area Network (WPAN) per Bluetooth zur Datenübertragung zw. Mobiltelefonen und dem Fahrzeug möglich.

folgen, damit resultierende Anforderungen frühzeitig in die automotive E/E Entwicklung einfließen können [DREWS/HILLEBRAND 2007, S. 129; MISSEL ET AL. 2013, S. 96ff.; HOFFMANN 2010, S. 39].

Herausforderung:

Upgrade- und Updatebarkeit von Software als Folge der Anforderungen hinsichtlich der Integration und Nutzbarkeit mobiler Endgeräte (CE-Geräte) im Fahrzeug führt zu einem wachsenden Innovations- und Kostendruck sowie steigender Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

## Zunehmende Systemkomplexität und Variantenvielfalt

Die Komplexität automotiver E/E Gesamtsysteme resultiert insb. aus Anzahl und Varianz von E/E Funktionen inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten. Hinzu kommen Vernetzungsgrad (vgl. Abbildung 1-1, Abbildung 1-5, Abbildung 1-12) sowie Technologie-sprünge innerhalb der automotiven E/E Entwicklung [BROY ET AL. 2011, S. 47]. Diese E/E Gesamtsystemkomplexität steht in direkter Wechselwirkung mit der strukturgebenden automotiven E/E Architektur, welche im weiteren Verlauf als E/E Bordnetzarchitektur²6 bezeichnet wird [BRANDT ET AL. 2012, S. 737; TRAUB 2010, S. 2]. Bei Integration zusätzlicher E/E Funktionen in eine E/E Bordnetzarchitektur steigen Systemkomplexität und Vernetzungsgrad des E/E Gesamtsystems: Werden bspw. Innovationen als softwarebasierte E/E Funktionen auf Steuergeräte partitioniert, müssen diese miteinander vernetzt werden [FRANK ET AL. 2008, S. 2; JAENSCH 2012, S. 3f.]. Im Hinblick auf eine fehlerfreie Integration und Funktionalität des E/E Gesamtsystems ist ein Komplexitätsanstieg durch zusätzliche E/E Funktionen schwer beherrschbar. Etwa, weil lokal auftretende Probleme auch angrenzende E/E Komponenten über das Kommunikationsnetzwerk beeinträchtigen können [Nörenberg 2012, S. 4].

Ein Ansatz zur Beherrschung der Systemkomplexität ist die Optimierung der internen Variantenvielfalt<sup>27</sup> von E/E Umfängen. Indem etwa die für das E/E Funktionsangebot vor Kunde benötigten E/E Komponenten in ihrer Anzahl und Vielfalt minimiert und die dazu gehörigen Entwicklungsprozesse und Randbedingungen angepasst werden [ESCH 2013, S. 25ff.; PULM 2004, S. 128]. Dabei gibt es interne und externe Varianz. Die externe Varianz wird vom Kunden wahrgenommen und ist idealerweise größer als die interne Varianz. D.h. die interne Variantenvielfalt (vgl. Abbildung 1-11) spiegelt nicht zwangsläufig die Anzahl bestehender Fahrzeugderivate<sup>28</sup> und Baureihen<sup>29</sup> inkl. Kundenfunktionen eines OEMs wider [HOFFMANN 2010, S. 30]. Die interne Variantenvielfalt und Veränderlichkeit wird durch verschiedene

<sup>26</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden die **E/E Architektur** und **automotive E/E Bordnetzarchitektur** (**E/E BNA**) synonym verwendet. Weiterführende Grundlagen zur automotiven E/E Bordnetzarchitektur legt Kapitel 3.1 dar.

Variantenvielfalt kann in interne und externe Variantenvielfalt differenziert werden: Interne Variantenvielfalt ist die zur Realisierung des Angebots vor Kunde notwendige oder durch bestehende Prozesse und Randbedingungen entstandene Vielfalt von Umfängen. Die externe Variantenvielfalt ist das Angebot vor Kunde. Prinzipiell ist die interne Variantenvielfalt zu optimieren und die externe Variantenvielfalt der Kundennachfrage anzupassen. Dabei unterstützt das Variantenmanagement: Unter Variantenmanagement, werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die der Beherrschung von Varianten in der Produktentwicklung etc. unterstützen [Förster 2003, S. 1ff., Franke et al. 2002, S. 1ff.; Heina 1999, S.6f.; Pulm 2004, S. 128].

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Unter einem **Derivat** ist die enge Ableitung eines bestehenden Fahrzeugmodells einer Baureihe zu verstehen: So ist bspw. der BMW 3er Grand Tourismo (BMW 3er GT) ein Derivat des BMW 3er.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Eine **Baureihe**, auch Modellreihe, ist eine in der Größe, Leistung etc. skalierbare Familie gleicher Produkte [PULM 2004, S. 129]. In einer Fahrzeugbaureihe (z.B. 3er Baureihe) werden Fahrzeugmodelle entwickelt [PAHL/BEITZ 2007, S. 629].

Faktoren getrieben. Diese beeinflussen entweder die Variantenvielfalt von E/E Funktion (vgl. Abbildung 1-11) oder die Veränderlichkeit eines E/E Umfangs, welche sich bspw. durch unterschiedliche Lebenszyklen bedingt [DZIOBEK ET AL. 2008, S. 33f.; HOFFMANN 2010, S. 30; KAMPKER ET AL. 2010, S. 258f.; ZIEGENBEIN ET AL. 2005, S. 1].

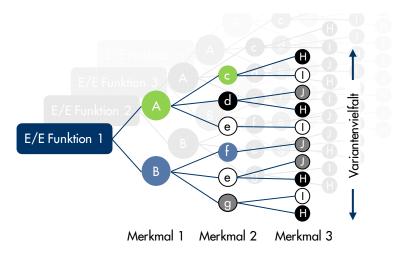


Abbildung 1-11: Bsp. eines merkmalsorientierten Varianten-/Strukturvariantenbaums, eigene Darstellung in enger Anlehnung an [PULM 2004, S. 131].

Bei der Gestaltung respektive Weiterentwicklung softwarebasierter E/E Funktionen sind funktionale und nicht-funktionale Anforderungen zu berücksichtigen, da sich diese auf die Variantenvielfalt von E/E Funktionen auswirken können [NÖRENBERG 2012, S. 4; TRAUB 2010, S. 2]. Nicht-funktionale Anforderungen beziehen sich etwa auf Bauraum, Gewicht, Qualität, Temperaturverträglichkeit, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Testbarkeit, Wartbarkeit und Kosten [ESCH/LANG 2008, S. 194f].

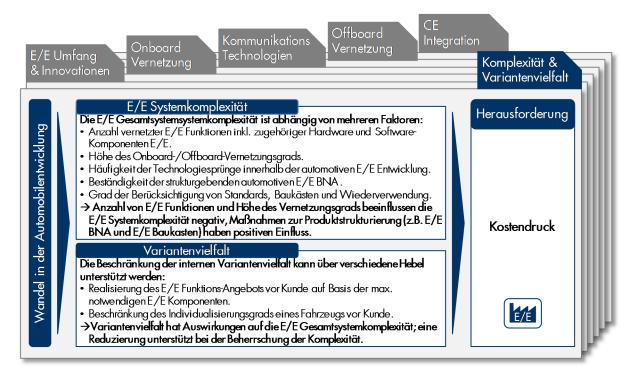


Abbildung 1-12: Endogene Herausforderungen bzgl. Komplexität und Variantenvielfalt führen zu steigendem Kostendruck in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Herausforderung: Die Zunahme der E/E Gesamtkomplexität inkl. interner Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung führt zu steigendem Innovations- und Kostendruck.

### Auswirkungen endogener Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung

Endogene Umwelteinflüsse haben verschiedene Auswirkungen auf die E/E Entwicklung: Steigende Aufwände (insb. Zeit, Kosten) innerhalb des Entwicklungsprozesses, höhere Variantenvielfalt und Komplexität von vernetzten E/E Funktionen (inkl. Hardware- und Software-Komponenten) sowie des E/E Gesamtsystems inkl. automotiver E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Abbildung 1-3 und Abbildung 1-13).

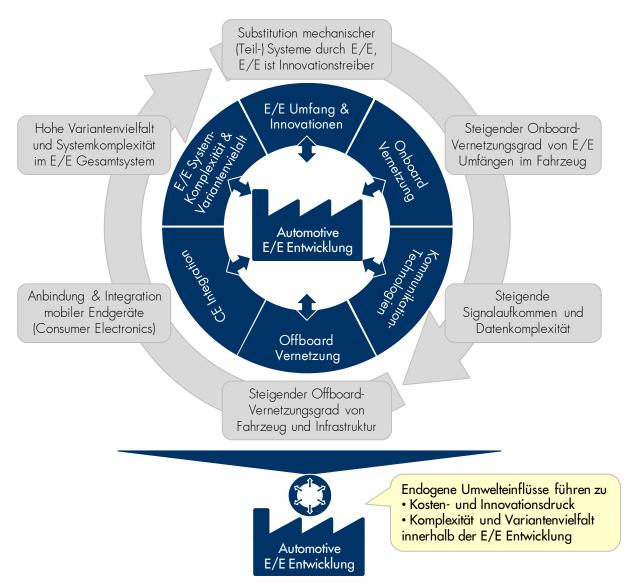


Abbildung 1-13: Endogene Herausforderungen steigern die Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Die Analyse der endogenen Umwelteinflüsse führt zu zwei zentralen Problemstellungen: Die Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt (vgl. Problemstellung 1) und die Bewältigung von Innovations- und Kostendruck (vgl. Problemstellung 2). Das jeweilige Ausmaß ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren. Zu diesen Faktoren gehört die Reaktionsfähigkeit

eines OEM auf endogene Herausforderungen, ist diese etwa systematisch und methodisch fundiert oder zufällig und chaotisch. Ferner haben Unternehmensstrategie, (Entwicklungs-) Prozesslandschaft sowie E/E Produktstruktur<sup>30</sup> Einfluss auf den Grad der Variantenvielfalt und Komplexität sowie dem Innovations- und Kostendruck.

### Problemstellung 1 – Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt:

Die Komplexität der E/E Entwicklung steht in direkter Wechselwirkung mit Variantenvielfalt und Aufwandseinsatz:<sup>31</sup> Die Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt ist folglich immanent miteinander verknüpft und ein kritischer Erfolgsfaktor für OEMs [SCHUH 2005, S. 13]. Wobei die Variantenvielfalt durch unterschiedlichste Einflüsse über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg induziert wird [FRANKE ET AL. 2002, S. 52f.; HEINA 1999, S. 24; S. 26; S. 88; PILLER/WARINGER 1999, S. 14; RATHENOW 1993, S. 24; WILDEMANN 2005, S. 202f.] und die E/E Gesamtkomplexität hingegen ein strukturelles Merkmal ist, das aus Vielfalt, Art und Vernetzung der einzelnen E/E Gesamtsystemelemente resultiert [SCHUH 2005, S. 13].

Scheitern Bemühungen eines OEMs zur Beherrschung von Komplexität innerhalb der automotiven E/E Entwicklung, kann das die negativen Folgen endogener Umwelteinflüsse verstärken. Bspw. die Zunahme einzelner interner E/E Funktionsvarianten oder die Verkürzung von Produktlebenszyklen. Zusätzlich kann eine Nicht-Beherrschung unmittelbare Auswirkungen auf die Kosten haben: Etwa Kosten für Prozess- und Produktentwicklung oder für Qualitätsarbeit. Folgen von zu hoher Komplexität können ferner sinkende Skaleneffekte bei steigender Variantenvielfalt, mangelnde Transparenz über die Wertschöpfungskette oder Ineffizienzen innerhalb Arbeitsabläufen sein [SCHUH 2005, S. 19ff.].

Problemstellung 1: Das Zusammenspiel endogener Umwelteinflüsse, daraus resultierende Anforderungen und deren Auswirkungen, führen zu Komplexität und Variantenvielfalt in der automotiven E/E Entwicklung.

#### Problemstellung 2 – Beherrschung von Innovations- und Kostendruck:

Nachdem beschriebene Herausforderungen gravierende Auswirkungen auf das E/E Gesamtsystem im Fahrzeug haben, überträgt sich die o.g. Problemstellung gleichermaßen auf die automotive E/E Bordnetzarchitektur als das strukturgebende Element: Jede zusätzliche E/E Funktion oder neue Variante einer E/E Funktion birgt das Risiko, Änderungen einer bestehenden E/E Bordnetzarchitektur zu verursachen oder eine zusätzliche Variante zu erwirken. Bei Nicht-Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt folgt somit eine Vielzahl automotiver E/E Bordnetzarchitektur Varianten [JAENSCH 2012, S. 3f.]. Ein Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung automotiver E/E Bordnetzarchitekturen ist eine durchgängige und konsistente Beschreibung von Architekturaspekten mit Anspruch auf Vollständigkeit. Der Schritt, initial völlige Transparenz über die betrachtete automotive E/E Bordnetzarchitektur zu schaffen, ist elementar, um die Komplexität auf das gewünschte bzw. notwendige Maß zu reduzieren [SCHUH 2005, S. 119]. In einem weiteren Schritt können unterstützend Stellhebel angesetzt

<sup>30</sup> In der Arbeit werden E/E Gesamtsystem, E/E Bordnetzarchitektur und E/E Funktionen unterschieden.

Die **Komplexität** ist ein strukturelles Merkmal, welches aus Vielfalt, Art und Vernetzung der einzelnen E/E Gesamtsystemelemente resultiert [SCHUH 2005, S. 13].

werden, wie die baureihen- oder plattformübergreifenden<sup>32</sup> Gestaltung von E/E Bordnetzarchitekturen unterstützt durch die ergänzende Anwendung von Standards und Gestaltungsprinzipien, wie dem Baukastenprinzip<sup>33</sup> (vgl. Kapitel 3.6) [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 155f.; KÜHL/REICHMANN 2007, S. 18; HARDT/GROßE-ROHDE 2008, S. 14; TANNEBERGER/PAETZ 2012, S. 64]. Letztere zählen zu Maßnahmen der Produktstrukturoptimierung<sup>34</sup> (vgl. Kapitel 1.1.3).

Die zielgerichtete Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur in Verbindung mit Maßnahmen zur Produktstrukturierung beinhaltet somit großes Potential Variantenvielfalt und Komplexität innerhalb der automotiven E/E Entwicklung beherrschbar zu machen. Analyse und Berücksichtigung der aus den endogenen Herausforderungen resultierenden Anforderungen an eine automotive E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung ist dabei ein wesentlicher, unterstützender Beitrag (vgl. Kapitel 1.1.1 und Abbildung 1-13). Zu diesen Anforderungen zählt etwa die Befähigung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur:

- Zur nahtlosen Integration von E/E Umfänge, die mechanische Systeme substituieren.
- Zur (kurzfristigen) Umsetzung von E/E Innovationen oder Änderungen an bestehenden E/E Umfängen.
- Zur Beherrschung des steigenden On-/Offboard-Vernetzungsgrades von E/E Komponenten inkl. Signalaufkommen, Datenkomplexität sowie Bandbreite.
- Zur Unterstützung von Integrationskonzepten für CE-Devices im Fahrzeug.

Problemstellung 2: Der Produktivitätsdruck für OEMs, bestehend aus Innovations- und Kostendruck, wird in der automotiven E/E Entwicklung durch endogene Herausforderungen forciert.

Zusammenfassend besteht für OEMs ein zentraler Ansatz zur systematischen Bewältigung der dargestellten endogenen Herausforderungen in der ganzheitlichen Gestaltung einer baureihenübergreifenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur unter Einbeziehung aller bestehenden Anforderungen, knapper Entwicklungsressourcen und immer kürzer werdender Entwicklungszyklen [JAENSCH 2012, S. 4].

Hierauf hebt das Forschungsvorhaben ab und betrachtet Ansätze im Kontext der Produktstrukturoptimierung, die zur Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt von E/E Bordnetzarchitekturen beitragen. Als wichtige Randbedingungen sollen das gewünschte Produktangebot vor Kunde sowie die Produktzuverlässigkeit inkl. -qualität unter optimalem Aufwandseinsatz von Zeit und Kosten realisiert werden. Hierbei unterstützt eine E/E Bordnetzarchitektur gemäß dem Domänenansatz<sup>35</sup> (vgl. Kapitel 3.5). Wird eine solche E/E

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Eine **Plattform** ist ein standardisiertes, kundenneutrales Grundgerüst, das durch die Ergänzung um kundenwahrnehmbare und ggf. individualisierbare Elemente (z.B. Zierleisten, Funktionen etc.) produkt- oder kundenspezifisch wird. Die Anpassungen einer Plattform ist grundsätzlich möglich, aus Effizienzgründen jedoch prinzipiell nicht wünschenswert [PULM 2004, S. 129].

Das **Baukastenprinzip** beschreibt die Zusammensetzung eines Produkts aus einer Anzahl von Bausteinen mit definierten Schnittstellen. Das resultierende Produkt wird als **Baukasten** bezeichnet [PULM 2004, S. 129].

Die Produktstruktur ist wesentlicher Ansatzpunkt zur Beeinflussung von Variantenvielfalt und Komplexität. Zu den Maßnahmen zur Produktstrukturoptimierung z\u00e4hlen Architektur, Plattform und Baukasten.

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Der **Domänenansatz**, auch Domänenarchitektur genannt, beschreibt die Untergliederung einer E/E Bordnetzarchitektur in einzelne Cluster, die wiederum zusammengehörige E/E Umfänge beinhalten. Diese

Bordnetzarchitektur zusätzlich skalierbar ausgelegt, erleichtert dies deren baureihenübergreifenden Einsatz signifikant. Ein baureihenübergreifender Einsatz ist aus Effizienzgründen sinnvoll, weil dadurch – ähnlich zum Plattformansatz – eine Wiederverwendung für neue Derivate baureihenübergreifend ermöglicht wird [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 155f.; ESCH 2013, S. 25ff.]. Darüber hinaus sind bei der initialen E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung Vorhalte einzuplanen. Beispielweise, um zusätzliche Funktionen im Zuge von Lebenszyklusmaßnahmen (z.B. "*Fahrzeug-Facelift*" mit neuem E/E Funktionsset) für bestehende oder neue Derivate umsetzen zu können, ohne dabei die bestehende Struktur der E/E Bordnetzarchitektur überarbeiten zu müssen [BROY ET AL. 2011, S. 44].

Anforderungen an eine E/E Bordnetzarchitektur resultieren nicht ausschließlich aus endogenen Herausforderungen. Zusätzliche funktionale und nicht-funktionale Anforderungen werden aus exogenen Herausforderungen (vgl. Kapitel 1.1.2.) abgeleitet und durch die OEM-spezifische Produktstrategie vorgegeben. Letztere gibt einen Rahmen vor, wann welche Innovationen zur Umsetzung eingeplant, d.h. innerhalb der E/E Entwicklung umgesetzt werden müssen. Die frühzeitige Ableitung und Aufbereitung solcher Anforderungen bzw. Vorgaben spielen bei der E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung als Eingangsgrößen eine zentrale Rolle. Hierbei gilt es die relevanten Anforderungen, z.B. bzgl. E/E Kundenfunktionen, in der Spezifikations- und Entwurfsphase zu berücksichtigen. Aufgrund der hohen Systemkomplexität bietet es sich an eine solche E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung mit geeigneten Werkzeugen und Methoden zu unterstützen (vgl. Kapitel 4) [JAENSCH 2012, S. 5.; SANGIOVANNI-VINCENTELLI/DI NATALE 2007, S.42f.].

#### Handlungsbedarf:

- Ganzheitliche Betrachtung und Berücksichtigung sämtlicher funktionalen wie nicht-funktionalen Anforderungen aus endogenen Herausforderungen.
- Gestaltung einer skalierbaren E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz.
- Umsetzung ergänzender Maßnahmen zur Produktstrukturierung wie Standards und Baukastenprinzip

# 1.1.2. Exogene Herausforderungen für die automotive E/E Entwicklung

Die aufgezeigten endogenen Herausforderungen der automotiven E/E Entwicklung werden durch direkt oder indirekt einwirkende Umwelteinflüsse der Makroumwelt<sup>36</sup> zusätzlich verstärkt. (vgl. Abbildung 1-14). Diese Umwelteinflüsse werden im weiteren Verlauf als exogene Herausforderungen für die automotive E/E Entwicklung bezeichnet.

Zur Strukturierung von Einflüsse der Makroumwelt auf die automotive E/E Entwicklung werden diese in fünf Kategorien unterteilt: Ökonomische Umwelt, Technologische Umwelt, Gesellschaftliche Umwelt, Ökologische Umwelt und Politisch-rechtliche Umwelt (vgl. Abbildung 1-14) [HEIGL/RENNHAK 2008, S. 14; RENNHAK 2009; S. 12; CAMPHAUSEN 2007, S. 124]. Jede Kategorie beinhaltet Auslöser verschiedener Herausforderungen, z.B. stagnierende Umsätze in den Triademärkten, Wettbewerb um Marktanteile in den BRIC-Staaten, steigende

sogenannten Domänen unterstützen u.a. dabei eine E/E Bordnetzarchitektur skalierbar zu machen [BROY ET AL. 2011, S.44].

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe Umwelt und Umfeld synonym verwendet. Die Makroumwelt ist im Rahmen des Forschungsvorhabens als das auf die automotive E/E Entwicklung einflussnehmende Umfeld zu interpretieren.

Kunden- und verschärfte Gesetzesanforderungen, zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, Ressourcenverknappung sowie ein global wachsendes Umweltbewusstsein [BECKER 2007, S. 9ff.; ESCH 2013, S. 25ff.; WILDEMANN 2004, S. 1; SCHÖNMANN 2012, S.7ff.].

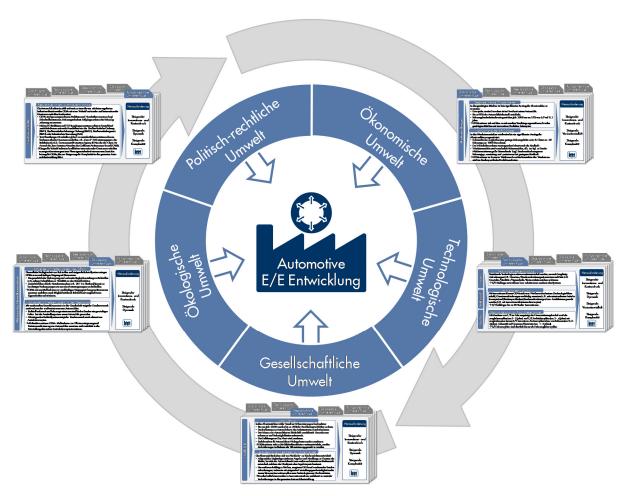


Abbildung 1-14: Umwelteinflüsse der Makroumwelt auf die E/E Automobilentwicklung, eigene Darstellung.

Aufgrund bestehender Abhängigkeiten der Makroumwelt untereinander ist eine trennscharfe Zuordnung der einzelnen Herausforderungen je Umweltkategorie nicht durchgängig möglich (vgl. Abbildung 1-14). Auch weisen exogene und endogene Herausforderungen Überschneidungen auf: Umwelteinflüsse der Makroumwelt verstärken in vielen Fällen endogene Herausforderungen, was durch die folgenden Erläuterungen bestärkt wird. Analog zur Betrachtung der endogenen Herausforderungen, liegt der Fokus auf übergreifenden Auswirkungen inkl. resultierender Problemstellung und Handlungsbedarfen für OEMs.

#### Ökonomische Umwelt

In den Krisenjahren 2008 und 2009 haben große Umsatzeinbrüche den Einfluss der ökonomischen Umwelt verdeutlicht [SCHMIDT 2010, S. 7ff.]. Nicht zuletzt dadurch sahen sich weltweit viele OEMs darin motiviert, das Profitabilitäts- und Effizienzstreben nachhaltig zu verstärken [HOFFMANN 2010, S. 2]. Als eine enorme ökonomische Herausforderung lässt sich die Verschiebung der Hauptabsatzmärkte beobachten [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 50]: Weg

von traditionellen Automobilabsatzmärkten, den gesättigten Triade-Märkten,<sup>37</sup> hin zu neuen Wachstumsmärkten wie den BRIC-Staaten<sup>38</sup> [SCHÖNMANN 2012, S. 18ff.].

Aufgrund begrenzter Wachstumsmöglichkeiten, und um sich deutlich von den Wettbewerbern zu differenzieren, müssen OEMs in den Triade-Märkten Kunden besonders attraktive und innovative Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten [ESCH 2013, S. 25ff.]. Hieraus ergibt sich der sogenannte Produktivitätsdruck [RADKE ET AL. 2004, S. 16], der OEMs in das von *Schönmann* als Produktivitätszange bezeichnete Spannungsfeld aus Innovations- und Kostendruck treibt (vgl. Abbildung 1-15) [SCHÖNMANN 2012, S. 5].

Der Sättigung in den Triade-Märkten steht ein kontinuierlicher Anstieg der Absatzzahlen in den BRIC-Staaten gegenüber. Diese Märkte, auch "*Emerging Markets*" genannt, zeichnen sich durch ein zunehmendes Wirtschaftswachstum und einem verhältnismäßig großen Anstieg der Kaufkraft aus [MATTHES ET AL. 2004, S. 15; WALLENTOWITZ et al. 2009, S. 23ff.; VDA 2012, S.17ff.]. Ferner lassen sich die BRIC-Staaten durch eine vergleichsweise geringe Fahrzeugdichte bei großer Nachfrage charakterisieren. Bis zum Jahr 2025 werden annähernd die Hälfte aller Automobile in diesen Wachstumsmärkten verkauft werden. Gemäß Schätzungen wird hierbei China, mit einem prognostizierten Absatzanteil von über 30 Prozent, eine besonders exponierte Position einnehmen [KALMBACH ET AL. 2011, S. 52].

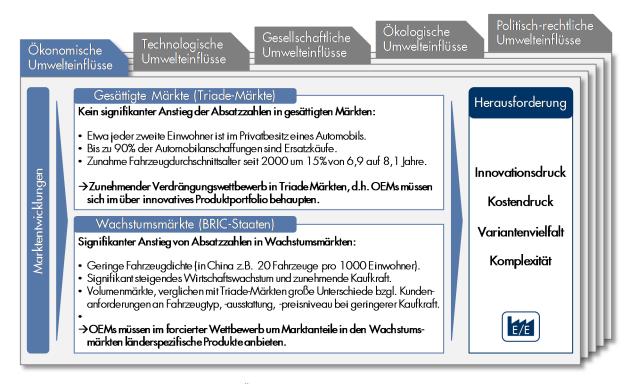


Abbildung 1-15: Herausforderungen der Ökonomischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Im Vergleich zu den Triade-Märkten herrschen in den Wachstumsmärkten signifikante Unterschiede bzgl. der Kundenanforderungen [ESCH 2013, S. 25ff.; MATTES 2004, S.13; SCHÖNMANN 2012, S. 23]. So sehen sich OEMs mit zunehmender Globalisierung gezwungen,

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Die Triade-Märkte setzten sich zusammen aus (West-) Europa, Japan und Nordamerika [MECKL 2011, S. 104].

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> Die BRIC-Staaten ist eine Bezeichnung für die Märkte Brasilien, Russland, Indien und China, die heute zu den größten Wachstumsmärkten zählen [MECKL 2011, S. 318].

länderspezifische Derivate zu entwickeln (z.B. Limousinen mit langem Radstand für den Markt China) [WALLENTOWITZ ET AL 2009, S.15 ff.]. Um den Entwicklungsaufwand minimal zu halten, werden länderspezifische Anforderungen an Kundenfunktionen häufig über softwarebasierte E/E Funktionen realisiert (z.B. RTM in China).

<u>Herausforderung:</u>	Zunehmender Verdrängungswettbewerb in gesättigten Triade-Märkten und forcierter
_	Wettbewerb um Marktanteile in Wachstumsmärkten führen zu einem wachsenden
	Innovations- und Kostendruck sowie steigender Komplexität und Variantenvielfalt
	innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

## Technologische Umwelt

Herausforderungen der technologischen Umwelt werden durch Gesetzes- und Kundenanforderungen sowie den Wettbewerb forciert. Sie bedingen die Weiterentwicklung bestehender Technologien,<sup>39</sup> die Entwicklung von Innovationen<sup>40</sup> sowie den Bedarf zur Harmonisierung unterschiedlicher Produkt- bzw. Technologielebenszyklen<sup>41</sup> innerhalb der Fahrzeugentwicklung (vgl. Kapitel 1.1.1und Abbildung 1-16) [ESCH 2013, S. 25ff.].

Technologieweiterentwicklungen werden in verschiedenen Feldern durchgeführt, z.B. um Fahrzeugemissionen zu reduzieren. Dazu zählen etwa neben der Effizienzsteigerung klassischer Verbrennungsmotoren, die Entwicklung von alternativen Antrieben (u.a. Elektrofahrzeuge wie z.B. BMW i3 und Plug-In-Hybride wie z.B. BMW i8).

Die Entwicklung von Innovationen (z.B. Night-Vision oder Surround-View) helfen OEMs sich als Innovations- oder Technologieführer im Markt zu positionieren und sich dadurch im Wett-

Die Weiterentwicklung von Technologien kann in drei Klassen unterschieden werden: Stabile Technologieentwicklung (klassische Weiterentwicklung einer bestehenden Technologie analog des Technologieentstehungsprozess), Dynamische Technologieentwicklung (Weiterentwicklung einer bestehenden Technologie bei überdurchschnittlich hoher Geschwindigkeit) und Turbulente Technologieentwicklung (Weiterentwicklung ist durch rasche Technologiesprünge gekennzeichnet) [STREBEL 2007, S. 76].

Gemäß HAUSCHILDT und SALOMO liegen Innovationen vor, wenn diese Neuartigkeitscharakter erfüllen, d.h. deren Zweck und Mittel bislang noch nicht in dieser Form verknüpft wurden. Dabei lassen sich Innovationen in Produkt- und Prozessinnovationen unterscheiden. Prozessinnovationen sind "[...] neuartige Faktorkombinationen, durch die die Produktion eines bestimmten Gutes kostengünstiger, qualitativ hochwertiger, sicherer oder schneller erfolgen kann." Ziel von Prozessinnovationen ist eine Effizienzsteigerung. Produktinnovationen umfassen eine "[...] Leistung, die dem Benutzer erlaubt, neue Zwecke zu erfüllen oder vorhandene Zwecke in einer völlig neuartigen Weise zu erfüllen." Ziel von Produktinnovationen kann neben der Erzeugung von Effektivität auch die Effizienzsteigerung sein. [HAUSCHILDT/SALOMO 2011; S. 4ff.].

Ehrlenspiel et al. beschreibt den **Produktlebenszyklus** "[...] als Netz bestehend aus miteinander verflochtenen und einander ablösender Teilprozesse [...] "[EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 38]. Konkreter definiert Lindemann den Produkt- bzw. Technologielebenszyklus als einen Zeitraum von der Idee für ein neues Produkt bzw. einer neuen Technologie bis zum Ausscheiden des Produktes am Markt bzw. der Substitution einer Technologie durch eine Folgetechnologie [LINDEMANN 2004, S. 31]. Dabei umfasst ein Produktlebenszyklus zwei Phasen des **Produktentstehungsprozess (PEP)** und Absatzmarktzyklus (Markteinführung, Marktwachstums, Marktreife, Marktsättigung, Marktdegeneration) [LINDEMANN 2004, S. 32; KREIKEBAUM 1997, S. 111]. Der **Technologielebenszyklus** umfasst die Lebenszyklen analog zu denen des Produktlebenszyklus. Innerhalb dieser Technologiezyklen wird eine Technologie von einer Schrittmachertechnologie über die Schlüsseltechnologie zur Basistechnologie entwickelt. Das Ergebnis dieses Entwicklungsprozess – die neue Basistechnologie – wird über den Vorgang der **Technologiesubstitution** eingeführt [SEIBERT 1998, S. 122].

bewerb um Marktanteile von der Konkurrenz abzusetzen. Vor allem im gehobenen Fahrzeugsegment zeigen entsprechende Bemühungen deutliche Effekte, wenn diese von Kunden positiv wahrgenommen werden [GLEICH ET AL. 2009, S. 189; RIEDEMANN 2011, S.12].

Eine besondere technologische Herausforderung für die E/E Entwicklung besteht in der schnellen Entwicklung von Innovationen in den Feldern Infotainment (CE) und (Verkehrs-) Telematik. Kundenerwartungen gehen längst über den Wunsch hinaus, während der Fahrt von einem Radio unterhalten zu werden: Moderne Fahrzeuge sind mit verschiedenen Quellen für Musik (Radio, CD/DVD, MP3), Telefonie, digitalem und analogem Fernsehen, (3D-) Navigation und Internet ausgestattet [ESCH 2013, S. 25ff.; REIF 2009, S. 341ff.; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 464ff.]. Die Tendenz immer mehr innovative Infotainment- und Telematikumfänge in das Fahrzeug zu integrieren ist steigend. Bspw. wird im Jahr 2016 eine globale Marktdurchdringung der Fahrzeugvernetzung via Mobilfunknetz prognostiziert, die alle Fahrzeugklassen umfasst. So könnte das Fahrzeug über die Vernetzung mit PCs, Smartphones oder MP3-Playern jederzeit synchronisiert werden, sodass auf allen vom Kunden genutzten Geräten konsistente Daten vorliegen [BENTENRIEDER/WANDRES 2011, S. 8f.].

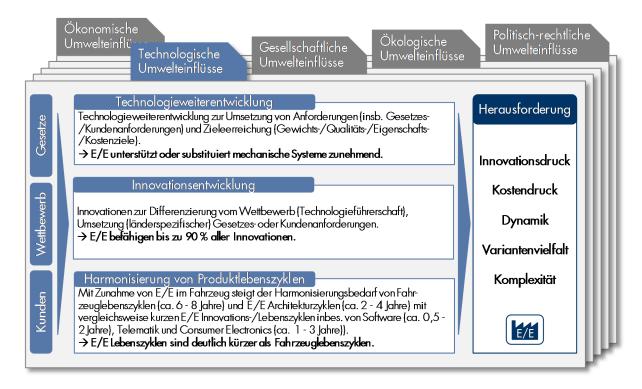


Abbildung 1-16: Herausforderungen der Technologischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Darüber hinaus halten immer mehr vernetzte Fahrerassistenzfunktionen Einzug in das moderne Automobil: Fahrzeuginsassen können bei Unfällen Hilfe über automatische Notrufsysteme, wie BMW Assist erhalten oder die personalisierte Konfiguration bestimmter Fahrzeugfunktionen, wie Klimaanlage oder Sitzeinstellung, über das Internet vornehmen [Ludwig 2012, S. 434ff.]. Bei Pannen können remote Vorabdiagnosen mit Fahrzeugzustandsdaten des defekten Automobils durchgeführt und übermittelt werden [Bentenrieder/Wandres 2011, S. 8].

Mit Zunahme von E/E im Fahrzeug steigt der Harmonisierungsbedarf unterschiedlicher Produktlebenszyklen in der Automobilentwicklung [SIEBERT 2003, S. 53f.; SCHUH/SCHWENK 2001, S. 14f.]. Im Vergleich zum klassischen Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs von ca. 6

bis 8 Jahren und E/E Architekturzyklen von etwa 3 bis 4 Jahren, sind die Innovations- bzw. Lebenszyklen für bestimmte E/E Umfänge deutlich kürzer [BALZERT 2009, S. 35; BURGDORF 2010; S. 13]. Wie Abbildung 1-17 zeigt, erstrecken sich die Lebenszyklen von Software über 0,5 bis 2 Jahre (z.B. Microsoft Office) und die der Consumer Electronics (z.B. das iPhone 6 und 6S von Apple) auf 1 bis 3 Jahre [RAUBOLD 2011, S. 42; STREICHERT/TRAUB 2012, S.1].

# - Produktlebenszyklen in Jahren - Fahrzeug (ca. 7 Jahre)



Abbildung 1-17: Divergierende Produktlebenszyklen, eigene Darstellung in Anlehnung an BALZERT, BURGDORF und RAUBOLD [BALZERT 2009, S. 35; BURGDORF 2010; S. 13; RAUBOLD 2011, S. 42].

Damit die automotive E/E Entwicklung im Feld der Infotainment und Telematik konkurrenzfähig bleiben kann, muss eine Annäherung an die deutlich kürzeren Entwicklungs- sowie Produktlebenszyklen der IT- und Consumer Electronics erfolgen. Diese Herausforderung wird verstärkt, indem die für E/E Umfänge im Automobil zugrundeliegenden Anforderungen bzgl. der Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Qualität sowie Gewährleistungs-, Produkthaftungs- und Ersatzteilversorgungszeiträume deutlich höher sind als die für klassische IT- und Consumer Electronics [Burgdorf 2010, S. 13f.]. Um den Kunden die Nutzung externer elektronischer CE-Geräte im Fahrzeug zu ermöglichen (z.B. von Smartphones oder Tablet-PCs), werden standardisierte Schnittstellen für deren Integration im Automobil implementiert (vgl. Kapitel 1.1.1) [EHMER 2002, S. 469; HILDISCH ET AL. 2007, S. 12; STREICHERT/TRAUB 2012, S.14].

Herausforderung:

Entwicklung von Innovationen sowie (Weiter-) Entwicklung von Technologien und Harmonisierung verschiedener Produktlebenszyklen aufgrund veränderter Kundenwünsche, Gesetzgebung und Wettbewerb führen zu einem wachsenden Handlungs-, Innovations- und Kostendruck sowie steigender Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

#### Gesellschaftliche Umwelt

Eine Herausforderung der gesellschaftlichen Umwelt, auf die sich OEMs sukzessive einstellen müssen, ist die Bewältigung der mit dem Trend zur Urbanisierung verbundenen Veränderungen und dem Wertewandel in der modernen Gesellschaft: Prognosen zufolge werden bis zum Jahr 2030 etwa 60 Prozent der Weltbevölkerung in städtischen Agglomerationen wohnen [DIETZ 2012, S. 124]. Für diese auch als Mega-Cities bezeichneten, dicht besiedelten Gebiete wird eine sehr hohe Verkehrsdichte angenommen. Vor diesem Hintergrund werden zukünftig die Nutzung und Verfügbarkeit öffentlicher Verkehrsmittel und alternative Mobilitätsdienstleistungskonzepte wie Carsharing in der Gesellschaft an Bedeutung gewinnen. Die Nutzung von Automobilen als Mobilitätsform in o.g. Mega-Cities wird verhältnismäßig abnehmen [Terporten et al. 2012, S. 369]. Als eine mögliche Folge könnten Automobile mit

klassischem Verbrennungsmotoren für städtische Agglomerationen zukünftig zur ungeeigneten Mobilitätsform werden [TERPORTEN ET AL. 2012, S. 368]. Diese aufgezeigten Tendenzen motivieren OEMs dazu, in die Entwicklung von alternativen Antriebskonzepte zu investieren, um auf die Anforderungen der Gesellschaft einzugehen und angepasste Hybrid- und Elektrofahrzeuge anbieten zu können (vgl. Abbildung 1-18).

Eine zweite Herausforderung der gesellschaftlichen Umwelt resultiert aus dem Wandel des Automobilmarktes vom Verkäufer- zum Käufermarkt. Neben dem Kundenwunsch, mobil zu sein, wächst der Wunsch nach Individualisierung und Differenzierung [BECKER 2007, S. 107ff.; ESCH 2013, S. 25ff.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 16]. Zusätzlich steigen die Kundenanforderungen an Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit. Dieser Wandel ist ein Ergebnis des zunehmenden Ungleichgewichts aus Angebot und Nachfrage zugunsten der Kunden [BECKER 2002, S. 2ff.; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 661; PICOT ET AL. 2003, S. 3].

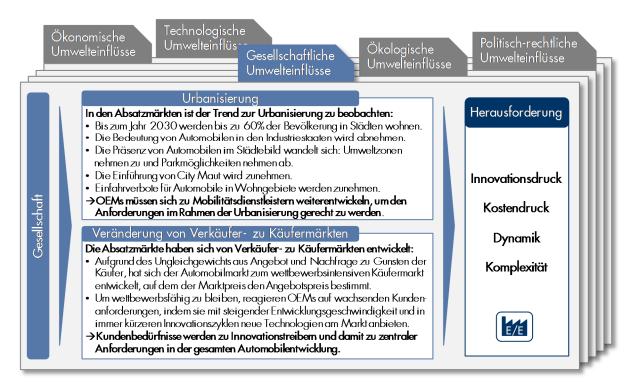


Abbildung 1-18: Herausforderungen der Gesellschaftlichen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Kundenanforderungen und -wünsche bilden somit eine der zentralen Einflussgrößen der Fahrzeugentwicklung (vgl. Abbildung 1-18). Die Bewältigung dieser Herausforderung ist zu einem wettbewerbsentscheidenden Faktor für OEMs geworden [BECKER 2002, S. 2ff.; ESCH 2013, S. 25ff.]. Folglich sind OEMs bemüht, den Kundenbedürfnissen entsprechend attraktive und individuelle Produkte anzubieten, um auf dem von Verdrängungs- und Preiswettbewerb gekennzeichneten Käufermarkt bestehen zu können. Dazu erweitern sie mit steigender Entwicklungsgeschwindigkeit und immer kürzeren Innovationszyklen ihr Produktportfolio<sup>42</sup> um zusätzliche Fahrzeugderivate sowie die Funktionsportfolios um innovative Funktionen [ESCH 2013, S. 25ff.: Wildemann 2004, S. 1f.]. Dies führt zu erhöhten Entwicklungskosten bei geringer

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Das Fahrzeugportfolio eines OEM, auch Produktportfolio oder Produktprogramm genannt, umfasst i.d.R. verschiedene Modellreihen bzw. Baureihen wie z.B. die BMW 3er, 5er, 7er Baureihe [PAHL/BEITZ 2007, S. 109]. In der vorliegenden Arbeit werden darunter alle von einem OEM angebotenen Produkte vor Kunde verstanden [RENNER 2007, S. 12].

Mehrpreisbereitschaft der Kunden und birgt das Risiko der sogenannten Kannibalisierung<sup>43</sup> OEM eigener Derivate oder Baureihen [WILDEMANN 2008, S. 71].

Herausforderung: Die Veränderung von Verkäufer- zu Käufermärkten und der Trend zur Urbanisierung führen zu einem wachsenden Innovations- und Kostendruck sowie steigender Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

## Ökologische Umwelt

Eine Herausforderung der ökologischen Umwelt besteht in der Reduzierung von Schadstoffemissionen sowie im nachhaltigen Umgang mit knappen Ressourcen, sowohl in der Automobilentwicklung und -produktion als auch während des Fahrzeugbetriebs (Abbildung 1-19). Eine weitere Herausforderung stellt der Umgang mit dem wachsenden Umwelt-bewusstsein in der Gesellschaft dar, welcher mit der Verknappung von Ressourcen wächst [WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 15f.]. Bspw. gilt heute der Kraftstoffverbrauch durchschnittlich als das gewichtigste Kaufargument bei der Anschaffung eines neuen Automobils [KPMG 2011, S. 7]. Ferner lassen steigende Kraftstoffpreise den Kundenwunsch nach alternativen Antriebskonzepten wie Hybridfahrzeugen wachsen [KPMG 2011, S. 22f.].

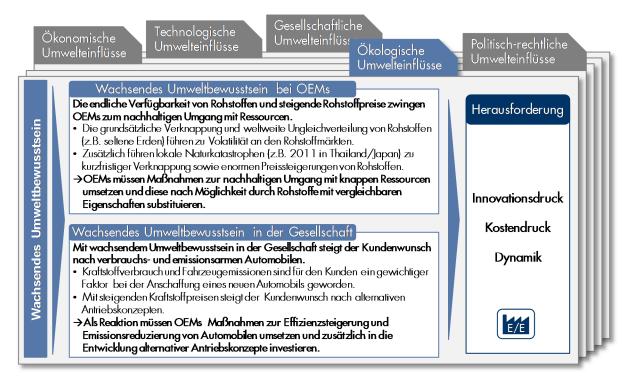


Abbildung 1-19: Herausforderungen der Ökologischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, eigene Darstellung.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Unter der **Kannibalisierung**, auch Kannibalisierungseffekt genannt, ist die Absatzsteigerung eines bestimmten Produktes zum Nachteil eines bestehenden Produktes im Portfolio eines Anbieters durch konkurrierende Vermarktung beider Produkte zu verstehen [WILDEMANN 2008, S. 71]. Bspw. könnte ein OEM wie Volkswagen oder Daimler eine vergleichsweise preisgünstige Sonderedition eines bereits existierenden Fahrzeugderivats auf den Markt bringen, dessen Absatz zu Ungunsten des bestehenden Fahrzeugderivates mit ähnlicher Ausstattung zum regulären Preis ausfällt.

Kundenanforderungen, die aus dem wachsenden Umweltbewusstsein resultieren, erhöhen den Innovationsdruck auf OEMs. Entsprechend müssen OEMs Maßnahmen sowie innovative Technologien umsetzen, die zum nachhaltigen Umgang mit fossilen Ressourcen bzw. Rohstoffen und zur Emissionsreduzierung während der Fahrzeugproduktion sowie des Fahrzeugbetriebs beitragen. Beispiele dafür sind die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte wie Wasserstoffoder Elektroantriebe und ein intelligentes Energiemanagement zur Optimierung der Energieversorgung der Komponenten im Fahrzeug [REICHERT 2005 S.26; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 2f.].

Herausforderung:

Das gesteigerte Umweltbewusstsein der Gesellschaft sowie der OEMs führt zu einem wachsenden Handlungs-, Innovations- und Kostendruck innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

#### Politisch-rechtliche Umwelt

Aus der Politisch-rechtlichen Umwelt gehen diverse Herausforderungen hervor: Allein in Europa zählt die Automobilindustrie zu den am stärksten regulierten Industrien [VDA 2012, S. 56ff.]. Der Gesetzgeber nimmt auf viele Bereiche der Fahrzeugentwicklung Einfluss. Dazu zählen Richtlinien und Vorschriften bzgl. Schadstoffemission, Fahrzeugsicherheit, Fußgängerschutz, Fahrzeugzulassung oder Datenschutz (vgl. Abbildung 1-20).

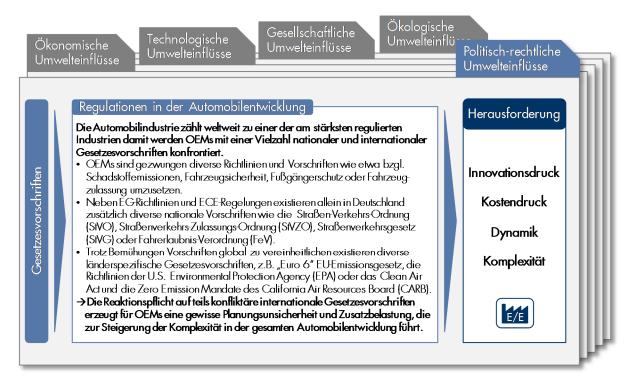


Abbildung 1-20: Herausforderungen der politisch-rechtlichen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Zwar liegt es im Bemühen internationaler Gremien, wie der Europäischen Wirtschaftskommission oder der Vereinten Nationen, bestehende Vorschriften global zu vereinheitlichen [UNECE 1999], dennoch existieren zusätzlich diverse länderspezifische Vorschriften. Die Einhaltung dieser länderspezifischen Vorschriften ist in der Regel essentiell für die Zulassungsfähigkeit von Automobilen in den entsprechenden Zielmärkten [STREICHERT/TRAUB 2012, S.

32]. Die Einhaltung dieser vielfältigen, teilweise konfliktären Anforderungen stellt OEMs vor enorme Herausforderungen [STEGER 2012, S. 53; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 33], deren Bewältigung innerhalb der Automobilentwicklung eine zentrale Rolle einnimmt und ein hohes Maß an Flexibilität und schneller Reaktionsfähigkeit erfordert [WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S.20]. Als ein Beispiel seien gesetzliche Vorschriften<sup>44</sup> zur CO2-Emissions-Reduzierung<sup>45</sup> genannt, wie das "*Euro 6*" EU-Emissionsgesetz [EUR-Lex 2012, o.S.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S.20.], die Richtlinien der U.S. Environmental Protection Agency (EPA) [EPA 2012, o.S.] oder das Clean Air Act und die Zero Emission Mandate des California Air Resources Board (CARB) [CARB 2012; o.S.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S.14 ff.; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 3].

Als zweites Beispiel für länderspezifische Vorschriften, die innerhalb der Automobilentwicklung einen besonders hohen Stellenwert einnehmen, dienen Sicherheitsvorschriften<sup>46</sup>: Um die Sicherheit von Fahrzeuginsassen und Fußgängern zu erhöhen, werden immer mehr gesetzlich vorgeschriebene Sicherheitssysteme ins Fahrzeug integriert. OEMs unternehmen bereits während der Fahrzeugentwicklung größte Anstrengungen zur Realisierung einer vollumfänglichen funktionalen Sicherheit<sup>47</sup> von Fahrzeugen, der Produktsicherheit (vgl. ISO 26262<sup>48</sup> "Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit") [REIF 2009, S. 259ff.]. Diesbezüglich birgt insbesondere die Integration neuer Technologien Risiken und damit große Herausforderungen für OEMs.

Herausforderung:	Gesetzesvorschriften und verschiedene, komplexe Regularien in der Automobilent-
_	wicklung führen zu einem wachsenden Innovations- und Kostendruck sowie steigender
	Komplexität innerhalb der automotiven E/E Entwicklung.

## Auswirkungen exogener Umwelteinflüsse für die automotive E/E Entwicklung

4

Gesetzliche Vorschriften zur CO2-Emissions-Reduzierung: Verordnung der Europäischen Union (EU) Nr. 459/2012 der Kommission vom 29. Mai 2012 zur Änderung der Verordnung der Europäischen Gemeinschaft (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für leichte Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge [EUR-Lex 2012, o.S.].

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Der Kraftstoffverbrauch [Liter/Kilometer] und die CO2-Emissionen [Gramm/Kilometer] eines Fahrzeugs hängen nicht einzig von der effizienten Ausnutzung des Kraftstoffs durch das Fahrzeug ab, sondern werden auch vom Fahrverhalten und anderen nichttechnischen Faktoren beeinflusst. CO2 ist das für die Erderwärmung hauptsächlich verantwortliche Treibhausgas. Ein Leitfaden für den Kraftstoffverbrauch und die CO2-Emissionen aller in Deutschland angebotenen Personenkraftfahrzeugmodelle ist unentgeltlich an jedem Verkaufsort in Deutschland erhältlich, an dem neue Personenkraftfahrzeugmodelle ausgestellt oder angeboten werden.

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Die **Sicherheit während der Fahrt** wird einer Umfrage gemäß von Kunden als die zweitwichtigste Fahrzeugeigenschaft empfunden [KPMG 2011, S. 7f.].

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> Die **Funktionale Sicherheit** bezieht sich auf die korrekten Funktion eines sicherheitsbezogenen Systems und bildet einen Bestandteil der Gesamtfahrzeugsicherheit [HILLENBRAND 2012, S. 91].

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Die **ISO 26262** "Funktional Safety for Road Vehicles" ist ein auf die Grundnorm IEC 61508 aufsetzender internationaler Standard für die funktionale Sicherheit mit Gültigkeit für Fahrzeuge eines zulässigen Gesamtgewichts von maximal 3,5 Tonnen. Die ISO 26262 bezieht sich auf einen gesamten Sicherheitslebenszyklus und geht dabei auf die speziellen Anforderungen der Serienentwicklung und Produktion von Fahrzeugen ein. Ein Sicherheitslebenszyklus erstreckt sich hierbei von Entwicklung, Produktion, Betrieb, Service bis hin zur Außerbetriebnahme [HILLENBRAND 2012, S. 91].

Die Analyse der Markroumwelt-Einflüsse führt zu drei Problemstellungen für die automotive E/E Entwicklung: Beherrschung von Komplexität (vgl. Problemstellung 1), Bewältigung des Handlungsdrucks (vgl. Problemstellung 2) und des Produktivitätsdrucks (vgl. Problemstellung 3). Diese Problemstellungen werden nachfolgend schrittweise erläutert.

### Problemstellung 1 – Beherrschung von Komplexität

Herausforderungen der Makroumwelt weisen Überschneidungen auf. Beispiele dafür sind das global wachsende Umweltbewusstsein und die länderspezifischen Gesetzesanforderungen bzgl. Schadstoffemissionen. Entsprechend wichtig ist eine übergreifende, ganzheitliche Betrachtung inkl. Analyse der aus den exogenen Umwelteinflüssen resultierenden funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen an E/E Umfänge. Diese Betrachtung sollte für die automotive E/E Entwicklung unter Berücksichtigung der nachfolgenden Zielen erfolgen:

- Wechselwirkungen zu identifizieren,
- Synergieeffekte zu heben,
- redundante oder widersprüchliche Lösungen zu vermeiden,
- Ressourcen zu schonen und nachhaltig einzusetzen,
- Variantenvielfalt und Komplexität beherrschbar zu machen.

Der anzustrebende Ergebnistyp einer solchen holistischen Betrachtung ist ein strukturiertes Set an konsolidierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen.<sup>49</sup> Dies umfasst u.a. sämtliche Anforderungen an E/E Umfänge bzw. E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten, die innerhalb der Entwicklung des automotiven E/E Gesamtsystems inkl. E/E Bordnetzarchitektur zu berücksichtigen sind. Das resultierende Anforderungsset bildet damit eine Eingangsgröße für die ganzheitliche Gestaltung<sup>50</sup> einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur inkl. der darin abzubildenden E/E Funktionen (vgl. Kapitel 1.1.1). Dementsprechend ist es möglich über diesen Ansatz einen Beitrag zur Bewältigung der exogenen Herausforderungen zu leisten und Bemühungen zur Beherrschung von Komplexität sowie Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung zu unterstützen [SCHUH 2005, S. 13]. Dies geschieht u.a., indem Synergieeffekte gehoben oder unnötige Varianten einer technischen Lösung vermieden werden (z.B. mit Entwicklung eines anforderungsgerechten E/E Baukastens für den baureihenübergreifenden Einsatz) [RENNER 2007, S. 4, SCHUH 2005, S. 19ff.; STOCKMAR 2004, S. 17]. Als weiterer positiver Effekt eines solchen ganzheitlichen Ansatzes lassen sich Ressourceneinsparungen erzielen. Mit Vermeidung unnötiger Varianten von Komponenten oder E/E Funktionen können bspw. Kosten und Zeit eingespart werden. Entsprechend trägt eine holistische Betrachtung zur Profitabilität eines OEMs bei. Gleichzeitig schafft diese Betrachtungsweise Freiräume für OEMs und befähigt diese dazu exogene Herausforderungen mit notwendiger Flexibilität und Reaktionsgeschwindigkeit bewältigen zu können. Je höher die Transparenz über Ausgangssituation und Anforderungsset ist, desto leichter ist für OEMs die Priorisierung notwendiger Handlungen. Ferner lassen sich Ansatzpunkte für die Handlungen inkl. deren Auswirkungen im automotiven E/E Gesamtsystem schneller identifizieren.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> Die Konsolidierung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen kann z.B. in Form einer übergreifenden, strukturierten **Anforderungsliste** erfolgen.

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Die E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung kann dabei entweder für den derivats-, baureihenspezifischen, baureihenübergreifenden oder sogar OEM-übergreifenden Einsatz erfolgen.

Problemstellung 1: Das Zusammenspiel exogener Umwelteinflüsse, resultierender Anforderungen und deren Auswirkungen führen zu Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der E/E Entwicklung.

#### Problemstellung 2 – Bewältigung von Handlungsdruck

Verschiedene, aus Umwelteinflüssen resultierende Anforderungen, bedingen eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf OEM-Seite. Des Weiteren erfordern diese etablierte, flexible Prozesse innerhalb der automotiven E/E Entwicklung (vgl. Abbildung 1-16). Einflüsse der politischrechtlichen und gesellschaftlichen Umwelt – etwa in Form von Gesetzes- oder Kundenanforderungen – tragen im Speziellen einen hohen Anteil an der Erhöhung des sogenannten Handlungsdrucks für OEMs. Gemeint ist damit die Notwendigkeit zur Ausführung einer Handlung (z.B. Technologieweiterentwicklung) als Reaktion auf dedizierte Anforderungen (z.B. Gesetzesanforderungen), die auf einer objektiv zugrundeliegenden Ursache (z.B. rechtliche Vorschrift) basieren [ESCH 2013, S. 25ff.].

Der zunehmende Handlungsdruck führt zur Steigerung der Dynamik innerhalb der automotiven E/E Entwicklung. Zusätzlich forciert der Handlungsdruck häufig die Aufnahme unterschiedlichster (Entwicklungs-) Aktivitäten außerhalb bestehender Standardprozesse. Folgerichtig steigt mit dem Handlungsdruck das Risiko für OEMs eine kontrollierte bzw. gesteuerte Reaktion auf bestehende Herausforderungen aus Umwelteinflüssen gewährleisten zu können. Dieses Risiko erhöht sich weiter, wenn bestehende Prozesse innerhalb der automotiven E/E Entwicklung sowie Produktstrukturen (insb. E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten, vgl. Kapitel 1.1.1) nicht auf eine gewisse Flexibilität ausgelegt sind [HOFFMANN 2010, S. 1f]. Aus OEM-Sicht liegt das motivierende Moment darin, das zuvor beschriebene Risiko innerhalb der E/E Entwicklung zu beherrschen, d.h. zu minimieren oder einzugrenzen. Dementsprechend müssen sich OEMs dazu befähigen auf exogene Herausforderungen kontrolliert und effizient reagieren zu können. In diesen Prozess sind mögliche Handlungsoptionen und technische sowie betriebswirtschaftliche Aspekte mit einzubeziehen.

Als Grundlage für diese Befähigung sind Organisationsstrukturen und (Entwicklungs-) Prozesse innerhalb der automotiven E/E Entwicklung daraufhin zu überprüfen, ob diese den o.g. Ansprüchen gerecht werden. Parallel dazu ist die E/E Produktstruktur daraufhin zu überprüfen,<sup>51</sup> ob diese eine flexible und schnelle Reaktion auf exogene Herausforderungen ermöglicht. Eine dabei unterstützende Maßnahme zur Optimierung der E/E Produktstruktur ist die Gestaltung einer baureihenübergreifenden und skalierbaren E/E Bordnetzarchitektur. Denn die automotive E/E Bordnetzarchitektur ist das strukturierende Element des E/E Gesamtsystems. Ergänzend ist als weitere Maßnahme zur Produktstrukturoptimierung das Baukastenprinzip anzuwenden (vgl. Kapitel 1.1.1).

<u>Problemstellung 2:</u> Die Fähigkeit flexibel und schnell auf exogene Herausforderungen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung reagieren zu müssen, erzeugt bei OEMs einen enormen Handlungsdruck.

Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität von Produktstrukturen sind etwa die Skalierbarkeit von E/E Bordnetzarchitektur und dedizierter technischer Lösungen, die konsequente Umsetzung geltender Standards, Upgrade- und Updatebarkeit von Software, Einsatz von Plattformen und Baukästen (zur Entwicklung vieler Fahrzeugvarianten mit einer geringstmöglichen Anzahl variantenspezifischer Bauteilen).

### Problemstellung 3 – Bewältigung von Produktivitätsdruck

Unabhängig von Art oder Ursprung der Umwelteinflüsse, verstärken sich viele der exogenen Herausforderungen und der in Kapitel 1.1.1 aufgeführten endogenen Herausforderungen gegenseitig. Folglich tragen beide einen Anteil an der Erhöhung des Innovations- und Kostendrucks (Produktivitätsdrucks) innerhalb der E/E Entwicklung (vgl. Abbildung 1-21).

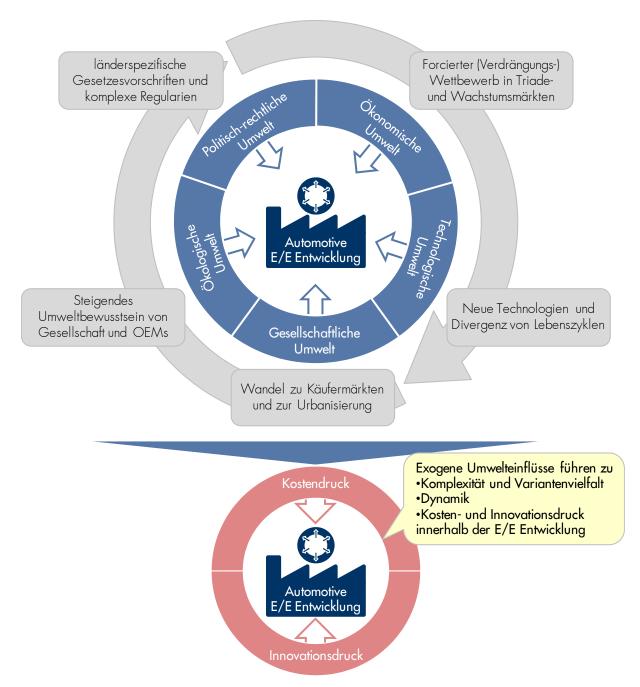


Abbildung 1-21: Die Umwelteinflüsse der Makroumwelt erzeugen Innovations- und Kostendruck auf die automotive E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

OEMs reagieren auf verschiedene exogene Herausforderungen häufig mit (Weiter-) Entwicklung von Technologien oder Innovationen [HOFFMANN 2010, S. 1], was sich auf die automotive E/E Entwicklung, das E/E Gesamtsystem und die E/E Bordnetzarchitektur auswirkt (vgl. Kapitel 1.1.1). Das dabei verfolgte Ziel ist bestehenden Gesetzes- und Kunden-anforderungen

gerecht zu werden, den individuellen Kundennutzen zu maximieren und eine gezielte Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb zu schaffen [BECKER 2002, S. 2ff.; KOHLHASE 1997, S. 1; RENNER 2007, S. 2].

Technologieweiter- bzw. -neuentwicklungen lösen jedoch Kosten innerhalb der automotiven E/E Entwicklung aus und haben damit direkte Auswirkung auf die Erhöhung des Kostendrucks für OEMs (vgl. Abbildung 1-21). Darüber hinaus führt eine Innovation, additive Technologieweiterentwicklung oder -neuentwicklung zu einer wachsenden Anzahl technischer Lösungsvarianten, woraus eine Komplexitätszunahme innerhalb der automotiven E/E Entwicklung folgt. Die Auswirkungen von Technologie- und Innovationsentwicklung leiten zu einer der zentralen Handlungsempfehlungen des Forschungsvorhabens über: OEMs müssen im Spannungsfelds aus Innovations- und Kostendruck bestehen, d.h. den Produktivitätsdruck innerhalb der automotiven E/E Entwicklung für sich beherrschbar machen (vgl. Abbildung 1-21).

<u>Problemstellung 3:</u> Der Produktivitätsdruck für OEMs, bestehend aus Innovations- und Kostendruck, wird innerhalb der automotiven E/E Entwicklung durch exogene Herausforderungen zusätzlich erhöht.

Die Auflösung dieser drei zentralen Problemstellungen ist für OEMs eine Grundvoraussetzung, um deren Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. (Weiter-) Entwicklungen bestehender Technologien oder von Innovationen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung müssen dazu unter Berücksichtigung der o.g. übergreifenden Anforderungen erfolgen (vgl. Problemstellung 1). Ferner sind erwähnte strukturelle und prozessuale Voraussetzungen bei OEMs zu etablieren respektive zu verbessern (vgl. Problemstellung 2), welche es ermöglichen, notwendige Technologien und Innovationen flexibel und kostenoptimal zu entwickeln und zu integrieren. Wobei die (Weiter-)Entwicklung von E/E Umfängen unter dem Aspekt der Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität erfolgen sollte. Dies schafft die Voraussetzung für den gleichzeitigen Einsatz von technischen Lösungen in neu anlaufenden Fahrzeugprojekten (vorwärts-kompatibel) und Derivaten in Serie (rückwärtskompatibel).<sup>52</sup>

#### Handlungsbedarf:

• Holistische Betrachtung/Berücksichtigung (nicht-) funktionaler Anforderungen exogener Umwelteinflüsse.

- Voraussetzungen schaffen bzgl. Organisation, Prozess, Produktstruktur für eine flexible Reaktionsfähigkeit auf exogene Umwelteinflüsse.
- Maßnahmenumsetzung zur Beherrschung des Spannungsfelds aus Innovations- und Kostendruck (Produktivitätsdruck) in der automotiven E/E Entwicklung.

Eine Rückwärtskompatibilität unterstützende Maßnahme innerhalb der automotiven E/E Entwicklung ist die Anwendung des Baukastenprinzips zur Entwicklung von E/E Baukästen im Zusammenspiel mit einer skalierbaren, baureihenübergreifenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu nennen (vgl. Abbildung 1-23, Kapitel 1.1.3 und Kapitel 1.2) [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 155f.; KÜHL/REICHMANN 2007, S. 18; HARDT/GROßEROHDE 2008, S. 14].

# 1.1.3. Reaktionen auf endogene und exogene Herausforderungen

OEMs verfolgen das Ziel, Wettbewerbsfähigkeit und Existenz in den globalen Märkten abzusichern. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist, die zuvor betrachteten endogenen wie exogenen Herausforderungen inkl. der daraus resultierenden Problemstellungen zu erkennen und zu bewältigen (vgl. Kapitel 1.1.1 und 1.1.2). Als Reaktion auf Innovations- und Kostendruck innerhalb der automotiven E/E Entwicklung (vgl. Kapitel 1.1.1) setzen OEMs auf Maßnahmen der Leistungs- und Kostenseite. Diese stehen zueinander in Wechselwirkung (vgl. Abbildung 1-22 und Kapitel 1.1.2.6) [KOHLHASE 1997, S. 19].

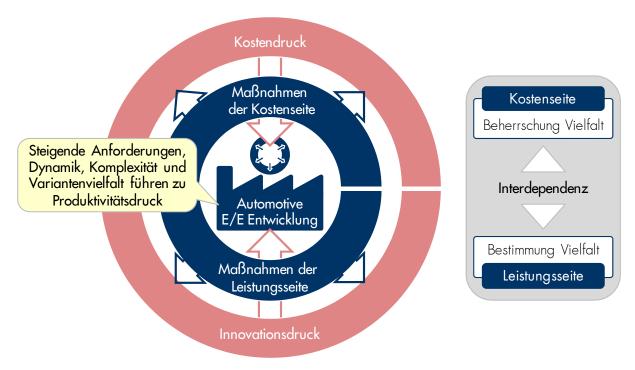


Abbildung 1-22: OEMs reagieren auf endogene und exogene Herausforderungen mit Maßnahmen der Kostenund Leistungsseite, eigene Darstellung in Anlehnung an [RATHENOW 1993, S. 42; SCHÖNMANN 2012, S. 5; SCHUH 2005, S. 121].

Mit Maßnahmen der Leistungsseite begegnen OEMs dem wachsenden Innovationsdruck (vgl. Kapitel 1.1.1 und 1.1.2). Dazu gehört etwa die Entwicklung neuer Elektromobilitätskonzepte<sup>53</sup> (Elektro- und Hybridfahrzeuge) als Reaktion auf die anspruchsvollen CO2-Emissionsvorschriften (vgl. Herausforderungen der politisch-rechtlichen und ökologischen Umwelt in Kapitel 1.1.1.4 und Kapitel 1.1.1.5) [KPMG 2012, S. 4ff.]. Als weitere Maßnahmen auf der Leistungsseite erschließen OEMs neben der Pflege und Erweiterung bestehender Kernbaureihen<sup>54</sup> rentable Produktnischen mit neuen Derivaten<sup>55</sup> [RENNER 2007, S. 2]. Mit diesen Maßnahmen zielen OEMs darauf ab, Herausforderungen der gesellschaftlichen Umwelt gerecht zu werden [PICOT ET AL. 2003, S. 3; KERSTEN 2002; S. 2; WILHELM 2001, S. 50]. Zusätzlich

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Bspw. wird bei BMW aktuell das Modell i3 als rein elektrisch motorisiertes Stadtfahrzeug (auch Mega City Vehicle genannt) sowie der BMW i8 als Plug-In-Hybrid Sportwagen entwickelt.

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Als Beispiel für **Baureihen** eines OEMS seien die BMW 1er-, 3er-, 5er-, 6er- und 7er-Baureihe genannt.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Daimler verkauft z.B. seit 2012 das neue Derivat CLS Shooting Brake am Markt.

fokussieren OEMs auf Dienstleistungen, wie Carsharing-Angebote<sup>56</sup> oder Mehrwertdienste<sup>57</sup> [BRANDT ET AL. 2012, S. 737; PWC 2014, S.1ff.].

Übergeordnetes Ziel aller aufgeführten Maßnahmen auf Leistungsseite ist neben existierenden Anforderungen der politisch-rechtlichen wie ökologischen Umwelt, Kundenanforderungen und -wünsche zu erfüllen, um die Markenverbundenheit bestehender Kunden zu festigen oder neue Kundengruppen zu erschließen [BECKER 2002, S. 2ff.; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 292; HEINA 1999, S. 1; HOFFMANN 2010, S. 60; KOHLHASE 1997, S. 1; RENNER 2007, S. 2]. Die mit der oben beschriebenen Diversifizierung<sup>58</sup> verbundene Weiterentwicklung eines OEMs innerhalb eines Marktes respektive Produktprogramms, reduziert die Abhängigkeit von bestehenden Strukturen und Kundengruppen: Ein breiteres Angebotsspektrum ermöglicht die Erschließung potentieller neuer Kundengruppen. Ferner können dadurch Synergieeffekte (Skalen- und Verbundeffekte) ausgeschöpft werden [CAMPHAUSEN 2007, S. 143; LINGAU 1994, S. 111f.].

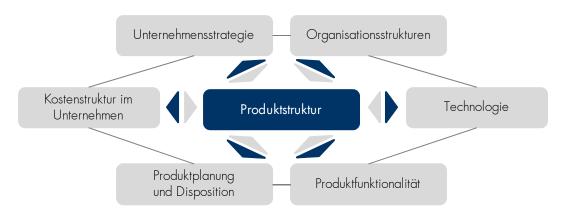


Abbildung 1-23: Produktstruktur als wesentlicher Schlüsselfaktor für Leistungsoptimierung [RAPP 1999, S. 92; Schuh/Schwenk 2001, S. 77; SCHUH 2005, S. 12].

Ergänzend zu o.g. Maßnahmen der Leistungsseite heben OEMs auf Maßnahmen der Kostenseite ab. Diese umfassen Maßnahmen zur Kostensenkung, Effizienzsteigerung sowie zur Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt, um dem Kostendruck entgegen zu wirken. Hierbei setzen OEMs neben Standardisierung und Normierung sowie allgemeinen Profitabilitäts- und Transformationsprogrammen, wie Daimler mit "Core 1 und Core 2" oder GM/Opel mit "Olympia", zusätzlich auf dedizierte strukturierende Maßnahmen zur betriebswirtschaftlichen Optimierung der Produktstruktur<sup>59</sup> (vgl. Abbildung 1-23). Letztere befasst sich mit der

Das Geschäftsmodell "Carsharing" ist vornehmlich in Großstätten verbreitet und gewinnt zunehmend an Akzeptanz. Deutschland ist dabei heute der größte Carsharing-Markt Europas für klassische Verbrennerfahrzeuge. Prognosen gemäß wird Deutschland dies zukünftig auch für Elektrofahrzeuge werden [PWC 2014, S.1ff.]. Beispiele hierfür sind "Flinkster" der DB Rent GmbH, "DriveNow" der DriveNow GmbH & Co. KG und "car2go" der car2go Deutschland GmbH.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Beispiele für **Mehrwertdienste** sind "Audi Connect" von Audi, "ConnectedDrive" von BMW und "mbrace" von Daimler.

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Als **Diversifizierung** wird die Aufnahme neuer und andersartiger Produkte in ein Programm verstanden. Die damit verbundene Auffächerung des Produktprogramms bzw. Sortiments eines Unternehmens erfolgt insb. zur Realisierung von Wachstumschancen. Dabei wird unterschieden in die horizontale Diversifikation (Auffächerung eng verwandter Produkte der bisherigen Produktionsstufe), die vertikale Diversifikation (Vordringen in vor- oder nachgelagerte Produktionsstufen) und die laterale Diversifikation (existente und neue Produkte haben keinen Zusammenhang).

<sup>59</sup> Die Produktstruktur, auch Erzeugnis-Struktur oder Erzeugnis-Gliederung genannt, ist gemäß Schuh "[...] die strukturierte Zusammensetzung des Produktes aus seinen Komponenten. Baugruppen und Einzelteile führen dabei zu Strukturstufen, indem sie Komponenten aus tieferer Ebene in der Produktstruktur zusammenfassen."

Zusammensetzung einzelner Produktkomponenten [FRANKE ET AL. 2002, S. 62f.; GREINER ET AL. 2012, S. 24ff.; RAPP 1999, S. 9ff.; SCHUH/SCHWENK 2001, S. 74].

#### Endogene Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung

# Exogene Umwelteinflüsse auf die automotiver E/E Entwicklung

Herausforderung

- Substitution mechanischer (Teil-) Systeme durch E/E, E/E als Innovationstreiber
- Onboard-Vernetzungsgrad von E/E Umfängen im Fahrzeug
- Signalaufkommen und Datenkomplexität
- Offboard-Vernetzungsgrad von Fahrzeug und Infrastruktur
- Anbindung & Integration mobiler Endgeräte (Consumer Electronics)
- Variantenvielfalt und Systemkomplexität im E/E Gesamtsystem

- Forcierter (Verdrängungs-) Wettbewerb in Triade- und Wachstumsmärkten
- Neue Technologien und Divergenz von Lebenszyklen
- Wandel zu Käufermärkten und zur Urbanisierung
- Steigendes Umweltbewusstsein von Gesellschaft und OEMs
- länderspezifische Gesetzesvorschriften und komplexe Regularien

Problemstellung

- P1 Das Zusammenspiel endogener Umwelteinflüsse, resultierender Anforderungen und deren Auswirkungen führen zu Komplexität und Variantenvielfalt in der automotiven E/E Entwicklung.
- P2 Der Produktivitätsdruck für OEMs, bestehend aus Innovations- und Kostendruck, wird innerhalb der automotiven E/E Entwicklung durch endogene Herausforderungen forciert.
- P1 Das Zusammenspiel exogener Umwelteinflüsse, resultierender Anforderungen und deren Auswirkungen führen zu Komplexität und Variantenvielfalt innerhalb der E/E Entwicklung.
- P2 Die Fähigkeit flexibel und schnell auf exogene Herausforderungen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung reagieren zu müssen, erzeugt bei OEMs einen enormen Handlungsdruck.
- P3 Der Produktivitätsdruck für OEMs, bestehend aus Innovations- und Kosten-druck, wird innerhalb der automotiven E/E Entwicklung durch exogene Herausforderungen zusätzlich erhöht.

# Handlungsbedarf

- H3 Holistische Betrachtung/Berücksichtigung (nicht-) funktionaler Anforderungen endogener Umwelteinflüsse.
- H2 Baureihenübergreifende und skalierbare Gestaltung von automotiven E/E BNAs.
- H3 Einsatz von Standards und Baukästen als ergänzende Maßnahmen zur Produktstrukturierung.
- H1 Holistische Betrachtung/Berücksichtigung (nicht-) funktionaler Anforderungen exogener Umwelteinflüsse.
- H2 Voraussetzungen schaffen bzgl. Organisation, Prozess, Produktstruktur für eine flexible Reaktionsfähigkeit auf Umwelteinflüsse.
- H3 Maßnahmenumsetzung zur Beherrschung des Spannungsfelds aus Innovations- und Kostendruck (Produktivitätsdruck) in der automotiven E/E Entwicklung.

Abbildung 1-24: Herausforderungen, Problemstellungen und Handlungsbedarfe aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen auf die automotive E/E Entwicklung, eigene Darstellung.

Strukturierende Maßnahmen können auf Gesamt- oder Teilsystemebene umgesetzt werden, etwa in der geometrischen Architektur (Gesamtfahrzeugarchitektur), der E/E Bordnetz-

<sup>[</sup>SCHUH 2005, S. 119]. Damit ist unter Optimierung der Produktstruktur die Verbesserung der strukturierten Zusammensetzung der einzelnen Produktkomponenten zu verstehen.

architektur (inkl. Soft- und Hardware) sowie alternativ oder ergänzend auf Produkt-komponentenebene. In der automotiven Entwicklung lässt sich die Mehrzahl der strukturierenden Maßnahmen den Feldern Fahrzeugarchitekturen und Gestaltungsfeldern des Packages (insb. Plattform- und Baukastenansatz) zuordnen (vgl. Kapitel 1.1.1) [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 149ff.; BROY ET AL. 2011, S. 44; ERICSSON/ERIXON 1999, S. 5ff.; REIF 2010, S. 211; REINER/KRIEGER 2011, S. 14ff.; RENNER 2007, S. 41; SCHÖNMANN 2012, S. 7; SCHUH 1989, S. 58f]. So äußert REIF, im Zusammenhang mit dem wachsenden Anteil von E/E und Vernetzung im modernen Automobil, den Bedarf an "[...] leistungsfähigen Entwicklungsprozessen und deren Beschreibungsmethoden [...]" [REIF 2010, S. 211]. BROY ET AL. unterstreichen: "Die Gestaltung der Systemarchitektur wird [...] zunehmend zur Schlüsselrolle künftiger Automobile", um den zugrundeliegenden Anforderungen in der E/E Entwicklung vollumfänglich gerecht werden zu können [BROY ET AL. 2011, S. 44]. SCHUH ET. AL. kritisieren, dass "[...] Produktarchitekturen heute weitestgehend ungeplant realisiert werden", wodurch etwa potentielle Skaleneffekte nicht optimal genutzt werden können [SCHUH ET AL. 2012, S. 322].

Bei der Bewältigung der in Kapitel 1.1.1. und Kapitel 1.1.2. identifizierten Herausforderungen, Problemstellungen und abgeleiteten Handlungsbedarfe (vgl. Abbildung 1-24) unterstützt eine problemorientierte Umsetzung strukturierender Maßnahmen zur Kostenoptimierung der Produktstruktur innerhalb der E/E Entwicklung. Hier setzt das Forschungsvorhaben an (vgl. Kapitel 1.1.2): Der Fokus wird auf strukturierende Maßnahmen der Kostenseite gelegt, d.h. auf gezielte Maßnahmen zur betriebswirtschaftlichen Optimierung der Produktstruktur (vgl. Abbildung 1-23). Konkret liegt die Konzentration im ersten Schritt auf der kostenoptimierten Partitionierung von Funktionen in einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz (vgl. Kapitel 3.5 und Kapitel 5). Gegenstand des zweiten Schritts ist die E/E Baukastengestaltung im Zusammenspiel mit der strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 3.6 und Kapitel 6). Der identifizierte Forschungsbedarf beinhaltet die Entwicklung konkreter Gestaltungshilfen zur Systematisierung sowie Strukturierung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastengestaltung inkl. einer transparenten und durchgängigen Abbildung des Zusammenspiels beider Felder. Forschungsziel ist die Erarbeitung eines umfassenden Gestaltungsvorschlags, der einen an der automotiven Praxis orientierten Vorschlag zur Bewältigung der dargelegten Herausforderungen liefert (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2).

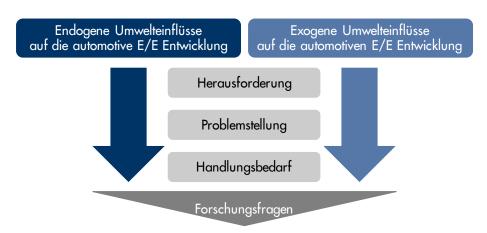
# 1.2. Zielsetzung und Forschungsleitende Fragestellung

Die einleitende Betrachtung (vgl. Kapitel 1.1) zeigt die Vielfalt an Herausforderungen, Problemstellungen und Handlungsbedarfen endogener und exogener Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung (vgl. Abbildung 1-24). Zusammenfassend steigt mit wachsendem Anteil von E/E Umfängen sowie On-/Offboard-Vernetzung der Bedarf an strukturierenden Maßnahmen zur kostenseitigen Optimierung der E/E Produktstruktur (vgl. Kapitel 1.1). Ziel ist dabei, die Systemkomplexität, Variantenvielfalt sowie den Handlungs- und Produktivitätsdruck beherrschbar zu machen. Wie im Kapitel 1.1 hergeleitet, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens die automotive E/E Bordnetzarchitektur (Details s. Kapitel 3.5) als das strukturgebende Element für das E/E Gesamtsystem betrachtet. So liegt der Ansatzpunkt zur kostenseitigen Optimierung der E/E Produktstruktur initial bei der automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Ergänzend kann die E/E Produktstruktur über die Anwendung des Baukastenansatzes verbessert werden (vgl. Kapitel 1.1.3 und Kapitel 3.6). Dies trägt dazu bei die Flexibilität zu erhöhen und

die Gesamtsystemkomplexität beherrschbar zu machen, indem die Variantenvielfalt über die Baureihen minimiert wird (vgl. Kapitel 1.1.3). Der konsequente, baureihenübergreifende Einsatz von E/E Baukästen leistet ferner einen Beitrag dazu zusätzliche Kosten einzusparen (vgl. Kapitel 3.6), um ein Kostenoptimum für den automotiven E/E Gesamtumfang zu erreichen. Als Konsequenz liegt der Fokus auf kostenseitiger Optimierung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 5) und einer darauf aufsetzenden automotiven E/E Baukastengestaltung (vgl. Kapitel 6). Dieses identifizierte Feld findet in der Fachliteratur bislang nur auszugsweise und damit unzureichend Erwähnung: Es existieren keine holistischen Ansätze, Konzepte, Modelle oder Maßnahmen zur Produktstrukturierung unter vollständiger Einbeziehung der Kostenseite [Broy et al. 2011, S.42 ff; Brandt et al. 2012, S.737; Warkentin ET AL. 2009, S. 190]. Die in der Literatur dokumentierten Umfänge geben zumeist nur Anregungen oder Vorschläge bzgl. Anforderungen oder Zielsetzungen, die der Entwicklung von E/E Bordnetzarchitektur zugrunde gelegt werden sollten, ohne konkret oder im Detail auf deren gesamthafte Ausgestaltung einzugehen [vgl. z.B. BOROWSKI 1961; BIEGERT 1971; BROY ET AL. 2009; Broy et al. 2011; Matheis et al. 2006, Reif 2010; Renner 2007; Reiner/Krieger 2011; WARKENTIN ET AL. 2009].

# 1.2.1. Forschungsleitende Fragestellung

Die in Kapitel 1.1.1 und 1.1.2 identifizierten zentralen Problemstellungen und Handlungsbedarfe für den Anwendungskontext der E/E Entwicklung in der Automobilindustrie, fassen sich zusammen als Bedarf an Maßnahmen auf Kostenseite zur Optimierung der Produktstruktur. Daraus ergibt sich der Rahmen für die Forschungsleitende Fragestellung der vorliegenden Arbeit, die dabei unterstützt Lösungsansätze für die herausgearbeiteten Problemstellungen zu entwickeln (Abbildung 1-25). Entsprechend lassen sich zwei Forschung sziele ableiten, die zum einen den Fokus des Forschungsvorhabens schärfen und zum anderen dessen Grobstruktur vorgeben.



- F1 Wie ist eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren, in welcher E/E Funktionen abgebildet werden können?
- F2 Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert?

Abbildung 1-25: Abbildung 1-26:Herausforderungen, Problemstellungen und Handlungsbedarfe aus endogenen und exogenen Herausforderungen erweitert um die Forschungsleitende Fragestellung, eigene Darstellung.

Das erste Forschungsziel befasst sich mit der Untersuchung und Gestaltung bzw. Modellierung<sup>60</sup> des strukturgebenden Elements des E/E Gesamtsystems (vgl. Kapitel 1.1.3): Der
automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Genauer liegt der Fokus auf der Fragestellung, wie in
einer solchen E/E Bordnetzarchitektur alle softwarebasierten E/E Funktionen vollständig
realisiert bzw. partitioniert werden können. Wobei alle zugrundeliegenden funktionalen und
nicht-funktionalen Anforderungen zu berücksichtigen sowie das Kostenoptimum zu erzielen
sind. Das zweite Forschungsziel befasst sich mit der Produktstrukturoptimierung auf Teilsystemebene mittels Anwendung des Baukastenprinzips. Für jedes der zwei Forschungsziele
wird im Folgenden eine Forschungsfrage formuliert, die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens untersucht wird.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung verfolgt die Forscherin den Ansatz, ein Optimierungsmodell<sup>61</sup> zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu entwickeln. Dabei wird eine Entkopplung von Hardware (insb. Steuergeräte inkl. Stecker und Kabel) und softwarebasierten E/E Funktionen vorausgesetzt. D.h. Funktionen werden hardwareunspezifisch entwickelt. Die Steuergeräteentwicklung erfolgt skalierbar und unterliegt geltenden Standards (z.B. AUTOSAR). Die Entwicklung des Optimierungsmodells erfolgt unter der Prämisse, eine skalierbare baureihenübergreifend einsetzbare E/E Bordnetzarchitektur als strukturgebende Basis für die weitere E/E Baukastengestaltung und -integration zu schaffen.

Forschungsfrage 1: Wie ist eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren, in welcher komplexe E/E Funktionen vollständig abgebildet werden können?

Mit der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung befasst sich die Forscherin mit der Gestaltung eines Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung im Automobil (vgl. Kapitel 1.1.3). Wobei eine konsequente baureihenübergreifende Anwendung des Baukastenansatzes in Abhängigkeit des strukturgebenden Elements des E/E Gesamtsystems – der E/E Bordnetzarchitektur – fokussiert wird. Dies geschieht mit dem Ziel eine klare Regelung des Zusammenspiels von automotiver E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen zu definieren, um bei deren Gestaltung eine ergänzende Hilfestellung im Kontext der Produktstrukturverbesserung zu geben.

Forschungsfrage 2: Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert?

Die Lösungsvorschläge zur Beantwortung der zwei Forschungsleitenden Fragestellungen (vgl. Abbildung 1-25), haben Auswirkungen auf den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn in der

Die Modellierung ist das zielgerichtete und zweckgemäße Gestalten und Erstellen von Modellen. Dies umfasst eine entsprechende Auswahl von Modell und Modellierungssprache, das Ableiten von Synergien bzw. Aufstellen von Analogien zwischen dem zu gestaltenden Modell und der Realität sowie die Vorbereitung des Modells für eine Verwendung in Systemen, zur Bearbeitung und Veränderung [FRIEDRICH 2011, S. 15].

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Die Optimierung von Kosten über (mathematische) Modelle ist immer dann sinnvoll, wenn die Kostenstruktur des Produktes (z.B. automotive E/E Bordnetzarchitektur) eine gewisse Komplexität überschreitet. Wobei die Kostenstruktur die Gliederungslogik ist, nach der die Kosten eines betrachteten Produktes aufgeteilt werden.

Produktentwicklung für den Bereich der automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung. Gleichzeitig stiften die erzeugten Ergebnisse einen Mehrwert für die unternehmerische Praxis der Automobilindustrie.

# 1.2.2. Einordung und Abgrenzung der Arbeit

Die Einordung der vorliegenden Arbeit erfolgt in das Gebiet der Ingenieurwissenschaften. Gegenstand der Ingenieurwissenschaften ist die Technik, deren grundsätzliches Ziel die Sicherung und Erweiterung der Lebensmöglichkeiten der Menschen durch Entwicklung und sinnvolle Anwendung technischer Systeme<sup>62</sup> darstellt. Dafür notwendige Ingenieurleistungen basieren auf der zweckgemäßen Kombination interdisziplinären Wissens (vgl. Abbildung 1-27) [CZICHOS 2008, S. 1ff.]:

- *Technologische Grundlagen:* Werkstoffkunde, Mechanik, Thermodynamik, Elektrotechnik, Messtechnik, Regelungstechnik, Steuerungstechnik und Informatik.
- *Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen:* aus Mathematik, Physik und Chemie.
- *Normative Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen:* Konstruktionstechnik, Produktionstechnik, Betriebswirtschaftslehre und Rechtswissenschaften.

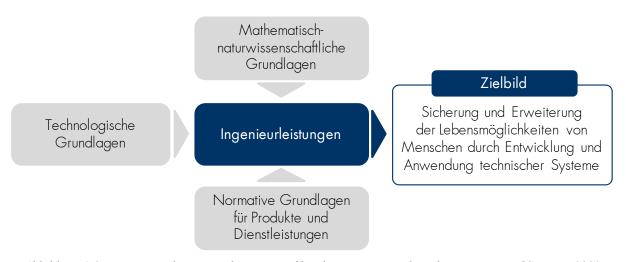


Abbildung 1-27: Ingenieursleistungen basieren auf kombiniertem, interdisziplinären Wissen [CZICHOS 2008, S.13].

Aufgrund der Konzentration auf die spezifischen Felder automotiver E/E Architektur- und Baukastenentwicklung (vgl. Abbildung 1-28), ist das Forschungsvorhaben innerhalb der Ingenieurswissenschaften schwerpunktmäßig dem Automotive Software Engineering, der Mechatronik und der Kraftfahrzeugelektronik zuzuordnen. Letztere bildet eine eigenständige Disziplin der Fahrzeugtechnik und damit ein wichtiges Gebiet im Maschinenbau [REIF 2009; WALLENTOWITZ/REIF 2010].

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> Als **technisches Systeme** definieren PONN und LINDEMANN ein "in sich geschlossenes, aus einer Anzahl von Bauteilen, Baugruppen oder Modulen bestehendes, funktionsfähiges Erzeugnis" [PONN/LINDEMANN 2011, S. 455].

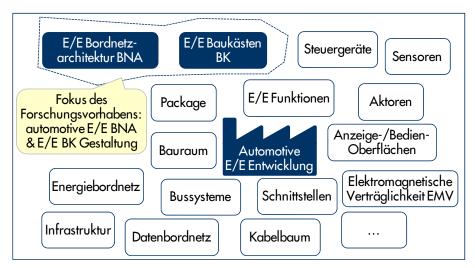


Abbildung 1-28: Forschungsvorhaben fokussiert die Felder automotive E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten, eigene Darstellung.

Die technologischen Grundlagen (vgl. Kapitel 3) werden somit vornehmlich dem wissenschaftlichen und praktischen Schrifttum der Kraftfahrzeugelektronik, aber auch des Automotive Software Engineerings und der Informatik entnommen. Letzteres begründet sich etwa mit steigendem Einsatz hochkomplexer, softwarebasierter E/E Funktionen und Themen wie etwa der On-Offboard-Vernetzung. Entsprechend richtet sich das Forschungsvorhaben nach bestehenden Vorgaben sowie Anforderungen der automotiven E/E Entwicklung. Hierbei fokussiert es im ersten Schritt die automotiven E/E Architekturgestaltung inkl. der Partitionierung von softwarebasierter E/E Funktionen auf Steuergeräten, d.h. auf Funktionen und Anforderungen sowie und Logische Architekturen (vgl. das Systemebenen-Modell einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur in Kapitel 3.1.2). In diese Betrachtung werden verschiedene Bestandteile des E/E Gesamtsystems nicht näher einbezogen: Das Daten- und Energiebordnetz, Bussysteme, Knotenpunkte, Leitungen, Kabelbaum, Sicherungen, Steckverbindungen, Kontakte, Schnittstellen, Sensoren und Aktoren, Anzeige- und Bedienoberflächen oder etwa Aspekte wie die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) [GROHMANN ET AL. 2013, S. 78ff.].

Als normative Grundlagen (vgl. Kapitel 4) dienen in erster Linie das Operations Research und die Wirtschaftsinformatik. Operations Research bedient sich der Fachgebiete angewandte Mathematik, Wirtschaftswissenschaften und (Wirtschafts-) Informatik und ist als ein Teilgebiet der Wirtschaftswissenschaften etabliert [FINK ET AL. 2001; DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 19f.]. Im Rahmen der Arbeit unterstützt es bei der Gestaltung des Optimierungsmodells für eine E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 4 und 5). Die Disziplin Wirtschaftsinformatik bildet einen interdisziplinären Wissenschaftszweig aus Betriebswirtschaftslehre und Informatik [Kurbel/Strunz 1990, S. 3]. In der Arbeit schafft diese die normativen Grundlagen für die Gestaltung des Referenzmodells zur architektur-gesteuerten E/E Baukastenentwicklung (vgl. Kapitel 4 und 6).

Zur Identifikation des auf das Forschungsvorhaben passende Forschungsdesigns und Forschungsmethoden, orientiert sich die vorliegende Arbeit am wissenschaftstheoretischen Ordnungsrahmen nach BECKER ET AL. (vgl. Kapitel 2.1, Abbildung 1-29, Abbildung 2-1) [BECKER ET AL. 2003, S. 5].

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Ein steigender Anteil von Funktionen wird "offboard", d.h. außerhalb der Fahrzeuggrenzen realisiert. Bspw. innerhalb der OEM-eigenen IT-Infrastruktur oder bei Serviceprovidern.

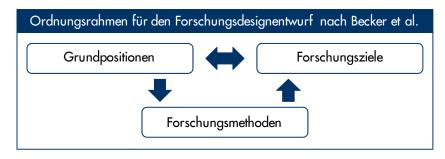


Abbildung 1-29: Ordnungsrahmen für den Entwurf eines Forschungsdesigns [BECKER ET AL. 2003, S. 3].

# 1.3. Aufbau der Arbeit

Die Erläuterung der Motivation des Forschungsvorhabens wird durch die Darlegung von Aufbau und Beitrag der Arbeit abgerundet. Dazu werden die einzelnen Kapitelinhalte und deren Ergebnisbeitrag innerhalb der Arbeit im Folgenden eingeordnet (vgl. Abbildung 1-30).



Abbildung 1-30: Übersicht über den Aufbau der Arbeit, eigene Darstellung.

#### Kapitel 1 - Einleitung und Motivation des Forschungsvorhabens

Kapitel 1 stellt Hintergrund, Rahmen und Ziel des Forschungsvorhabens dar. Der erste Abschnitt zeigt zunächst die Motivation und Herausforderungen für das Forschungsvorhaben auf, indem endogene und exogene Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung dargestellt und analysiert sowie resultierende Herausforderungen herausgearbeitet werden (vgl. Kapitel

1.1.1). Darauf basierend werden Problemstellungen und Handlungsbedarfe für die automotive E/E Entwicklung abgeleitet (vgl. Kapitle 1.1.2). Das erste Unterkapitel schließt mit der Darstellung der Reaktionen von OEMs auf die herausgearbeiteten endogenen und exogenen Herausforderungen (vgl. Kapitel 1.1.3). Das zweite Unterkapitel umfasst Zielsetzung und die beiden Forschungsleitenden Fragestellung des Forschungsvorhabens, welche auf der Diskussion der Herausforderungen und Handlungsbedarfe beruhen (vgl. Kapitel 1.2.1). Daran anknüpfend erfolgt eine differenzierte Einordnung des Forschungsvorhabens in das Gebiet der Ingenieurwissenschaften inklusive eines Ausblicks auf die dafür notwendigen technologischen, mathematisch-naturwissenschaftlichen sowie normativen Grundlagen. Damit verbunden ist die Abgrenzung der Arbeit und Fokussierung auf die automotive E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastengestaltung innerhalb der automotiven E/E Entwicklung (vgl. Kapitel 1.2.2).

#### Kapitel 2 – Forschungsdesign und Forschungsvorhaben

Das Kapitel 2 ist das erste von drei Grundlagenkapiteln. Dessen Gegenstand sind die forschungsstrategischen sowie -methodischen Grundlagen bzw. das Forschungsdesign, welche zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellungen benötigt werden (vgl. Kapitel 2). Dazu wird zunächst der wissenschaftstheoretische Ordnungsrahmen zur Unterstützung des Entwurfs des Forschungsdesigns inkl. der Auswahl passender Forschungsmethoden erläutert. Darin inbegriffen sind die Herleitung und Erläuterung der wissenschaftstheoretischen Grundposition (vgl. Kapitel 2.1.1), die Forschungsziele (vgl. Kapitel 2.1.2), Forschungsmethoden (vgl. Kapitel 2.1.3) baran anschließend wird die gestaltungsorientierte Forschung als das methodische Rahmenkonzept des Forschungsvorhabens erläutert (vgl. Kapitel 2.2). Abschließend werden die Forschungsmethoden des Forschungsvorhabens im Detail betrachtet, die bei der Beantwortung der zugrundeliegenden Forschungsmethoden wird die explorative Forschung ausgewählt und betrachtet (vgl. Kapitel 2.3.1), wobei die theoriebasierte Exploration (vgl. Kapitel 2.3.2) und die qualitativ-empirische Exploration (vgl. Kapitel 2.3.3) im Rahmen des Design Science Anwendung finden.

## Kapitel 3 – Grundlagen der automotiven E/E Entwicklung

Kapitel 3 ist das zweite Grundlagenkapitel. Es führt die zentralen technischen Begriffe im Kontext der automotiven E/E Entwicklung ein (vgl. Kapitel 3). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der automotiven E/E Bordnetzarchitektur und dem E/E Baukasten. Entsprechend befasst sich das Kapitel zunächst mit der automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 3.1) sowie deren Entwicklung (vgl. 3.1.1). Anschließend wird das Systemebenen-Modell einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur vorgestellt (vgl. Kapitel 3.1.2), deren vier Systemebenen maßgeblichen Einfluss auf die Struktur des Kapitels haben. Ferner wird die Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur untersucht (vgl. Kapitel 3.5), wobei der Funktionsorientierungsansatz (vgl. Kapitel 3.5.1), der Zentralisierungsansatz (3.5.2) sowie der Domänenansatz (vgl. Kapitel 3.5.3) unterschieden und verglichen werden (vgl. Kapitel 3.5.4). Der letzte Betrachtungsumfang ist der automotive E/E Baukasten (vgl. Kapitel 3.6). Darin inbegriffen wird der allgemeine Baukastenbegriff – als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip – diskutiert (vgl. Kapitel 3.6.1), der automotive Baukasten charakterisiert (vgl. Kapitel 3.6.2) und der automotive E/E Baukasten definiert (vgl. Kapitel 3.6.3).

#### Kapitel 4 – Grundlagen und methodisches Vorgehen zur Modellbildung

Kapitel 4, als das dritte Grundlagenkapitel. Es beinhaltet die Grundlagen und das methodische Vorgehen zur Modellbildung (vgl. Kapitel 4). Zunächst erfolgt die allgemeine Erläuterung des Modellbegriffs (vgl. Kapitel 4.1), woran sich die detaillierte Betrachtung von Optimierungsmodellen (vgl. Kapitel 4.2) und Referenzmodellen (vgl. Kapitel 4.3) anschließt. Die Grundlagen zur Optimierungsmodellbildung benötigt das Kapitel 5, in dem ein Optimierungsmodell erarbeitet wird. Die Grundlagen zur Referenzmodellbildung dienen der Erarbeitung des Referenzmodells in Kapitel 6.

### Kapitel 5 – Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer E/E BNA

Gegenstand des Kapitels 5 ist die Erarbeitung eines Optimierungsmodells zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (E/E BNA) (vgl. Kapitel 5). In Kapitel 5 wird das Optimierungsmodell detailliert erläutert. Die Optimierungsmodellbildung erfolgt schrittweise und orientiert sich dabei an dem Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research (vgl. Kapitel 5.1). Zu den einzelnen Schritten gehört die Problemidentifikation und -analyse (vgl. Kapitel 5.2), die Zieldefinition (vgl. Kapitel 5.1.2), das deskriptive Modell (vgl. Kapitel 5.4), das mathematische Modell (vgl. Kapitel 5.5), die Datenbeschaffung (vgl. Kapitel 5.6) sowie die Lösungsfindung und Bewertung inkl. optimaler Lösung (vgl. 5.7). Die Optimierungsmodell Validierung erfolgt auf Basis der computerbasierten Modelllösung mit einem in MATLAB programmierten Algorithmus und unter enger Einbeziehung von Experten der unternehmerischen Praxis (vgl. Kapitel 5.7).

#### Kapitel 6 – Architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung

Die in Kapitel 6 zu bewältigende zentrale Aufgabenstellung ist die Erarbeitung eines Referenzmodells als Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung (vgl. Kapitel 6). Die entsprechende Konstruktion des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung orientiert sich am Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung (vgl. Kapitel 6.1). Die schrittweise Erarbeitung des Referenzmodells erstreckt sich dabei über die folgenden Phasen: Zieldefinition (vgl. Kapitel 6.2), Konstruktion des Ordnungsrahmens (vgl. Kapitel 6.1.2), Modellierung der Struktur (vgl. Kapitel 6.4) sowie die Konsolidierung und Komplettierung (vgl. Kapitel 6.5). Die Validierung des Referenzmodells erfolgt unter enger Einbeziehung von Experten der unternehmerischen Praxis (vgl. Kapitel 6.5).

### Kapitel 7 – Fazit und Ausblick

Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einem Rückblick auf die erarbeiteten Lösungsvorschläge zur beantworteten der zwei Forschungsleitenden Fragestellungen. Dies schließt die Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich deren Relevanz für Forschung und Praxis mit ein. Ferner wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

# 2. Forschungsdesign und Forschungsmethoden

Unterstützend zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellungen (vgl. Kapitel 1.2.1, und, um Forschungsergebnisse intersubjektiv nachvollziehbar aufbereiten zu können, wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen Forschungsstrategien und -methoden als Orientierungsrahmen respektive Ordnungsrahmen¹ entwickelt [REMENYI ET AL. 2003, S. 43ff.; TSCHAMLER 1996, S. 67]. In diesem Kapitel wird das forschungsmethodische Design hergeleitet, welches der vorliegenden Arbeit unterstützend zugrunde gelegt wird. Dazu erfolgt eine Gliederung des Kapitels in die folgenden drei Teilabschnitte: Im ersten Schritt wird der wissenschaftstheoretische Ordnungsrahmen inkl. wissenschaftstheoretischer Grundposition und Forschungszielen dargelegt (vgl. Kapitel 2.1). Darauf bauen im zweiten Schritt das methodische Rahmenkonzept (vgl. Kapitel 2.2) und im dritten Schritt die Forschungsmethoden des Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 2.3) auf.

# 2.1. Wissenschaftstheoretischer Ordnungsrahmen

Zur Unterstützung des Entwurfs eines Forschungsdesigns inkl. der Auswahl passender Forschungsmethoden haben BECKER ET AL. den in Kapitel 1.2.2 erwähnten Ordnungsrahmen entwickelt (vgl. Kapitel 1.2.2, Abbildung 1-29 und Abbildung 2-1) [BECKER ET AL. 2003, S. 5].

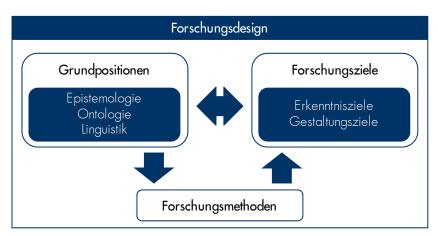


Abbildung 2-1: Ordnungsrahmen für den Entwurf eines Forschungsdesigns nach BECKER ET AL. [BECKER ET AL. 2003, S. 5].

Diesem Ordnungsrahmen liegt die Hypothese zugrunde, dass eine Auswahl der Forschungsmethoden auf Basis von Grundposition und Forschungszielen des Forschers getroffen wird. Wobei sich die Grundposition aus der epistemologischen, ontologischen sowie linguistischen Position (vgl. Kapitel 2.1.1) und das Forschungsziel aus Erkenntnis- sowie Gestaltungszielen (vgl. Kapitel 2.1.2) des Forschers zusammensetzt. Letztlich ist es das Ziel, die wissenschaftstheoretische Grundposition, die Forschungsziele sowie die zur Zielerreichung sinnvollerweise einzusetzenden Forschungsmethoden zu identifizieren und zu dokumentieren [BECKER ET AL.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe "Orientierungsrahmen" und "Ordnungsrahmen" im Kontext von Forschungsdesign und Forschungsmethoden synonym verwendet. Vor dem Hintergrund einer durchgängigen Verwendung von Begrifflichkeiten wird im Folgenden nur noch der Begriff "Ordnungsrahmen" verwendet.

2003, S. 5; HOFFMANN 2010, S. 12]. Im Folgenden werden schrittweise wissenschaftstheoretische Grundposition, Forschungsziele sowie Forschungsmethoden näher erläutert sowie jeweils in den Kontext des Forschungsvorhabens der vorliegenden Arbeit eingeordnet.

# 2.1.1. Wissenschaftstheoretische Grundposition

Wie setzt sich die wissenschaftstheoretische Grundposition eines Forschers aus epistemologischer, ontologischer sowie linguistischer Position zusammen [BECKER ET AL. 2003, S. 5; HOFFMANN 2010, S. 12]. Die Grundpositionen werden nachfolgend erläutert und für das Forschungsvorhaben in den Kontext gesetzt.

#### Epistemologie als Element der wissenschaftstheoretischen Grundposition

Ziel der Epistemologie ist es, wahre Erkenntnisse über Erkenntnisobjekte (z.B. einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur oder E/E Baukästen) inkl. der entsprechenden Veränderungen von Vorstellungswelten zu erlangen. Die epistemologische Grundposition eines Forschers, bezogen auf das Verhältnis von Erkenntnis und Gegenstand, ist, dass ein objektives (d.h. subjektunabhängiges) Erkennen möglich oder nicht möglich ist. Auf dem Weg zu einem solchen Erkenntnisgewinn können folgende drei zentrale Fragen unterstützend herangezogen werden [BECKER ET AL. 2003, S. 6f.; KANT/SCHMIDT 1976, S. 75; SEIFFERT 1996, S. 154; GETHMANN 1995, S. 434]:

- Die Frage nach dem Erkenntnisgewinn: Wie entstehen Erkenntnisinhalte, d.h. was ist die Quelle von Erkenntnissen?
  - Erkenntnisquellen können Erfahrungen (z.B. aus Theorie- und Erfahrungspraxis) oder auch der Verstand sein [KANT/SCHMIDT 1976, S. 75].
- Die Frage nach der Methodologie: Wie gestaltet sich der Weg zur Erkenntnis?
  - Der Weg zur Erkenntnis kann entweder induktiv oder deduktiv erfolgen. Induktiv bedeutet einen Erkenntnisgewinn durch das Schließen von Einzelfällen auf eine allgemeingültige, gesetzartige Aussage (Generalisierung). Deduktiv beschreibt, dass der Erkenntnisgewinn durch das logische Ableiten des Einzelnen aus dem Allgemeinen erfolgt [SEIFFERT 1996, S. 154; GETHMANN 1995, S. 434].
- Die Frage nach der Erkenntniswahrnehmung: Wie verhält sich die Erkenntnis zum Gegenstand?
  - Zu überprüfen ist, ob ein subjektunabhängiges Erkennen der Wirklichkeit überhaupt möglich ist. Gemäß dem erkenntnistheoretischen Realismus ist dies erreichbar, sofern geeignete Maßnahmen zur Beseitigung entsprechender Störgrößen gefunden werden. Hingegen wird im Idealismus die Position vertreten, dass die erkannte Wirklichkeit immer auf rein subjektiven Erkenntnissen basiert [BECKER ET AL. 2003, S. 7].

# Ontologie als Element der wissenschaftstheoretischen Grundposition

Die zentrale Fragestellung zur Klärung der ontologischen Grundposition ist, ob der Forscher in seinen Untersuchungen von einer Realwelt (z.B. E/E Entwicklung innerhalb der Automobilindustrie) ausgeht, die unabhängig von der gewonnen Erkenntnis existiert. Diesbezüglich

werden im Realismus und im Idealismus zwei konträre Grundpositionen bezogen [BECKER ET AL. 2003, S. 8; GUBA 1990, S. 27]:

- *Erkenntnistheoretischer Realismus:* Eine von Naturgesetzen bestimmte Realität existiert, d.h. es gibt eine objektive Welt.
- *Idealismus:* Eine Realwelt kann nur in selbst konstruierten, subjektiven Ausprägungen existieren, d.h. es gibt keine objektive Welt.

Die Ontologische und epistemologische Grundpositionen sind miteinander nur bedingt kombinierbar (vgl. Abbildung 2-2): Die epistemologische Position, ein objektives Erkennen sei entweder möglich oder nicht möglich, können mit der ontologischen Position, eine objektive Welt existiert, kombiniert werden. Hingegen ist die epistemologische Position, ein objektives Erkennen sei möglich, zu der ontologischen Position, eine objektive Welt existiere nicht, widersprüchlich. Somit sind die beiden letztgenannten Grundpositionen auch nicht miteinander kombinierbar [BECKER ET AL. 2003, S. 8; SCHÜTTE 1998, S. 15].

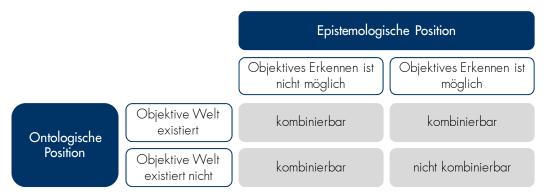


Abbildung 2-2: Kombinationsmöglichkeiten ontologischer und epistemologischer Grundpositionen nach BECKER ET AL. [BECKER ET AL. 2003, S. 8].

#### Linguistik als Element der wissenschaftstheoretischen Grundposition

Die linguistische Grundposition beschreibt den vom Forscher als sinnvoll erachteten Austausch sprachlicher Artefakte im Kontext des Forschungsvorhabens. Z.B. zur Durchführung, Sichtung, Deskription und Auswertung von Interviews mit Experten der automotiven E/E Entwicklung. Als Leitplanken dienen drei zentrale Fragestellungen [BECKER ET AL. 2003 S. 9f.; WOLF 2001, S. 102f.]:

- Die Frage nach der kognitiven Funktion: Welche Funktion hat Sprache im Rahmen von Denkvorgängen?
- Die Frage nach der expressiven Funktion: Wie erlangen Sprachartefakte an Bedeutung?
- Die Frage nach der kommunikativen Funktion: Wie ermöglicht Sprache eine Form der intersubjektiven Verständigung?

Für eine wissenschaftliche Arbeit liefert die Beantwortung aller drei Fragen wertvolle Erkenntnisse. Vor allem dann, wenn – wie beim Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 5.7 und Kapitel 6.5) – Sender und Empfänger verschiedener Disziplinen involviert sind (vgl. Kapitel 1.2.2). Etwa aufgrund der verschiedenen Hintergründe, Interessen und Fachbegriffe, die in bestimmten

Disziplinen etabliert sind, aber disziplinübergreifend unterschiedliche Bedeutungen haben können. Die letztgenannte Frage nach der kommunikativen Funktion ist daher von besonderer Relevanz. Eine Veröffentlichung (z.B. der transkribierten Ergebnisse eines Experteninterviews oder die übergreifende Dokumentation eines Forschungsvorhabens in Form einer wissenschaftlichen Schrift) ist nicht in jedem Fall sinnvoll bzw. nützlich. Ein Nutzen entsteht erst dann, wenn die von der Forscherin intendierte Bedeutung der adressierten Sprachartefakte auch vom Empfänger beigemessen werden kann und dadurch eine intersubjektive Verständigung gewährleistet ist [BECKER ET AL. 2003, S. 10].

#### Wissenschaftstheoretische Grundposition des Forschungsvorhabens

Wie in Kapitel 1.2.2 aufgezeigt, lässt sich die vorliegende Arbeit in das Gebiet der Ingenieurs-wissenschaften (schwerpunktmäßig innerhalb des Automotive Software Engineering, der Mechatronik und Kraftfahrzeugelektronik) einordnen, deren Gegenstand die Technologie ist (vgl. Kapitel 1.2.2 und Abbildung 1-27). Folglich handelt es sich um ein vornehmlich technologiegetriebenes Forschungsvorhaben. Bei dieser Art liegen i.d.R. folgende zwei zentrale philosophische Fragestellungen zugrunde [BUNGE 1979, S. 262f.]:

- Wie unterscheiden sich die Eigenschaften von durch Technologie neu geschaffener Artefakte von denen natürlicher Objekte?
- Wie ist das Zusammenspiel der verschiedenen Möglichkeiten des Erkenntnisgewinns im Kontext der technologiegetriebenen Forschung?

Die Ausprägungen von epistemologischer, ontologischer und linguistischer Position orientieren sich beim technologiegetriebenen Forschungsvorhaben im Wesentlichen an den Sichtweisen des Realismus und lehnen die des Idealismus tendenziell ab [HOFFMANN 2010, S. 13]. Die folgenden Schlussfolgerungen, die sich gemäß BUNGE aus den philosophischen Grundlagen der technologiegetriebenen Forschung ableiten lassen, unterstützen diese Grundposition [BUNGE 1997, S. 271]:

- Technologie ermöglicht es bestimmte natürliche Prozesse zielgerichtet zu verändern.
- Technologie kann neue Artefakte schaffen, um damit die Realität zu verändern.
- Technologie-geschaffene Artefakte sind keine natürlichen Produkte, sondern die Produkte bewusster, durchdachter sowie zielgerichteter Gestaltung. Damit beinhalten und folgen sie eigenen ontologischen Eigenschaften und Regeln.

So kann dem hier betrachteten Forschungsvorhaben als wissenschaftstheoretische Grundposition der kritische Rationalismus zugrunde gelegt werden (vgl. Abbildung 2-3): D.h. es wird
eine objektivistisch epistemologische Position, eine kritisch realistisch ontologische Position
sowie eine linguistische Position eingenommen, in der eine intersubjektive Verständigung über
das Forschungsvorhaben als möglich erachtet wird.

Eine objektivistisch epistemologische Position im kritischen Realismus bedeutet, dass eine objektive Wahrnehmung von Erkenntnissen als möglich angenommen wird und sich der Weg zur Erkenntnis deduktiv gestaltet, d.h. durch Anwendung bekannter Sätze auf gesammelte Erfahrungen [GUBA 1990, S. 23]. Die kritisch realistisch ontologische Position im kritischen Realismus beinhaltet, dass zwar eine von Naturgesetzen bestimmte Wirklichkeit existiert, das

vollständige Verstehen dieser jedoch als unmöglich erachtet wird. Der hier geltenden linguistischen Position gemäß, ist es möglich, dass die über die deduktiven Methoden erlangten objektiven Erfahrungen verständlich dokumentiert und ausgetauscht werden können.

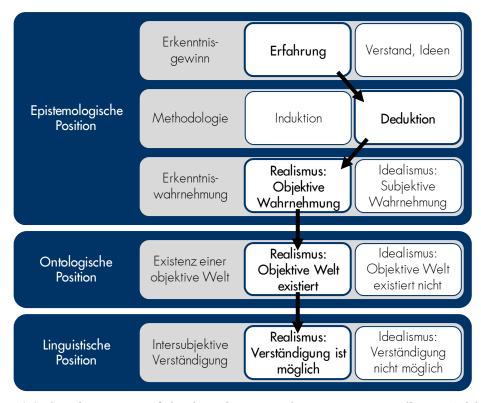


Abbildung 2-3: Grundposition gemäß dem kritischen Rationalismus, eigene Darstellung in Anlehnung an Becker und Hoffmann [Becker et al. 2003, S. 6; Hoffmann 2010, S. 14].

#### Wissenschaftstheoretische Grundposition des Forschungsvorhabens:

Die wissenschaftstheoretische Grundposition entspricht der des kritischen Rationalismus. D.h. eine objektivistisch epistemologische und kritisch realistisch ontologische sowie eine linguistische Grundposition, in der eine intersubjektive Verständigung über das Forschungsvorhaben als möglich erachtet wird, werden vertreten.

# 2.1.2. Forschungsziele

#### Erkenntnis- und Gestaltungsziele

Die erläuterte Grundposition des Forschers steht wiederum in Interdependenz zu dessen jeweiligen Forschungszielen, die sich in Erkenntnis- und Gestaltungsziele unterscheiden lassen (vgl. Kapitel 1.2.1 und Abbildung 2-4) [BECKER ET AL. 2003, S. 11; HEINRICH 2000, S. 8]:

- *Erkenntnisziele:* Ziel ist es, einen Sachverhalt zu verstehen sowie eine Prognose über dessen Veränderung aufzustellen.
- *Gestaltungsziele:* Ziel ist es, einen Sachverhalt zu gestalten bzw. die zielgerechte Veränderung bestehender Sachverhalte zu erreichen.

Erkenntnis- und Gestaltungsziele können auf Basis zweier Schwerpunkte inhaltlich differenziert werden, dem methodischen und inhaltlich funktionalen Auftrag (vgl. Abbildung 2-4) [BECKER ET AL. 2003, S. 12]:

- *Methodischer Auftrag eines Forschungsziels:* Liegt einem Forschungsziel ein methodischer Auftrag zugrunde, so ist dessen zentrales Ziel, Methoden und Techniken zur Beschreibung, Entwicklung, Einführung und Nutzung von Informationssystemen<sup>2</sup> sowohl zu verstehen als auch zu gestalten.
- *Inhaltlich-funktionaler Auftrag eines Forschungsziels:* Liegt einem Forschungsziel ein inhaltlich-funktionaler Auftrag zugrunde, so ist dessen zentrales Ziel, z.B. eine automotive E/E Bordnetzarchitektur sowohl zu verstehen als auch zu gestalten oder E/E Baukästen zu entwickeln und in eine E/E Bordnetzarchitektur zu integrieren.

Ferner lassen sich Forschungsziele in Sach- und Formalziele unterscheiden. Sachziele beschreiben den Zweck der Forschung, wohingegen Formalziele die Leitplanken für die Erreichung der Sachziele festlegen [BECKER ET AL. 2003, S. 12].



Abbildung 2-4: Erkenntnis- und Gestaltungsziele mit unterschiedlichen Schwerpunkten, eigene Darstellung.

#### Ziele des Forschungsvorhabens

Die Forschungsziele der vorliegenden Arbeit entsprechen den zu erarbeitenden Antworten auf die im Kapitel 1.2.1 formulierten Forschungsleitenden Fragestellungen (vgl. Kapitel 1.2.1 und Abbildung 2-5). Wie zuvor beschrieben, lassen sich diese entweder als Erkenntnisziele oder Gestaltungsziele kategorisieren, die wiederum jeweils als Schwerpunkt einen methodischen oder inhaltlich-funktionalen Auftrag haben können (vgl. Abbildung 2-4).

Hinter beiden Forschungsfragen der Arbeit stehen, abhängig von der jeweiligen Betrachtungsebene, verschiedene Forschungsziele mit unterschiedlichen Schwerpunkten (vgl. Abbildung 2-5). Beide Forschungsleitenden Fragestellungen haben gemein, dass sie übergreifend ein inhaltlich-funktionales Gestaltungsziel verfolgen sowie als Teilziele sowohl Erkenntnisziele mit

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> "Bei Informationssystemen (IS) handelt es sich um soziotechnische ("Mensch-Maschine-") Systeme, die menschliche und maschinelle Komponenten (Teilsysteme) umfassen und zur Bereitstellung von Information und Kommunikation nach wirtschaftlichen Kriterien eingesetzt werden." [KRCMAR 2015, S.8].

inhaltlich-funktionalem und methodischem Auftrag als auch Gestaltungsziele mit methodischem Auftrag umfassen.

#### Forschungsfrage 1 Forschungsziele "Wie ist eine strukturgebende automotive Untersuchung und Gestaltung bzw. Modellierung der E/E Bordnetzarchitektur zu gestalten und (1) automotiven E/E BNA und modellseitig zu optimieren, in der alle E/E (2) E/E BNA gesteuerten E/E Baukastenentwicklung. Funktionen abgebildet werden können?" Gestaltungs-Erkenntnis-Auftrag des Forschungsziels ziel ziel Forschungsfrage 2 "Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, Methodischer Auftrag das spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren Inhaltlichautomotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit der strukturgebenden funktionaler **Auftrag** automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert?"

Abbildung 2-5: Forschungsziele des technologiegetriebenen Forschungsvorhabens, eigene Darstellung.

Die erste Forschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2.1), die nach der Art und Weise fragt, wie eine automotive E/E Bordnetzarchitektur (die alle E/E Funktionen umfasst) zu gestalten und modellseitig zu optimieren ist, hat das übergreifende inhaltlich-funktionale Gestaltungsziel eine automotive E/E Bordnetzarchitektur zu entwickeln, die alle zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen berücksichtigt. Diesem übergreifenden Ziel können weitere Teilziele unterstellt werden, zu denen die folgenden gehören:

- Zunächst sollte der Forscher verstehen, was eine automotive E/E Bordnetzarchitektur
  ist, was deren Umfeld bzw. Anwendungskontext ist, welche funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen, etc. dieser zugrunde liegen und welche Umfänge diese
  umfasst. Hierbei handelt es sich um ein Erkenntnisziel mit inhaltlich-funktionalem
  Auftrag.
- Im zweiten Schritt ist durch den Forscher zu erfassen, welche Methoden und Techniken bereits existieren und wie diese angewendet werden, welche dabei unterstützen, eine E/E Bordnetzarchitektur zu gestalten und modellseitig zu optimieren. Hier handelt es um ein Erkenntnisziel mit methodischem Auftrag.
- Sind die identifizierten Methoden und Techniken etc. nicht ausreichend, um das übergreifende inhaltlich-funktionale Gestaltungsziel zu erreichen, müssen in einem weiteren Schritt zusätzlich Methoden und Techniken erarbeitet werden respektive bestehende Methoden und Techniken verändert werden. In diesem Fall handelt es sich um ein Gestaltungsziel mit methodischem Auftrag, dessen Ergebnis ein notwendiges bzw. sinnvolles Set von Techniken und Methoden bildet, als Grundlage für die übergreifende Zielerreichung, eine automotive E/E Bordnetzarchitektur zu entwickeln.

Die zweite Forschungsfrage, die nach der Art und Weise fragt, wie ein Referenzmodell zu gestalten ist, das spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit der strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert, hat das übergreifende inhaltlich-funktionale Gestaltungsziel ein Referenzmodell für das Zusammenspiel einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur und E/E

Baukästen zu entwickeln, das alle zugrundeliegenden funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen berücksichtigt. Um dieses zu erreichen, kann das übergreifende Gestaltungsziel in mehrere Teilziele aufgegliedert werden. Dazu gehören die Folgenden:

- Im ersten Schritt sollte der Forscher verstehen, was automotive E/E Baukästen ausmacht, was deren spezifische Charakteristika, funktionale, nicht-funktionale Anforderungen sowie kritische Erfolgsfaktoren sind und wie automotive E/E Baukästen mit einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zusammenspielen. Folglich handelt es sich hierbei um ein Erkenntnisziel mit inhaltlich-funktionalem Auftrag.
- Im zweiten Schritt ist zu verstehen, welche Methoden und Techniken etc. bereits existieren, die bei der Gestaltung von E/E Baukästen und deren Harmonisierung mit automotiven E/E Bordnetzarchitektur unterstützen können und wie diese angewendet werden. Damit handelt es um ein Erkenntnisziel mit methodischem Auftrag.
- Sofern die im zweiten Schritt identifizierten Methoden und Techniken nicht genügen, um das übergreifende inhaltlich-funktionale Gestaltungsziel umzusetzen, sind in einem dritten Schritt adäquate Methoden und Techniken zu erarbeiten bzw. existente Methoden und Techniken anzupassen. Ist dieser dritte Schritt notwendig, handelt es sich um ein Gestaltungsziel mit methodischem Auftrag. Als Resultat wird ein zielführendes Set an Techniken und Methoden erarbeitet, welches die Grundlage zur übergreifenden Zielerreichung bildet, ein Referenzmodell für das Zusammenspiel einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen zu entwickeln (vgl. Kapitel 5 und 6).

# 2.1.3. Forschungsmethoden

Nach Definition von Grundposition und Forschungszielen lassen sich entsprechende Forschungsmethoden identifizieren. Dabei stellt die Orientierung an epistemologischer, ontologischer und linguistischer wissenschaftstheoretischer Grundposition den Gültigkeitsanspruch der durch den Einsatz von Forschungsmethoden erzielten Ergebnisse sicher. Ergänzend dient die Einbeziehung der Forschungsziele dazu, den eigentlichen Zweck der Forschung, das sogenannte Sachziel, inhaltlich durch den Einsatz der gewählten Forschungsmethoden zu erreichen und hierbei die bestehenden Rahmenbedingungen zur Erreichung der Sachziele, die sogenannten Formalziele (z.B. Kosten, Eigenschaften, Gewicht, Qualität, etc.), einzuhalten [BECKER ET AL. 2003, S. 12f.].

Neben der grundsätzlichen inhaltlichen Eignung der Forschungsmethode zur Erreichung des Sachziels, wird die Auswahlentscheidung maßgeblich durch die Anforderungen der Methoden an die zur Verfügung stehenden Ressourcen geprägt. Die Verfügbarkeit von Experten für Interviews oder vergleichbarer Untersuchungsfelder schränkt die Auswahl von Forschungsmethoden in vielen Fällen deutlich ein [BECKER ET AL. 2003, S. 13]. Die zur Erreichung des Sachziels der vorliegenden Arbeit getroffene Auswahl an Forschungsmethoden (Exploration) wird im Kapitel 2.3 näher erläutert. Zuvor wird im nachfolgenden Kapitel 2.2 das strukturgebende methodische Rahmenkonzept vorgestellt (gestaltungsorientierte Forschung).

# 2.2. Methodisches Rahmenkonzept des Forschungsvorhabens

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, besteht die wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit darin, den in Kapitel 1.1 fokussierten Ausschnitt der Realität (Untersuchungsgegenstand) – die automotive E/E Entwicklung bzw. genauer die automotive E/E Bordnetzarchitektur und Baukastenentwicklung – zu verstehen, zu erklären und zu gestalten [Heinen 1976, S. 368]. Die identifizierten, dedizierten Eigenschaften und Charakteristika dienen zur weiteren Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands der automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung [SCHÜTTE 1999, S. 215].

Für die Analyse des o.g. Untersuchungsgegenstands anhand der in Kapitel 2.1.1 definierten Forschungsfragen, bietet sich die gestaltungsorientierte Forschung (Design Science) als Forschungsrahmen (methodisches Rahmenkonzept) an [Becker/Pfeiffer 2006; Frank 2006; Hevner et al. 2004; Schauer/Frank 2007], da sich diese mit der Gestaltung von Phänomenen der unternehmerischen Praxis – automotive E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten – beschäftigt [Becker/Pfeiffer 2006, S. 3; March/Smith 1995, S. 253ff.]. Darüber hinaus eignet sich die gestaltungsorientierte Forschung für den betrachteten Untersuchungsgegenstand besonders, da in der Literatur bisher keine umfassende Auseinandersetzung mit übergreifenden Konzepten oder Modellen zur Kostenoptimierung einer E/E Bordnetzarchitektur und einer darauf aufbauenden E/E Baukastengestaltung für die Automobilindustrie existiert [Broy et al. 2011, S. 42 ff; Brandt et al. 2012, S. 737].

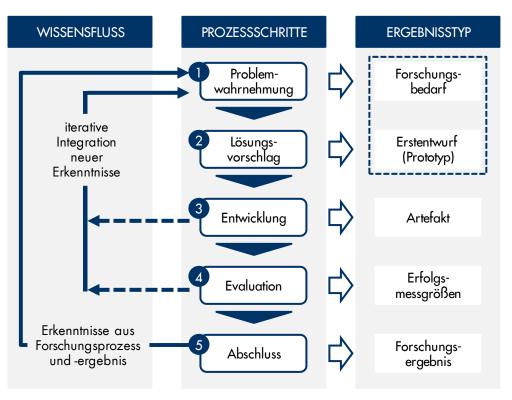


Abbildung 2-6: Gestaltungsprozess im Design Science [VAISHNAVI/KUECHLER 2004, O.S.].

Die gestaltungsorientierte Forschung beschäftigt sich mit der Schaffung und Gestaltung von kontextbezogenen Artefakten [MARCH/SMITH 1995, S. 253ff.; SIMON 1996, S. 111], wobei die übergreifende Zielsetzung in der Lösung eines Problemsachverhalts liegt. Der Problemsachverhalt muss einer praktischen Relevanz sowie einem nutzenstiftenden, in der Praxis verwertbaren Charakter unterliegen [HEVNER ET AL. 2004, S. 84f.]. Der in Abbildung 2-6 dargestellte

Gestaltungsprozess im Design Science versteht sich als Suche nach der optimalen Lösung auf Basis von fünf Prozessschritten, die im Folgendem erläutert werden [VAISHNAVI/KUECHLER 2004, o. S.].

Ausgangspunkt der gestaltungsorientierten Forschung bildet die Problemwahrnehmung im ersten Prozessschritt, also die Identifikation des Forschungsbedarfs. Letzterer begründet sich im Design Science aus dem Vorliegen von betriebswirtschaftlichen Anforderungen, die im Spannungsfeld von Mensch, Organisation und Technologie entstehen, d.h. vornehmlich im Umfeld der realen unternehmerischen Praxis [Hevner/March 2003, S. 112]. Mit dieser Orientierung an der unternehmerischen Praxis wird die Relevanz der Forschung gewährleistet [Hevner et al. 2004, S. 84f.]. Der Arbeit liegt die Wahrnehmung des Problems zugrunde, dass im wissenschaftlichen und praktischen Schrifttum bisher keine umfassende Auseinandersetzung mit übergreifenden Modellen zur Kostenoptimierung einer E/E Bordnetzarchitektur und einer darauf aufsetzenden E/E Baukastengestaltung für die Automobilindustrie vorliegt, jedoch Bedarf in der Praxis besteht, um aus den Herausforderungen der Makroumwelt resultierenden Innovations- und Kostendruck, Komplexität und Variantenvielfalt beherrschbar zu machen (vgl. Kapitel 1.1).

Im engen Zusammenhang mit Problemwahrnehmung und identifiziertem Forschungsbedarf folgt im zweiten Prozessschritt die Erarbeitung eines entsprechenden Lösungsvorschlags. Dieser zweite Prozessschritt erfolgt in der Regel mittels kreativer Maßnahmen zur Begriffsbildung und Bereitstellung neugestalteter Artefakte. Dazu werden zunächst bestehende Ergebnisse, etwa des wissenschaftlichen Schrifttums, daraufhin überprüft, ob bereits entsprechende Artefakte zur Lösung des wahrgenommenen Problems zur Verfügung stehen oder Artefakte, die als Grundlage für die Erarbeitung eines Lösungsvorschlags herangezogen werden können [HEVNER ET AL. 2004, S. 81]. Die nähere Analyse des wahrgenommenen Problems sowie eine darauf aufbauende Ableitung von Anforderungen und Zielen, helfen dabei, dessen Komplexität beherrschbar zu machen und den Aufwand für die spätere Evaluation des Artefakts effektiv zu reduzieren [PEFFERS ET AL. 2006, S. 89]. Der in der Arbeit zu entwickelnde Lösungsvorschlag besteht in der Gestaltung eines Optimierungsmodells zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, um eine baureihenübergreifende E/E Bordnetzarchitektur als strukturgebende Basis für die weitere E/E Baukastengestaltung und -integration zu schaffen. Dies ergänzend wird ein Referenzmodell konstruiert, um einen Rahmen für das Zusammenspiel der E/E Bordnetzarchitekturentwicklung und E/E Baukastengestaltung für den Anwendungskontext der Automobilindustrie vorzuschlagen.

Der so erarbeitete Lösungsvorschlag wird im dritten Prozessschritt der Entwicklung umgesetzt, in welchem das Artefakt konstruiert wird. Dabei werden nach Möglichkeit Gestaltungsempfehlungen induktiv von bestehenden Erkenntnissen, Teillösungen, Methoden und Theorien abgeleitet, um den Konstruktionsaufwand gering zu halten und eine hohe Qualität des Artefakts zu erzielen [Hevner et al. 2004, S. 80; Peffers et al. 2006, S. 90; Rosemann/Schütte 1997, S. 17]. Um die notwendige Praxisrelevanz und Neuartigkeit der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Artefakte (Optimierungsmodell, vgl. Kapitel 5 und Referenzmodell, vgl. Kapitel 6) sicherzustellen, werden zusätzlich kontinuierlich Experten aus der Praxis der automotiven E/E Entwicklung in den Gestaltungsprozess mit einbezogen. Zudem wird die Eignung auf Anwendbarkeit der Artefakte in der Praxis dadurch erhöht, dass der Anwendungskontext der automotiven E/E Entwicklung empirisch untersucht wird und bestehende Anforderungen an die Gestaltung des Optimierungsmodells und des Referenzmodells identifiziert, analysiert und berücksichtigt werden.

Nach Abschluss der Entwicklungsphase folgt im vierten Prozessschritt die Evaluation des Artefaktes, um gegebenenfalls in iterativen Überarbeitungsschritten eine fortwährende Verbesserung des jeweiligen Entwicklungsstandes zu erreichen. Dabei wird angestrebt, sowohl Nutzen und Qualität als auch Wirksamkeit des Artefakts auf Erfüllung der zugrunde liegenden Zielsetzung zu überprüfen [Hevner et al. 2004, S. 85f.]. Daher ist die Anzahl der Iterationen nicht statisch vorgegeben. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Evaluation der zu entwickelnden Artefakte (Optimierungsmodell und Referenzmodell) vornehmlich über die Einbeziehung von Case Studies und Expertenwissen aus der betrieblichen Anwendung der automotiven E/E Entwicklung. Die gesamthaften Schlussfolgerungen aus einem Evaluationsschritt fließen in die Iteration zur Optimierung des Artefaktes ein.

Nach erfolgreicher Beendigung der Evaluation folgt der fünfte und letzte Prozessschritt des Abschlusses, mit dem der dargestellte Gestaltungsprozess im Design Science als vollendet betrachtet wird. Voraussetzung für den erfolgreichen Abschluss ist die Erzielung des Forschungsergebnisses. Dies gilt als erreicht, wenn das konstruierte Artefakt als vollständig angesehen wird, d.h. damit das originär wahrgenommene Problem gelöst werden kann. Wie auch in der vorliegenden Arbeit, kann dieses Ziel bspw. mit der Konstruktion eines Optimierungs- oder Referenzmodells erreicht werden [Hevner et al. 2004, S.86f.]. Ist ein Gestaltungsprozess im Design vollständig abgeschlossen (z.B. in Form eines Referenzmodells, vgl. Kapitel 4.3), so können gewonnene Erkenntnisse aus Forschungsprozess und -ergebnis für mögliche darauf aufbauende Forschungsvorhaben analysiert und zusammengefasst werden (z.B. für die Wiederverwendung eines Referenzmodells, vgl. Kapitel 4.3).

# 2.3. Methoden des Forschungsvorhabens

Der innerhalb der vorliegenden Arbeit betrachtete Untersuchungsgegenstand der automotiven E/E Entwicklung im Allgemeinen und der Gestaltung von automotiven E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen im Speziellen, zeichnet sich u.a. durch folgende spezifische Eigenschaften und Charakteristika aus:

- exponentielles Wachstum von E/E Umfängen in Automobilen,
- rasche Weiterentwicklung von E/E-basierten Technologien,
- hohe E/E Innovationsdichte,
- kurze Lebenszyklen von E/E Umfängen im Vergleich zu Fahrzeuglebenszyklen,
- hohe Komplexität wie Variantenvielfalt von E/E Umfängen und E/E Gesamtsystem,
- unzureichende Existenz wissenschaftlicher Erkenntnisse bzw. Dokumentationen.

Insbesondere der zuletzt aufgezählte Punkt – die unzureichende Existenz wissenschaftlicher Erkenntnisse bzw. Dokumentationen – verlangt eine gewisse Flexibilität und Offenheit bei der Auswahl der Forschungsmethode, die bei der Beantwortung der zugrundeliegenden Forschungsfragen unterstützen soll (vgl. Abbildung 2-5). Aus diesem Grund wird die Exploration als Forschungsmethode herangezogen, die auch als erkundende Forschung bezeichnet wird. Die Exploration eignet sich besonders für die Sammlung von Informationen über einen gering erforschten Untersuchungsgegenstand mit starkem Praxisbezug und lässt dabei dem Untersuchenden relativ große Freiräume [BORTZ/DÖRING 2015, S. 54 und S. 354]. Eine Prüfung der

gebildeten Hypothesen findet innerhalb der explorativen Forschung nicht statt [ULRICH 1981, S. 19].

# 2.3.1. Explorative Forschung (Exploration)

Die Exploration bildet eine von drei Untersuchungsmethoden der empirischen Forschung<sup>3</sup> [ATTESLANDER 2003, S. 21ff.; BORTZ/DÖRING 2015, S. 360ff.; JUNGINGER, 2005 S. 7; TÖPFER 2010, S. 151ff.], welche sich besonders für die Bildung wissenschaftlicher und technologischer Theorien in der angewandten Forschung eignet. Dabei erkundet die explorative Forschung den Untersuchungsgegenstand bzw. Anwendungskontext: Durch ein mehr oder weniger systematisches Sammeln von Informationen wird eine Wissensbasis geschaffen, um entsprechende wissenschaftliche und technologische Theorien sowie Hypothesen bilden zu können [BORTZ/DÖRING 2015, S. 352ff.; TÖPFER 2010, S. 153]. Dabei werden folgende vier Vorgehensweisen unterschieden [BORTZ/DÖRING 2015, S. 358ff; JUNGINGER, 2005 S. 7]:

- Theoriebasierte Exploration: In der Fachliteratur bestehende Theorien und Modelle werden durch systematische Literaturrecherche analysiert und miteinander verglichen, um daraus, durch systematische Synthese und Integration, neuartige Erkenntnismodelle abzuleiten [BORTZ/DÖRING 2015, S. 358ff].
- *Methodenbasierte Exploration:* Im untersuchten Anwendungskontext bereits existierende Methoden und Erkenntnisse werden überprüft und reflektiert, um Zusammenhänge und Unterschiede durch Vergleich und Variation von Methoden transparent zu machen [BORTZ/DÖRING 2015, S. 365ff.].
- Qualitativ-empirische Exploration: Zusammenhänge und Handlungsanforderungen werden identifiziert, dargestellt und erläutert, um Theorien ableiten zu können. Dieses Vorgehen ist für den unzureichend erforschten Untersuchungsgegenstand von besonderer Wichtigkeit, da dadurch maßgeblich zum Verständnis der Sachverhalte und Zusammenhänge auf Grundlage des erhobenen Datenmaterials beigetragen wird [BORTZ/DÖRING 2015, S. 380; JUNGINGER, 2005 S. 7].
- Quantitativ-empirische Exploration: Identifikation von Effekten, Zusammenhängen und Unterschieden auf Basis von quantitativen Daten, um Hypothesen und Theorien ableiten zu können. Dazu können quantitative Daten, d.h. empirische Erkenntnisse in einer messbaren, d.h. in Zahlen darstellbarer Form, aus verschiedenen Quellen verwendet werden: Bestandsdaten (z.B. wissenschaftliche Studien), durch Dritte generierte Daten oder durch die Forscherin erhobene Daten [BORTZ/DÖRING 2015, S. 371ff.].

Im Kontext der vorliegenden Arbeit werden im Schwerpunkt theoriebasierte und qualitativempirische Exploration angewendet (vgl. Abbildung 2-7), da gemäß *Myers* ein Untersuchungsgegenstand mit explorativem Charakter nicht zwingend an dedizierte Methoden gebunden sein muss [MYERS 1997, S. 3f.]. Zudem eigenen sich zur Identifikation und Sammlung noch unerforschter Sachverhalte und Zusammenhänge nach LAMNEK qualitative Verfahren mit offenen sowie flexiblen Erhebungsinstrumenten besonders gut [LAMNEK 2005, S. 105]. Dies geschieht mit dem Ziel, nützliche Ansätze zur Gestaltung der Modelle zu identifizieren, die erarbeitet

Die **empirische Forschung** lässt sich prinzipiell in drei Untersuchungstypen differenzieren: explorative, explanative (Prüfung von Theorien und Hypothesen) und deskriptive Forschung (beschreibende Forschung) [ATTESLANDER 2003, S. 21ff.; BORTZ/DÖRING 2015, S. 360ff.; JUNGINGER 2005, S. 7].

werden sollen. Zu diesem Zweck werden sowohl existierende Theorien, Modelle, Methoden als auch Zusammenhänge und Handlungsanforderungen in Fachliteratur sowie der unternehmerischer Praxis analysiert, die Relevanz für den hier betrachteten Untersuchungsgegenstand und somit für den Gestaltungsprozess der Arbeit aufweisen.



Abbildung 2-7: Vier Vorgehensweisen der explorativen Forschung, eigene Darstellung.

# 2.3.2. Theoriebasierte Exploration

Bei der theoriebasierten Exploration werden im ersten Schritt wissenschaftliche Theorien über eine fundierte Literaturrecherche untersucht, um so einen Überblick über das Forschungsfeld zu erlangen [BORTZ/DÖRING 2015, S. 358]. Im zweiten Schritt werden aus dem so geschaffenen Grundlagenwissen über Synthese und Integration neue Erkenntnismodelle erarbeitet. Grundlegend ist dabei die Aufarbeitung und Bewertung bestehender Theorien sowie die Sammlung von Expertenwissen für den betrachteten Untersuchungsgegenstand auf Basis systematischer Literaturrecherche. Ferner sind eigene Ideen, die sich bei der Aufarbeitung der Theorien ergeben haben und Theorieanregungen aus Diskussionsteilen und Ausblicken der geprüften Literatur inkl. Vorschlägen zur Integration dieser theoretischen Fragmente zu dokumentieren. Als Ergebnis der theoriebasierten Exploration können eigene Theorien inkl. Modellen der eigenen Theorie abgeleitet werden, um diese sodann in Metatheorien einzuordnen. Zudem sind Vorschläge zur empirischen Theorieprüfung zu erarbeiten [BORTZ/DÖRING 2015, S. 359].

Die Erkenntnisse aus theoriebasierter Exploration für den untersuchten Anwendungskontext der automotiven E/E Entwicklung fließen zunächst in die Generierung der Problemorientierung mit ein. Ferner werden diese für die Erarbeitung der Grundlagenkapitel 3 "*Grundlagen der automotiven E/E Entwicklung*" und 4 "*Grundlagen und methodisches Vorgehen zur Modellbildung*" genutzt und dort dokumentiert. Die gewonnenen Erkenntnisse legen damit den Grundstein für die Modellbildung eines Optimierungsmodells in Kapitel 5 "Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Architektur" und eines Referenzmodells in Kapitel 6 "*Modell für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung respektive Weiterentwicklung*".

Optimierungsmodelle sind Gegenstand des Operations Research. Dies ist ein interdisziplinärer Wissenschaftszweig, der durch die Zusammenarbeit der drei Fachgebiete Angewandte Mathematik, Wirtschaftswissenschaften und (Wirtschafts-) Informatik geprägt und als ein Teilgebiet der Wirtschaftswissenschaften eingeordnet ist [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 19f.]. Operations Research befasst sich mit quantitativen Modellen und Methoden. Dabei werden komplexe Problemsachverhalte mit Praxisbezug wie Optimierungsprobleme im Kontext von Planungsprozessen analysiert, um so die Generierung von Entscheidungsgrundlagen mittels (mathematischer) Modelle, also abstrakter Optimierungs- und Simulationsmodelle vorzubereiten [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 19f.; DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 1; SUHL/MELLOULI 2009, S. 5]. Die resultierenden Optimierungs- bzw. Simulationsmodelle werden unter Anwendung von Optimierungsverfahren bzw. -methoden (Algorithmen) gelöst (vgl. Abbildung 4-2)

[KISTNER 2003, S. 3; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 461]. Die Optimierungsmodellbildung inkl. Optimierungsproblemen und -modellen sowie Optimierungsverfahren und -methoden zu Modelllösung werden im Grundlagenkapitel 4.2 weiter vertieft (vgl. Kapitel 4.2).

Referenzmodelle unterstützen Analyse, Entwurf, Implementierung sowie Wartung von unternehmensspezifischen Informationssystemen [FETTKE 2008, S. 180]. Diese Modellkategorie bildet, gemäß dem Kriterium der inhaltlichen Individualität, selbst eine Sonderform von Informationsmodellen und weist somit grundsätzlich auch deren Kerncharakteristikum auf: Die Beschreibung von Strukturen sowie Beziehungen von Informationssystemen [LOOS/SCHEER 1995, S. 185; SCHARL 1997, S.12]. Dabei heben sich Referenzmodelle in der Hauptsache durch ihre inhaltliche Reichweite und ihren hohen Qualitätsanspruch von unternehmensspezifischen Informationsmodellen ab [ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S.16f.]. Die Referenzmodellbildung inkl. Typen von Referenzmodellen sowie die Referenzmodell-Wiederverwendung wird im Grundlagenkapitel 4.3 betrachtet (vgl. Kapitel 4.3).

# 2.3.3. Qualitativ-empirische Exploration

Ergänzend zur theoriebasierten Exploration wird in der vorliegenden Arbeit die qualitativempirische Exploration genutzt: Als Verfahren zur Erhebung des Datenmaterials wird vornehmlich die mündliche Befragung (Experteninterview) gewählt [MAYRING 2002, S. 66f; GLÄSER/LAUDEL 2010, S. 111; BORTZ/DÖRING 2015, S. 237ff.]. Dabei wird im Speziellen die qualitative Technik des semi-strukturierten, problemzentrierten Interviews ausgewählt, da sich diese Technik gemäß MAYRING, aufgrund des explorativen Charakters, besonders gut für die theoriebasierte Forschung im Kontext der automotiven E/E Entwicklung eignet [MAYRING 2002, S. 70].

Unter semi-strukturierten, problemzentrierten Interviews lassen sich alle Formen der offenen, semi-strukturierten Befragung zusammenfassen [MAYRING 2002, S. 67; FLICK 2011, S.203ff.]. Diese Interviewtechnik findet in erster Linie für Befragungssituationen Anwendung, in denen bereits einiges Wissen über den Befragungsgegenstand vorliegt [MAYRING 2002, S. 67].

Bei der Durchführung eines semi-strukturierten problemzentrierten Interviews verfährt die befragende Person (Forscher) nicht nach einem vorgegebenen Fragenkatalog zur Strukturierung der Befragung. Vielmehr können, je nach Situation und Klärungsbedarf, Fragen oder Themen frei formuliert werden [MAYRING 2002, S. 67], d.h. sowohl inhaltliche als auch zeitliche Abfolge der gestellten Fragen liegen im Ermessen des Interviewers [DIEKMANN 2007, S. 531f.].

Im Verlauf der Befragung lässt der Interviewer den Befragten (Experten) möglichst frei zu Wort kommen, um dem Interview den Charakter eines offenen Gesprächs zu verleihen. Dadurch kann der Interviewer besser auf den Experten eingehen, um für den Untersuchungsgegenstand relevante Informationen zu erhalten [GLÄSER/LAUDEL 2010, S. 178ff.]. Ergänzend führt der Interviewer eine oder mehrere bestimmte Problemstellungen respektive Fragestellungen ein, auf die im Gesprächsverlauf immer wieder zurückgekommen wird.

Die mit den semi-strukturierten, problemzentrierten Interviews erhobenen Inhalte (Rohdaten), die neben konkreten Expertenaussagen u.a. auch schwer interpretierbare, irrelevante und widersprüchliche Informationen umfassen können, werden mittels Gedächtnisprotokollen und Interviewberichten dokumentiert [GLÄSER/LAUDEL 2010, S. 43f]. Diese Rohdaten fungieren als Grundlage für den anschließenden Auswertungsprozess [GLÄSER/LAUDEL 2010, S. 192].

Die Auswertung des semi-strukturierten, problemzentrierten Interviews erfolgt mittels Techniken der qualitativen Inhaltsanalyse [MAYRING 2002, S. 67; TÖPFER 2010, S. 241], die sich, gemäß GLÄSER und LAUDEL, als Auswertungsmethode von Experteninterviews eignet [GLÄSER/LAUDEL 2010, S. 46]. Der Grundgedanke dieser Technik ist, Texte, wie die in der vorliegenden Arbeit erstellten Gedächtnisprotokolle und Interviewberichte, systematisch zu analysieren, um das vorliegende Material sukzessive kontextsensitiv zu interpretieren und anschließend einzelne Aussagen miteinander in Beziehung setzen zu können [MAYRING 2002, S. 114]. Dabei lassen sich drei Grundformen der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING unterscheiden [MAYRING 2002, S. 115ff; DIEKMANN 2007, S. 607ff.]:

- **Zusammenfassung:** Paraphrasierung von Textmaterial, wobei dieses auf die wesentlichen Inhalte reduziert wird.
- *Explikation:* Ergänzung des Daten- oder Textmaterials um zusätzliche Kontextinformationen zur Verbesserung des Verständnisses sowie der Interpretation einzelner Textstellen.
- **Strukturierung:** Extraktion bestimmter formaler Aspekte, inhaltlicher Merkmale, Muster und Strukturen des Daten- oder Textmaterials sowie dessen Analyse, basierend auf festgelegten (Ordnungs-) Kriterien.

Für das Forschungsvorhabens nutz die Forscherin alle drei Grundformen, im Speziellen aber die Explikation und Strukturierung zur qualitativen Inhaltsanalyse der Experteninterviews. Besondere Konzentration liegt dabei auf der Ergänzung des erhobenen Textmaterials, um notwendige Kontextinformationen und die Identifikation bestimmter Muster, charakterisierender Merkmale, Ausnahmen sowie inhaltlicher Lücken zu identifizieren, die sich aus dem Gesamtzusammenhang ergeben [DIEKMANN 2007, S. 613]. Im Anschluss an die methodische Erhebung und Analyse des Daten- und Textmaterials der empirischen Untersuchung wird dieses unter Berücksichtigung der jeweils zugrunde liegenden Zielsetzung interpretiert. Die so gewonnen Erkenntnisse fließen zweckgerichtet in die Gestaltungsprozesse der vorliegenden Arbeit ein.

Die im Kontext der vorliegenden Arbeit durchzuführenden Interviews erfolgen mit Experten der E/E Entwicklung in der Automobilindustrie sowie Vertretern internationaler Strategieberatungen. Dazu werden sowohl Einzelgespräche als auch Workshops mit mehreren Teilnehmern durchgeführt. Aufgrund der sensiblen Inhalte und geltenden Geheimhaltungsvorschriften behält sich die Forscherin vor, weder Namen oder Funktion der befragten Experten noch dedizierte Gesprächsverläufe, in Form von Gedächtnisprotokollen oder Interviewberichten, zu veröffentlichen. Vielmehr fließen die reflektierten Ergebnisse aus den Interviews unmittelbar in die Gestaltung und Validierung des Optimierungsmodells zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (Kapitel 5) und des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung (Kapitel 6) ein: Dieses Vorgehen erfolgt in mehreren Iterationsschritten, jeweils unter gezielter Einbeziehung dedizierter Experten aus der Praxis. Mit Berücksichtigung ihrer Kompetenz, d.h. Fachwissen, Sachverstand, Qualifikation, Einschätzungsvermögen, etc., werden inhaltliche Konsistenz und Stimmigkeit sowie Praxisbezug und -nutzen der Ergebnisse gewährleistet. Zusammenfassend ist ein Ziel der Forscherin im Kontext des Forschungsvorhabens über qualitativ-empirische Forschung Anforderungen und Rahmenbedingungen hinsichtlich der architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung zu identifizieren, zu analysieren, welche dann in die entsprechende Modellgestaltung einfließen sollen (vgl. Kapitel 6).

# 2.4. Zusammenfassung

In Kapitel 2 wird das forschungsmethodische Design gemäß Design Science hergeleitet, welches dem Forschungsvorhabens zugrunde gelegt wird.

#### Wissenschaftstheoretischer Ordnungsrahmen

Für das Forschungsvorhaben wird der Ordnungsrahmen nach Becker et al. herangezogen, um den Entwurf des Forschungsdesigns sowie die Auswahl von Forschungsmethoden zu unterstützen. Diesem Ordnungsrahmen liegt die Hypothese zugrunde, dass eine Auswahl der Forschungsmethoden auf Basis von Grundpositionen und Forschungszielen des Forschers getroffen wird. Die Grundposition der vorliegenden Forschungsarbeit entspricht der des kritischen Rationalismus, d.h. einer objektivistischen epistemologischen und kritisch realistischen ontologischen sowie linguistischen Grundposition, in der eine intersubjektive Verständigung über das Forschungsvorhaben vom Forscher als möglich erachtet wird.

Die Forschungsziele des Forschungsvorhabens sind Antworten bzw. Lösungsvorschläge für die zwei formulierten Forschungsleitenden Fragestellungen:

- **Forschungsfrage 1:** Wie ist eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren, in welcher komplexe E/E Funktionen vollständig abgebildet werden können?
- Forschungsfrage 2: Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert?

Beide Fragestellungen haben dabei zwei Dinge gemein: Sie verfolgen ein inhaltlich-fachliches Gestaltungsziel und umfassen als Teilziele sowohl Erkenntnisziele mit inhaltlich funktionalem und methodischem Auftrag als auch Gestaltungsziele mit methodischem Auftrag.

#### Methodisches Rahmenkonzept des Forschungsvorhabens

Die übergreifende wissenschaftliche Zielsetzung des Forschungsvorhabens liegt darin den im einleitenden Kapitel fokussierten Ausschnitt der Realität (Untersuchungsgegenstand) – die automotive E/E Entwicklung bzw. die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung – zu verstehen, zu erklären und zu gestalten. Als methodisches Rahmenkonzept wird dazu die gestaltungsorientierte Forschung (Design Science) ausgewählt, da sich diese mit der Gestaltung von Phänomenen der unternehmerischen Praxis – automotive E/E Entwicklung inkl. der E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung – beschäftigt. Entsprechend orientiert sich das Forschungsvorhaben an der Design Science, welche folgende fünf Prozessschritte beinhaltet: die Problemwahrnehmung, aus der sich der Forschungsbedarf ableitet, der Lösungsvorschlag mit Ergebnistyp eines Erstentwurfs, die Entwicklung, im Rahmen derer kontextbezogene Artefakte geschaffen und gestaltet werden, die Evaluation der Artefakte anhand von Erfolgsmessgrößen sowie der Abschluss, in welchem die Forschungsergebnisse zusammengefasst werden.

#### Methoden des Forschungsvorhabens

Die Auswahl der Methoden für das Forschungsvorhaben basiert auf der Betrachtung spezifischer Eigenschaften und Charakteristika der automotiven E/E Entwicklung im Allgemeinen und der Gestaltung von automotiver E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen im Speziellen. Diese Betrachtung führt zur Notwendigkeit einer gewissen Flexibilität und Offenheit bei der Auswahl der Forschungsmethoden, die bei der Beantwortung der zugrundeliegenden Forschungsleitenden Fragestellungen unterstützen. Daher wird die Exploration als Forschungsmethode herangezogen, als eine von drei Untersuchungsmethoden der empirischen Forschung.

Die Exploration eignet sich zur Bildung wissenschaftlicher und technologischer Theorien in der angewandten Forschung. Das Forschungsvorhaben wendet dabei zwei von vier Vorgehensweisen der explorativen Forschung an: die theoriebasierte Exploration und die qualitativempirische Exploration. Beide Vorgehensweisen ergänzen sich und unterstützen dabei den o.g. Untersuchungsgegenstand zu erklären und zu gestalten. Die reflektierten Erkenntnisse aus der theoriebasierten Exploration für den untersuchten Anwendungskontext der automotiven E/E Entwicklung fließen darin ein. Ferner werden diese für die Erarbeitung der Kapitel 3 "Grundlagen der automotiven E/E Entwicklung" und 4 "Grundlagen und methodisches Vorgehen zur Modellbildung" genutzt sowie dort erläutert. Die gewonnenen Erkenntnisse legen damit den Grundstein für die Modellbildung des Optimierungsmodells in Kapitel 5 "Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Architektur" und eines Referenzmodells in Kapitel 6 "Modell für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung respektive Weiterentwicklung".

Mittels qualitativ-empirischer Forschung werden Anforderungen und Rahmenbedingungen der architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung identifiziert, analysiert und bei der Modellgestaltung berücksichtigt. Die reflektierten Ergebnisse aus der qualitativ-empirischen Exploration fließen unmittelbar in die Gestaltung und Validierung des Optimierungsmodells zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (Kapitel 5) und des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung (Kapitel 6) ein: Dieses Vorgehen erfolgt in mehreren Iterationsschritten, jeweils unter gezielter Einbeziehung dedizierter Experten aus der Praxis (Experteninterviews und -workshops). Mit Berücksichtigung ihrer Kompetenz, d.h. Fachwissen, Sachverstand, Qualifikation, Einschätzungsvermögen, etc. werden inhaltliche Konsistenz und Stimmigkeit sowie Praxisbezug und -nutzen der Ergebnisse gewährleistet.

# 3. Grundlagen der automotiven E/E Entwicklung

Anknüpfend an Kapitel 1.1, in dem die Einführung inkl. Motivation für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung hergeleitet wurde, führt dieses Kapitel die für die Arbeit zentralen technischen Begriffe im Kontext der automotiven E/E Entwicklung ein und hebt die entsprechend geltenden Definitionen hervor. Den Schwerpunkt der Betrachtung bilden dabei die automotive E/E Bordnetzarchitektur (E/E BNA) sowie E/E Baukästen (E/E BK) (vgl. Kapitel 1.2.2). Beide werden in der Fachliteratur als besonders geeignete Maßnahmen zur Optimierung der Produktstruktur variantenreicher Produkte bewertet, da diese einen wesentlichen Beitrag zur Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt und Aufwandsreduzierung leisten können (vgl. Kapitel 1.1) [JESCHKE 1997, S. 50; RENNER 2007, S. 49].

Die E/E Bordnetzarchitektur ist als strukturgebendes Element des E/E Gesamtsystems zu betrachten, welches aus technischen Teilsystemen bzw. E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten besteht (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 3.1). Der Entwicklungsprozess einer E/E Bordnetzarchitektur zeichnet sich durch eine Vielschichtigkeit aus: Abhängig von Klasse, Ausstattung und Konfigurierbarkeit eines Fahrzeugs sind dabei eine Vielzahl von E/E Umfängen inkl. Varianten zu berücksichtigen und entsprechend unterschiedliche Komplexitätsgrade zu beherrschen. Zur Unterstützung dieses Prozesses wurde bspw. innerhalb eines Forschungsprojekts des Karlsruher Forschungszentrums Informatik (FZI) und der Daimler AG, ein Konzept zur Modellierung von automotiven E/E Bordnetzarchitektur erarbeitet, das die einzelnen Gestaltungsschritte in mehrere Systemebenen unterteilt [HILLENBRAND 2012, S.87; MATHEIS 2009, S.7; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 16]. Das Kapitel 3.1 greift dieses Modell auf, beschreibt dessen Systemebenen und stellt die für den Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit relevanten Umfänge, Funktionen (vgl. Kapitel 3.2), Software (vgl. Kapitel 3.3) und Steuergeräte (vgl. Kapitel 3.4) heraus. Dazu ergänzend werden in Kapitel 3.5 automotive E/E Bordnetzarchitektur -Konzepte vorgestellt.

Der Baukastenbegriff bzw. die Baukastenbauweise wird in Kapitel 3.6 zunächst allgemein als klassisches Konstruktionsprinzip vorgestellt, um dieses dann für den Untersuchungsgegenstand der automotiven E/E Entwicklung zu adaptieren. Neben der Schaffung einer grundsätzlichen Begriffsdefinition und Darlegung von Spezifika automotiver E/E Baukasten werden Voraussetzungen für deren rückwärts- und vorwärtskompatiblen sowie baureihenübergreifenden Einsatz im Automobil diskutiert.

# 3.1. Automotive E/E Bordnetzarchitektur

Eine automotive E/E Bordnetzarchitektur (E/E BNA) ist die Struktur des E/E Gesamtsystems im Automobil, welche alle E/E Funktionen<sup>1</sup> respektive E/E Komponenten<sup>2</sup> beinhaltet. Dazu

Eine (softwarebasierte) E/E Funktion bildet einen dedizierten, abstrakten Ursache-Wirkungszusammenhang ab. Damit beschreibt diese ein technisches Eingabe- und/oder Ausgabeverhalten bezogen auf ein Ereignis oder kontinuierliche Eingangsgrößen. Letzteres bedeutet, dass die Eingangsgrößen im Sinne einer mathematischen Funktion direkt mit den Ausgangsgrößen verknüpft sind. Hervorzuheben ist, dass eine Funktion prinzipiell unabhängig von der jeweiligen physikalischen Implementierung ist [JAENSCH 2012, S. 14f.; REIF 2009, S. 56; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 14].

Nach JAENSCH ist eine **E/E Komponente** definiert als "[...]elektrische und/oder elektronische Komponente (auch als mechatronische Komponente in Verbindung mit der Mechanik), welche eine bestimmte Funktionalität im Fahrzeug umsetzt." Wobei unter einer Komponente "[...] eine physische Aggregation von

gehören die Software-Komponenten (Software-Komponenten) und Hardware-Komponenten (Hardware-Komponenten) inklusive deren Vernetzung [Burgdorf 2010, S. 73; Nörenberg 2012, S. 20]. Genauer wird als automotive E/E Bordnetzarchitektur das Produkt der logischen Partitionierung aller kundenerlebbaren E/E Funktionen im Bordnetz (Funktions- und Softwarearchitektur) definiert. Dies schließt die Vernetzungstopologie und Bussysteme zur Datenkommunikation (Daten- und Kommunikationsarchitektur) sowie zur Verwaltung des Energiebordnetzes (EBN) und damit der Energieversorgung mit ein [Broy et al. 2011; S. 44; Reif 2009, S. 241; Streichert/Traub 2012, S. 16; Wallentowitz/Reif 2010, S. 188ff.].

Definition automotive E/E BNA:

Die automotive E/E Bordnetzarchitektur (E/E BNA) ist das Produkt der logischen Partitionierung aller E/E Funktionen im Bordnetz inklusive der Vernetzungstopologie zur Datenkommunikation sowie Energieversorgung im Fahrzeug.

Die Partitionierung ist die Verortung einer E/E Funktion mit der dazugehörigen Software- und Hardware-Komponente in mindestens einem Steuergerät [BURGDORF 2010, S. 74; BORGEEST 2014, S. 53; Reif 2009, S. 94; Streichert/Traub 2012, S. 16; Wallentowitz/Reif 2010, S. 201]. Die Vernetzungstopologie der E/E Bordnetzarchitektur, auch Vernetzungsarchitektur genannt, bezeichnet die Art der Vernetzungsstruktur von verschiedenen Systemkomponenten, z.B. die zwischen einem Steuergerät und den dazugehörigen Sensoren sowie Aktoren [Reif 2010, S. 108ff.; Streichert/Traub 2012, S. 16; Wallentowitz/Reif 2010, S. 189]. Das Energiebordnetz (EBN) inkl. Energiemanagement ist Systembestandteil der E/E Bordnetzarchitektur und gewährleistet die ausreichende Versorgung aller E/E Komponenten im Automobil mit elektrischer Energie [Broy et al. 2011, S. 43]. Quellen für die elektrische Energieerzeugung bzw. -bereitstellung sind dabei i.d.R. Generator, Nieder- oder Hochvoltspeicher (Batterien) [Burgdorf 2010, S. 26; Borgeest 2014, S. 20; Reif 2009, S. 209]. Letztgenannter Umfang – Vernetzungstopologie und ENB – liegt, wie in Kapitel 1.2.2 aufgezeigt, nicht im Betrachtungsfokus der vorliegenden Arbeit und wird entsprechend nicht weiter vertieft (vgl. Abbildung 1-28).

# 3.1.1. Entwicklung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur

Der vielschichtige, iterative Prozess einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung ist zu einem hochkomplexen Aufgabengebiet innerhalb der E/E Entwicklung herangewachsen [BROY ET AL. 2011, S.44]: Immer mehr E/E Umfänge kommen in allen Bereichen des Fahrzeugs zum Einsatz. Entsprechend viele verschiedene funktionale- und nicht-funktionale Anforderungen, Rahmenbedingungen und Abhängigkeiten sind im Zuge der E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung zu berücksichtigen [BROY ET AL. 2011, S.42; REIF 2009, S. 261f.]. Zusätzlich zu diesen Faktoren sind die verschiedenen Stakeholder einzubeziehen, die zu unterschiedlichen Schritten an der E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung beteiligt sind: Alleine innerhalb der Entwicklung eines OEMs sind neben E/E Entwicklungsfachstellen (engl.: Center of Competence (CoC)) auch diverse Fachstellen anderer Bereiche (Entwicklung Antrieb, Fahrwerk, Karosserie, Interieur, Produktmanagement, Baureihen etc.) involviert [ADLER ET AL. 2011, S. 73; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 15].

zusammenhängenden mechanischen, elektrischen oder mechatronischen Teilen oder Baugruppen" zu verstehen ist [JAENSCH 2012, S. 13f.].

Zusätzlich treten bereits vor dem eigentlichen Entwicklungsprozess weitere Organisationseinheiten als Anforderungsgeber auf und legen damit wesentliche Prämissen als Ausgangspunkt für die Konzeptentwicklungsphase einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur fest (vgl. Kapitel 1.1.1 und Abbildung 3-1). Zu diesen Anforderungsgebern zählen folgende [SCHAAF, 1999, S. 35; SCHÖNMANN 2012, S. 87; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 7f.]:

- Unternehmensstrategie (Unternehmensziele und -leitbild, etc.),
- Innovationsstrategie (OEM-spezifische, strategische Innovations-Roadmap, etc.),
- Produktstrategie (OEM-spezifisches, strategisches Produkt- und Funktionsportfolio).

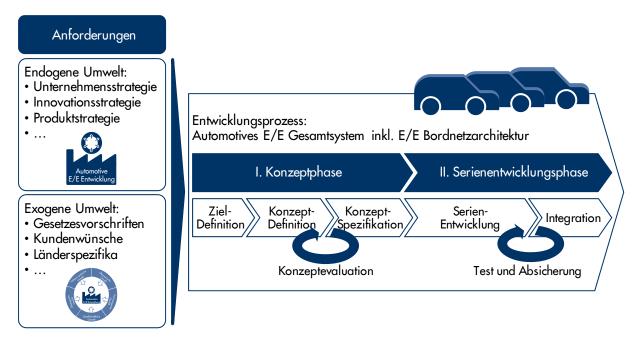


Abbildung 3-1: Schematischer Entwicklungsprozess eines automotiven E/E Gesamtsystems inkl. automotiver E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung in Anlehnung an Friedmann/Mayer 1998, S. 15; Jensch 2012, S. 3; Matheis et al. 2006, S. 66; Schaaf 1999, S. 26; Schönmann 2012, S. 86; Streichert/Traub 2012, S. 7ff.; Wildemann 2004, S.266.

Relevant sind weiterhin die Vertriebsplanung, die bspw. in Abstimmung mit den zuständigen Marktvertretern länderspezifische Anforderungen oder Kennzahlen wie Takerates (deutsch: Verbauraten) erhebt. Ein weiterer Stakeholder ist das Controlling, welches auf Basis betriebswirtschaftlicher Bewertungen, Aussagen über die Rentabilität möglicher Basis- und optionaler Ausstattungsumfänge eines Fahrzeugs trifft (vgl. Kapitel 1.1.2) [LÜHRIG 2006, S. 28f.; RAUBOLD 2011, S. 9ff.; SCHAAF 1999, S. 35].

Darüber hinaus müssen die für die automotive E/E Entwicklung geltenden Normen (z.B. ISO 61508 und ISO 26262<sup>3</sup> zur Funktionssicherheit) und der Stand der Technik, der sich bspw. aus Wettbewerbsanalysen, Patentschriften oder Veröffentlichungen ableiten lässt, berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 1.1.2) [REIF 2009, S. 243f.]. Diese und weitere endogene und exogene Einflüsse, die u.a. Auswirkungen auf die automotive E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung haben, wurden im einleitenden Kapitel 1.1 dargestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> ISO-Norm für sicherheitsrelevante E/E Systeme in Automobilen, die ein Vorgehensmodell inkl. geforderter Aktivitäten, Arbeitsergebnissen als auch Methoden für Entwicklung und Produktion vorgibt. Ziel ist es Fehlfunktionen von sicherheitsrelevanten E/E System bzw. Komponenten präventiv entgegenzuwirken.

Die vollständige Einbeziehung und Berücksichtigung bestehender Anforderungen, Rahmenbedingungen und Abhängigkeiten innerhalb der Konzeptphase (vgl. Abbildung 3-1) ist zentrale Voraussetzung für eine unter technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgreiche Integration des automotiven E/E Gesamtsystem in das Gesamtfahrzeug. Die Berücksichtigung der oben aufgezählten Punkte bzgl. der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur bekommt zusätzliches Gewicht, wenn diese nicht nur fahrzeugspezifisch, sondern für den baureihenübergreifenden Einsatz ausgelegt werden [Streichert/Traub 2012, S. 15].

In Anlehnung an den klassischen Fahrzeugentwicklungsprozess lässt sich der Entwicklungsprozess des E/E Gesamtsystems inkl. automotiver E/E Bordnetzarchitektur grundsätzlich in Konzept- und Serienentwicklungsphase unterteilen (vgl. Abbildung 3-1) [FRIEDMANN/MAYER 1998, S. 15; JENSCH 2012, S. 3; MATHEIS ET AL. 2006, S. 66; SCHAAF 1999, S. 26; SCHÖNMANN 2012, S. 86.; WILDEMANN 2004, S. 266]. Die Konzeptphase beginnt mit der Ideenfindungsbzw. Zieldefinitionsphase, an die sich die Analyse der resultierenden Anforderungen an E/E Funktionen anschließt. Für das darauf basierend E/E Funktionsset ist u.a. kritisch zu hinterfragen, ob es den Marktanforderungen und länderspezifischen Kundenerwartungen entspricht (vgl. Kapitel 1.1.2). Aus dem resultierenden Funktionsset lassen sich sodann weitere Anforderungen an eine automotive E/E Bordnetzarchitektur inkl. notwendiger Hardware-Umfänge ableiten. Diese zusätzlichen Anforderungen werden in einem Lastenheft dokumentiert.

Nach Abschluss des Prozessschritts Zieldefinition erfolgt der Übergang zur Konzeptdefinition, die das Grundgerüst für die anschließende Konzeptspezifikationsphase vorgibt. In der Konzeptdefinitionsphase erfolgt eine Detaillierung von Systemstruktur und Spezifikation zur Erfüllung aller zugrundeliegenden Anforderungen. Die Ergebnisse der Konzeptspezifikationsphase werden in Form einer Feinspezifikation dokumentiert [FRIEDRICH 2011, S. 31f.]. Im Anschluss daran erfolgt die Evaluation der Konzeptphase, deren Ergebnis die Notwendigkeit einer iterativen Überarbeitung der letzten zwei Teilprozessschritte – Konzept-Definition und – Spezifikation – sein kann. Z.B. dann, wenn in dem erarbeiteten Konzept nicht alle zugrundeliegenden Anforderungen ausreichend berücksichtigt wurden. Parallel zur Evaluation der Konzeptphase sollte die Prüfung einer Systemoptimierung hinsichtlich Funktionsumfang, Kosten, Bauraum, Gewicht, Qualität und Zuverlässigkeit erfolgen. Ein weiterer Bestandteil der Evaluation ist die funktionale Bewertung des Konzepts, um abzusichern, dass alle Funktionen in der E/E Bordnetzarchitektur anforderungsgerecht ausgeführt werden können.

Die Serienentwicklungsphase ist der zweite Abschnitt des Entwicklungsprozess eines automotiven E/E Gesamtsystems inkl. automotiver E/E Bordnetzarchitektur. Diese umfasst zwei Teilprozessschritte: Serienentwicklung und Integration (vgl. Abbildung 3-1). Der Prozessschritt Serienentwicklung setzt auf der Konzeptspezifikation für die automotive E/E Bordnetzarchitektur auf. Im zweiten Prozessschritt erfolgt die Integration des automotiven E/E Gesamtsystems inkl. E/E Bordnetzarchitektur. Der Übergang zwischen diesen beiden Teilprozessschritten wird begleitet von Test und Absicherung des E/E Gesamtsystems (vgl. Abbildung 3-1).

Die innerhalb der Serienentwicklungsphase zu beherrschende Komplexität steigt mit Anzahl, Variantenvielfalt und Vernetzungsgrad der zu berücksichtigenden E/E Funktionen und Komponenten [ADLER ET AL. 2011, S. 73; ZIEGENBEIN ET AL. 2005, S. 1; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 15]. Der Einsatz neuer, innovativer E/E Funktionen und Technologien, der Berücksichtigung länderspezifischer Markt- respektive Kundenanforderungen (z.B. bzgl. Komfort- und Infotainmentfunktionen) oder etwa Gesetzesanforderungen bzgl. Sicherheitsaspekten oder gelten-

der Standards (z.B. ISO26262 funktionale Sicherheit) sind zusätzliche Faktoren, die die Komplexität beeinflussen [BARON ET AL. 2006, S. 5f.; BECKER 2002, S. 2f; BROY 2003, S. 10; EHMER 2002, S. 463; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2006, S. 145ff.].

# 3.1.2. Systemebenen-Model einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur

Zur Unterstützung des Gestaltungs- und Entwicklungsprozesses einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur existieren in der Literatur wenige, ganzheitliche Ansätze respektive Modelle. Hervorzuheben sind an dieser Stelle die oben erwähnten Forschungsaktivitäten am Karlsruher Forschungszentrum Informatik (FZI) und der Daimler AG: Als Ergebnistyp des gemeinsamen Projekts wurde ein Prototyp zur Konzeptmodellierung und -bewertung von automotiven E/E Architekturen entworfen, auf dessen Basis ein Konzeptwerkzeug (PREEvision<sup>4</sup>) entwickelt wurde [MATHEIS et al. 2006, S. 66].

Das Systemebenen-Modell untergliedert die Umfänge einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur in Modellierungsebenen, auch Systemebenen genannt.<sup>5</sup> Die Gliederung und Anzahl der Systemebenen kann je nach Darstellung und Betrachtungsschwerpunkt variieren [u.a. Adler et al. 2011; S. 73; Hillenbrand 2012, S.87; Matheis 2009, S.7; Streichert/Traub 2012, S. 16]. Die einzelnen Systemebenen bauen sukzessive aufeinander auf und unterstützen dabei die Umfänge einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu strukturieren und detailliert zu beschreiben. Die dadurch geschaffene strukturelle Basis hilft einen Entwurf einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu schaffen, der etwa einem Maximalausstattungstyp<sup>6</sup> eines Fahrzeugkonzepts oder einer Baureihe gleichkommt. Zusätzlich können Vernetzungskonzept, Bordnetzkonfiguration und Topologie modelliert werden [Matheis et al. 2006, S. 66f.].

Die in Abbildung 3-2 visualisierten vier Systemebenen des Systemebenen-Modells einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur werden nachfolgend erläutert [HILLENBRAND 2012, S. 86ff; MATHEIS 2009, S.7ff; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 15ff.]:

E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 1 "Funktionen und Anforderungen": Gesamthafte Betrachtung des vollständigen Funktionsumfangs (Kunden- und Systemfunktionen, für Details vgl. Kapitel 3.2.1). Dokumentation der Artefakte, d.h. Funktionen inkl. aller Attribute sowie der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen, mittels einer hierarchisch strukturierten Funktionsliste.

E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 2 "Logische Architektur": Abbildung des Funktionsnetzwerks auf Basis einer technologieunabhängigen Darstellung einer jeden Kundenfunktion inkl. Software-Komponente und aller relevanten Sensoren und Aktoren, gemäß des Eingabe-Funktion-Ausgabe-Prinzips (EFA-Prinzip). Dieses Prinzip umfasst zudem

Das Konzeptwerkzeug PREEvision wurde ursprünglich von der aquintos GmbH entwickelt, die seit Mai 2010 zur Vector Informatik GmbH gehört. PREEvision unterstützt den modellbasierten Entwurf von E/E Architekturen in der frühen Konzeptphase, mit dem Ziel einer nahezu vollständigen Systembeschreibung. PREEvision wird zur modellbasierten Konzeption, Entwicklung und Bewertung von E/E Architekturen eingesetzt. Ziel ist die Konzeption und Evaluierung von Architekturalternativen über alle relevanten technischen Ebenen hinweg.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Die Architekturmodelle bestehen aus mehreren Ebenen. In der vorliegenden Arbeit werden die dafür verwendeten Begriffe **Systemebene** und **Abstraktionsebene** synonym verwendet.

Maximalausstattungstyp bedeutet, dass dieser alle verbaubaren E/E Ausstattungsmerkmale, also Funktionen inkl. notwendiger Hardware-Komponenten eines Fahrzeugderivats enthält.

die Spezifikation aller logischen Komponenten (z.B. Sensoren, Aktoren) sowie der Schnittstellen und Verbindungen.

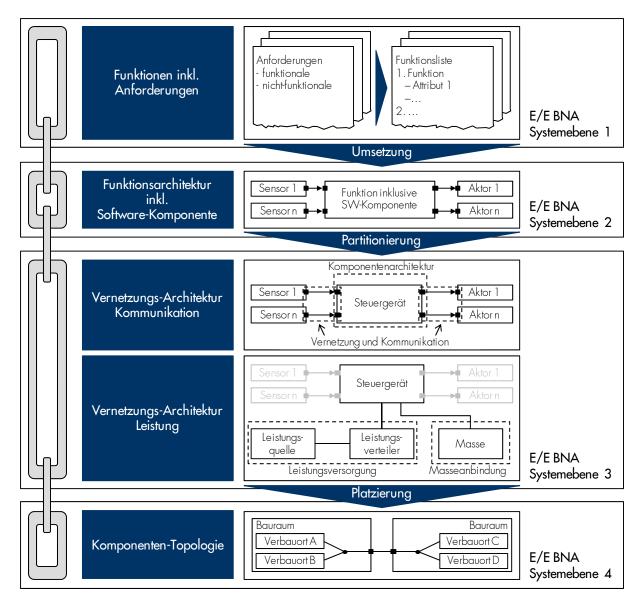


Abbildung 3-2: Systemebenen-Modell einer automotiven Elektrik/Elektronik Bordnetzarchitektur, Darstellung in Anlehnung an Streichert/Traub [Streichert/Traub 2012, S. 15].

E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 3 "Vernetzungsarchitektur": Partitionierung der Funktion bzw. deren Software-Komponenten auf die Steuergeräte mit relevanten Sensoren und Aktoren. Die Hardware-Komponentenarchitektur beschreibt mittels eines elektrischen Blockschaltbilds alle Aspekte innerhalb eines Steuergeräts (Stromversorgung, Masseverbindungen, Mikrocontroller, Busanbindungen, Steckerverbindungen, Speicher, Gehäuse, Leiterplatten, etc.). Die Hardware-Netzwerkarchitektur beschreibt alle Steuergeräte, Sensoren und Aktuatoren sowie deren Vernetzung und Kommunikation über Bussysteme oder dedizierte Leitungen.

E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 4 "Komponenten-Topologie": Verortung der in Systemebene 4 abgebildeten Umfänge, in dem dafür vorgesehenen Fahrzeugbauraum inklusive der dazugehörigen Kabel für Vernetzung zwecks Datenkommunikation sowie

Energieversorgung (Kabelbaum<sup>7</sup>), unter Berücksichtigung aller zugrundeliegenden Anforderungen (z.B. bzgl. Wartbarkeit, Upgrade- und Updatebarkeit, Zuverlässigkeit, elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV), Temperatur, Vibration/Erschütterung, Nässe/Feuchtigkeit, etc.).

Die an jede einzelne Systemebene geknüpften, spezifischen Aufgaben können in sich geschlossen abgearbeitet werden. Aus Gesamtsystemsicht sind diese jedoch unmittelbar im Zusammenhang zueinander zu betrachten, um das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Systemebenen einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur bereits während der Entwurfsphase berücksichtigen zu können. Daher verknüpft dieser ganzheitliche Ansatz sämtliche Umfänge in einem (Daten-) Modell (vgl. Abbildung 3-2):

- funktionale und nichtfunktionale Anforderungen,
- logischer Systementwurf,
- Netzwerk-Architektur,
- Funktions-Architektur inkl. Software- und Hardware-Komponenten,
- Leitungssatz (Kabelbaum),
- Topologie von E/E Komponenten und Kabelbaum im Fahrzeug.

Bei Neugestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur ist jede einzelne Systemebene zu betrachten und zu erarbeiten. Das Überspringen einer Systemebene würde zu einer lückenhaft ausgestalteten E/E Bordnetzarchitektur führen. In der frühen Phase eines E/E Bordnetzarchitekturentwurfs kann eine iterative Überarbeitung und Anpassung einzelner oder mehrerer Systemebenen notwendig sein. Bspw., wenn für Systemebene 3 ("Vernetzungsarchitektur") festgestellt wird, dass nicht alle Datenabhängigkeiten auf den vorhandenen Vernetzungs- bzw. Kommunikationsressourcen abgebildet werden können. Eine iterative Überarbeitung und Anpassung kann ebenfalls notwendig werden, wenn bei der Verortung einer kundenerlebbaren E/E Funktion mit der dazugehörigen Software- und Hardware-Komponente bestehende Bauraumrestriktionen oder -eigenschaften (z.B. Safety und Security, Umgebungsbedingungen oder Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)) nicht berücksichtigt wurden, d.h. mögliche Wechselwirkungen zw. den Systemebenen "Vernetzungsarchitektur" und "Komponententopologie" nicht ausreichend in den Gestaltungsprozess mit eingeflossen sind oder zusätzliche Anforderungen identifiziert wurden [Habermann/Burton 2012, S. 36; Streichert/Traub 2012, S. 15].

Zusammenfassend unterstützt die Untergliederung in Systemebenen bei der strukturierten Beschreibung sowie Entwicklung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Ferner können dadurch die Abhängigkeiten zwischen den aufeinander aufbauenden Systemebenen und Umfängen einer E/E Bordnetzarchitektur transparent aufgezeigt werden. Abbildung 3-2 gibt in enger Anlehnung an das bestehende E/E Architektur-Modell einen Überblick über diese Modellierungsebenen und indiziert damit die Interdependenz zwischen Anzahl, Variantenvielfalt sowie Vernetzungskomplexität von E/E Funktionen und der Gesamtsystemkomplexität einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur.

Der Kabelbaum umfasst alle Kabel bzw. Leitungsverbindungen inkl. Isolierungen, Steckverbindungen, Splices, Trennstellen, Pins eines Fahrzeugs. Die zentralen Aufgaben des Kabelbaums ist die Vernetzung von Steuergeräten mit den Sensoren und Aktoren über Bussysteme oder dedizierte Leitungen sowie deren Energieversorgung [REICHMANN 2011, S. 18f.].

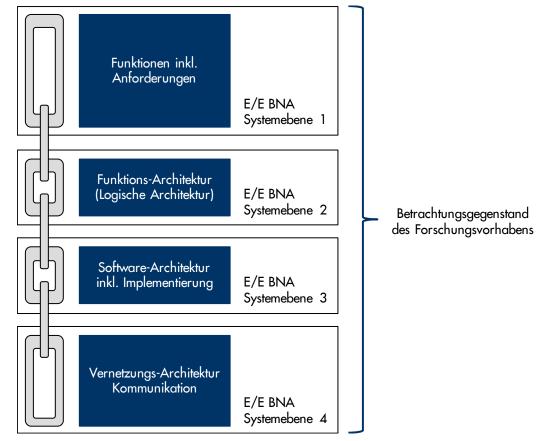


Abbildung 3-3: Der Betrachtungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens liegt auf der Partitionierung von E/E Funktionen inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponente, eigene Darstellung.

Im Forschungsvorhaben werden nicht alle der vier Systemebenen im Detail betrachtet. Gemäß Forschungsziel und -fragen (vgl. Kapitel 1.2.1) und der erfolgten Eingrenzung des Forschungsfokus (vgl. Kapitel 1.2.2 und Abbildung 1-28) liegt der Schwerpunkt auf den Inhalten der ersten zwei Systemebenen (vgl. Abbildung 3-3): E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 1 "Funktionen und Anforderungen", E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 2 "Logische Architektur" und E/E Bordnetzarchitektur Systemebene 3 "Softwarearchitektur" inkl. dem Prozessschritt Partitionierung. Entsprechend werden in den folgenden Teilkapiteln E/E Funktionen inkl. Funktionsarchitektur (Kapitel 3.2), Softwarearchitektur inkl. -standardisierung (Kapitel 3.3) und Steuergeräte bzw. Hardware (Kapitel 3.4) näher betrachtet.

## 3.2. E/E Funktionen

Die E/E Gesamtfunktionalität eines Automobils wird auf Basis des Zusammenspiels bestimmter E/E Funktionen<sup>8</sup> erzeugt. Diese erfüllen jeweils für sich genommen dedizierte Aufgaben wie Signalverarbeitung, Algorithmen-Berechnung und Ansteuerung von E/E Komponenten [BROY ET AL. 2011, S.42; JAENSCH 2012, S. 14; NÖRENBERG 2012, S. 10]. Eine solche E/E Funktion, auch technische Funktion genannt, lässt sich als abstrakte Relation und Verarbeitung von Eingangs- und Ausgangsinformationen beschreiben, die einen bestimmten Nutzen stiftet. Eingangsinformationen werden etwa durch Aktionen der Fahrzeuginsassen (z.B. Fahrer), Sensoren oder umliegenden Informations- und Kommunikationssystemen erzeugt.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> E/E Funktionen lassen sich in die zwei übergreifenden **Funktionskategorien** Kunden- und Systemfunktionen unterscheiden. Eine Differenzierung erfolgt in Kapitel 3.2.1.

Ausgangsinformationen werden direkt an die Fahrzeuginsassen, Aktoren oder die Fahrzeugungebung übermittelt [HARDT/GROßE-ROHDE 2008, S. 14]. Eine E/E Funktion wird mit den dazugehörigen HARDWARE- und Software-Komponenten auf mindestens einem Steuergerät partitioniert (vgl. Abbildung 3-4).

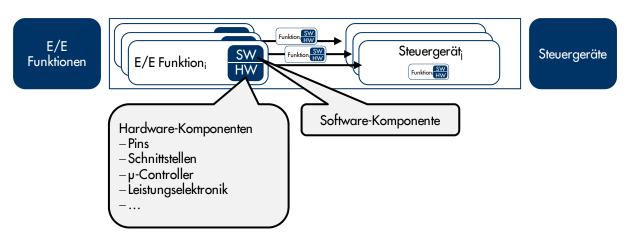


Abbildung 3-4: Partitionierung von E/E Funktionen auf ein Steuergerät, eigene Darstellung.

Definition E/E Funktion:	Abstrakte Relation und Verarbeitung von Eingangs- und Ausgangs-
	informationen/ -signalen, die unabhängig von der jeweiligen physika-
	lischen Implementierung sind. Eine E/E Funktion wird durch ein zustands-
	basiertes respektive eines kontinuierlichen Verhalten (Ereignis) ausgelöst
	und stiftet dabei einen dedizierten Nutzen. Eine E/E Funktion kann eine
	System- oder eine Kundenfunktion sein.

Komponenten sind verschiedene mechanische, mechatronische oder elektrische Bauteile oder Baugruppen, die zu physischen Einheiten gruppiert (physische Aggregation) und zur dedizierten Funktionserfüllung eingesetzt werden [JAENSCH 2012, S. 13]. Um eine E/E Hardware-Komponente handelt es sich dann, wenn diese elektrische, elektronische oder mechatronische Eigenschaften aufweist – wie Mikroprozessor, Speicher oder Leistungselektronik (vgl. Abbildung 3-4). E/E Hardware-Komponenten können als physische Einheiten betrachtet werden. Diese werden im Fahrzeug implementiert, an die notwendige elektrische Versorgung angeschlossen und zur Datenkommunikation vernetzt [Streichert/Traub 2012, S. 23f.]. Einzelne E/E Komponenten sind etwa Bestandteile von Sensoren, Steuergeräten und Aktoren (vgl. Kapitel 3.4). Sensoren verarbeiten physikalische Eingangsgrößen zu elektrischen Signalen (Sensorobjekte). Steuergeräte bereiten diese Signale auf, führen Algorithmen oder Berechnungen durch und generieren schließlich eine passende Ansteuerung der Aktoren [HARDT/ GROßE-ROHDE 2008, S. 14; JAENSCH 2012, S. 13].

Definition Hardware-Komponente:
Physische Aggregation von zusammenhängenden elektrischen, elektronischen oder mechatronischen Bauteilen oder -gruppen. E/E Hardware-Komponenten erfüllen bzw. unterstützen eine bestimmte (Teil) Funktionalität im Fahrzeug. Dabei handelt es sich vornehmlich um Sensoren, Aktoren, Steuergeräte sowie Eingabe- und Ausgabeeinheiten (Displays, Eingabecontroller, etc.).

Eine E/E Funktion kann auf eine Vielzahl von E/E Komponenten verteilt sein. In einem solchen Fall handelt es sich um eine vernetzte E/E Funktion. Dazu können E/E Funktionen in einzelne Funktionsbestandteile aufgegliedert werden, die in der Regel in Form von Software umgesetzt werden (vgl. Kapitel 3.3) [BROY ET AL. 2011, S.42]. Von einer Software-Komponente ist dann die Rede, wenn die darüber realisierte (Teil-) Funktionalität im Fahrzeug softwarebasiert umgesetzt wird (vgl. Abbildung 3-4) [VOGEL ET AL. 2009; S. 162].

<u>Definition Software-Komponente:</u>	Kompositionseinheit mit spezifizierten Schnittstellen, die explizite		
	Abhängigkeiten zum Anwendungskontext hat und welche eine bestimmte		
	(Teil-) Funktionalität im Fahrzeug umsetzt. Eine Software Komponente		
	kann Hardware-unabhängig eingesetzt werden und somit Hardware-un-		
	abhängig mit anderen komponiert werden.		

# 3.2.1. Systemfunktionen versus Kundenfunktionen

Aus abstrakter Sicht können E/E Funktionen als Fahrzeugbestandteile betrachtet werden, welche von den Fahrzeuginsassen direkt oder indirekt wahrgenommen werden und einen gewissen Nutzen stiften [HARDT/GROßE-ROHDE 2008, S. 14; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 2]. Dabei lassen sich zwei Kategorien von Funktionen unterscheiden [GIROD/STENGER 2007, S. 101]:

- Kundenerlebbare Funktionen/Kundenfunktionen,
- Systemfunktionen.

Letztgenannte Kategorie umfasst alle Funktionen die in ihrer Gesamtheit für die Fahrzeugfunktionalität bzw. die Befähigung von Kundenfunktionen immanent notwendig, nicht aber direkt für den Kunden wahrnehmbar sind (z.B. Flashen oder Programmieren von Steuergeräten) [NÖRENBERG 2012, S. 19]. Systemfunktionen bestehen dabei aus mindestens einer kleinstmöglich gekapselten Funktion, die mit der dazugehörigen Hardware und Software auf einer E/E Komponente bzw. einem Steuergerät partitioniert werden [BROY ET AL. 2011, S. 42].

Definition E/E Systemfunktion:	Abstrakte Relation und Verarbeitung von Eingangs- und Ausgangs-
	informationen/-Signalen, die als Hilfsfunktion eine (Teil-) Funktionalität
	im Fahrzeug darstellt. E/E Systemfunktionen sind in ihrer Gesamtheit für
	die Fahrzeugfunktionalität bzw. die Befähigung von Kundenfunktionen
	immanent notwendig, sind jedoch für den Kunden (Fahrzeugnutzer) nicht
	direkt erlebbar.

Die unterschiedlichen Anforderungen an ein Fahrzeug und damit an die Funktionalität des Fahrzeugs werden maßgeblich durch die Wünsche der Kunden geprägt [WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 14ff]. Aus Kundensicht stehen in der Regel nicht die technischen Umsetzungen im Vordergrund, sondern die im Fahrzeug wahrnehmbaren und nutzbaren Funktionen, d.h. die sogenannten Kundenfunktionen. Zu diesen zählen etwa die Klimatisierung sowie die Nutzung von Navigation oder Internet im Fahrzeug [HARDT/ GROßE-ROHDE 2008, S. 14; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 2]. Kundenwünsche sind zumeist heterogen und können länder- bzw. regionenspezifisch aber auch durch die Lebenssituation bedingt oder altersabhängig variieren.

So liegt aus Kundenfunktionssicht der Betrachtungsschwerpunkt auf den kundenerlebbaren übergreifenden, funktionalen Aspekten der E/E Umfänge im Automobil, nicht auf einzelnen E/E Hardware-Komponenten [NÖRENBERG 2012, S. 113]. Eine kundenerlebbare Funktion stellt für den Kunden (Fahrzeugnutzer) einen direkten oder indirekten Nutzen oder Wert dar und besteht aus mindestens einer kleinstmöglich gekapselten Funktion, die mit der dazugehörigen Hardware und Software auf einer E/E Komponente bzw. einem Steuergerät partitioniert wird (vgl. Abbildung 3-4).

Definition E/E Kundenfunktion:	Abstrakte Relation und Verarbeitung von Eingangs- und Ausgangs-
	informationen/-Signalen, die für den Kunden (Fahrzeugnutzer) einen
	direkt erlebbaren Nutzen oder Wert erzeugen. Dabei kann eine E/E
	Kundenfunktion eine Basisfunktion oder optionale Funktion sein.

Die tatsächliche Anzahl der in einem Fahrzeug realisierten kundenerlebbaren Funktionen ist abhängig von der spezifischen Fahrzeugkonfiguration: Der Kunde kann zusätzlich zu der Fahrzeugbasisausstattung optionale Ausstattungen gegen Aufpreis auswählen. Sowohl Basis- als auch Sonderausstattungen sind üblicherweise abhängig von der Fahrzeugklasse<sup>9</sup> und Fahrzeugbaureihe<sup>10</sup> [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 18]. Folglich lassen sich grundlegend zwei Kategorien von Funktionen unterscheiden: Basisfunktionen und optionale Funktionen inklusiver der hierbei je Kategorie möglichen (Länder-) Varianten (vgl. Abbildung 3-5).

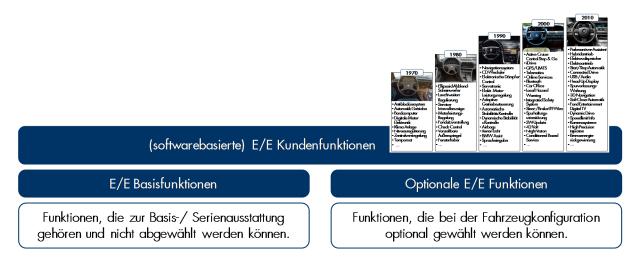


Abbildung 3-5: E/E Kundenfunktionen untergliedern sich in E/E Basisfunktionen und optionale Funktionen, eigene Darstellung.

Unter Basisfunktionen werden in der vorliegenden Arbeit alle kundenerlebbaren Funktionen zusammengefasst, die serienmäßig in einem Fahrzeugderivat bzw. einer Baureihe eines OEMs verortet werden. Diese Funktionen gehören damit zur Serienausstattung aller Fahrzeugderivate eines OEMs.<sup>11</sup> Folglich müssen Basisfunktionen als fixer Bestandteil bei der automotiven E/E Bordnetzarchitekturgestaltung berücksichtigt werden. Demgegenüber stehen optionale

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> **Fahrzeugklassen** sind z.B. Kompaktklasse, Kleinwagen, Mittelklasse, Geländewagen, Minivans, Kleinstwagen, Obere-Mittelklasse, etc.).

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Ein Beispiel für **Fahrzeugbaureihen** sind die BMW 1er, 2er, 3er, 4er, 5er, 6er, 7er, X, Z Baureihen.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Basisfunktionen weisen eine baureihenübergreifende Verbaurate von 100 Prozent auf.

Funktionen.<sup>12</sup> Diese umfassen alle kundenerlebbaren Funktionen, die bei der individuellen Fahrzeugkonfiguration<sup>13</sup> optional durch den Kunden ausgewählt werden können. Entsprechend bilden optionale Funktionen aus baureihenübergreifender Perspektive keinen fixen Bestandteil der einer E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung.

Definition E/E Basisfunktion:	E/E Basisfunktionen sind zu 100 Prozent-Umfang des Basisfahrzeugs,
	d.h. eine E/E Basisfunktion ist immer Bestandteil des Serienumfangs eines
	Fahrzeugs.

Optionale Ausstattungen sind bspw. der Parkassistent bei BMW, über den der Fahrzeugnutzer bedarfsgesteuert bei der Suche nach einem Parkplatz und beim Einparken des Fahrzeugs unterstützt wird. Die Anzahl und Varianten der zur Verfügung stehenden optionalen Funktionen können für Fahrzeugderivate einer bzw. verschiedener Baureihen variieren. Dadurch ist das Angebot von optionalen Funktionen eines OEMs in der Regel nicht für alle Fahrzeugderivate identisch. Gründe hierfür liegen in der gewünschten Differenzierung zwischen den Baureihen respektive Fahrzeugklassen. Ferner ist es möglich, dass sich einzelne optionale Funktionen gegenseitig ausschließen.

<u>Definition optionale E/E Funktion:</u> E/E Funktion, die durch den Kunden zusätzlich zum Serienumfang eines Fahrzeugs ausgewählt werden kann.

Aus baureihenübergreifender Sicht kann nicht jede der kundenerlebbaren Funktionen eindeutig einer der zwei beschriebenen Kategorien zugeordnet werden. Das liegt daran, dass bestimmte Funktionen für Fahrzeugderivate einer Baureihe als Basisfunktionen definiert wurden, die wiederum in Fahrzeugderivaten einer anderen Baureihe maximal als optionale Funktion vom Kunden ausgewählt werden können. Zur Verdeutlichung seien hier drei exemplarische Konfigurationen am Beispiel BMW 116i (BMW 1er Baureihe) und BMW 760i (BMW 7er Baureihe) aufgeführt [BMW FAHRZEUGKONFIGURATOR 2012]:

- Im BMW 760i ist in der Basisausstattung die "Soft-Close Automatik für Türen" enthalten. Hingegen ist diese kundenerlebbare Funktion in einem BMW 116i weder als Basisfunktion enthalten noch als optionale Ausstattung wählbar.
- Die "Klimaautomatik mit 4-Zonenregelung" ist beim BMW 760i eine Basisausstattung.
   Bei einem BMW 116i ist die Klimaautomatik keine Basisfunktion, dafür ist für den Kunden eine "Klimaautomatik mit 2-Zonenregelung" als optionale Ausstattung verfügbar
- Das "Navigationssystem Professional" ist in einem BMW 760i serienmäßig verbaut und kann in einem BMW 116i als optionale Ausstattung ausgewählt werden.

In modernen Fahrzeugen der Oberklasse (z.B. der BMW 7er-Baureihen, Abbildung 1-1) existieren heute eine Vielzahl (vernetzter) kundenerlebbarer Basisfunktionen und optionaler Funktionen. Vor der stark vereinfachten Annahme ausgehend, dass alle Funktionen untereinander

1.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Optionale Funktionen weisen eine baureihenübergreifende Verbaurate kleiner 100 Prozent auf.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Unter **Konfiguration** ist hier die Zusammensetzung eines konkreten Produkts (Fahrzeugs) zu verstehen, wobei die Bestandteile des Produkts neben den fix definierten Basisumfängen (z.B. E/E Basisfunktionen) auch ausgewählte optionale Funktionsumfänge (z.B. optionale E/E Funktionen) sein können.

vernetzt sind, ergibt sich damit eine enorme Komplexität der E/E Komponenten im Fahrzeug [BURGDORF 2010, S. 1f.]. Tatsächlich wird eine maximale Komplexität in einem real konfigurierten Fahrzeug aus drei Gründen kaum erreicht:

- Nicht jede verfügbare Funktion muss auch vom Kunden ausgewählt werden.
- Einzelne Funktionen können sich gegenseitig ausschließen.
- Nicht alle Funktionen sind in allen Fahrzeugklassen bzw. Baureihen wählbar.

Dennoch kann die maximal mögliche Anzahl vernetzter E/E Funktionen als Referenz für die größer werdende Komplexität einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur betrachtet werden, denn mit Einführung zusätzlicher E/E Funktionen erhöht sich die Vernetzung der Funktionen exponentiell und erschwert damit die Beherrschung der resultierenden Komplexität im Fahrzeug. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer übergreifend gesteuerten und konsequent umgesetzten funktionsorientierten E/E Entwicklung, die die Fahrzeugspezifikationen im Rahmen des Entwicklungsprozesses explizit, präzise und vollständig erfasst und umsetzt [HARDT/GROßE-ROHDE 2008, S. 14].

## 3.2.2. Logische Funktions-Architektur

Im Rahmen der Funktions-Architektur-Modellierung werden alle Bestandteile einer E/E Funktion inklusive deren logischer Verbindungen betrachtet. D.h. jeder Funktionsblock (inkl. Software-Komponente sowie dazugehörige Sensoren und Aktoren), welcher eingehende Daten verarbeitet und wieder ausgibt.

Definition Funktionsarchitektur:	Darstellung von Funktionen inkl. zugehöriger Softwarekomponenten
	sowie den jeweils benötigten Schnittstellen zur Kommunikation mit den
	erforderlichen Datenquellen zum Empfang von Eingangsinformationen/
	-Signalen (Sensoren) und Datensenken zum Versand von Ausgangs-
	informationen/-Signalen (Aktoren).

Besteht eine kundenerlebbare Funktion aus mehreren kleinstmöglich gekapselten Teilfunktionen, so muss diese nicht gesamthaft auf einem einzigen Steuergerät verortet sein und kann Daten von unterschiedlichen Sensoren (Datenquellen) zur Datenverarbeitung beziehen und die verarbeiteten Daten an unterschiedliche Aktoren (Datensenken) weitergeben. In einem solchen Fall handelt es sich um eine sogenannte vernetzte Funktion.

Ein Beispiel für eine vernetzte kundenerlebbare Funktion ist die adaptive Geschwindigkeitsreglung (englisch: Adaptive Cruise Control (ACC)) [BOSCH 2011, S. 17; BROY 2006, S. 13ff.], deren Systemstruktur mit Sensoren, Aktoren, Steuergeräten und Vernetzungstechnologie (vgl. Kapitel 3.4) in Abbildung 3-6 dargestellt ist. ACC hat die funktionale Aufgabe die Fahrgeschwindigkeit so zu regulieren, dass der per Gesetz vorgeschriebene Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht unterschritten wird. Voraussetzung zur Realisierung von ACC ist die Kommunikation zwischen verschiedenen Sensoren sowie Motorsteuerung und der Getriebesteuerung (EGS) (vgl. Abbildung 3-6) [REIF 2009, S. 333; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 435]. Die hierfür notwendigen Kommunikationsschnittstellen zwischen dem zentralen Funktionsblock Fahrgeschwindigkeitsregelung sowie notwendige Datenquellen (Raddrehzahlsensor, etc.) und Datensenken (Motorsteuerung, etc.) werden in dem zuvor erläuterten Systemebenen-

Modell einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur auf der Ebene 2 beschrieben (vgl. Kapitel 3.1.2 und Abbildung 3-2).

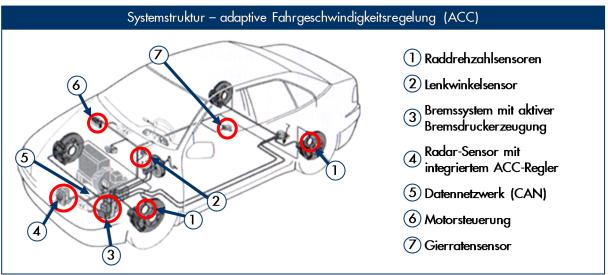


Abbildung 3-6: Adaptive Fahrgeschwindigkeitsreglung-Systemstruktur [eigene Darstellung in Anlehnung an Bosch 2011, S. 17; Broy 2006, S. 13; Wallentowitz/Reif 2010, S. 435].

Zentrales Ziel bei der Funktionsarchitekturgestaltung ist vollständige Transparenz über die Schnittstellen eines jeden Funktionsblocks inkl. Sensoren und Aktoren zu schaffen. D.h. über die Art der Schnittstellen (Ein- und Ausgänge), Datentyp der jeweiligen auszutauschenden Werte und das Datenaufkommen je Schnittstelle. Durch sorgfältige Dokumentation dieser Informationen, kann bereits auf der Systemebene 2 des Systemebenen-Modells der E/E Bordnetzarchitektur festgestellt werden (vgl. Kapitel 3.1.2 und Abbildung 3-2), um welche Art der Kommunikation es sich handelt ("Client-Server" oder "Sender-Receiver") und welche Daten zwischen welchen Kommunikationsblöcken ausgetauscht werden müssen. Daraus können folgende wesentliche Erkenntnisse für die weitere Gestaltung einer E/E Bordnetzarchitektur abgeleitet werden [Reif 2009, S. 56ff; Streichert/Traub 2012, S. 1]:

- Kommunikationsschnittstellentyp je E/E (Kunden-/System-)Funktion,
- Kommunikationsaufkommen je E/E (Kunden-/System-)Funktion,
- Kommunikationsaufkommen innerhalb eines Steuergeräts,
- Kommunikationsaufkommen auf den Bussystemen.

Die präzise und vollständige Definition von Kommunikationsschnittstellen und -aufkommen zwischen den einzelnen E/E Bordnetzarchitektur Komponenten liefert einen signifikanten Beitrag zur Beherrschung der Komplexität: Dadurch wird die Austauschbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Funktionsblöcken erleichtert. Dieser Effekt wird verstärkt durch den durchgängigen Einsatz von Standardschnittstellen und eine dies unterstützende Architektur der Softwarekomponenten<sup>14</sup> je Funktionsblock (vgl. Kapitel 3.3) [ZIMMERMANN/SCHMIDGALL 2006, S. 203]. Die beschriebene Funktionsarchitektur ist vergleichbar mit der des Software-

Software wird nicht mehr ausschließlich hardwarespezifisch entwickelt und ist zunehmend einer der tragenden Innovationstreiber zur Realisierung diverser wettbewerbsdifferenzierender Funktionen im Fahrzeug [BROY ET AL. 2011, S. 42f.].

Architektur Standards AUTOSAR<sup>15</sup> (vgl. Kapitel 3.3), bei dem einzelne Funktionsblöcke durch Software-Komponenten dargestellt werden [FENNEL ET AL. 2006; S.1ff; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 20].

## 3.3. Software

Mit wachsendem Anteil von Software im Automobil, nimmt diese einen immer höheren Stellenwert innerhalb der Fahrzeugentwicklung ein (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2). Die Berücksichtigung und Integration der zunehmenden Software-Umfänge in bestehende Entwicklungsprozesse ist eine der zentralen Herausforderung innerhalb der E/E Entwicklung: Mit steigender Komplexität von Komponenten und Vernetzung einer E/E Bordnetzarchitektur wächst der Aufwand für automotive Softwareentwicklung, -integration und -test überproportional an [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 51]. Letztgenannter Effekt ist besonders dann merkbar hoch, wenn die Softwareentwicklung vornehmlich proprietär und hardwarespezifisch erfolgt, ohne dabei Software-Wiederverwendung oder Standardsoftware zu berücksichtigen. Dabei können in erster Linie durch die Wiederverwendung abgesicherter und bewährter Software-Komponenten Entwicklungs-, Zertifizierungs- oder Lizenzkosten eingespart werden. Darüber hinaus unterstützt eine durchgängige Wiederverwendung maßgeblich bei der Beherrschung von Komplexität, da die Variantenvielfalt eingegrenzt wird (vgl. Kapitel 1.1). Entsprechend bemühen sich OEMs um eine übergreifende Standardisierung von Software-Architekturen, um den inhomogenen Softwarelösungen in modernen Fahrzeugen entgegenzuwirken (vgl. Kapitel 1.3) [ZIMMERMANN/SCHMIDGALL 2006, S. 203].

# 3.3.1. Software-Architektur Standardisierung

In der Automobilbranche sind diverse Bestrebungen zu verzeichnen, die sich mit der Unterstützung bzw. Vereinfachung der Entwicklung von E/E Systemen inkl. Software durch standardisierte Ansätze, Methoden, Werkzeuge und Normen beschäftigen (vgl. Kapitel 1.3). Entsprechend existieren verschiedene Ansätze zur Standardisierung von automotiver Software [HOFFMANN 2010, S. 43]. Hinsichtlich der übergreifenden Standardisierung von Software-Architekturen sind die Arbeitsergebnisse zweier Konsortien hervorzuheben:

- OSEK/VDX (Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug/Vehicle Distributed Executive),
- AUTOSAR (<u>AUT</u>omotive <u>Open System AR</u>chitecture).

OSEK/VDX beschreibt im Wesentlichen die Komposition von Software, d.h. die Software-Architektur. Ein großer Umfang dieses Standards wurde 2003 vom jüngeren Standard AUTOSAR adaptiert, weiterentwickelt und ergänzt [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 51; SCHÄUFFELE/ZURAWKA, 2010, S.33; ZIMMERMANN/SCHMIEGALL 2006, S. 206 ff.]. Daher weisen OSEK/VDX und AUTOSAR große Ähnlichkeiten auf: Beide Standards differenzieren zwischen wettbewerbsdifferenzierender, OEM-spezifischer Applikations-Software (Applikations-Softwaremodule) und Basissoftware (Basis-Softwaremodule). Letztgenannter Software-

AUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture) [AUTOSAR 2014, o.S.; BOSCH 2011, S. 112; BROY ET AL. 2011, S. 52; REIF 2010, S. 214].

Umfang ist hardwareabhängig, d.h. mit direktem Hardwarebezug. Die Schnittstellen der einzelnen Basis-Softwaremodule sind vornehmlich hardwareunabhängig standardisiert (vgl. Abbildung 3-7) [BURGDORF 2010, S. 75; SCHÄUFFELE/ZURAWKA, 2010, S. 33].

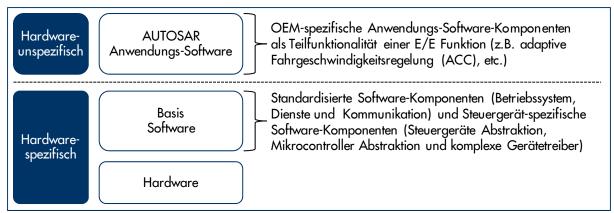


Abbildung 3-7: AUTOSAR entkoppelt anwendungsspezifische Software von der Steuergeräte Hardware, eigene Darstellung.

Eine wesentliche Weiterentwicklung von AUTOSAR ist, dass neben der Beschreibung der Software-Architektur auch auf die Entwicklungsmethodik von Software eingegangen wird. Dies ist einer der Gründe, warum AUTOSAR sich u.a. bei den großen deutschen OEMs etablieren konnte [FEILKAS ET. AL. 2013, S. 204; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 51]. Erste Steuergeräte nach AUTOSAR wurden z.B. bei BMW bereits 2008 (AUTOSAR Release 3.0) in Serie gebracht [FRICKENSTEIN 2008, S. 26].

In diese Weiterentwicklung des AUTOSAR-Standards flossen Erfahrungen und Erkenntnisse aus der laufenden Serienentwicklung bei OEMs und Zulieferern, sodass heute bereits das AUTOSAR Release 4.1 verfügbar ist [AUTOSAR 2014, o.S.]. Im Zuge der zunehmenden Standard-Reife, passen immer mehr OEMs und Zulieferer, bestehende Softwareentwicklungsprozesse an und produzieren bzw. implementieren AUTOSAR konforme Basis- und Applikations-Software (Software-Komponenten) und Steuergeräte. Aufgrund der genannten Vorteile, Verbreitungsgrad und Reife des AUTOSAR-Standards, wird dieser im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung der Software-Architektur und Software-Entwicklungsmethodik heran gezogen und im Folgenden näher erläutert.

## 3.3.2. Software-Architektur Standardisierung gemäß AUTOSAR

Seit dem Jahr 2003 wird AUTOSAR – eine offene Systemarchitektur für E/E Systeme – durch das gleichnamige Konsortium entwickelt. Das AUTOSAR Konsortium ist eine internationale Entwicklungspartnerschaft, die sich aus OEMs und Zulieferer der Automobilbranche, Softwareherstellern sowie verschiedenen Forschungseinrichtungen zusammensetzt. Beispielhaft sind OEMs wie die BMW Group, Daimler, Ford, General Motors, PSA (Peugeot Citroën), Toyota und Volkswagen sowie Repräsentanten der Automobilzulieferer wie Bosch und Continental zu nennen [AUTOSAR 2014, o. S.; REIF 2010, S. 214].

Mit AUTOSAR sollen, neben einer automobilindustrieübergreifenden Standardisierung von grundlegenden Systemfunktionen und Funktionsschnittstellen, die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, Funktionen innerhalb einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur integrieren,

ersetzen und übertragen zu können. Ferner zielt der Standard darauf ab, Update- und Upgradebarkeit von Software über die gesamte Fahrzeuglebensdauer hinweg zu verbessern, um u.a. einen Beitrag zur Beherrschung der steigenden Komplexität des E/E Gesamtsystems in modernen Fahrzeugen zu leisten (vgl. Kapitel 1.1). So verfolgt AUTOSAR bzgl. der Entwicklung automotiver Software den Ansatz eines funktionsbasierten Systementwurfs, um folgende technische Ziele zu erreichen [AUTOSAR 2014, o. S.; SCHMERLER/RIMKUS 2013, S. 59]:

- Modularität von Software-Komponenten (Funktionen): Software-Komponenten können einzeln gemäß spezifischer Steuergeräte-Anforderungen und -Aufgaben entwickelt und angepasst werden.
- Skalierbarkeit von Software-Komponenten (Funktionen): OEM-unspezifische Software-Komponenten können an verschiedene Fahrzeugplattformen angepasst werden. Dies reduziert die Entwicklung von Software-Varianten mit ähnlicher respektive identischer Funktion.
- Übertragbarkeit von Software-Komponenten (Funktionen): AUTOSAR Software-Komponenten werden Steuergeräte-unabhängig entwickelt. Dadurch kann deren Partitionierung so erfolgen, dass die innerhalb einer automotiven E/E Bordnetz-architektur vorhandenen Ressourcen ideal genutzt werden.
- Wiederverwendbarkeit von Software-Komponenten (Funktionen): Die nachhaltige Verbesserung von Qualität und Zuverlässigkeit, Reduzierung der Variantenvielfalt sowie der baureihenübergreifende Einsatz von Software wird unterstützt.

Um die Erreichung dieser aufgeführten technischen Ziele zu unterstützen, gibt AUTOSAR eine Software-Infrastruktur für sämtliche Steuergeräte bzw. E/E Systeme einer automotiven E/E vor. Diese setzt auf eine logische Aufteilung in steuergerätspezifische Basissoftware sowie Steuergerät-unspezifische Anwendungs-Software. Ferner werden standardisierte Schnittstellen zwischen den folgenden vier AUTOSAR-Architektur Schichten definiert (vgl. Abbildung 3-8):

- AUTOSAR Anwendungssoftware,
- AUTOSAR Laufzeitumgebung,
- Basis Software,
- Steuergeräte-Hardware.

Die erste Schicht der AUTOSAR-Software – die AUTOSAR Anwendungssoftware – besteht aus verschiedenen steuergeräteunspezifischen AUTOSAR-Software-Komponenten (vgl. Abbildung 3-8) [Wallentowitz/Reif 2010, S. 194], die auf dem jeweiligen Steuergerät abgebildet werden. Jede dieser Software-Komponenten stellt eine Teilfunktionalität einer E/E Funktion dar [Feilkas et. al. 2013, S. 205]. Ein Vorteil dieser AUTOSAR Software-Architektur ist, dass diese Anwendungssoftware-Komponenten OEM-spezifisch entwickelt werden können, d.h. unabhängig voneinander und unter Umständen sogar durch unterschiedliche Software-Hersteller. Diese gewisse Flexibilität deckt sich mit dem AUTOSAR Motto "Cooperate on standards, compete on implementation" [AUTOSAR 2014, o.S.; Klauda/Lauff 2008, S. 19; Streichert/Traub 2012, S. 58; Zimmermann/Schmidgall 2006, S. 241].

Sämtliche Interaktionen zwischen den Software-Komponenten werden über die AUTOSAR-Laufzeitumgebung geregelt, der sogenannten AUTOSAR-Zwischenumgebung. Die AUTOSAR-Schnittstellen gewährleisten die Anbindung der Software-Komponenten an die Laufzeitumgebung, welche als Kommunikationszentrum für den Informationsaustausch im Steuergerät und über die Steuergerätegrenzen hinweg fungiert. D.h. die AUTOSAR-Laufzeitumgebung bildet das Bindeglied zwischen der AUTOSAR-Anwendungs-Software und der Basis-Software, über welches der Datenaustausch zwischen verschiedenen AUTOSAR-Software-Komponenten eines Steuergeräts oder mehrerer Steuergeräte sowie mit den Diensten der Basis Software stattfindet. Dabei abstrahiert die Laufzeitumgebung von der Steuergeräte-Infrastruktur (Hardware, Bus- und Betriebssystemtechnologie) sowie daraus resultierender Kommunikationsbeziehungen und regelt den Datenaustauch für alle der damit verknüpften Software-Komponenten über verschiedene Bussysteme. Entsprechend können bspw. zwei Funktionen bzw. Anwendungen Daten miteinander austauschen, ohne dabei die vorherrschende Steuergeräte-Topologie zu kennen [AUTOSAR 2014, o.S.; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 194f.].

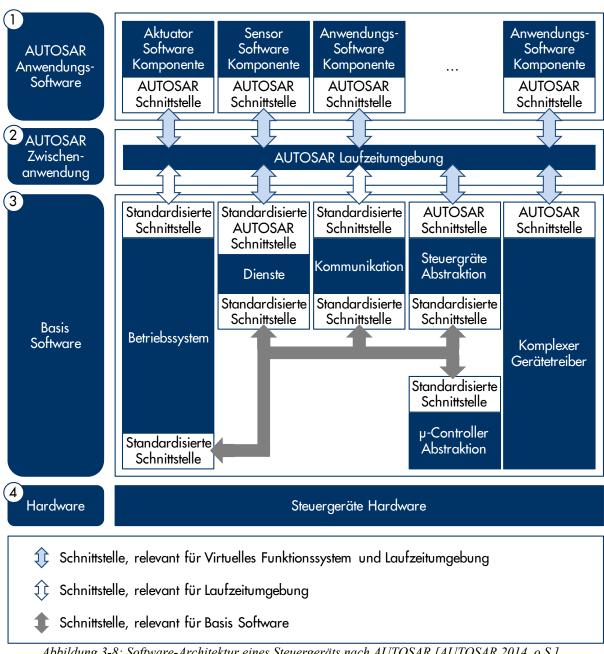


Abbildung 3-8: Software-Architektur eines Steuergeräts nach AUTOSAR [AUTOSAR 2014, o.S.].

Die Basis-Software-Schicht unterhalb der Laufzeitumgebung beinhaltet standardisierte Software-Komponenten (Betriebssystem, Dienste und Kommunikation) und steuergerätspezifische Software-Komponenten (Steuergeräte Abstraktion, Mikrocontroller Abstraktion und komplexe Gerätetreiber) [AUTOSAR 2014, o.S.; ZIMMERMANN/SCHMIDGALL 2006, S. 242; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 194f.]. Dabei ist die Basissoftware zuständig für die Realisierung der Systemfunktionen und um die Dienste zur Verfügung zu stellen, welche für die AUTOSAR-Software-Komponenten notwendigen sind.

Zusammenfassend ist AUTOSAR einen Software-Architektur Standard zur Entwicklung von (verteilten) E/E Funktionen, wobei AUTOSAR ein skalierbares Basis-Betriebssystem für jedes Steuergerät und ein standardisiertes Datenkommunikations- und Konfigurationslayout (AUTOSAR Methodologie) vorgibt. Dieser funktionsorientierte Ansatz, der standardisierte AUTOSAR Schnittstellen und Software-Komponenten vorgibt, eignet sich, um nicht wettbewerbsdifferenzierende E/E Funktionsumfänge sowie Systemfunktionen Standard-Software-Komponenten für den Baureihen- bzw. OEM-übergreifend Einsatz zu entwickeln und zu implementieren. Ferner können einzelne Software-Komponenten über einen gesamten Fahrzeuglebenszyklus hinweg Hardware-unabhängig ausgetauscht werden. Mit einer konsequenten Anwendung des AUTOSAR Standards können somit verschiedene Potentiale gehoben werden. Dazu gehören die Erreichung der aufgeführten technischen Ziele bei steigender Qualität und Zuverlässigkeit und die langfristige Beherrschung von Kosten für die Softwareentwicklung.

Aufgrund des funktionsorientierten Ansatzes, der technischen wie betriebswirtschaftlichen Ziele sowie Reife und Verbreitung des AUTOSAR-Standards, wird dieser im Rahmen des Forschungsvorhabens als Grundlage für die Software- und Softwarearchitekturentwicklung herangezogen. So wird bspw. die AUTOSAR-Konformität von Steuergeräten (vgl. Kapitel 3.4) und E/E Baukästen (vgl. Kapitel 3.6) als Prämisse gesetzt.

Definition AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture): Automobilindustrieübergreifende, offene, standardisierte und modulare Software-Architektur für automotive Steuergeräte. AUTOSAR gibt definierte und standardisierte Schnittstellen vor und unterstützt die Abstraktion funktionsspezifischer Anwendungssoftware von Steuergeräte-Hardware inkl. der hardwarespezifischen Basissoftware. AUTOSAR unterstützt die Wiederverwendung von Software und den Einsatz von AUTOSAR-konformen skalierbaren Steuergeräten.

# 3.4. Steuergeräte

Steuergeräte (engl.: Electronic Control Unit (ECU)) sind die zentralen Rechen- und Steuereinheiten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 190], auf die E/E Funktionen bzw. Teilumfänge von E/E Funktionen partitioniert werden. Infolgedessen bilden Steuergeräte die zentralen E/E Komponenten des Gesamtsystems "Fahrer-Fahrzeug-Umwelt" (vgl. Abbildung 3-9) [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 47].

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> AUTOSAR unterstützt Softwareupdate ohne Hardware-Tausch.

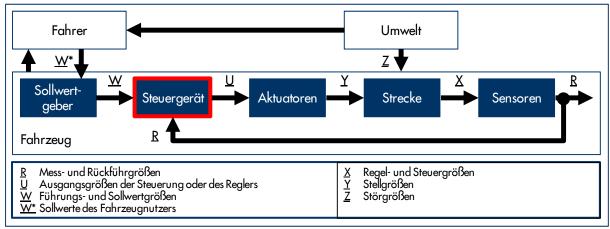


Abbildung 3-9: Realisierung von Funktionen durch ein Steuergerät im "Fahrer-Fahrzeug-Umwelt" Gesamtsystem, Darstellung nach SCHÄUFFELE und ZURAWKA [SCHÄUFFELE/ZURAWKA, S. 38f.].

Steuergeräten inkl. den darauf partitionierten E/E Funktionen obliegen dedizierte Aufgaben der Fahrzeugsteuerung, -regelung, -überwachung und -diagnose, die innerhalb der automotiven E/E Bordnetzarchitektur (bzw. Datenbordnetz) abgearbeitet werden müssen [BROY ET AL. 2011, S. 44; FAHRENKOPF 2013, S.40ff.]. Wie Abbildung 3-9 exemplarisch zeigt, werten Steuergeräte Sensordaten aus, führen Berechnungen auf Basis der v.a. in Software implementierten Algorithmen aus und übernehmen Diagnose, Selbsttest und Ansteuerung von Aktoren [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 190].

<u>Definition Steuergeräte (engl.: Electronic Control Unit ECU):</u> Steuergeräte inkl. Hardware und Basissoftware sind zentrale Rechen- und Steuereinheiten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, auf denen E/E Funktionen partitioniert sind.

# 3.4.1. Steuergerätehardware

Der Mikrocontroller bildet den Kernbaustein eines Steuergeräts. Dieser besteht aus Mikroprozessor, Ein- und Ausgabeeinheiten, Speicher (Lesespeicher (Programm- und Datenspeicher) und Schreib-Lese-Speicher (Datenspeicher)), Bussystem, Taktgenerator und Überwachungsschaltungen (Watchdog) (vgl. Abbildung 3-10) [FAHRENKOPF 2013. S.40ff.; 2012. SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, 59f.; STREICHERT/TRAUB S. S. WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 190f.]. Ferner bildet der Mikrocontroller die zentrale Rechenund Steuereinheit (engl.: Central Processing Unit (CPU)) des Steuergeräts. Die Ausführung der Befehle des Programmspeichers erfolgt über das Steuerwerk. Das Rechenwerk übernimmt die Befehle der arithmetischen und logischen Operationen. So wird die Anpassung an verschiedene praktische Anwendungen durch Programmierung ermöglicht [Tietze/Schenk 1999, S. 1067].

Dem Taktgenerator (auch: Oszillator) obliegt die Aufgabe, alle Operationen im Mikrocontroller mit einer definierten Zeitrate abarbeiten zu lassen (vgl. Abbildung 3-10). Der Watchdog überwacht diese Programmabarbeitung. Die verschiedenen Ein- und Ausgabeeinheiten (engl.: Input/Output (I/O)) wickeln den Datenverkehr mit der Umgebung ab, so etwa die Kommunikation mit anderen Steuergeräten einer E/E Bordnetzarchitektur. Programm- und Datenspeicher sind i.d.R. nichtflüchtige Lesespeicher, in denen das Programm verlustsicher abgespeichert wird [Tietze/Schenk 1999, S. 1097]. Hingegen handelt es sich je nach Anforderung

bei Datenspeichern um nichtflüchtige oder flüchtige Schreib-Lese-Speicher, auf die während der Programmabarbeitung verändernde Daten abgespeichert werden. Mit Ausnahme des Taktgenerators und Watchdogs sind alle Komponenten des Mikrocontrollers über Bussysteme (z.B. ein CAN-Bussystem (Controller Area Network)) verbunden [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 59f.; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 190ff.]. An dieser Stelle wird näher auf die oben erwähnten Halbleiterspeicher Technologien eingegangen (vgl. Abbildung 3-11) [BRIDWATER 2012, S. 58ff; PWC 2013, S. 2ff.; SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 51; TIETZE/SCHENK 1999, S. 727ff.]:

- Flüchtige Speicher sind Kurzzeitspeicher (engl.: Random Access Memory (RAM)), die sich in statische und dynamische Kurzzeitspeicher (engl.: Static RAM (SRAM) und Dynamic RAM (DRAM)) unterteilen lassen.
- Nichtflüchtige Halbleiterspeicher sind etwa Langzeitspeicher (engl.: Read Only Memory (ROM)), programmierbare Festwertspeicher (Programmable ROM (PROM)), wiederbeschreibbare Festwertspeicher (Erasable PROM (EPROM)) und elektrisch löschbare und wiederprogrammierbare Festwertspeicher (Electrical EPROM (EEPROM)).

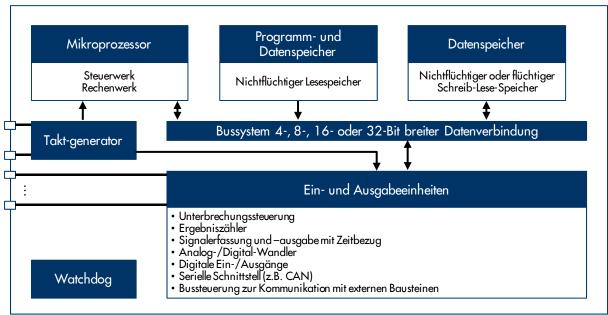


Abbildung 3-10: Vereinfachter Aufbau eines Mikrocontrollers in Anlehnung an SCHÄUFFELE/ZURAWKA [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 49ff.].

Die Flash-Speichertechnologie (Electric Erasable Programmable Read Only Memory) ist besonders hervorzuheben [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 308]: Bei dieser Speicherkategorie können über elektrische Löschimpulse (engl.: Flash) einzelne Speicherbereiche oder der gesamte Speicherinhalt gelöscht werden [Tietze/Schenk 1999, S. 751]. Im Vergleich zu anderen nichtflüchtigen Halbleiterspeichern besteht der Vorteil des Flash Speichers darin, dass dessen Programmierung sowohl in geschlossenen Steuergeräten, als auch bei im Fahrzeug bereits verbauten Steuergeräten, unter Zuhilfenahme von Programmiergeräten erfolgen kann. Dadurch eignet sich diese Kategorie von Speichern ideal für die Sicherung relativ großer Datenmengen, die im Laufe des Produktlebenszyklus des Steuergeräts bzw. Fahrzeugs mit hoher Wahrscheinlichkeit zu ändern bzw. zu ersetzen sind (z.B. der Programm- oder Datenspeicher im Steuer-

gerät). So ist es bspw. möglich, ein Software-Update für ein Steuergerät über die zentrale Offboard-Diagnoseschnittstelle eines Fahrzeugs durchzuführen.<sup>17</sup> Dieses kann z.B. bei einem baureihenübergreifenden Verbau von Steuergeräten (z.B. bei E/E Baukästen) notwendig sein, bei dem derivatsspezifische Softwareupdates erforderlich werden. Folglich unterstützt die Flash-Speichertechnologie baureihenübergreifenden Verbau und die Wiederverwendung von Steuergeräten. Dadurch kann, sofern ausschließlich Software-Updates vorgenommen werden, ein Wechsel des Steuergeräts vermieden werden, wodurch erhebliche Kosten eingespart werden können [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 308f.; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 101; TIETZE/SCHENK 1999, S. 751ff.].

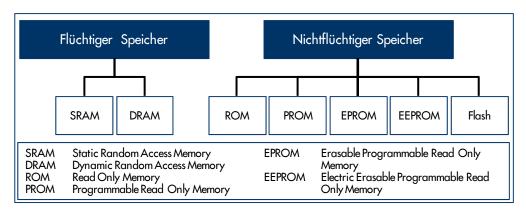


Abbildung 3-11: Nichtflüchtiger und flüchtiger Speicher, eigene Darstellung in Anlehnung an Schäuffele/Zurawka und Borgeest [Schäuffele/Zurawka 2010; Borgeest 2014].

## 3.4.2. Steuergerätearten und Vernetzungstechnologien

Die ersten im Fahrzeug eingesetzten E/E Steuergeräte realisierten nur vereinzelte und meist lokal abgegrenzte Anwendungen und Funktionen. Im Vergleich dazu kommen heute bis zu 90 hochkomplexe, vernetzte Steuergeräte in modernen Fahrzeugen zum Einsatz (vgl. Kapitel 1.1.1) [BROY 2006, S. 33; S. 2; SAAD/WEINMANN 2004, S. 1; SCHÄUFFELE/ZURWAKA 2013, S. 4f.]. Diese Vielzahl an Steuergeräten lässt sich in drei Grundtypen aufgliedern [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 191; WINNER ET AL. 2012, S. 89]:

- eingebettete Steuergeräte,
- semi-eingebettete Steuergeräte,
- Rechnerknoten.

Eingebettete Steuergeräte<sup>18</sup> bilden einen hohen Anteil aller in modernen Automobilen integrierten Rechen- und Steuereinheiten. Dies gilt speziell für die Anwendungsdomänen Antrieb, Fahrwerk und Karosserie [WINNER ET AL. 2012, S. 89]. Eingebettet bezeichnet die Integration einer Komponente respektive eines Systems (Steuergerät) in ein technisches Umfeld (z.B. Fahrzeug), ohne dass eine zusätzliche Bildschirmausgabe (z.B. Display) oder Eingabe (z.B. via Touch-Bedieneinheit) existiert [KREIFELDT ET AL. 2012, S. 248ff.]. Eingebettete Steuergeräte besitzen damit keine direkten Benutzerschnittstellen. Ferner haben die Fahrzeuginsassen (z.B.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Dieser Vorgang wird auch als "*flashen"* von Steuergeräten bezeichnet [REIF 2009, S. 401].

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Beispielhaft sei das **eingebettete Steuergerät** für die elektronische Dämpferregelung zu nennen [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 190f.].

der Fahrer) keinen bis geringen Einfluss auf deren Funktionalität [REIF 2009, S. 57]. Eingebettete Steuergeräte arbeiten die oben genannten Kernaufgaben eines Steuergeräts (z.B. Sensor-Auswertung, Algorithmen-Berechnung, Aktor-Ansteuerung) gesamthaft ab. Die auf dem Steuergerät partitionierten Funktionen laufen demnach weitestgehend autonom ab [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 191; WINNER ET AL. 2012, S. 89f.].

Semi-eingebettete Steuergeräte beinhalten i.d.R. keine Treiberbausteine. D.h. Sensoren und Aktoren werden zumeist als ausgelagerte, mechatronische Einheiten realisiert. Diese mechatronischen Einheiten übernehmen oft zusätzlich die Signalverarbeitung bis hin zur Ansteuerung der Aktorik. Die Systemvernetzung der Steuergeräte mit anderen Einheiten (z.B. den Sensoren oder Aktoren) erfolgt über (Sub-) Bussysteme. Aufgrund der Auslagerungen oben genannter Steuergeräte-Aufgaben (z.B. Signalverarbeitung), sind semi-eingebettete Steuergeräte mit hohen Rechenleistungen und Speicherkapazität für die Ausführung komplexer Funktionen (z.B. Fahrerassistenzfunktionen) ausgestattet. Ein Beispiel für diese Kategorie ist das Steuergerät für die adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Controll (ACC)) (vgl. Kapitel 3.2.2 und Abbildung 3-6) [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 191; WINNER ET AL. 2012, S. 90f.].

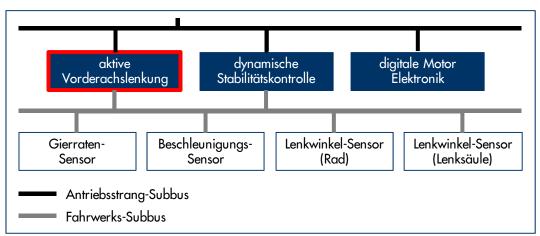


Abbildung 3-12: Vereinfachte technische Architektur "aktives Vorderachslenksystems" [vgl. Winner et al. 2012, S. 91].

Rechnerknoten werden vermehrt zur Umsetzung von Fahrerassistenzsystemen (z.B. Spurwechselassistent) oder X-by-Wire-Systemen (z.B. elektromechanische Bremsen) angewendet. D.h. für die Realisierung von hochkomplexen, vernetzten E/E Funktionen im Fahrzeug, die sich nur über das Zusammenwirken mehrerer vernetzter Steuergeräte umsetzen lassen. Zusätzlich können über Rechnerknoten gezielt Steuergerät-interne oder -externe Redundanzen aufgebaut werden, um etwa bestehende Verfügbarkeits- und Sicherheitsanforderungen erfüllen zu können. Ein Beispiel für den Einsatz von Rechnerknoten ist die Aktivlenkung (vgl. Abbildung 3-12): Für die Realisierung dieser vernetzten E/E Funktion ist ein Datenaustausch des Steuergeräts "aktive Vorderachslenkung" (engl.: Active Front Steering (AFS)) mit den Steuergeräten "dynamische Stabilitätskontrolle" (engl. Dynamic Stability Control (DSC)) und "digitale Motor Elektronik" (engl.: Digital Motor Electronic (DME)) über den Antriebsstrang-Subbus notwendig. Zusätzlich benötigt es eine doppelte Sensorik (vgl. Abbildung 3-12), die ebenfalls vom DSC benötigt wird und daher an den Fahrwerks-Subbus angeschlossen sind. Das als Rechnerknoten kategorisierte Steuergerät "aktive Vorderachslenkung" kann stark vereinfacht

auf dessen Doppelprozessor<sup>19</sup> reduziert werden: Die Berechnungsergebnisse des einen (Haupt-) Prozessors werden durch den zweiten Prozessor überwacht. [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 192; WINNER ET AL. 2012, S. 91].

Unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem der drei Grundtypen verfügen diese (vernetzten) Steuergeräte i.d.R. über mindestens einen Bus<sup>20</sup>-Anschluss, um über Kommunikationssysteme oder dedizierte Leitungen mit Sensoren, Aktoren und anderen Steuergeräten kommunizieren zu können [Broy et al. 2011, S. 43]. In modernen Fahrzeugen sind nahezu alle Steuergeräte direkt oder indirekt über sogenannte Vernetzungstechnologien miteinander vernetzt, z.B. über zentrale oder dezentrale Gateways<sup>21</sup> [REIF 2010, S. 208]. Das E/E Gesamtsystem umfasst folglich eine Vielzahl verschiedener Kommunikationssysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften [BORGEEST 2014, S. 53ff]. Wie im einleitenden Kapitel definiert (vgl. Kapitel 1.2.2.), sind Vernetzungstechnologien und das Kommunikationsrouting nicht Betrachtungsgegenstand des Forschungsvorhabens. Da diese jedoch einen elementaren Bestandteil einer E/E Bordnetzarchitektur bilden, werden diese zur Schaffung eines einheitlichen Verständnisses im Folgenden kurz erläutert (vgl. Kapitel 3.1.2): Bussysteme sind auf die jeweils zu erfüllende Aufgabe, hinsichtlich Geschwindigkeit und Datenaufkommen, ausgelegt. Differenziert wird zwischen den folgenden Bussystem-Typen:

- High-Speed Bussysteme für zeitkritische und sicherheitsrelevante Bereiche,
- Low-Speed-Bussysteme für den Komfortbereich,
- Bussysteme mit hohem Datendurchsatz im Infotainment- bzw. Multimediabereich,
- Bussysteme für Offboard-Diagnoseaufgaben, Fertigungstests, Kalibrierungsdienste.

Je nach Anwendungszweck unterliegen Busse unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich:

- Bandbreite (Datenübertragungsrate),
- Latenzzeit (Verzögerung zwischen Nachrichtversand und -empfang),
- Übertragungsmedium (optische versus elektrische Leitungen),
- Leitungslänge (maximal zulässige Leitungslänge),
- Datenübertragung (synchrone vs. asynchrone Datenübertragung).

Eine weitere Differenzierung von Bussystemen kann auf Basis der jeweiligen Buszugriffsverfahren unterschieden werden [REIF 2009, S. 9f.; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 192]: Deterministische Bussysteme (z.B. Flex Ray, TTP (Time-Triggered Protocol)) und prioritätsgesteuerte Bussysteme (LIN (Local Interconnect Network), CAN (Controller Area Network), MOST (Media Oriented Systems Transport)) oder Ethernet). Eine weitere Möglichkeit zur Kategorisierung von Bussystemen ist die Aufgliederung in Regel- und Steuernetzwerke (z.B. LIN, CAN, FlexRay oder Ethernet) sowie Multimedianetzwerke (z.B. MOST oder Ethernet) [BORGEEST 2014, S. 80ff.; REIF 2009, S. 32]. Letztere werden etwa für die Anbindung von

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> **Doppelprozessoren** funktionieren nach dem "Checks and Balances" Prinzip: Wenn die berechneten Ergebnisse beider Prozessoren nicht identisch sind, wird das Aktivlenksystem in einen sicheren Modus überführt, innerhalb dessen sich die Lenkung gleich einer konventionellen starren Lenkübersetzung verhält [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 192].

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> BUS (<u>B</u>inary <u>U</u>nit <u>S</u>ystem)

Gateways verbinden Bussysteme und Netzwerke im Fahrzeug physikalisch und logisch miteinander und stellen dabei Daten netzwerkübergreifend im gesamten Fahrzeug zur Verfügung [WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 236].

Kameras oder Bildschirmen im Automobil verwendet. Für die lokale Anbindung von (einfachen) Steuergeräten werden i.d.R. Subbusse (z.B. LIN) eingesetzt [WALLENTOWITZ/Reif 2010, S. 192]. Zur weiteren Vertiefung von Eigenschaften und spezifischen Verwendung der verschiedenen Vernetzungstechnologien sei an dieser Stelle u.a. auf folgende Literatur verwiesen: BORGEEST 2014; REIF 2009, WALLENTOWITZ/Reif 2010; WINNER ET AL. 2012 ZIMMERMANN/SCHMIDGALL 2006.

# 3.5. Automotive E/E Bordnetzarchitektur – Gestaltung

Die Komplexität des automotiven E/E Gesamtsystems wächst mit steigendem Anteil von Software-basierten E/E Funktionen (vgl. Kapitel 1.1). Bis zu 90 vernetzte Steuergeräte übernehmen heute Regelungs- und Steuerungsaufgaben im Fahrzeug (vgl. Kapitel 1.1.1 und Kapitel 3.4.2) [Broy 2006, S. 33; Saad/Weinmann 2004, S. 1; Schäuffele/Zurwaka 2013, S. 4f.]. Die Vernetzung steigt dabei nicht nur innerhalb der Fahrzeuge, sondern über die Fahrzeuggrenzen hinaus: Immer mehr E/E Funktionen finden offboard statt (vgl. Kapitel 1.1). Um die resultierende Systemkomplexität, Variantenvielfalt sowie den Produktivitätsdruck (Innovations- und Kostendruck) beherrschbar zu machen (vgl. Kapitel 1.2), besteht die Notwendigkeit strukturierende Maßnahmen auf E/E Gesamt- und Teilsystemebene unter besonderer Berücksichtigung der Kosten durchzuführen (vgl. Kapitel 1.1.3) [BRAESS/SEIFERT 2013, S. 149ff.; Broy et al. 2011, S. 44; Ericsson/Erixon 1999, S. 5ff.; Reif 2010, S. 211; REINER/ KRIEGER 2011, S. 14ff.; RENNER 2007, S. 41; SCHÖNMANN 2012, S. 7; SCHUH 1989, S. 58f]. Die automotive E/E Bordnetzarchitektur ist Ausgangspunkt für eine derartige Optimierung der E/E Produktstruktur, da diese das strukturgebende Element des E/E Gesamtsystems bildet (vgl. Kapitel 1.1.3). Entsprechend wichtig ist eine strukturierte Gestaltung der E/E Bordnetzarchitektur, unter Zuhilfenahme von Gestaltungsansätzen und -methoden, ergänzt durch die Berücksichtigung der funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen, die aus endogenen und exogenen Herausforderungen resultieren (vgl. Kapitel 1.1). Die Komplexität der Anforderungen an eine automotive E/E Bordnetzarchitektur steigt, wenn diese nicht nur für ein spezifisches Fahrzeug sondern für den derivats- und baureihenübergreifenden Einsatz gestaltet werden soll. Entsprechend sind je nach Einsatzziel einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur die passenden Gestaltungsansätze und -methoden zu identifizieren und auszuwählen.

In der Literatur existieren keine durchgängigen, gesamtsystemumfassende Gestaltungsansätze und -methoden zur Strukturierung und Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur mit Fokus auf die Kostenseite [BROY ET AL. 2011, S.42 ff; BRANDT ET AL. 2012, S.737; WARKENTIN ET AL. 2009, S. 190]. Im Schrifttum beschriebene Umfänge geben zumeist nur problemorientierte Anregungen hinsichtlich Anforderungen oder Zielsetzungen, die als Grundlage für die Entwicklung einer E/E Bordnetzarchitektur herangezogen werden können. Selten wird dabei auf Detailschritte einer gesamthaften Ausgestaltung einer E/E Bordnetzarchitektur eingegangen (vgl. Kapitel 1.2) [vgl. z.B. Borowski 1961; Biegert 1971; Broy et al. 2009; Broy et al. 2011; Matheis et al. 2006, Reif 2010; Renner 2007; Reiner/Krieger 2011; Warkentin et al. 2009].

Zu den in der Literatur am häufigsten diskutierten Gestaltungsansätzen zur automotiven E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung gehören der Funktionsorientierungsansatz (vgl. Kapitel 3.5.1), Hochintegrations- bzw. Zentralisierungsansatz (vgl. Kapitel 3.5.1) und Domänenansatz (vgl.

Kapitel 3.5.3) [BOROWSKI 1961; BIEGERT 1971; BURKERT 2012; BROY ET AL. 2009; BROY ET AL. 2011; MATHEIS ET AL. 2006, REIF 2010; RENNER 2007; REINER/KRIEGER 2011; Steininger/Wendenburg 2011; WARKENTIN ET AL. 2009]. Diese drei Gestaltungsansätze werden in den nachfolgenden Unterkapiteln betrachtet und unter Zuhilfenahme verschiedener Kriterien (s.u.) bewertet. Auf Basis der Bewertungsergebnisse folgt ein Vergleich der Ansätze untereinander. Als ergänzende Informationsquelle zur Literatur dienen hier Experteninterviews. Entsprechend fließt das in diesem Rahmen ermittelte Wissen in die Ausführungen und Bewertungen ein.

Die nachfolgend aufgeführten Bewertungskriterien wurden ebenfalls in Experteninterviews (vgl. Kapitel 2.3.3) diskutiert und festgelegt. Diskussionsgrundlage war der Handlungs- und Forschungsbedarf, der im einleitenden Kapitel erarbeitet wurde (vgl. Kapitel 1.2). Das resultierende Set an Kriterien fokussiert sich auf die relevanten Bewertungsumfänge des Forschungsvorhabens. Bspw. werden keine Kriterien aufgeführt, die im Kontext Kommunikation, Energieversorgung, Temperaturempfindlichkeit oder Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) relevant wären. Das resultierende Set an Bewertungskriterien von Gestaltungsansätzen für eine automotive E/E Bordnetzarchitektur mit Relevanz für das Forschungsvorhaben, besteht aus den folgenden:

- **Entwicklungsaufwand:** Wie hoch ist der Ressourceneinsatz für die Entwicklung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur unter Anwendung des Gestaltungsansatzes?
- **Skalierbarkeit:** Ermöglicht der Gestaltungsansatz die Skalierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, z.B. für einen derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz?
- **Updatefähigkeit/Erweiterbarkeit:** Unterstützt der Gestaltungsansatz die Updatefähigkeit und nachträgliche Erweiterung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur um zusätzliche E/E Funktionen?
- **Wiederverwendbarkeit:** Befähigt der Gestaltungsansatz die Wiederverwendung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur inkl. der dazugehörigen Hardware- und Software-Komponenten, z.B. für einen derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz?
- **Blindverbau:** Verhindert der Gestaltungsansatz den Blindverbau von Hardware- und Software-Komponenten innerhalb der automotiven E/E Bordnetzarchitektur, z.B. über gezielte Hochintegration von Umfängen mit derivats- oder baureihenübergreifender 100 Prozent Verbaurate?
- Steuergeräteanzahl: Wird mit dem Gestaltungsansatz die Anzahl von Steuergeräten inkl. eingesetzter Hardware-Ressourcen (Prozessor, Speicher, Steckverbindungen, etc.) auf ein Mindestmaß beschränkt?
- **Hochintegration:** Unterstützt der Gestaltungsansatz die Hochintegration von softwarebasierten E/E Funktionen auf Steuergeräten?
- **Bauraum:** Lässt der Gestaltungsansatz eine ideale Ausnutzung des verfügbaren Bauraums im Fahrzeug zu, wird bspw. die Anzahl an Steuergeräten reduziert, die Größe von Steuergeräten minimiert und die Verlegung langer Kabel vermieden?
- Verkabelungsaufwand / Kabellänge: Unterstützt der Gestaltungsansatz den Einsatz von minimaler Anzahl und Länge von Kabeln, z.B. über gezielte Hochintegration von

Umfängen mit 100 Prozent Verbaurate inkl. Verortung in unmittelbarer Nähe zu den relevanten Sensoren und Aktoren?

• **Steckverbindungen**: Verhindert der Gestaltungsansatz den Verbau unnötiger Steckverbindungen, z.B. über gezielte Hochintegration von Umfängen mit 100 Prozent Verbaurate innerhalb eines Steuergeräts?

### 3.5.1. Funktionsorientierungsansatz

Beim Funktionsorientierungsansatz zur Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur wird jede softwarebasierte E/E Funktion gekapselt auf einer Hardware-Komponente partitioniert, welche mit den notwendigen Sensoren und Aktoren sowie Vernetzungstechnologien verbunden werden muss [Steininger/Wendenburg 2011; S. 65ff.; Streichert/Traub 2012, S. 41]. Bei diesem Ansatz liegt der Fokus im ersten Schritt nicht auf der gesamten automotiven E/E Bordnetzarchitektur, sondern auf der Realisierung jeder einzelnen Funktion [Warkentin et al. 2009, S. 191]. D.h. die ziel- und anforderungsgerecht zu erfüllende Funktion steht im Vordergrund und über jeden dedizierten Funktionsablauf wird vollständige Transparenz geschaffen [Renner 2007, S. 92]. Erst im zweiten Schritt werden alle Funktionen, die im Rahmen der gesamten E/E Bordnetzarchitektur berücksichtigt werden sollen, gesamthaft betrachtet und integriert. Elementar dabei ist die Betrachtung der Wirkflüsse und Beziehungen zwischen den zu integrierenden Funktionen. Hierarchische Abhängigkeiten der einzelnen Funktionen untereinander stehen hierbei nicht im Vordergrund, d.h. über den Funktionsorientierungsansatz wird prinzipiell keine hierarchische Struktur innerhalb der E/E Bordnetzarchitektur geschaffen [Streichert/Traub 2012, S. 41f.].

Bewertungskriterien	Funktionsorientierung
Entwicklungsaufwand	+
Skalierbarkeit	-
Erweiterbarkeit	0
Wiederverwendbarkeit	+
Blindverbau	+
Steuergeräteanzahl	-
Hochintegration	-
Bauraum	-
Verkabelungsaufwand/Kabellänge	-
Steckverbindungen	-

(+) positiv;(o) neutral;(-) negativ

Abbildung 3-13: Bewertung des Gestaltungsansatzes der Funktionsorientierung, eigene Darstellung.

Die Bewertung des Funktionsorientierungsansatzes zur Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur kommt gemäß Literatur und den Experteninterviews zu folgenden Ergebnissen, die in der Abbildung 3-13 abschließend zusammengefasst werden [vgl. Broy et al. 2011, S. 47; Streichert/Traub 2012, S. 41f.; Warkentin et al. 2009, S. 189 ff.]:

- Entwicklungsaufwand: Im o.g. ersten Schritt ist der Entwicklungsaufwand verhältnismäßig gering, da hierbei jede E/E Funktion inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten separat betrachtet wird. Die darauffolgende Integration bzw. Harmonisierung des Zusammenspiels aller Einzelfunktionen innerhalb der automotiven E/E Bordnetzarchitektur ist eine hochkomplexe Aufgabe, da die Kommunikation zwischen den Steuergeräten dediziert festgelegt werden muss. Dies bindet ein hohes Maß an Kapazitäten.
- **Skalierbarkeit:** Der Funktionsorientierungsansatz und damit die Verortung von genau einer Funktion je Steuergerät verhindert eine anforderungsgerechte Skalierung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur über alle Derivate und Baureihen hinweg. Bei einer Erweiterung um zusätzliche E/E Funktionen, ist die Harmonisierung des Zusammenspiels aller Einzelfunktionen sicherzustellen.
- Erweiterbarkeit: Grundsätzlich ist eine Erweiterung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur um zusätzliche Funktionen inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten mit geringem Aufwand möglich. Allerdings ist auch hier die Harmonisierung des Zusammenspiels aller Einzelfunktionen sicherzustellen.
- Wiederverwendbarkeit: Der Funktionsorientierungsansatz unterstützt die Wiederverwendung von einzelnen Funktionsblöcken, aber auch der gesamten E/E Bordnetzarchitektur, da jede E/E Funktion inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten separat integriert wird. Entsprechend wäre eine Wiederverwendung für einen derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz zu einem späteren Zeitpunkt möglich, sofern identische funktionale Anforderungen zugrunde liegen.
- **Blindverbau:** Ein Blindverbau wird bzgl. der funktionsspezifischen Software- und Hardware-Komponenten vermieden. Allerdings können etwa die zur vollständigen Realisierung einer Funktion notwendigen Sensoren und Aktoren redundant verbaut werden, da jede einzelne E/E Funktion getrennte Steuergeräte, Sensorik und Aktorik hat.
- Steuergeräteanzahl: Bei der Anwendung des Funktionsorientierungsansatzes ist die resultierende Anzahl von Steuergeräten entsprechend sehr hoch, da die Anzahl von Funktionen und Hardware-Komponenten äquivalent sind. Entsprechend werden Hardware-Ressourcen wie Prozessor, Speicher oder Steckverbindungen funktionsspezifisch gebunden und nicht aus Gesamtsicht auf die automotive E/E Bordnetzarchitektur auf ein Mindestmaß beschränkt.
- Hochintegration: Die Hochintegration von mehreren Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten ist bei dem Funktionsorientierungsansatz nicht vorgesehen. Entsprechend weisen die einzelnen Komponenten eine verhältnismäßig niedrige Komplexität auf. Grund dafür ist, dass bei diesem Ansatz lediglich ein kleiner Funktionsumfang auf ein Steuergerät partitioniert wird, für den eine geringe Anzahl von Schnittstellen benötigt wird.
- Bauraum: Mit Anwendung des Funktionsorientierungsansatzes ergeben sich viele Steuergeräte, die allerdings geringe Packagegröße und Schnittstellenanzahl aufweisen. Ein erhöhter Bauraumbedarf resultiert aus dem hohen Verkabelungsaufwand und der Integration von funktionsspezifischer Sensorik und Aktorik.

- Verkabelungsaufwand / Kabellänge: Der Verkabelungsaufwand ist sehr hoch, da verschiedene Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten untereinander vernetzt werden müssen und die Steuergeräte an unterschiedlichen Stellen im Fahrzeug verortet sein können.
- Steckverbindungen: Die Anzahl der Steckverbindungen je Steuergerät sind beim Funktionsorientierungsansatz gering. Allerdings ist die E/E Bordnetzarchitektur übergreifende Anzahl von Steckverbindungen sehr hoch, da die Option einer Hochintegration mehrerer Funktionen auf ein Steuergerät ausgeschlossen wird und somit keine möglichen Synergien geschöpft werden können.

## 3.5.2. Zentralisierungsansatz

Bei der Integration der steigenden Anzahl von Steuergeräten im Fahrzeug stoßen OEMs zunehmend an die Grenzen der Umsetzbarkeit (vgl. Kapitel 1.1). Neben Restriktionen bzgl. Bauraum und Gewicht fällt dabei das steigende Kommunikationsaufkommen inkl. der daraus resultierenden Last auf den Bussystemen sowie die notwendige Energieversorgung der Hardware-Komponenten stark ins Gewicht [Broy 2006, S. 33; Broy et al. 2011, S. 43; SAAD/Weinmann 2004, S. 1; Schäuffele/Zurawka 2010, S. 4f.; Streichert/Traub 2012, S. 12; Wallentowitz/Reif 2010, S. 179]. Als Reaktion gibt es in der automotiven E/E Entwicklung einen Trend zum Zentralisierungsansatz [Broy et al. 2011, S. 43; Streichert/Traub 2012, S. 42f]. Bei diesem Gestaltungsansatz werden mehrere E/E Funktionen auf einem hochleistungsfähigen Steuergerät integriert, wodurch sich die gesamte Anzahl von Steuergeräten im E/E Gesamtsystem reduziert. Dieses Vorgehen wird auch Hochintegration genannt. Das Steuergerät, auf dem die Hochintegration stattfindet, wird als Domänenleitrechner [Streichert/Traub 2012, S. 42] oder im Rahmen des Forschungsvorhabens als Zentrales Steuergerät (ZSG) bezeichnet.<sup>22</sup>

Eine Hochintegration von E/E Funktionen auf einem ZSG ist nicht uneingeschränkt möglich. Die verfügbaren Hardware-Kapazitäten (insb. Prozessor und Speicher) sind begrenzt und die für die Ausführung der integrierten E/E Funktionen notwendige Vernetzung zum Austausch von Daten (z.B. mit Sensoren und Aktoren) muss realisierbar bleiben (vgl. Kapitel 3.3.2) [REIF 2010, S. 209f.]. Zudem ist hier ein verhältnismäßig großer Bauraum vorzuhalten, da in einem ZSG größere Hardware-Komponenten (z.B. Platinen), Schnittstellen und Stecker verbaut werden. Auch kann die Ableitung der durch die große Anzahl von Bauteilen im Steuergerätegehäuse entstehenden Wärme zu thermischen Problemen führen [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 43].

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bewertung des Hochintegrations- bzw. Zentralisierungsansatzes zur Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur gemäß Literatur und den Experteninterviews aufgeführt, die in der Abbildung 3-14 abschließend zusammengefasst werden [Broy et al. 2011, S. 43f.; Reif 2009, S. 153; Streichert/Traub 2012, S. 42f; Wallentowitz/Reif 2010, S. 188]:

• Entwicklungsaufwand: Beim Zentralisierungsansatz werden mehrere E/E Funktionen auf einem hochleistungsfähigen Steuergerät integriert. Dadurch ist die Komplexität eines solchen ZSG höher als die von Einzelsteuergeräten, auf denen jeweils nur eine

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese hochleistungsfähigen Steuergeräte (Body Controller) als Zentrale Steuergeräte (ZSG) bezeichnet.

Funktion partitioniert wird. Jedoch ist die Anzahl der zu entwickelnden Steuergeräte im E/E Gesamtsystem beim Zentralisierungsansatz niedriger. Entsprechend ist der Entwicklungsaufwand hoch für die Entwicklung jedes einzelnen ZSG, relativiert sich allerdings übergreifend durch eine geringe Anzahl zu entwickelnder Steuergeräte für das E/E Gesamtsystem. Entsprechend beschränkt sich die Steuergeräteabsicherung beim Zentralisierungsansatz auf eine geringere Anzahl von Steuergeräten, da die auf einem ZSG verorteten E/E Funktionen gesamthaft abgesichert werden (Absicherung "all-inone").

- Skalierbarkeit: Ein ZSG ist nur bedingt skalierbar, da die Hardware-Komponenten (Prozessorleistung, Speicher, etc.) oder Schnittstellen für einen dedizierten E/E Funktionsumfang ausgewählt wurden. Auch können funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an den auf einem ZSG partitionierten E/E Funktionsumfang Derivats- oder baureihenübergreifend divergieren.
- Erweiterbarkeit: Die nachträgliche Erweiterung eines Zentrales Steuergerätes um zusätzliche E/E Funktionen ist nur eingeschränkt möglich, da die Hardware-Komponenten (Prozessorleistung, Speicher, etc.) oder Schnittstellen für einen dedizierten E/E Funktionsumfang ausgewählt wurden. Entsprechend ist eine Erweiterbarkeit eines ZSGs um neue E/E Funktionen u.U. nicht realisierbar.
- Wiederverwendbarkeit: Aufgrund der spezifischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an den E/E Funktionsumfang, der auf einem ZSG verortet wird, ist die Wiederverwendbarkeit in der Mehrzahl aller Anwendungsfälle nicht möglich.
- **Blindverbau:** Wird der Hochintegrations- bzw. Zentralisierungsansatz zur Gestaltung einer derivatsspezifisch automotiven E/E Bordnetzarchitektur angewendet, kann der Blindverbau von E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten ausgeschlossen werden. Wird dieser Ansatz für eine Derivats- oder baureihenübergreifende E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung verwandt, dann steigt die Wahrscheinlichkeit des Blindverbaus von E/E Funktionen mit der Anzahl der zugrundeliegenden unterschiedlichen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen.
- Steuergeräteanzahl: Mit Anwendung des Zentralisierungsansatzes kann bei der Gestaltung einer E/E Bordnetzarchitektur die Anzahl von Steuergeräten minimiert werden, da mehrere E/E Funktionen auf dem ZSG verortet werden. Auch werden die Hardware-Komponenten von Steuergeräten beim Zentralisierungsansatz im Vergleich zum Funktionsorientierungsansatz im Idealfall optimal ausgenutzt, sodass die Anzahl verwendeter Bauteile reduziert werden kann.
- Hochintegration: Der Zentralisierungsansatz hebt auf Hochintegration von E/E Funktionen auf ein leistungsstarkes ZSG ab. Dadurch ist die Komplexität eines ZSGs hoch, verglichen mit einem Steuergerät, auf dem nur eine einzige E/E Funktion partitioniert ist. Aus der automotiven E/E Bordnetzarchitektur -Gesamtsicht ist die Komplexität jedoch geringer als beim Funktionsorientierungsansatz, da weniger Steuergeräte betrachtet werden müssen.
- Bauraum: Aufgrund der größeren Anzahl von Hardware-Komponenten (Prozessor, Speicher, Platinen, Stecker, Schnittstellen, etc.) in einem ZSG, benötigt dieses einen entsprechend größeren Bauraumvorhalt als ein Steuergerät, auf dem nur eine einzige E/E Funktion partitioniert ist. Aufgrund der geringeren Anzahl von Steuergeräten im

Vergleich zum Funktionsorientierungsansatz, wird in Summe ggf. weniger Bauraum beansprucht.

- Verkabelungsaufwand / Kabellänge: Der Vernetzungs- bzw. Verkabelungsaufwand kann bei der Anwendung des Zentralisierungsansatzes für die automotive E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung sehr hoch werden, wenn Sensoren und Aktoren nicht in unmittelbarer Nähe des ZSG verbaut sind. Liegen Sensoren und Aktoren nahe dem ZSG, so ist der Verkabelungsaufwand im Vergleich zum Funktionsorientierungsansatz, aufgrund der niedrigeren Anzahl von Steuergeräten, geringer.
- **Steckverbindungen**: Durch die gleichzeitige Nutzung einzelner Schnittstellen bzw. Steckverbindungen für mehrere E/E Funktionen, ist die Anzahl der Steckverbindungen bei der Anwendung des Zentralisierungsansatzes geringer als beim Funktionsorientierungsansatz.

Bewertungskriterien	Zentralisierung
Entwicklungsaufwand	0
Skalierbarkeit	-
Erweiterbarkeit	-
Wiederverwendbarkeit	-
Blindverbau	-
Steuergeräteanzahl	+
Hochintegration	+
Bauraum	0
Verkabelungsaufwand/Kabellänge	0
Steckverbindungen	+

(+) positiv;(o) neutral;(-)negativ

Abbildung 3-14: Bewertung des Zentralisierungsansatzes, eigene Darstellung.

#### 3.5.3. Domänenansatz

Beim Domänenansatz wird die automotive E/E Bordnetzarchitektur in dedizierte Domänen aufgegliedert. Jede der Domänen umfasst dabei einen zentralen Rechnerknoten (Domänenleitrechner<sup>23</sup>) sowie hierarchisch untergeordnete Steuergeräte, auf denen ein domänenspezifischer E/E Funktionsumfang partitioniert ist [BROY ET AL. 2011, S. 44].

Aufgrund der hier vorliegenden hierarchischen Anordnung von Domänenleitrechner und Steuergeräten kann auch von einem Master-/Slave-Ansatz gesprochen werden. Die Domänen kommunizieren untereinander ausschließlich über die Domänenleitrechner (Master-ECUs), die wiederum die zugehörigen Steuergeräte (Slave-ECU) ansteuern [STREICHERT/TRAUB 2012, S.

Domänenleitrechner übernehmen übergreifende Aufgaben einer Domäne und überlassen den intelligenten Stellern ausschließlich die Grundfunktionen [MISCHO ET AL. 2008, S. 21].

43]. Die Definition und Schneidung einzelner Fahrzeugdomänen kann OEM-spezifisch divergieren. Exemplarisch können die Domänen Antrieb,<sup>24</sup> Fahrwerk,<sup>25</sup> Karosserie und Komfort,<sup>26</sup> Sicherheit und Fahrerassistenz<sup>27</sup> sowie Infotainment<sup>28</sup> genannt werden [BROY ET AL. 2011, S 52; BUTZ ET AL. 2012; S. 180ff.; HOFFMANN 2010, S. 39; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 12].

Die Bewertung des Domänenansatzes zur Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur kommt gemäß Literatur und den Experteninterviews zu folgenden Ergebnissen, die in der Abbildung 3-15 abschließend zusammengefasst werden [vgl. Broy et al. 2011, S. 44F.; Streichert/Traub 2012, S. 43f.; Warkentin et al. 2009, S. 189 ff.]:

• Entwicklungsaufwand: Der Entwicklungsaufwand für einen Domänenleitrechner ist, aufgrund der etwas höheren Komplexität, größer als der für ein Steuergerät auf Slave-Ebene. Ferner ist für die Umsetzung des Domänenansatzes ein Netzwerkmanagement<sup>29</sup> erforderlich, da die Domänenleitrechner je Domäne unabhängig voneinander sind und sich bspw. im Teilnetzbetrieb bei temporärer Deaktivierung gegenseitig "wecken"<sup>30</sup>

Die Domäne Antrieb umfasst E/E Funktionen (z.B. Motoren- und Getriebesteuerung), die im direkten Zusammenhang mit dem Fahrzeugantrieb stehen, d.h. den Verbrennungs-, Elektromotoren und Getrieben sowie den dazugehörigen Umfängen. Im Zuge der Hybridisierung und Elektromobilität sowie den Bemühungen sowohl Emissionen als auch Energie- respektive Kraftstoffverbräuche zu reduzieren, wird diese Domäne zukünftig großen Veränderungen unterliegen [BORGEEST 2008; S. 269ff.; BROY ET AL. 2011, S.45; REIF 2009, S. 127ff.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 152ff.].

Domäne Fahrwerk enthält fahrwerksspezifische E/E Funktionen wie die dynamische Antriebsschlupfregelung (DTC), das Antiblockiersystem (ABS) oder die Antriebsschlupfregelung und Bremsenmanagement zur Erhaltung der Fahrstabilität (DSC) [BORGEEST 2008; S. 274ff.; BROY ET AL. 2011, S.45; REIF 2009, S. 309ff.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 177ff.].

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> In der **Domäne Karosserie und Komfort** sind E/E Funktionen geclustert, die in der Karosserie bzw. im Chassis eines Fahrzeugs verortet sind und dabei größtenteils zum Komfort der Fahrzeuginsassen beitragen. Dazu gehören etwa Multifunktions-Sitze, elektronische Schließsysteme inklusive Funkfernbedienung, elektronische Fenster und Schiebedach oder mehrzonige Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums [BORGEEST 2008; S. 299f.; BROY ET AL. 2011, S.45; REIF 2009, S. 247ff.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 125ff.].

Mit Sicherheit und Fahrerassistenz umfasst die gleichnamige Domäne verschiedene E/E Funktionen, die für die Sicherheit des Fahrers und seiner Umwelt sorgen. Darüber hinaus unterstützen diese E/E Funktionen den Fahrer während der Fahrt aktiv und passiv [BORGEEST 2008; S. 274f.; BROY ET AL. 2011, S.45; BUTZ ET AL. 2012; S. 180ff.; REIF 2009, S. 259]. Als Beispiele für sicherheitsrelevante E/E Funktionen sind der aktive Fußgängerschutz oder die Airbag-Steuerung zu nennen. Solche E/E Funktionen unterliegen strengsten Sicherheitsanforderungen und haben höchsten Anspruch bzgl. Qualität sowie Zuverlässigkeit, da diese Menschenleben erhalten können. Die Entwicklung solcher sicherheitsrelevanten E/E Funktionen ist häufig durch gesetzliche Vorgaben getrieben.

Beispiele für Fahrerassistenzsysteme sind die E/E Funktionen Spurwechselwarnung oder die Verkehrszeichenerkennung. Dieser letztgenannte Funktionsumfang birgt ein ganz besonders großes Potenzial für zukünftige Innovationen, die das Reisen für den Autofahrer immer sicherer und komfortabler machen [BORGEEST 2008; S. 285f.; BROY ET AL. 2011, S.43ff.; REIF 2009, S. 259ff.; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 208ff.].

Die Domäne Infotainment beinhaltet E/E Funktionen, welche die Fahrzeuginsassen während der Fahrt unterhalten, informieren und vernetzen. Neben verschiedenen Quellen für Musik (Radio, DVD/CD, MP3), Telefonie, digitalen und analogen TV zählen Verkehrsinformationen, Navigation und die Internetnutzung. Funktionen dieser Domäne obliegt die große Herausforderung kompatibel zu den jeweils aktuell am Markt erhältlichen Consumer Electronics zu sein. Dadurch haben sie wesentlich kürzere Lebenszyklen im Vergleich zum Fahrzeug [BORGEEST 2008; S. 288ff.; BROY ET AL. 2011, S.45; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 208ff.].

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Unter **Netzwerkmanagement** ist die Verwaltung, Betriebstechnik und Überwachung des Domänennetzwerks zu verstehen

Wecken bedeutet, dass die Domänenleitrechner aus "schlafen" (Ruhezustand) in den normalen Arbeitsmodus "wach" versetzt werden.

müssen. E/E Bordnetzarchitektur übergreifend kann mit Anwendung des Domänenansatzes der Entwicklungsaufwand im Vergleich zum Funktionsorientierungsansatz und Zentralisierungsansatz dadurch reduziert werden, dass die Anzahl der zu entwickelnden Steuergeräte inkl. Verkabelungsaufwand geringer ist.

- **Skalierbarkeit:** Mit dem Domänenansatz lässt sich die Skalierbarkeit der automotiven E/E Bordnetzarchitektur sehr gut über die Steuergeräte auf Slave-Ebene realisieren, auf der zusätzliche E/E Funktionen anforderungsgerecht integriert werden können. Dadurch eignet sich die Anwendung des Domänenansatzes, im Vergleich zu den beiden anderen Gestaltungsansätzen, am besten für eine derivats- oder baureihenübergreifende automotive E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung.
- Erweiterbarkeit: Mit Anwendung des Domänenansatzes kann die automotive E/E Bordnetzarchitektur sehr gut über die Steuergeräte auf Slave-Ebene um E/E Funktionen erweitert werden. Entsprechend kann eine automotive E/E Bordnetzarchitektur, die gemäß dem Domänenansatz gestaltet wurde, z.B. auf exogene Herausforderungen reagieren, indem zusätzliche innovative E/E Funktionen (z.B. aufgrund von Kundenoder Gesetzesanforderungen) integriert werden können.
- **Wiederverwendbarkeit:** Bei dem Domänenansatz besteht die Möglichkeit einzelne E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponente einer Domäne derivats- oder baureihenübergreifend wiederzuverwenden. Dies gilt aber vornehmlich für solche, die auf Steuergeräten der Slave-Ebene partitioniert sind.
- **Blindverbau:** Der Domänenansatz beugt dem Blindverbau von E/E Funktionen vor, indem dieser eine Skalierung und Erweiterung mit zusätzlichen E/E Funktionen auf Steuergeräten der Slave-Ebene unterstützt. Eine Hochpartitionierung von E/E Funktionen mit niedriger Verbaurate auf den Domänenleitrechner findet i.d.R. nicht statt.
- Steuergeräteanzahl: Die Steuergeräteanzahl ist bei der Anwendung des Domänenansatzes niedriger als beim Funktionsorientierungsansatz und höher als beim Zentralisierungsansatz.
- **Hochintegration:** Der Domänenansatz unterstützt Hochintegration nur beim Domänenleitrechner. Für die Steuergeräte auf der Slave-Ebene wird dies nicht angewendet. Die Komplexität von Software- und Hardware-Komponenten des Domänenleitrechners und der übrigen Steuergeräte ist vergleichsweise gering.
- **Bauraum:** Bei dem Domänenansatz ist der Bauraumbedarf von Hardware-Komponenten bzw. Steuergeräten gering, da die notwendige Rechenleistung wie auch Schnittstellen auf mehrere Steuergeräte je Domäne aufgeteilt werden.
- Verkabelungsaufwand / Kabellänge: Der Verkabelungsaufwand ist im Vergleich zum Funktionsorientierungs- und Zentralisierungsansatz gering, da ein Kommunikationssystem für den Signalaustausch zwischen Domänenleitrechnern und den zugehörigen Steuergeräten genutzt sowie die Ansteuerung nahe der notwendigen Sensorik und Aktorik verortet werden kann.
- **Steckverbindungen**: Durch die gleichzeitige Nutzung einzelner Schnittstellen bzw. Steckverbindungen im Domänenleitrechner für mehrere E/E Funktionen, ist die Anzahl der Steckverbindungen bei der Anwendung des Domänenansatzes geringer als beim Funktionsorientierungsansatz.

Bewertungskriterien	Domänen
Entwicklungsaufwand	0
Skalierbarkeit	+
Erweiterbarkeit	+
Wiederverwendbarkeit	+
Blindverbau	+
Steuergeräteanzahl	0
Hochintegration	0
Bauraum	0
Verkabelungsaufwand/Kabellänge	0
Steckverbindungen	0

(+) positiv;(o) neutral;(-)negativ

Abbildung 3-15: Bewertung des Domänenansatzes, eigene Darstellung.

# 3.5.4. Vergleich automotiver E/E Bordnetzarchitektur Gestaltungsansätze

Die Bewertungsergebnisse der drei Gestaltungsansätze werden in Abbildung 3-16 gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung gehen klare Vor- und Nachteile der jeweiligen Gestaltungsansätze hervor, welche im Folgenden kurz diskutiert werden.

Zu den Vorteilen des Funktionsorientierungsansatzes zählen die geringe Komponenten-Komplexität, der geringe Bauraumbedarf je Komponente, die Möglichkeit zur Skalier- und Erweiterbarkeit sowie die Wiederverwendbarkeit der automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Demgegenüber stehen die Nachteile, dass keine hierarchische Struktur erzeugbar ist, die Anzahl der Hardware-Komponenten (Steuergeräte) inkl. Sensoren und Aktoren und damit einhergehend auch der Gesamtpackagebedarf (Bauraum) sowie der Verkabelungsaufwand sehr hoch sind. Dadurch entstehen verhältnismäßig hohe Kosten. Gerade die Nachteile des Funktionsorientierungsansatzes verdeutlichen, dass eine sinnvolle Konzeptgestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur für einen derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz nur bedingt nach Vorgaben dieses Ansatzes erfolgen kann. Zentrale Aspekte, die gegen die konsequente Anwendung des Funktionsorientierungsansatzes sprechen, sind die hohen Kosten.

Der Zentralisierungsansatz hat die wesentlichen Vorteile der geringen Steuergeräteanzahl, der effizienten Ausnutzung von Hardwarekapazitäten, des Entwicklungsaufwands und der mäßigen Kosten. Demgegenüber stehen Nachteile wie die hohe Komplexität eines ZSGs und die schlechte Eignung hinsichtlich Skalier-, Erweiter- und Wiederverwendbarkeit. Vor allem die aufgeführten Nachteile zeigen Gründe auf, warum der Einsatz von ZSGs für den derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz nur bedingt sinnvoll ist, und somit durch die Möglichkeit ergänzt werden muss, E/E Funktionen auch einzeln auf Hardware-Komponenten partitionieren zu können. Letzteres wird gerade dann immanent notwendig, wenn eine automotive E/E Bordnetzarchitektur für den derivats- oder baureihenübergreifenden Einsatz gestaltet werden soll. Andernfalls wird die Erfüllung des zugrundeliegenden umfangreichen Sets an funktionalen wie

nicht-funktionalen Anforderungen nahezu unmöglich. Dies ergänzend ist der Zentralisierungsansatz nur dann wirklich geeignet, wenn auf dem ZSG E/E Funktionen mit hoher Verbaurate partitioniert werden, um den Blindverbau von E/E Funktion zu vermeiden. Funktionen mit geringer Verbaurate sollten nicht hochintegriert, sondern wie oben beschrieben, separat hinzugefügt werden [STREICHERT/TRAUB 2012, S. 43; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 188].

Bewertungskriterien	Funktionsorientierung	Zentralisierung	Domänen
Entwicklungsaufwand	+	0	0
Skalierbarkeit	-	-	+
Erweiterbarkeit	0	-	+
Wiederverwendbarkeit	+	-	+
Blindverbau	+	-	+
Steuergeräteanzahl	-	+	0
Hochintegration	-	+	0
Bauraum	-	+	0
Verkabelungsaufwand/Kabellänge	-	0	0
Steckverbindungen	-	0	0

(+) positiv;(o) neutral;(-)negativ

Abbildung 3-16: Vergleich der drei Gestaltungsansätze, eigene Darstellung.

Die Bewertung des Domänenansatzes zeigt ebenfalls Vor- und Nachteile [BROY ET AL. 2011, S. 44; Reif 2010, S. 212ff.; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 43f.]: Vorteilhaft an diesem Gestaltungsansatz ist, dass dieser für die automotive E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung eine klare hierarchische Ordnung bzgl. Partitionierung der E/E Funktionen und der Kommunikation vorgibt. Auch wird die Skalierung, Erweiterung und Wiederverwendung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur unterstützt. Positive Auswirkung auf die Kosten für die Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur haben die mehrfache Nutzung einzelner Steckverbindungen bzw. Schnittstellen, die gute Ausnutzung von Hardware-Kapazitäten und der geringe Verkabelungsaufwand. Diese positiven Eigenschaften des Domänenansatzes befähigen eine anforderungsgerechte derivats- oder baureihenübergreifende E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung, d.h. auch im Spannungsfeld aus Innovations- und Kostendruck. Nachteile am Domänenansatz sind, dass dieser die Umsetzung eines Netzwerkmanagements erfordert, da die Domänenleitrechner je Domäne unabhängig voneinander sind und sich bspw. im Teilnetzbetrieb bei temporärer Deaktivierung gegenseitig "wecken" müssen.

Unter Berücksichtigung der im einleitenden Kapitel formulierten Forschungsfragen wird im Rahmen des Forschungsvorhabens nach einer Lösung für eine automotive E/E Bordnetzarchitektur gesucht, mit Eignung für den baureihenübergreifenden Einsatz, in die sämtliche E/E Funktionen integrierbar sein sollen (vgl. Kapitel 1.2). Der Vergleich der drei verschiedenen Ansätze zur Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur führt zu dem Ergebnis, dass diese formulierte Anforderung am besten mit Anwendung des Domänenansatzes erreicht werden kann. Entsprechend wird dieser als Grundlage für das im Rahmen des Forschungsvorhabens zu erarbeitende Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 5) ausgewählt.

# 3.6. Automotiver E/E Baukasten

Die Eignung von Baukästen bzw. die Anwendung des Baukastenprinzips als technische Maßnahme zur Optimierung der Produktstruktur und Beherrschung von interner Variantenvielfalt und Komplexität wird sowohl in der Fachliteratur als auch von Experten der Praxis als besonders nutzenstiftend bewertet (vgl. Kapitel 1.1) [BROY ET AL. 2011, S. 44; ERICSSON/ERIXON 1999, S. 5ff.; JESCHKE 1997, S. 50; REIF 2010, S. 211; REINER/KRIEGER 2011, S. 14ff.; RENNER 2007, S. 41; SCHÖNMANN 2012, S. 7; SCHUH 1989, S. 58f; SCHUH/SCHWENK 2001, S. 74; STOCKMAR 2004; S. 7]. Die Variantenvielfalt und die Komplexität bedingen sich gegenseitig. In der E/E Automobilentwicklung führt vor allem die hohe Variantenvielfalt<sup>31</sup> zu einem höheren Komplexitätsgrad [ZERRES 2014, S. 289]. Die interne Variantenvielfalt und Veränderlichkeit wird durch verschiedene Faktoren<sup>32</sup> getrieben. Diese beeinflussen entweder die Variantenvielfalt bezogen auf E/E Funktion (vgl. Abbildung 1-11) oder die Veränderlichkeit eines E/E Umfangs, welche sich bspw. durch unterschiedliche Lebenszyklen bedingt [DZIOBEK ET AL. 2008, S. 33f.; HOFFMANN 2010, S. 30; KAMPKER ET AL. 2010, S. 258f.; ZIEGENBEIN ET AL. 2005, S. 1]. Im Folgenden sind je zwei Beispiele für (Varianten-) Vielfalt und Veränderlichkeit beeinflussende Faktoren aufgeführt:

- Konfigurationsmöglichkeit als Vielfalt-beeinflussender Faktor: Grad in dem ein Derivat über (optionale) Ausstattungslisten<sup>33</sup> auf Kundenwunsch individualisiert werden kann [Broy 2003, S. 6; Pretschner et al. 2007, S. 4; Hoffmann 2010, S. 30].
- Lösungsvarianten als Vielfalt-beeinflussender Faktor: Anzahl eingesetzter technischer Lösungsvarianten je E/E (Kunden-) Funktion, z.B. für verschiedene Zielmärkte mit jeweils marktspezifischen Ausstattungsangeboten für ein Fahrzeug, bedingt durch unterschiedliche regionale Gesetzgebungen oder Kundenanforderungen [BALZERT 2009, S. 35].
- Lebenszyklen als Veränderlichkeit-beeinflussender Faktor: Divergierende Lebenszyklen von Fahrzeugen und darin verbauten E/E Umfängen respektive Komponenten

Die Variantenvielfalt resultiert aus der steigende Anzahl an angebotenen Produktvarianten (Fahrzeugtypen und -modelle) [Lechner et al. 2011, S. 1; Zenner 2006, S. 1; Lechner/Wagenitz 2011, S. 252]. Diese wird zudem durch immer kürzere Innovations- und Modellwechselzyklen verstärkt [Schittny et al. 2008, S. 12]. In Deutschland können so, den Ergebnissen einer Studie des Center of Automotive Research (CAR) zufolge, Automobilkäufer zwischen 376 PKW-Reihen wählen [o. V. 2012]. Im Jahr 2015 werden es nach Ansicht der Autoren dieser Studie bereits 415 PKW-Reihen sein. OEMs wie Mercedes-Benz unterstreichen diese Entwicklung. In den 80er Jahren wurden bei Mercedes-Benz im Segment PKW fünf Modelltypen angeboten; heute umfasst die Modellpalette über 20 Typen [KRUMM/RENNEKAMP 2011, S.17]. OEMs versuchen in diesem Zusammenhang, Kunden eine höhere Angebotsvielfalt durch eine individuelle (Fahrzeug-)Konfiguration zu bieten. Hieraus resultiert eine Variantenvielfalt, die zu einer besseren Befriedigung der Kundenwünsche führt, allerdings die Komplexität für die Automobilhersteller deutlich erhöht. Im Jahr 2005 gab es bspw. für den Audi A6 18.800 Türverkleidungsvarianten und 152 Varianten von Handschuhkästen. Für den BMW X3 wurden insgesamt 90.000 Dachhimmel-Varianten angeboten und der VW Phaeton wurde mit einer Sitzanlage angeboten, für die 778 Ausstattungs- und Kombinationsmöglichkeiten vorlagen [SCHLOTT 2005, S. 38 ff.].

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Auf vielen Märkten, wie etwa auf dem europäischen Markt, sind Sättigungstendenzen und entsprechende Überkapazitäten deutlich wahrnehmbar. Des Weiteren wird es für OEMs immer schwieriger, den stetig heterogener werdenden Kundenanforderungen gerecht zu werden. Diese resultieren vor allem aus der allgemeinen gesellschaftlichen Entwicklung hin zu einer stärkeren Individualisierung sowie unterschiedlichen Bedingungen in den verschiedenen Ländern [BECKER 2002, S. 2ff.; RENNER 2007, S. 2].

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Die **(optionale) Ausstattungsliste** enthält etwa mögliche Lackfarben, Rädervarianten und Sitzpolster sowie alle optionalen Ausstattungen (z.B. Klimaautomatik, Navigationsgerät oder Schiebedach).

eines E/E Umfangs [Broy et al. 2007, S. 361; Hildisch et al. 2007, S. 5; Pretschner et al. 2007, S. 4].

• Software-Releases als Veränderlichkeit-beeinflussender Faktor: Software-Releases, die im Rahmen eines Produktlebenszyklus auf einer Steuergeräte-Generation implementiert werden [HILDISCH ET AL. 2007, S. 5].

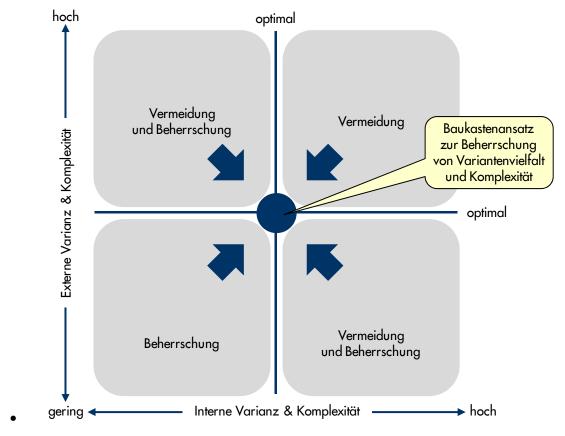


 Abbildung 3-17: Beherrschung versus Vermeidung interner Varianz & Komplexität, eigene Darstellung in enger Anlehnung an KAISER [KAISER 1995, S. 102].

Neben den aufgeführten Faktoren können unternehmensintern zusätzliche Gründe vorliegen, die zu Variantenvielfalt führen, wie etwa methodische oder organisatorische Defizite eines OEMs [FIRCHAU ET AL. 2002, S. 5; JESCHKE 1997, S. 4]. Das Baukastenprinzip ist nicht nur technische Maßnahme zur Optimierung der Produktstruktur und Beherrschung von interner Variantenvielfalt und Komplexität, sondern hilft darüber hinaus Synergie- und Skaleneffekte zu verstärken, was zur Steigerung von Effizienz sowie Wirtschaftlichkeit in Produktentwicklung beitragen kann [BOROWSKI 1961, S. 19]. Der Ansatzpunkt des Baukastenprinzips ist, ein optimales Gleichgewicht aus interner und externer Varianz und Komplexität zu schaffen (vgl. Abbildung 3-17). Dabei liegt die Herausforderung darin, das optimale Maß externer Varianz und Komplexität vor Kunde mit der optimalen internen Varianz und Komplexität innerhalb der Produktentwicklung zu kombinieren. Wesentlicher Stellhebel ist die Vermeidung respektive Beherrschung von interner als auch externer Varianz und Komplexität. Dabei sollte die interne Varianz und Komplexität so gering wie möglich gehalten und unnötige externe Varianz und Komplexität vermieden werden [KAISER 1995, S. 102]. Der Baukastenbegriff wird zu Anfang dieses Kapitels zunächst allgemein als klassisches Konstruktionsprinzip für die Automobilentwicklung betrachtet, um dessen Grundsätze auf den Untersuchungsgegenstand der automotiven E/E Entwicklung übertragen zu können. Darauf aufbauend wird die Definition des E/E Baukastenbegriffs für die Automobilindustrie hergeleitet. Parallel dazu werden ergänzend Spezifika von automotiven E/E Baukästen erarbeitet.

## 3.6.1. Allgemeiner Baukastenbegriff

Für den Baukastenbegriff – als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip – existieren in der Literatur diverse Definitionen und synonym verwendete Begrifflichkeiten<sup>34</sup> [BIEGERT 1971, S. 10; BOROWSKI 1961, S. 14; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 654; FRANKE ET AL. 2002, S.75, JESCHKE 1997, S.27; KOHLHASE 1997, S. 8; PAHL/BEITZ 2007, S. 662]. Auf eine vergleichende Betrachtung der existierenden Baukastendefinitionen wird an dieser Stelle verzichtet und dazu auf die oben genannte Literatur verwiesen. Allerdings werden Definitionen zur Herleitung der im Rahmen des Forschungsvorhabens relevanten Begrifflichkeiten aufgegriffen.

Existierenden Begriffsdefinitionen gemäß, enthält ein Baukasten immer eine bestimmte Anzahl von Baukastenelementen<sup>35</sup> (vgl. Abbildung 3-18) [BIEGERT 1971, S. 10; KOHLHASE 1997, S. 8]. Diese können als Teilsysteme mit vorgegebenen Schnittstellen betrachtet werden, die jeweils eine Teilfunktion realisieren. Zur vollständigen Erfüllung einer dedizierten Funktion lassen sich mehrere Baukastenelemente zu einer Produktvariante miteinander kombinieren. Dies geschieht unter Berücksichtigung bestehender Anforderungen an eine dedizierte Funktion sowie existierender Rahmenbedingungen und Schnittstellen [BEITZ 1997, S. 606; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 654; FRANKE ET AL. 2002, S. 75; JESCHKE 1997, S. 27; KOHLHASE 1997, S. 8].

Ein Baukastenelement kann eine Baugruppe oder ein Einzelteil sein [PAHL/BEITZ 2007, S. 662]. Ferner können mehrere Varianten eines Baukastenelements existieren (vgl. Abbildung 3-18) und in verschiedene Kategorien eingeteilt werden [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 629; JESCHKE 1997, S. 52; PAHL/BEITZ 2007, S. 663f.]. BIEGERT unterscheidet z.B. die Kategorien der "substitutionalen Bausteine" und die der "nicht-substitutionalen Bausteine". Mit der zweiten Bausteinkategorie sind einzigartige Baukastenelemente gemeint, von denen keine Variante existiert [BIEGERT 1971, S. 43]. Eine ähnliche Unterscheidung ist die in "Muss-Baukastenelemente" (vgl. nicht-substitutionale Bausteine) und "Kann-Baukastenelemente" (vgl. substitutionale Bausteine). Muss-Baukastenelemente sind elementar für die Erfüllung der Gesamtfunktion eines Baukastens und werden somit in jede Baukastenvariante integriert (z.B. DABoder TV-Modul in Headunit). Wohingegen Kann-Baukastenelemente optional integriert werden können, um eine gewünschte Zusatzfunktion oder Eigenschaft des Baukastens zu realisieren [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 629; RENNER 2007, S. 54]. Übergreifend gilt, dass unter den gegebenen Möglichkeiten die Anzahl der Elemente eines Baukastens minimal und die daraus erzeugbaren Kombinationsmöglichkeiten inkl. des jeweiligen Individualisierungsgrads maximal sein sollten [BIEGERT 1971, S. 10; JESCHKE 1997, S. 7].

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> In der vorliegenden Arbeit werden die verschiedenen verwendeten Begrifflichkeiten wie Baukasten, Baukastenbauweise, Baukastentechnik, Baukastensystem, Baukasten-Kombinationstechnik, Baukastenprinzip, Baukastenkonstruktion synonym verwendet.

Baukastenelemente werden in der Literatur häufig auch als Bausteine bezeichnet [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 629; PAHL/BEITZ 2007, S. 662; RENNER 2007, S. 53]. In der vorliegenden Arbeit werden beide Begrifflichkeiten synonym verwendet.

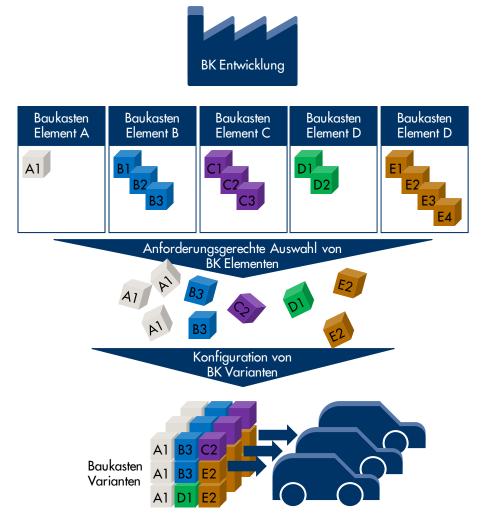


Abbildung 3-18: Schematische Darstellung des Baukastenprinzips, eigene Darstellung.

Durch die anforderungsgerechte, individuelle Konzeption von Baukasten-Produktvarianten können diese übergreifend, d.h. im Kontext der Automobilindustrie derivats- respektive baureihenübergreifend, eingesetzt werden. Dabei besteht die Zielsetzung anforderungsgerechte Produktlösungen zu schaffen sowie eine höchstmögliche, den Kundenwünschen entsprechende, externe Varianz als auch Differenzierung zu ermöglichen und dabei die interne Varianz und Komplexität minimal zu halten [Renner 2007, S. 53].

Definition Baukasten:	Gestaltungsprinzip zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der
	Produktstruktur. Bei diesem wird eine spezifische Anzahl und Art von Bau-
	kastenelementen mit definierten Schnittstellen zu gewünschten Baukasten-
	Produktvarianten, mit endlicher Anzahl kombiniert. Dies geschieht unter
	Berücksichtigung aller zugrundeliegenden funktionalen und nicht-
	funktionalen Anforderungen. Baukästen eignen sich für den derivats-
	bzw. baureihenübergreifenden Einsatz.

# 3.6.2. Charakterisierung automotiver Baukästen

Gemäß Ehrlenspiel lassen sich Anwender- und Herstellerbaukästen unterscheiden [Ehrlenspiel et al. 2014, S. 629]. Anwenderbaukästen können nach Produktauslieferung durch den Kunden, im Rahmen bestehender Möglichkeiten, beliebig verändert, angepasst,

ergänzt oder in die einzelnen Baukastenelemente zerlegt werden. Im Kontext der Automobilentwicklung kommen sogenannte Herstellerbaukästen zur Anwendung, d.h. Baukästen, die bei einem Lieferanten oder OEM im Rahmen des Fertigungsprozesses zusammengebaut und nach Fahrzeugauslieferung nicht mehr verändert werden (vgl. Abbildung 3-19) [EHRLENSPIEL ET al. 2014, S. 629f.; PONN 2000, S. 53]. Für den Kunden ist der Verbau eines Baukastens im Automobil im Idealfall nicht erkennbar (z.B. Getriebe-Baukasten), es sei denn, dieser befindet sich im direkten Sichtbereich oder im Bereich der Bedienoberfläche (z.B. Klimaautomatikbedienteil-Baukasten).

Eine weitere Differenzierung ist die von offenen und geschlossenen Baukästen. Offene Baukästen lassen sich durch eine uneingeschränkte Variations- und Kombinationsmöglichkeit charakterisieren. Geschlossene Baukästen weisen eine endliche Variations- und Kombinationsmöglichkeit auf [Ehrlenspiel et al. 2014, S. 630]. In der Automobilentwicklung handelt es sich i.d.R. immer um geschlossene Baukästen, da sich diese aus einer endlichen Anzahl von Baukastenelementen zusammensetzen und anforderungsbedingt immer eine dedizierte Funktion zu erfüllen haben.

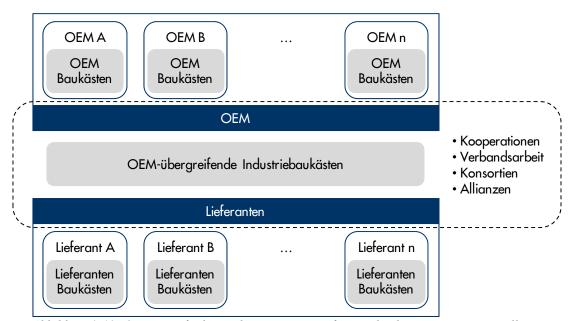


Abbildung 3-19: OEM-spezifische Baukästen versus Lieferantenbaukästen, eigene Darstellung.

Eine für die Automobilentwicklung weitere wichtige Differenzierung ist die in OEM-Baukästen und Lieferantenbaukästen (vgl. Abbildung 3-19). Unter der ersten Kategorie lassen sich alle OEM-eigenen Baukästen zusammenfassen, die OEM-spezifisch entwickelt und implementiert werden. Hingegen sind Lieferantenbaukästen i.d.R. OEM-unspezifisch und können entsprechend OEM-übergreifend zum Einsatz kommen [Renner 2007, S. 56]. Lieferantenbaukästen kommen für Umfänge, die nicht bzw. nicht in besonderem Maße wettbewerbsdifferenzierend sind (z.B. Parkdistanz-Sensoren, Nackenwärmer oder Anhängeranschlussgerät) zur Umsetzung. Der intelligente und gezielte Einsatz von Lieferantenbaukästen kann zu hohen Einsparungspotentialen hinsichtlich Kosten für Entwicklung und Herstellung führen. Wobei Herstellkosteneinsparungen auf die Abschöpfung von Skalen- und Verbundeffekten zurückzuführen ist.

Als eine weitere Baukastenkategorie können sogenannte Industriebaukästen aufgeführt werden. Hierbei handelt es sich um Baukästen, die durch Kooperationen, Verbandsarbeit (z.B. im

Rahmen des VDAs), in Konsortien oder etwa Allianzen zwischen OEMs und Lieferanten entstehen. Sie fördern gezielt OEM-übergreifende Entwicklungen und Implementierungen von nicht-wettbewerbsdifferenzierenden Umfänge [RENNER 2007, S. 57]. Bspw. unterscheiden sich Motorsteuergeräte<sup>36</sup> (z.B. hinsichtlich Dieselmotoren, Benzinmotoren, Elektromotoren) für gleiche Motorklassen oftmals nur im Detail. Entsprechend verfolgen verschiedene OEMs das gemeinsame Ziel, solche Umfänge in einem gemeinsamen Industriebaukasten zu verankern. Dabei ist es das Ziel des Industriebaukastens, eine OEM-übergreifende Festlegung der Spezifikationen von Baukasten-Umfängen zu erreichen, die weder wettbewerbsdifferenzierend noch OEM-spezifisch sind [SCHMUTZLER 2012, S. 62].

Unabhängig von der jeweiligen Baukastenkategorie sieht das Baukastenprinzip einen derivatsund baureihenübergreifenden Einsatz von Baukästen vor. Für OEMs bietet der baureihenübergreifende Einsatz von Baukästen diverse Vorteile, die Auswirkungen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg haben. Im Folgenden werden diese kurz erläutert:

- Konstruktion und Entwicklung: Der Aufwand für die Entwicklung eines Baukastens erfolgt einmalig. Damit verbunden reduzieren sich die Einmalaufwände je Fahrzeug (u.a. Entwicklungs-, Werkzeug-, Test- und Absicherungskosten) mit steigenden Stückzahlen. Bspw. erfolgen grundlegende Tests und Absicherung im Rahmen des Produktentwicklungszyklus des erstanlaufenden Derivats und fallen entsprechend geringer für nachfolgende Derivate aus. Dadurch sinken die Entwicklungszeiten für nachfolgende Derivate, wodurch bei OEMs Kapazitäten frei werden, um schneller auf exogene Anforderungen reagieren zu können [SCHUH ET AL. 2012, S. 322]. Des Weiteren steigt die Transparenz innerhalb der automotiven Entwicklung durch den verstärkten Einsatz von Baukästen, indem eine einheitliche Produktstruktur geschaffen wird, Varianten reduziert werden und somit die Komplexität beherrschbarer wird [PILLER/WARINGER 1999, S. 78]. Ferner eröffnet der konsequente Einsatz von Baukästen die Möglichkeit, Derivate geringerer Stückzahl (Nischenprodukte) rentabel vor Kunde anbieten zu können [RENNER 2007, S. 63]
- Produktion: Neben Einsparpotentialen bzgl. Herstellkosten und damit verbundenen Kostendegressionseffekten [KOHLHASE 1997, S. 45ff.; SCHUH 2005, S. 47], können durch den Einsatz von Baukästen in der Produktion Synergieeffekte (Economies of Scope) und Skaleneffekte (Economies auf Scale) erschlossen werden [PILLER/WARINGER 1999, S. 79; SCHUH ET AL. 2012, S. 322].
- Qualität: Der vermehrte Einsatz von bereits spezifizierten, entwickelten, gefertigten, getesteten, abgesicherten und erprobten Baukästen führt i.d.R. zu einer Steigerung der Fahrzeugqualität [RENNER 2007, S. 65]. Entsprechend ist die initiale Absicherung von Baukastenumfängen immanent wichtig, um eine technische Robustheit zu gewährleisten [SCHUH ET AL. 2012, S. 322].
- **Einkauf**: Durch den baureihenübergreifenden Einsatz von Baukästen können sich über Skaleneffekte Einkaufspreise (als Teil der Herstellkosten) reduzieren. Zusätzlich kann sich auch die Anzahl der zu befähigenden Lieferanten reduzieren. Hierdurch können nachhaltig Kosten (Stückkostendegression) vermieden werden [Lemme 2009; SCHUH 2005, S. 47].

Motorsteuergeräte sammeln Anforderungen an den Motor, priorisieren und setzten diese um. Bspw. bzgl. der Fahrpedalstellung und des Abgassystems.

• **Vertrieb**: Der intelligente Einsatz von Baukästen ermöglicht das Angebot eines Produktportfolios mit einem Höchstmaß an kundenindividuellen Produkten und Differenzierungsmöglichkeiten [BIEGERT 1971, S. 68ff.].

Zusammenfassend können OEMs mit systematischer, langfristig geplanter baureihenübergreifende Gestaltung von Baukästen diverse Potentiale heben [SCHUH ET AL. 2012, S. 322]:

- Reduzierung der Einmalaufwände,
- Reduzierung der Herstellkosten,
- Verkürzung von Entwicklungszeiten,
- Steigerung der Produkt-Qualität und -Robustheit.

Insbesondere bei Umfängen mit vielen Varianten empfiehlt sich die Anwendung des Baukastenansatzes, da sich dadurch die interne Variantenvielfalt und Komplexität intelligent reduzieren und beherrschen lässt, ohne dabei die externe Variantenvielfalt vor Kunde reduzieren zu müssen. Zentral ist hierbei, dass notwendige Rahmenbedingungen zur Realisierung der baukastengerechten Gestaltung bei OEMs vorherrschen, zu denen folgende Punkte zählen [KOHLHASE 1996, S. 65ff.; RENNER 2007, S. 95f.]:

- Der Baukastenentwicklungsprozess ist definiert, mit bestehenden Entwicklungsprozessen harmonisiert und mit allen relevanten Schnittstellenpartnern abgestimmt.
- Zentrale Verantwortlichkeiten und Steuerung der Baukastenentwicklung und -implementierung sind festgelegt.
- Organisationsstrukturen sind angepasst inkl. dedizierter Definition von Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten.
- Baureihenübergreifendes Anforderungsmanagement ist etabliert.
- Baukasten-Roadmap ist für einen definierten Zeitraum erstellt und mit der Unternehmens- sowie Innovationsstrategie abgestimmt.
- Betriebswirtschaftliche Zielvorgaben und Controlling-Mechanismen sind definiert.
- Erforderliches Fach- und Methodenwissen ist vorhanden.

Trotz vielfältiger Potentiale ist die Anwendung des Baukastenansatzes mit verschiedenen Herausforderungen verbunden. So sollte dieser bspw. nur in sorgfältiger Abwägung des Kosten-Nutzen-Verhältnissens erfolgen. Im Vergleich zu einer fahrzeugspezifischen Funktionsentwicklung, erfolgt die Entwicklung von Baukästen auf Basis eines derivats- oder baureihen-übergreifenden Sets an Anforderungen. Damit ist diese mit einem deutlich höheren Einmalaufwand verbunden. Ferner ist bei der Baukastenentwicklung die Umsetzung OEMspezifischer, innovativer Funktionen, Ausstattungen, Komfort- oder Designvorgaben nicht zu vernachlässigen. Entsprechend ist es für OEMs von zentraler Bedeutung, sich trotz des Einsatzes von Baukästen im Spannungsfeld zw. Standardisierung und Individualisierung optimal zu positionieren, um dem Kundenwunsch nach innovativen Funktionen, Individualisierung und Differenzierung gerecht zu werden. Dies gilt in erster Linie für OEMs mit einer Positionierung im Premiumsegment. Elementare Voraussetzung für den Einsatz von Baukästen ist ferner, dass entsprechend unterstützende Produktarchitekturen bei OEMs etabliert sind (vgl. Kapitel 3.5) [SCHUH ET AL. 2012, S. 322].

## 3.6.3. Definition automotiver E/E Baukasten

Wie unter Kapitel 1 beschrieben, werden immer mehr E/E Umfänge in allen Bereichen des modernen Fahrzeugs eingesetzt, welche dedizierte Antriebs-, Fahrwerks-, Karosserie-, Komfort-, Sicherheits-, Fahrerassistenz- und Infotainmentfunktionen übernehmen (vgl. Kapitel 1.1). Dabei handelt es sich zumeist um softwarebasierte E/E Funktionen, die i.d.R. einen hohen Vernetzungsgrad aufweisen. Die stetige Zunahme von E/E Umfängen im Fahrzeug, haben signifikante Auswirkungen auf die Variantenvielfalt und Systemkomplexität der automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 1.1). Als ein wesentlicher Stellhebel zur Produktstruktur-Optimierung, interner Varianz- und Komplexitätsbeherrschung sowie Effizienz- und Wirtschaftlichkeitssteigerung von E/E Umfängen im Fahrzeug bietet sich folglich die baureihenübergreifende Anwendung des Baukastenansatzes im Rahmen der automotiven E/E Entwicklung an (vgl. Kapitel 1.1, 3.6.1 und 3.6.2). Eine baukastenbefähigende, baureihenübergreifende automotive E/E Bordnetzarchitektur ist Grundlage dafür, dass die beschriebenen Bemühungen des OEMs erfolgreich sind (vgl. Kapitel 6).

Aus funktionsorientierter Sicht lassen sich die E/E Umfänge in E/E System- und Kundenfunktionen unterteilen (vgl. Kapitel 3.2.1). Auch wenn eine solche E/E Funktion mit der dazugehörigen Software- und Hardware-Komponente auf ein Steuergerät partitioniert wird (vgl. Abbildung 3-4), stehen bei dieser funktionsorientierten Sicht nicht etwa Hardware-Komponenten oder Steuergeräte im Vordergrund, sondern die ziel- und anforderungsgerechte Gestaltung und Umsetzung sowie ggf. kundenwerte Bedienbarkeit der E/E Funktion. Damit unterstützt diese – analog zum AUTOSAR-Ansatz<sup>37</sup> – eine Abstraktion der funktions- bzw. anwendungsspezifischen Software von der unspezifischen Hardware inkl. hardwarespezifischer Basissoftware (vgl. Kapitel 3.2.2 und 3.3.2). Ermöglicht wird diese Abstraktion jedoch erst durch die Vorgabe definierter Schnittstellen (vgl. AUTOSAR Schnittstellen, Kapitel 3.3.2) und einer Kommunikationsschicht, die den Informationsaustausch zw. E/E funktionsspezifischer Software, der spezifischen Basissoftware des Steuergeräts, auf dem die E/E Funktion partitioniert ist sowie den zusätzlich benötigten Hardware-Umfängen (insb. Sensoren und Aktoren) regelt (vgl. AUTOSAR Laufzeitumgebung, Kapitel 3.3.2). Entsprechend können E/E Funktionen, dem Baukastenansatz gemäß, in folgende Kategorien von Baukastenelementen aufgeteilt werden: In E/E funktionsspezifische Software-Komponenten, E/E funktionsspezifische Hardware-Komponenten inkl. hardwarespezifische Basissoftware und sofern benötigt, in E/E funktionsspezifische Anzeige- und Bedienoberflächen inkl. Bedienelemente (vgl. Kapitel 3.6.1) [Blume et. al. 2013, S.248ff.].

Eine E/E Funktion muss dabei mindestens eine funktionsspezifische Software-Komponente inkl. notwendiger Hardware-Komponenten umfassen, die als Muss-Baukastenelement festgelegt wird. Je nach Anzahl funktionsspezifischer Software-Komponenten, bilden diese jeweils die Funktionalität oder eine Teilfunktionalität einer E/E Funktion ab. Additive Software-Komponenten können als Kann-Baukastenelement zur Erfüllung einer dedizierten Zusatzfunktion oder Variante einer (Teil-)Funktionalität entwickelt werden und bedarfsgesteuert implementiert werden. Wobei auch hier das Paradigma berücksichtigt werden sollte, dass die Anzahl der Baukastenelemente minimal und die daraus erzeugbaren Kombinationsmöglichkeiten

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Verwendung des OEM-übergreifenden offenen AUTOSAR Standards festgelegt, da dieser eine einheitliche Softwarearchitektur inkl. Beschreibungs- und Konfigurationsformaten für automotive Software und Methoden zur Beschreibung von Software vorgibt, die sicherstellen, dass Softwarekomponenten wiederverwendet, ausgetauscht, skaliert und integriert werden können, zur Verfügung stellt und sich in stetiger Weiterentwicklung befindet.

sowie der Individualisierungsgrad maximal sein sollte. Entsprechend wichtig ist eine sinnvolle und anforderungsgerechte Aufgliederung einer E/E Funktion in Teilfunktionalitäten, die in Form von einzelnen Software-Komponenten abgebildet werden.

Zur Realisierung einer E/E Funktion wird ein spezifischer Umfang an Hardware-Komponenten benötigt (vgl. Kapitel 3.4). Dazu zählen neben Signalgebern (z.B. Sensoren) und -nehmern (z.B. Aktoren), insbesondere die Steuergeräte-Hardware, Kommunikationsschnittstellen und Stecker inkl. Pins. Dieser Umfang variiert je Funktion und muss ggf. anforderungsbedingt skalierbar ausgelegt werden. Um Einmalaufwände zu reduzieren sollte bei der Auswahl der Hardware-Komponenten auf bestehende automotive Standards zurückgegriffen werden. Ferner können Hardware-Umfänge (z.B. Sensoren) von mehreren E/E Funktionen gleichzeitig genutzt werden. Für E/E Kundenfunktionen können zudem Anzeige- und Bedienoberflächen inkl. Bedienelemente benötigt werden. Dazu gehören Displays, Kombiinstrumente und Schalter. Auch diese Umfänge können für mehrere E/E Funktionen benötigt werden, dies gilt vor allem für Kombi und Displays.

E/E Baukästen ermöglichen einen übergreifenden Einsatz über das vollständige Produktportfolio eines OEMs hinweg, d.h. derivats- bzw. baureihenübergreifend. Voraussetzung dafür ist die spezielle Planung, Konzeption und Funktionsabdeckung bei gleichzeitig kundenwerter Differenzierung. Ferner verfolgen E/E Baukästen nachhaltige, langfristige und baureihenübergreifende Planung eines Funktionsumfangs mit Fokus auf das gesamtbetriebswirtschaftliche Optimum inkl. Vergabeterminierung.

Definition automotiver E/E Baukasten: Gestaltungsprinzip zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der E/E Produktstruktur, bei der eine spezifische Anzahl und Art an E/E funktionsspezifischen Software- und Hardwarebaukastenelementen mit definierten Schnittstellen, unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen, zu gewünschten Baukasten-Produktvarianten mit endlicher Anzahl kombiniert werden.

# 3.7. Zusammenfassung

Im Kapitel 3 werden die zentralen technischen Begriffe aus Wissenschaft und Technik eingeführt und für den weiteren Gebrauch im Rahmen des Forschungsvorhabens definiert. Die Schwerpunkte dieser Betrachtung liegen dabei auf der automotiven E/E Bordnetzarchitektur und den E/E Baukästen.

#### Definition automotive E/E Bordnetzarchitektur und Bestandteile

Als "automotive E/E Bordnetzarchitektur" innerhalb der automotiven E/E Entwicklung wird das Produkt der logischen Partitionierung aller E/E Funktionen im Bordnetz inkl. der Vernetzungstopologie zur Datenkommunikation sowie Energieversorgung definiert. Der vielschichtige Prozess der E/E Bordnetzarchitekturentwicklung wird vorgestellt. Dieser Prozess orientiert sich dabei am klassischen Fahrzeugentwicklungsprozess und umfasst zwei Phasen: die Konzeptphase, welche sich aus "Zieldefinition", "Konzeptdefinition" und "Konzeptspezifikation" zusammensetzt und die Serienentwicklungsphase, die aus der Serienentwicklung

und Integration besteht. Ergänzt wird dies durch das Systemebenen-Modell, welches die Umfänge einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur in vier Modellierungsebenen untergliedert: "Funktionen und Anforderungen", "Logische Architektur", "Vernetzungsarchitektur" und "Komponenten-Topologie" (vgl. Abbildung 3-2). Das Systemebenen-Modell unterstützt dabei, die Bestandteile einer E/E Bordnetzarchitektur zu strukturieren und auszugestalten. Ausgehend vom Systemebenen-Modell werden sämtliche für das Forschungsvorhaben relevanten Bestandteile einer E/E Bordnetzarchitektur detailliert betrachtet und definiert. Dazu gehören die E/E Funktionen inkl. der zugehörigen Hardware- und Software-Komponenten sowie die logische Funktions-Architektur. E/E Funktionen untergliedern sich in E/E Systemfunktionen und E/E Kundenfunktionen. Die E/E Kundenfunktionen teilen sich wiederum in E/E Basisfunktionen und optionale E/E Funktionen auf. Des Weiteren wird die Software bzw. die Standardisierung der Software-Architektur innerhalb der automotiven E/E Entwicklung betrachtet, wobei der Fokus auf der Softwarestandardisierung gemäß AUTOSAR liegt. Abschließend werden Steuergeräte betrachtet, für welche Steuergerätehardware, Steuergerätetypen und Vernetzungstechnologien unterschieden werden.

#### Gestaltungsansätze für die automotive E/E Bordnetzarchitektur

Für die automotive E/E Bordnetzarchitekturgestaltung existieren verschiedene Ansätze. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden die in der Literatur am häufigsten diskutierten drei Gestaltungsansätzen erläutert: "Funktionsorientierungsansatz", "Hochintegrationsansatz" und "Zentralisierungsansatz". Aufgrund der unzureichenden Existenz wissenschaftlicher Erkenntnisse bzw. Dokumentationen wird der Wissensgewinn aus der Literaturrecherche durch das im Rahmen von Experteninterviews gewonnene Wissen wesentlich erweitert. Darauf basierend werden Bewertungskriterien automotiver E/E Bordnetzarchitekturen erarbeitet, anhand derer die Bewertung und der Vergleich der drei aufgeführten Gestaltungsansätze durchgeführt werden. Das Ergebnis liefert die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des "Zentralisierungsansatz" zur Gestaltung des "Optimierungsmodells für die Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur" in Kapitel 5.

#### Automotiver E/E Baukasten

Als Grundlage zur Definition des "automotiven E/E Baukastenbegriffs", wird der allgemeine Baukastenbegriff – als wirtschaftliches und technisches Gestaltungsprinzip – eingeführt. Aufgrund unzureichender Existenz von wissenschaftlichen Erkenntnissen bzw. Dokumentationen im wissenschaftlichen Schrifttum hinsichtlich des automotiven E/E Baukastenbegriffs, wird der Wissensgewinn aus der Literaturrecherche durch das gemäß des Design Science im Rahmen von Experteninterviews gewonnene Wissen wesentlich erweitert. Auf dieses erweiterte Wissen aufsetzend, lassen sich automotive E/E Baukästen charakterisieren und der automotiven E/E Baukastenbegriff herleiten. Die Forscherin definiert automotive E/E Baukästen als ein Gestaltungsprinzip zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der E/E Produktstruktur, bei der eine spezifische Art und Anzahl von E/E funktionsspezifischen Software- und Hardware-komponenten mit definierten Schnittstellen, unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen, zu gewünschten Baukasten-Produktvarianten mit endlicher Anzahl kombiniert wird. Die Definition des automotiven E/E Baukastens ist Grundlage für die Erarbeitung des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung in Kapitel 6.

# 4. Grundlagen und methodisches Vorgehen zur Modellbildung

Das folgende Kapitel befasst sich mit Modellen im Allgemeinen und mit Optimierungs- und Referenzmodellen im Speziellen. Motivation dabei ist, die theoretischen Grundlagen für die Modellbildung in den anknüpfenden Kapiteln zu schaffen, wobei in Kapitel 5 das Optimierungsmodell und in Kapitel 6 das Referenzmodell erarbeitet wird (vgl. Kapitel 2.3).

Im ersten Schritt erfolgt eine Erläuterung des allgemeinen Modellbegriffs. Anschließend werden auf Basis eines morphologischen Kastens mit Modellmerkmalen unterschiedliche Modelltypen charakterisiert (vgl. Kapitel 4.1). An diese grundlegenden Ausführungen anknüpfend, werden die beiden Modelltypen Optimierungs- und Referenzmodell vertieft, die für das Forschungsvorhaben von zentraler Bedeutung sind. Die Betrachtung der Optimierungsmodellbildung schafft die notwendigen modelltheoretischen Grundlagen für die Erarbeitung des Optimierungsmodells zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 5). Die zweite vertiefende Betrachtung erfolgt für das Feld der Referenzmodellbildung. Diese schafft die Grundlage für die Erarbeitung des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung (vgl. Kapitel 6).

## 4.1. Modelle

Modelle bilden komplexe, reale Systeme ab, um zur Beschreibung sowie Lösung eines konkreten Problemsachverhalts beizutragen [SCHWEITZER 2001, S.72]. Ein System beinhaltet eine "[...]Menge von Elementen (Objekten), die durch Relationen miteinander verknüpft sind" [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 31]. Jedes Systemelement besitzt Attribute und Eigenschaften wie Kosten, Größe, Gewicht oder Qualität, die es charakterisieren und so von den übrigen Elementen abgrenzen. Die Relation, d.h. das Verhältnis bzw. die Verknüpfung der Elemente, beschreibt deren Beziehungen und Abhängigkeiten untereinander. Aus der Anzahl aller Relationen eines Systems resultiert somit die Systemstruktur, wie z.B. die einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 27f; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 31; SCHOLL 2001, S. 15f.]. Systeme werden über die Systemgrenze vom direkten Systemumfeld abgetrennt, mit dem sie wiederum über Eingangs- und Ausgangsgrößen in Beziehung stehen können [LINDEMANN 2009, S. 9f.].

Die Überführung eines realen Systems, etwa einer E/E Bordnetzarchitektur, auch Urbild genannt, erfolgt entweder strukturgleich (isomorph) oder strukturähnlich (homomorph). Isomorphe Modelle beinhalten alle Elemente inklusive der dazugehörigen Relationen analog zum Urbild. Entsprechend weisen isomorphe Modelle eine Urbild-identische Systemstruktur auf. Hingegen bilden homomorphe Modelle eine vereinfachte Version des Urbilds ab, d.h. das reale System wird abstrahiert, indem einzig auf lösungsrelevante Elemente und Relationen des Urbilds fokussiert wird. In diesem Fall ist die Systemstruktur dem Urbild ähnlich, wie bspw. eine vereinfachte Baumstruktur einer E/E Bordnetzarchitektur [ADAM/WITTE 1975, S. 369f.; DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 28; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 32].

Die Ausgestaltung eines jeden Modellelements ist abhängig von der Zielsetzung, die der Modellbildung zugrunde liegt sowie von der inhaltlichen Aufgliederung und Interpretation des Problemsachverhalts. Abhängig von Modellfokus und der damit verbunden Auslegung des

Problemsachverhalts können sich verschiedene Kombinationen der Elemente ergeben. Damit verbunden sind mögliche Erweiterungen oder Reduzierungen der Merkmale und Eigenschaften des Modells [DRESBACH 1999, S. 76ff.]. Die jeweilige Ausgestaltung der Modellelemente, wie auch die Festschreibung und Auswahl der Modelleigenschaften, liegen dabei im Ermessen des Modellgestalters. Damit basiert die Modellbildung auf einer gewissen Subjektivität, deren Ausmaß vom Problemsachverhalt sowie Fokus und Interpretation des Modellgestalters beeinflusst wird [DRESBACH 1999, S. 79].

#### Komplexität von modellbasierter Abbildung von Problemsachverhalten

In der Regel ist die modellbasierte Abbildung von Problemsachverhalten hochkomplex. Die Bewältigung der resultierenden Komplexität ist essentiell, um die Anwendbarkeit eines Modells für die unternehmerische Praxis sicherzustellen. Dabei sind folgende drei Ausprägungen der Komplexität zu berücksichtigen [BECKER ET AL. 2002, S. 58]:

- Elemente-Komplexität: Festlegung der Anzahl sowie Umfang von Modellelementen über die Modellvarianten.
- **Relationen-Komplexität:** Beschreibung der Relationen zwischen den einzelnen Modellelementen.
- **Dynamische Komplexität:** Erfassung von Verhaltens- sowie Konfigurationsregeln im Rahmen des Modells.

Bei der Komplexitäts-Bewältigung unterstützen zwei Maßnahmen: die Komplexitäts-Reduktion und die Komplexitäts-Beherrschung. Bei Anwendung des Komplexitätsreduktionsansatzes werden Modellvarianten, -beziehungen sowie Verhaltens- oder Konfigurationsregeln reduziert. Damit zusammenhängend reduzieren sich auch Modellmerkmale, -elemente und -beziehungen. Hingegen beinhaltet die Komplexitäts-Beherrschung den gezielten Einsatz von Modellierungswerkzeugen bei der Modellbildung, um so die konsistente Gestaltung der Modellelemente zu unterstützen und zu erleichtern [BECKER ET. AL 2002, S. 58ff.]. Im Kontext des Forschungsvorhabens wird die Umsetzung beider Maßnahmen verfolgt. Kapitel 5 legt mit der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur den Fokus auf einen Ansatz zur Optimierung der E/E Produktstruktur, um u.a. die Variantenvielfalt und Komplexität sowie den Produktivitätsdruck beherrschbar zu machen. Dieses Bemühen wird in Kapitel 6 fortgeführt, indem dort der Einsatz von E/E Baukästen, als weitere Maßnahme zur Optimierung der Produktstruktur, betrachtet wird.

## Charakterisierung von Modellen

In der Literatur werden verschiedene Typen bzw. Klassen von Modellen aufgeführt [LINDEMANN 2009, S. 11, ADAM/WITTE 1976, S. 1ff.; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 32ff.; PFOHL/STÖZLE 1997, S. 52ff.; SCHOLL 2001, S. 17]. Die dort beschriebenen Modelle lassen sich anhand mehrerer unterschiedlicher Modellmerkmale (Modellzweck, Messniveau, Darstellungsform, Informationsvollständigkeit, Zeitbezug, Abbildungsumfang und Kriterienanzahl) bestimmten Modelltypen zuordnen (vgl. Abbildung 4-2), die wiederum inhaltliche Überschneidungen aufweisen können. Dabei hat der Anwendungszweck (Modellzweck) einen maßgeblichen Einfluss auf eine zielgerichtete Modell-Konstruktion. Dies unterstreicht BOSSEL, demzufolge der Modelzweck "[...] die wichtigste Vorgabe der Modellentwicklung (ist). Je genauer er spezifiziert wird, desto schärfer, präziser und knapper kann die Modellformulierung

entwickelt werden. Die präzise Formulierung des Modellzwecks gehört daher an den Beginn der Modellentwicklung: auf sie muß einige Sorgfalt verwendet werden" [BOSSEL 1992, S. 28].

Modell-Merkmal	Ausprägung der Modell-Merkmale							
Modellzweck	Beschreibungs- modelle	Erklärungs-, Kausalmodelle			nose- delle	Entscheidungs-, Optimierungs- modelle		Simulations- modelle
Messniveau	Quantitative Modelle				Qualitative Modelle			
Darstellungsform	Formale Modelle		Physische Modelle		Graphische Modelle		Verbale Modelle	
Informations- vollständigkeit	Deterministische Modelle				Stochastische Modelle			
Zeitbezug	Statische Modelle				Dynamische Modelle			
Umfang der Abbildung	Homomorphe Modelle				Isomorphe Modelle			
Anzahl Kriterien	Einkriterielle Modelle				Multikriterielle Modelle			

Abbildung 4-1: Modellmerkmale zur Gruppierung von Modellen, eigene Darstellung in Anlehnung an [Lindemann 2009, S. 11, Adam/Witte 1976, S. 1ff.; Klein/Scholl 2011, S. 32ff.; Pfohl/Stölzle 1997, S. 52ff.; Scholl 2001, S. 17].

Vor dem Ziel, die Klassifizierung oder Charakterisierung eines Modells grundsätzlich zu erleichtern, wurde unter Berücksichtigung der in der Literatur existierenden Modellmerkmale von Modellen ein morphologischer Kasten erarbeitet. Dieser ermöglicht es, ein Modell als Abbildung eines spezifischen Problemsachverhalts, anhand der unterschiedlichen Ausprägungen der Modellmerkmale zu klassifizieren und damit zu charakterisieren. In der linken Spalte sind dazu die oben genannten verschiedenen Modellmerkmale aufgeführt, die jeweils mehrere Ausprägungen besitzen. Ausgehend vom Modellzweck, als wichtigste Vorgabe der Modellentwicklung, lassen sich so Modelle sukzessive weiter spezifizieren. Dabei ist eine Ausprägung pro Modellmerkmal für den betrachteten Problemsachverhalt zutreffend, d.h. pro Zeile wird nur eine Ausprägung ausgewählt. Dabei sind sämtliche Kombinationen von Ausprägungen der Modellmerkmale in vertikaler Abfolge möglich.

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Bildung eines Optimierungsmodells zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (Kapitel 5) und eines Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung (Kapitel 6). Entsprechend werden an dieser Stelle weitere mögliche Modelltypen anhand des Morphologischen Kastens hergeleitet und beschrieben. Zur Vertiefung weiterer Modelltypen wird auf folgende Literatur verwiesen [ADAM/WITTE 1976, S. 1ff.; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 32ff.; PFOHL/STÖLZLE 1997, S. 52ff.; SCHOLL 2001, S. 17ff.].

Zusammenfassend lässt sich für die Zielsetzung der Modellbildung in Kapitel 4 und 5 festhalten, dass mittels der modellbasierten, homomorphen Abbildung der betrachteten Sachverhalte ein Beitrag zur Reduzierung respektive Beherrschung der in der unternehmerischen Praxis existenten Komplexität geleistet wird. Zusätzlich wird angestrebt, ein Gleichgewicht aus Abstraktion und Konkretisierung zu schaffen, indem die Anpassbarkeit auf OEM-spezifische Anforderungen der E/E Entwicklung berücksichtigt wird. Mit der Erläuterung grundlegender Zusammenhänge der Modellbildung wurde somit in diesem Kapitel die Basis zur Einordnung und Konstruktion der beiden verschiedenen Modelltypen geschaffen. Im folgenden Kapitel 4.2 werden die notwendigen Grundlagen der Modellbildung der in dieser Arbeit angewandten Modelltypen, Optimierungsmodelle und Referenzmodelle dargelegt.

# 4.2. Optimierungsmodelle

Auf Basis des in Kapitel 4.1 vorgestellten, allgemeingültigen Modellbegriffs werden in diesem Abschnitt Optimierungsmodelle sowie deren Modellbildung anhand eines Vorgehensmodells eingeführt. Dies geschieht mit dem Ziel alle relevanten Grundlagen zu beschreiben, die bei der Konstruktion des Optimierungsmodells zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Architektur in Kapitel 5 benötigt werden.

Optimierungsmodelle sind Gegenstand des Operations Research (OR). Operations Research ist ein interdisziplinärer Wissenschaftszweig, der durch die Zusammenarbeit der drei Fachgebiete Angewandte Mathematik, Wirtschaftswissenschaften und (Wirtschafts-) Informatik geprägt und als ein Teilgebiet der Wirtschaftswissenschaften eingeordnet ist [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 19f.]. Operations Research befasst sich mit quantitativen Modellen und Methoden. Dabei werden komplexe Problemsachverhalte mit Praxisbezug wie Optimierungsprobleme im Kontext von Planungsprozessen analysiert, um so die Generierung von Entscheidungsgrundlagen mittels (mathematischer) Modelle, also abstrakter Optimierungs- und Simulationsmodelle, vorzubereiten [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 19f.; DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 1; SUHL/MELLOULI 2009, S. 5]. Die resultierenden Optimierungs- bzw. Simulationsmodelle werden unter Anwendung von Optimierungsverfahren bzw. -methoden (Algorithmen) gelöst (vgl. Abbildung 4-2) [KISTNER 2003, S. 3; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 461]. Abbildung 4-2 skizziert das Vorgehen zur Lösung von Optimierungsproblemen im Operation Research, dessen einzelne Elemente im Folgenden schrittweise näher erläutert werden.

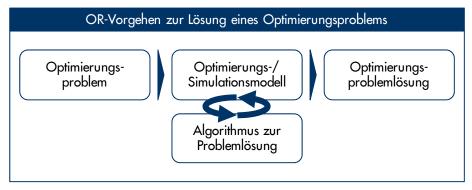


Abbildung 4-2: OR-Vorgehen zur Lösung eines Optimierungsproblems, eigene Darstellung.

# 4.2.1. Optimierungsprobleme und -modelle

Wie einleitend eingeführt, liegt einem Optimierungsmodell immer ein **Optimierungsproblem** zugrunde, wie etwa die vorliegende Problemstellung der Partitionierung von Funktionen in einer E/E Architektur. Ein Optimierungsproblem resultiert in der Regel aus einer aktuell bestehenden oder künftig zu erwartenden Abweichung oder Diskrepanz des Ist-Zustands vom angestrebten Soll-Zustand (Zielvorgabe) eines Systems [SCHWEITZER 2005, S. 54; WEICKER 2015, S.20ff.]. Diese wird aus verschiedenen möglichen Gründen, wie der Verfehlung von vereinbarten bzw. definierten Eigenschafts-, Gewichts-, Qualitäts- oder Kostenzielen eines Systems, als inakzeptabel eingestuft. Um den Soll-Zustand erreichen zu können, müssen bestimmte Entscheidungen, z.B. über die Art und Weise der E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, getroffen werden. Daher ist von einem Entscheidungsproblem die Rede [Domschke/Scholl 2008, S. 22; Klein/Scholl 2011, S. 1 und S. 7ff.]. Entscheidungsprobleme, die sich durch mathematische Optimierungsmodelle abbilden lassen, werden als Optimierungsprobleme definiert [Klein/Scholl 2011, S. 41; Weicker 2015, S.20].

Zur näheren Charakterisierung und Lösung von Optimierungsproblemen können folgende fünf zentrale Größen herangezogen werden [vgl. DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 22; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 3]:

- 1. Ausgangszustand: Betrachtung aller unbeeinflussbaren Problemsachverhalte des Ist-Zustands, die als Informationen (Daten¹) in die Planung einfließen.
- 2. Soll-Zustand/Zielvorgabe: Definition der Zielvorgaben, mit denen der Soll-Zustand beschrieben werden kann. Dabei sind mögliche Zielkonflikte zu identifizieren und nach Möglichkeit aufzulösen.
- **3. Handlungsalternativen:** Identifikation aller Handlungsalternativen (Maßnahmen), die zur Erreichung des Soll-Zustands beitragen. Handlungsalternativen wirken auf die in Zukunft beeinflussbaren Systemtatbestände ein.
- **4. Wirkzusammenhänge:** Identifikation der zwischen den Daten und Variablen eines Systems bestehenden Wirkzusammenhänge. Wirkzusammenhänge lassen sich nur selten exakt erfassen und müssen daher oftmals prognostiziert werden.
- **5. Handlungsergebnisse:** Beurteilung und Auswahl der Handlungsalternativen hinsichtlich ihres Beitrags zur Erreichung des Soll-Zustands unter Betrachtung bestehender Wirkzusammenhänge.

Die OR-gestützte Planung<sup>2</sup> befasst sich mit der Identifikation von geeigneten Maßnahmen zur Erreichung des Soll-Zustands [SCHWEITZER 2005, S. 54]. Auf Basis der identifizierten Maßnahmen und unter Berücksichtigung aller relevanten Daten, wird die Lösung des Optimierungsproblems erarbeitet [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 22; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 1]. Dies geschieht im Allgemeinen, indem die Optimierungsprobleme in Optimierungsmodellen abgebildet werden.

Daten lassen sich definieren als "Informationen, die sich auf unveränderliche Tatbestände beziehen" [KLEIN/SCHOLL 2011, S.6]

Unter dem Begriff Planung lässt sich gemäß Domschke und Scholl "ein von Planungsträgern, auf der Grundlage unvollkommener Informationen, durchgeführter, grundsätzlich systematischer und rationaler Prozess zur Lösung von (Entscheidungs-) Problemen unter Beachtung subjektiver Ziele" definieren [Domschke/Scholl 2008, S. 23].

**Optimierungsmodelle** bestehen generell aus mindestens einer Zielfunktion sowie einer Anzahl von Handlungsalternativen, deren Lösungsraum durch Restriktionen (Nebenbedingungen) implizit begrenzt wird. Die Zielfunktion und Nebenbedingungen beinhalten nicht beeinflussbare Daten/Parameter und unbeeinflussbare Variablen [DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 29]. Ferner lassen sich Optimierungsmodelle nach der Anzahl von Zielfunktionen grob in zwei Klassen einteilen [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 40; NICKEL ET. AL. 2011, S. 81]:

- Einkriterielle Entscheidungsmodelle: Modelle mit einer einzigen Zielfunktion.
- Multikriterielle Entscheidungsmodelle: Modelle mit einer Zielfunktion und mehreren abhängigen Variablen oder Modelle mit mehreren Zielfunktionen.

Zielfunktionen können entweder minimiert oder maximiert werden und dienen zur Identifizierung von entsprechend einer oder mehreren optimalen Handlungsalternativen (Lösungen). Die Anzahl zulässiger Lösungen ist implizit durch die Anzahl aller definierten Nebenbedingungen vorgegeben [Domschke/Drexl 2011, S. 4]. Die Handlungsalternativen, die alle Nebenbedingungen erfüllen, bilden die Menge der zulässigen Lösungen. Eine optimale und zulässige Lösung liegt allerdings erst dann vor, wenn keine zweite zulässige Lösung existiert, die hinsichtlich der Zielfunktion als besser bewertet werden kann. Somit ist mit der optimalen Lösung die beste Handlungsalternative des Optimierungsmodells identifiziert [Klein/Scholl 2011, S. 46f.].

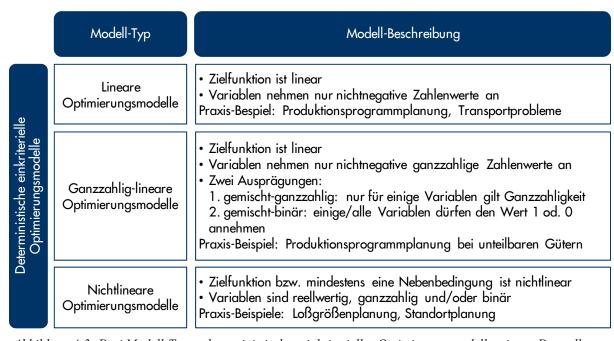


Abbildung 4-3: Drei Modell-Typen deterministischer einkriterieller Optimierungsmodelle, eigene Darstellung nach [Domschke/Drexl 2011, S. 13ff, S. .121ff., S.176ff.; Klein/Scholl 2011, S47f., S. 461ff., S. 485ff.].

Im Operations Research werden verschiedene **Typen von Optimierungsmodellen** betrachtet. Abhängig von Datenbasis, Zielfunktionseigenschaften und -anzahl, Lösungsmengenstruktur sowie Planungsperiodenanzahl können Optimierungsmodelle verschiedenen Typen zugeordnet werden. Hinsichtlich der Unterteilung respektive Zuordnung finden sich in der Literatur geringfügige Abweichungen [Kistner 2003, S. 4ff; Domschke/Drext 2011, S. 7ff; Suhl/Mellouli 2009, S. 8ff; Nickel et. al. 2011, S. 65ff; Klein/Scholl 2011, S. 47], die im direkten inhaltlichen Vergleich nicht widersprüchlich zueinander sind. Daher wird für die vorliegende Arbeit die bei Klein und Scholl gewählte Einteilung in vier Hauptkategorien der deterministisch

einkriteriellen, multikriteriellen, stochastischen und dynamischen Optimierungsmodelle übernommen und nachfolgend erläutert [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 47ff.].

## Deterministisch einkriterielle Optimierungsmodelle

Hauptcharakteristikum von deterministisch einkriteriellen Optimierungsmodellen³ ist, dass diese einzig eine zu maximierende oder zu minimierende Zielfunktion sowie eine Anzahl von Handlungsalternativen beinhalten, die durch die Nebenbedingungen implizit vorgegeben werden. Die optimale Lösung eines solchen Optimierungsmodells ist durch die Zielfunktion eindeutig ermittelbar [Klein/Scholl 2011, S. 47; Domschke/Drexl 2011, S. 4; Suhl/Mellouli 2009, S. 33ff.]. Diese Kategorie der Optimierungsmodelle lässt sich weiter in die folgenden drei Modelltypen untergliedern [Klein/Scholl 2011, S. 47f.]: Lineare Optimierungsmodelle,⁴ ganzzahlig-lineare Optimierungsmodelle⁵ und nichtlineare Optimierungsmodelle.⁶ Diese Modelltypen unterscheiden sich im Wesentlichen in der Ausprägung ihrer Variablen.

#### Mulitkriterielle Optimierungsmodelle

Mulitkriterielle Optimierungsmodelle<sup>7</sup> finden für Optimierungsprobleme Anwendung, denen eine mehrdimensionale Zielsetzung und deterministische Eingangsdaten zu Grunde liegen. Ferner liefern sie Ansätze zur Quantifizierung möglicher Zielkonflikte<sup>8</sup> [NICKEL ET. AL. 2011, S. 81]. Multikriterielle Optimierungsmodelle beinhalten mehrere Zielfunktionen, d.h. eine Zielfunktion für jedes zu berücksichtigende (gegenläufige) Ziel [KLEIN/SCHOLL 2011, S47f.]. Anders als bei der linearen einkriteriellen Optimierung muss daher anstelle einer singulären linearen Zielfunktion ein Vektor von Zielfunktionen maximiert oder minimiert werden [ARNOLD ET AL. 2008, S. A2-5].

Mit multikriteriellen Optimierungsmodellen ist nur im idealen Fall die optimale Lösung zu identifizieren und zwar dann, wenn bei den betrachteten Zielen kein Zielkonflikt vorliegt und diese gemäß ihrer Wichtigkeit in eine eindeutige Rangfolge, d.h. lexikographische Ordnung, gebracht werden können [Domschke/Drexl 2011, S. 57]. Verhalten sich die Ziele jedoch konkurrierend und gleichgewichtig zueinander, so lässt sich zwar für jede Zielfunktion, d.h. für

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> DOMSCHKE und DREXL bezeichnen **deterministische einkriterielle Optimierungsmodelle** auch als "allgemeines Optimierungsmodell" [DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 4].

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Optimierungsprobleme, die sich mit **linearer Optimierung** lösen lassen, findet sich z.B. bei: Domschke/Drexl 2011, S. 13ff.; Klein/Scholl 2011, S. 461ff.; Suhl/Mellouli 2009, S. 33ff.; Nickel et. Al. 2011, S. 65ff.; Neumann/Morlock 2002, S. 35ff.; Ellinger et al. 2003, S. 15ff.

Optimierungsprobleme, die sich mit Ganzzahlig-linearen Optimierungsmodellen lösen lassen, findet sich z.B. bei: DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 121ff.; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 485ff.; SUHL/MELLOULI 2009, S. 135ff.; NICKEL ET. AL. 2011, S. 183ff.; NEUMANN/MORLOCK 2002, S. 380ff.; ELLINGER ET AL. 2003, S. 149ff.

Optimierungsprobleme, die sich mit nichtlinearer Optimierung lösen lassen, findet sich z.B. bei: Domschke/Drexl 2011, S. 176ff.; Nickel et. al. 2011, S. 243ff.; Neumann/Morlock 2002, S. 536ff.; Ellinger et al. 2003, S. 155ff..

Bei DINKELBACH werden Multikriterielle Optimierungsmodelle auch als "Vektoroptimierungsmodell" bezeichnet [DINKELBACH 1982, Kap. 3.1.2].

Ziele sind komplementär, wenn die Erreichung eines Ziels zu einer Zielerreichung des anderen führt. Ziele indifferent, sofern die Erreichung eines Ziels unabhängig von der Zielerreichung des anderen ist. Verhindert die Erreichung eines Ziels die Zielerreichung des anderen sind die Ziele konkurrierend [NICKEL ET. AL. 2011, S. 82; DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 52].

jedes Ziel, eine individuelle optimale Lösung ermitteln, jedoch keine Lösung für das gesamte Optimierungsproblem [ARNOLD ET AL. 2008, S. A2-5; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 51]. In solch einem Fall führt die Verbesserung des Erfüllungsgrades des einen Ziels zu einer Verschlechterung des anderen Ziels. So kann einzig die Teilmenge sogenannter effizienter<sup>9</sup> Lösungen identifiziert werden [DINKELBACH/KLEINE 1996, S. 38ff.]. Um aus der ermittelten Teilmenge der effizienten Lösungen eine optimale bzw. scheinbar optimale Lösung identifizieren zu können, muss eine Metazielfunktion eingeführt werden. Diese verknüpft die einzelnen Zielfunktionen gemäß der definierten Präferenzen zu einer so genannten Präferenzfunktion [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 42]: Das multikriterielle Modell wird in diesem Schritt in ein einkriterielles Modell überführt. Bei der Präferenzfunktion handelt es sich um eine Funktion, die einen Vektor von Zielfunktionswerten auf einen einzigen Präferenzwert abbildet [ARNOLD ET AL. 2008, S. A2-5; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 357f.].

## Stochastische Optimierungsmodelle

Eine grundlegende Gemeinsamkeit der beiden zuvor erläuterten Optimierungsmodelltypen sind die deterministischen Eingangsdaten. Liegen einem Entscheidungsproblem hingegen unvollständige bzw. unsichere Daten als Eingangsdaten für die Zielfunktion oder die Nebenbedingungen zugrunde, bedingt dies die Anwendung stochastischer Optimierungsmodelle [WESTPHALEN 2004, S. 5; DINKELBACH/KLEINE 1996, S. 62f.]. Die Unvollständigkeit bzw. Unsicherheit erzeugt eine Mehrwertigkeit der einzelnen Daten. Entsprechend sind mehrere verschiedene Szenarien denkbar. Jedes Szenario entspricht einer deterministischen Modellinstanz, die jeweils mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten könnte. Vor diesem Hintergrund ist es kaum möglich, ein optimal lösbares stochastisches Optimierungsmodell aufzustellen, denn bedingt durch die unvollständige oder unsichere Datenbasis, sind weder Optimalität noch Zulässigkeit einer Lösung eines stochastischen Optimierungsmodells eindeutig feststellbar [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 52].

Treten unvollständige oder unsichere Daten einzig in der Zielfunktion auf, unterscheiden sich die Szenarien nur in den Zielkoeffizienten. In Analogie zu den zuvor beschriebenen multikriteriellen Optimierungsmodellen ist in diesem Fall eine Präferenzfunktion zu definieren. Die stochastische Zielfunktion wird also durch eine deterministische Ersatzzielfunktion repräsentiert. Dadurch wird es möglich, dennoch eine zulässige und damit akzeptable Lösung zu identifizieren [ARNOLD ET. AL 2004, S. A2-5]. Sind neben der Zielfunktion auch die Nebenbedingungen von unsicheren Einflussgrößen betroffen, ergeben sich Lösungen, die nur zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zulässig sind. Daher ist ebenfalls eine geeignete deterministische Ersatzformulierung (Ersatzrestriktion) für die stochastischen Nebenbedingungen zu formulieren [ARNOLD ET. AL 2004, S. A2-6]. Durch Substitution der stochastischen Funktionen mit Ersatzzielfunktionen und -restriktionen resultiert ein deterministisch einkriterielles Ersatzmodell, dessen Modellinstanz sich, verglichen mit originären stochastischen Optimierungsmodellen, numerisch lösen lässt [ARNOLD ET. AL 2004, S. A2-6; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 52].

<sup>9</sup> Eine **zulässige Lösung** ist dann effizient, wenn keine andere zulässige Lösung existiert, die für keines der Ziele schlechter und für mindestens ein Ziel günstiger beurteilt werden kann als die effiziente Lösung. Nicht effiziente Lösungen werden von mindestens einer effizienten Lösung dominiert [DOMSCHKE/DREXEL 2011, S.13].

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Eine **Modellinstanz** ergibt sich aus einem allgemeinen Modell, dem für alle Parameter Werte vorgegeben wurden [Domschke/Drexel 2011, S.5].

## Dynamische Optimierungsmodelle

Mehrstufige Entscheidungsprobleme, bei denen über mehrere Perioden interdependente Entscheidungen getroffen werden müssen, können mit dynamischen Optimierungsmodellen zu einer optimalen Lösung gebracht werden [Domschke/Drexl 2011, S. 159; Nickel et. Al. 2011, S. 305]. Die dynamische Optimierung geht bei der Problemlösung sequenziell vor, d.h. der Entscheidungsprozess wird in definierte Perioden (Stufen) aufgeteilt, in der jeweils ausschließlich die dort existierenden Entscheidungsalternativen betrachtet werden [Domschke/Drexl 2011, S. 159].

Hierbei können deterministisch und stochastisch dynamische Optimierungsmodelle unterschieden werden. Für deterministisch dynamische Optimierungsmodelle werden alle Eingangsdaten über alle Perioden hinweg als vorgegeben und sicher angenommen. Daher muss einzig zu Beginn des Entscheidungsprozesses eine Lösung berechnet werden, die über die einzelnen Perioden hinweg unverändert realisiert wird. Stochastisch dynamische Optimierungsmodelle unterliegen unsicheren Eingangsdaten, d.h. zufälligen Einflüssen. Diese Modelle lassen sich über Ersatzmodelle (vgl. dazu auch stochastische Optimierungsmodelle) lösen. Alternativ können stochastisch dynamische Optimierungsmodelle mittels sogenannter Szenario- oder Entscheidungsbäume<sup>11</sup> abgebildet und für bestimmte Ersatzzielfunktionen effizient gelöst werden [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 53].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass vor allem lineare Modelle für die Anwendung in der unternehmerischen Praxis von hoher Wichtigkeit sind, da es für diese Art von Optimierungsmodellen zum einen gute Lösungsmethoden und zum anderen hochentwickelte Standardsoftware gibt. Bis auf wenige Ausnahmen können mit heutigen Optimierungstechnologien alle praxisrelevanten linearen Optimierungsmodelle in vertretbarer Zeit optimal gelöst werden. Dieses Argument ist weder für ganzzahlige, gemischt-ganzzahlige oder nichtlineare Modelle anführbar. Entsprechend fällt die Auswahl bzgl. des Optimierungsmodells zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur im Rahmen des Forschungsvorhabens auf ein lineares einkriterielles Entscheidungsmodell.

# 4.2.2. Optimierungsverfahren zur Modelllösung

Mit **Optimierungsverfahren** können alle Lösungen eines Optimierungsmodells ermittelt werden. Die Lösungsmöglichkeiten sind dabei vielfältig [PAPAGEORGIOU ET AL. 2015, S. 2; KISTNER 2003, S.3]. Operations Research unterscheidet exakte und heuristische Verfahren zur Modelllösung [KLEIN/SCHOLL 2011, S.460; DOMSCHKE/DREXL 2011, S127f.].

**Exakte Optimierungsverfahren** führen, nach einer endlichen Anzahl von Schritten, zur mathematisch optimalen Lösung eines Optimierungsmodells. Zu exakten Optimierungsverfahren zählen z.B. die lineare Optimierung, ganzzahlige lineare Optimierung, Simplexverfahren, Exhaustionsmethode oder Branch and Bound Methode. Exakte Optimierungsverfahren weisen viele Vorteile auf, wie etwa die Ermittlung der mathematisch

<sup>11</sup> "Szenariobäume dienen zur Abbildung der unsicheren Umweltentwicklungen, sofern die Anzahl der in jeder Periode möglichen Umweltumstände nicht zu groβ ist. Jeder Pfad durch einen Szenariobaum definiert eine Modellinstanz eines deterministischen mehrperiodischen Modells. Ist in jeder Periode zudem genau nur eine von mehreren Alternativen zu realisieren, so lässt sich das Entscheidungsproblem in Form eines Entscheidungsbaums darstellen und für bestimmte Ersatzzielfunktionen effizient lösen" [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 52].

optimalen Lösung. Allerdings kann die Anwendung exakter Optimierungsverfahren zu einer Beschränkung der möglichen Modellqualität führen: Eine strukturgleiche Modellierung von realistischen Optimierungsproblemen – etwa durch Einbeziehung nicht-linearer Wirkungszusammenhänge und diskreter Entscheidungsvariablen – kann in komplexen, d.h. NP-schweren<sup>12</sup> Modellen resultieren [SUHL/MELLOULI 2009, S. 13; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 184]. NP-schweren Modellen führen zu einer optimalen Lösung. Jedoch können diese hinsichtlich der Kriterien Laufzeit und Speicherbedarf nicht effiziente Lösungswege sein [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 459f.].

grundlegenden Verständnis Zum von Anwendung und Methodik exakter Optimierungsverfahren werden im Folgenden zwei Methoden exemplarisch vorgestellt. Als erste wird die Exhaustionsmethode beispielhaft erläutert, da diese als eine gängiges exaktes Optimierungsproblem Lösungsverfahren prinzipiell auf iedes anwendbar [POMBERGER/DOBLER 2008, S. 370ff.; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 98]. Die Branch and Bound Methode ist das zweite Beispiel für eine gängige exakte Optimierungsmethode. Die Branch and Bound Methode ist allerdings nur für bestimmte Optimierungsprobleme sinnvoll anwendbar. Das wesentliche und bekannteste Anwendungsgebiet für die Branch and Bound Methode ist das Problem des Handlungsreisenden (engl. "Traveling Salesman Problem"). Zur Vertiefung dieser und weiteren exakten Lösungsverfahren wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen [Domschke/Drexl 2011; Kistner 2003; Klein/Scholl 2011; Papageorgiou et al. 2015; POMBERGER/DOBLER 2008; POPP 2015; SUHL/MELLOULI 2009; ZIEGENBALG ET. AL 2015]

Die Exhaustionsmethode wird auch die Methode der rohen Gewalt (engl.: "Brute-Force-Method") genannt. Die Exhaustionsmethode bildet den natürlichsten und einfachsten Ansatz für eine exakte, algorithmische Optimierung. Alle möglichen Ergebnisse werden mit der Exhaustionsmethode über vollständige Enumeration berechnet. D.h. alle Permutationen werden ermittelt, worüber die mathematisch optimale Lösung schließlich identifiziert wird und somit eine bessere Lösung eindeutig ausgeschlossen werden kann [POMBERGER/DOBLER 2008, S. 370ff.; POPP 2015, S. 39; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 98]. Eine Anwendung der Exhaustionsmethode ist - bezogen auf ihre Dimensionalität - nur für begrenzte Probleme sinnvoll: Die Anzahl der möglichen Lösungen steigt exponentiell mit der Anzahl der Dimensionen [SCHÄFER ET. AL. 2010, S.56; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 177]. Dieser Einschränkung stehen verschiedene Vorteile der Exhaustionsmethode gegenüber: Die Implementierung der Exhaustionsmethode ist verhältnismäßig einfach. Ferner werden bei diskreten Optimierungsproblemen alle möglichen Lösungen mit der Exhaustionsmethode überprüft. Darum eignet sich die Exhaustionsmethode als Referenzmethode, um die exakte Anzahl der Lösungen und der Rechenschritte bis zur Identifikation des mathematischen Optimums zu ermitteln. Zusammenfassend eignet sich die Exhaustionsmethode prinzipiell zur exakte Lösung eines jeden Optimierungsproblems, zur Abschätzung des Rechenaufwands [MAYER 2016, S. 46; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 99].

Die **Branch and Bound Methode** führt über implizite Enumeration zu einer optimalen Lösung eines kombinatorischen Optimierungsproblems. Hierbei wird der Suchraum sukzessive durch einen Suchbaum beschränkt. Durch diese schrittweise Beschränkung findet eine Effizienzsteigerung statt, indem Teilbäumen bzw. Verzweigungen (engl.: "*Branch*") eliminiert

\_

<sup>&</sup>quot;NP" ist die Menge aller nicht-deterministisch polynominal lösbaren Entscheidungsprobleme. Ein Entscheidungsproblem ist nicht-deterministisch polynominal lösbar, wenn ein (geratener) Input in polynominaler Zeit als ein solcher nachgewiesen werden kann [NICKEL ET AL. 2011, S. 201].

werden. Die Branch and Bound Methode listet dazu sämtliche zulässige Lösungen des vorliegenden kombinatorischen Optimierungsproblems auf und schließt über Schranken (engl.: "Bound") Lösungen aus, die nicht als Optimum in Frage kommen [WEICKER 2015, S.41]. Durch Anwendung des Prinzips von Aufteilung und Begrenzung des Lösungsraums entsteht eine Baumstruktur [SUHL/MELLOULI 2009, S. 142ff.]. Die Laufzeit und Speicherbedarf bei Anwendung der Branch and Bound Methode ist vornehmlich von der Qualität der Schranken abhängig. Ist die Qualität der Schranken mangelhaft kann dies zu einer vollständigen Enumeration führen, wie bei der Exhaustionsmethode [JARRE/STOER 2004, S. 422; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 491f.].

Heuristische Optimierungsverfahren kommen insbesondere zur Anwendung, wenn exakte Verfahren Effizienzgrenzen überschreiten. Dies geschieht z.B. wenn ein realistisches Optimierungsproblem sowohl hohe Komplexität als auch Unschärfe aufweist, wodurch ein exaktes Lösungsverfahren nicht mehr sinnvoll anwendbar ist. Wesentliches Anwendungsgebiet von Heuristiken sind somit kombinatorische Optimierungsprobleme. Heuristiken bestehen aus dezidierten Vorgehensregeln zur Lösungsfindung oder -verbesserung. Qualität und Nutzen dieser Vorgehensregeln steigen mit deren Kompatibilität zum jeweiligen Optimierungsziel und der Optimierungsproblemstruktur [SUHL/MELLOULI 2009, S. 13]. Im Vergleich zu exakten Optimierungsverfahren ermitteln Heuristiken akzeptable Lösungen und das in der Regel mit geringerem Rechenaufwand. Damit dienen Heuristiken prinzipiell der effektiven Bewältigung realer Optimierungsprobleme. Heuristische Optimierungsverfahren bieten dabei allerdings keine Garantie für die Ermittlung einer exakten, d.h. mathematisch optimalen Lösung. Hingegen suchen Heuristiken nach guten zulässigen Lösungen. Damit liefern Heuristiken suboptimale Lösungen, die in der Regel nicht reproduzierbar sind. Auch Rechenschritte bis zum Erhalt einer guten Lösung sind bei einer Heuristik entsprechend vielfach nicht gleichbleibend und exakt reproduzierbar. Zusammenfassend sind die mittels Heuristiken berechneten Lösungen von Optimierungsproblemen nicht vereinbar mit der o.g. Definition des mathematischen Optimums [DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 127f.; KLEIN/SCHOLL 2011, S. 460f.].

Heuristiken formalisieren problembezogenes Erfahrungswissen sowie plausible Vorgehensregeln und stellen diese softwarebasiert zur Verfügung. Eine zentrale Herausforderung besteht dabei in der zielgerichteten Identifikation dieser Vorgehensregeln. Ideal sind heuristische Vorgehensregeln, die gleichermaßen simpel sind und eine akzeptable Lösung unter Berücksichtigung der definierten Zielkriterien liefern. Oftmals basieren Heuristiken auf Vorgehensregeln der sogenannten gierigen Strategie (engl.: "Greedy Strategy") [SUHL/MELLOULI 2009, S. 138; ZIEGENBALG ET. AL 2015, S. 100f.]. Hierbei werden Lösungen sukzessive konstruiert wodurch sich die Lösungsqualität Schritt für Schritt verbessern soll [KOPFER 1989, S. 19].

Ausprägungen heuristischer Verfahren zur Modelllösung sind zumeist optimierungsproblemspezifisch und nur in Ausnahmefällen verallgemeinerbar. Um dennoch eine grundlegende Kategorisierung heuristischer Verfahren vorzunehmen, klassifiziert das Operations Research Heuristiken in vier Gruppen [Domschke/Drexl 2011, S. 128; Klein/Scholl 2011, S. 484]:

- Eröffnungsverfahren: Heuristiken zur Konstruktion einer zulässigen Lösung,
- **Verbesserungsverfahren:** Heuristiken zur iterativen Verbesserung einer Lösung durch lokale Suche,
- Unvollständiges exaktes Verfahren: Heuristiken, die die beste gefundene Lösung eines vorzeitig abgebrochenen exakten Verfahrens liefert,

• Verbundverfahren: Heuristiken, die die zuvor genannten drei Ansätze kombinieren.

Eine weitere Unterscheidung heuristischer Verfahren ist die in problemspezifische sowie universelle Heuristiken. **Problemspezifische Heuristiken** werden zur Lösung eines spezifischen Problems entwickelt. Dabei nutzen problemspezifische Heuristiken dezidierte Eigenschaften der Problemstruktur und sind somit bereits bei minimaler Änderungen der Optimierungsproblemstellung nur noch bedingt wiederverwendbar. **Universelle Heuristiken** gründen hingegen auf Suchstrategien, die für unterschiedliche Problemstellungen übertragbar sind. Damit weisen diese Suchstrategien eine gewisse Allgemeingültigkeit auf, sind jedoch oftmals weniger effizient. Diese universellen Heuristiken werden auch generische Heuristiken oder Metaheuristiken genannt. Zu universellen Heuristiken zählen etwa Evolutionäre Algorithmen, Ameisenalgorithmen, Schwarmalgorithmen, Simulierte Abkühlung bzw. Härtung oder Tabu Suche. Das jeweilige Prinzip dieser universellen Heuristiken wird im Folgenden für ein grundlegendes Verständnis und zum Vergleich mit den oben aufgeführten exakten Optimierungsverfahren erläutert [POMBERGER/DOBLER 2008, S. 395; REEVES 1993; WEICKER 2015, S.127fff.; ZIEGENBALG 2015, S. 304ff.].

Evolutionäre Algorithmen (engl.: "Evolutionary Algorithm") orientieren sich an der biologischen Evolution. Sie imitieren dabei die drei grundlegenden biologischen Prinzipien: Mutation, Rekombination und (natürliche) Selektion. Diesen Prinzipien gemäß, werden die Eigenschaften eines Individuums durch Chromosomen kodiert, mittels Rekombinationsoperatoren neue Individuen erzeugt. Das Überleben sowie Fortpflanzen von Individuen wird durch Selektionsprozesse in Abhängigkeit von deren Durchsetzungsstärke gesteuert. Evolutionäre Algorithmen können daher auch schwierige Optimierungsprobleme lösen. Sie lassen sich wiederum in vier Klassen evolutionärer Algorithmen unterscheiden: Genetische genetische Programmierung, Evolutionsstrategien sowie Programmierung. Die Basis evolutionärer Algorithmen liegt in der Kodierung möglicher Lösungen als Zeichenketten sowie der primären Anwendung von Rekombinationsoperatoren auf eine bestimmte Menge (Population) von möglichen Lösungen (Individuen). Evolutionäre Algorithmen sind für Optimierungsproblemklassen mit hoher Unschärfe prädestiniert. Ferner beinhaltet die Evolution das Prinzip von Versuch und Irrtum (engl.: "Trial-and-Error") und ist ein Prozess mit sehr hohem Zeitaufwand.

Ameisenalgorithmen (engl.: "Ant Colony Optimization") ahmen die Strategie des komplexen, natürlichen Sozialverhaltens von Ameisen nach: Einzelne Suchprozesse (von Ameisen) konstruieren sukzessive vollständige Lösungen für das zu lösende Optimierungsproblem. Dabei markieren diese Suchprozesse qualitativ hochwertige Lösungen oder Elemente möglicher Lösungen. Ameisenalgorithmen werden im weiteren Suchverlauf von anderen Suchprozessen verwendet, um neue Lösungen mit Präferenz auf markierte Lösungen bzw. entsprechender Lösungselemente zu erzeugen.

Schwarmalgorithmen (engl.: "Particle Swarm Optimization") sind Optimierungsmethoden für reellwertige Optimierungsprobleme, die auf der Modellierung sozialer Interaktionen – analog des Futtersuchverhaltens von Vogel- oder Fischschwärmen – beruht. Damit sind Partikelschwärme naturanaloge Simulationsmodelle nach dem Vorbild biologischen Verhaltens. Eine Verbesserung des Schwarmalgorithmus wird nicht durch einen Selektionsmechanismus erreicht. Dies geschieht durch Nachahmung und Lernen von anderen, benachbarten Individuen. Dadurch unterscheiden sich Schwarmalgorithmen von evolutionären Algorithmen.

Simulierte Abkühlung oder Härtung (engl.: "Simulated Annealing") beruht auf der physikalischen Modellierung des Abkühlungs- bzw. Härtungsprozesses von Stoffen. D.h. auf einer Analogie zur thermischen Werkstoffphysik: Dem Verhalten von Kristallbildung in Metallen, die gerade aus der Schmelze kommen und gezielt gekühlt werden. Dabei erzeugt ein schnelles Abkühlen unregelmäßige Strukturen auf hohem Energieniveau und langsames Abkühlen regelmäßige Strukturen.

**Tabu Suche** (engl.: "*Tabu Search*") ist ein lokales Suchverfahren zur Verbesserung der Navigation bei der Suche nach besseren Lösungen im Lösungsraum mittels Tabuisierung von Teillösungen oder vollständigen Lösungen. Es verfügt über dezidierte Mechanismen, die den Verlauf der Optimierung steuern. Charakteristisch für Tabu Suche ist, dass bei der Erzeugung eines neuen Individuums die Historie der bislang erfolgten Optimierung einbezogen wird. Dazu wird aus den letzten Veränderungen Information extrahiert und in der Tabu Liste gespeichert. Dieser Eintrag verhindert das Zurückkehren zu den somit tabuisierten Lösungen.

Die Auswahl und Anwendung von Optimierungsverfahren kann nur in Ausnahmefällen im Sinne einer Black Box Lösung erfolgen. Dies gilt gleichermaßen für exakte als auch heuristische Optimierungsverfahren. Bei der Auswahl eines bestehenden Optimierungsverfahrens sind verschiedene Kriterien zu beachten. Beispielsweise ist die Struktur des zu lösenden realistischen Optimierungsproblems zu analysieren und daraus resultierende Anforderungen an das Optimierungsverfahrens abzuleiten. Wichtig ist ferner die eindeutige Kodierung der Lösungen eines Optimierungsverfahrens, sodass geeignete Suchoperatoren auf das zugrundeliegende Optimierungsproblem angewandt werden können. Zudem müssen die Lösungen hinsichtlich ihrer Güte mit einer Zielfunktion gemessen werden können. Daher können etwa heuristische Optimierungsverfahren für manche Probleme einsetzbar sein, die für exakte Optimierungsverfahren nur bedingt lösbar sind. Bei der Gestaltung von komplexen Anwendungssystemen mit Optimierungsumfängen ist es z.B. mittels Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren möglich, ein zugrundeliegendes Optimierungsproblem relativ realitätsnah abzubilden. Wird eine solche realitätsnahe Abbildung Optimierungsverfahren erzielt, so erfüllt dieses Optimierungsverfahren das Kriterium der Brauchbarkeit in der Wirklichkeit [MERTENS 1998, S. 173].

Aus der Vielfalt und universellen Anwendbarkeit von Optimierungsverfahren resultiert ein Auswahlproblem: Allgemeingültige Bewertungen oder Vergleichsstudien zur Leistungsfähigkeit verschiedener exakter sowie heuristischer Optimierungsverfahren in Abhängigkeit von o.g. Kriterien und Merkmalen realistischer Optimierungsprobleme existieren im wissenschaftlichen oder praktischen Schrifttum nur für Ausnahmen [JOHNSON/MCGEOCH 2002, S.1ff.]. Eine Ausnahme bildet etwa das o.g. Problem des Handlungsreisenden, welches sich mit der Branch and Bound Methode lösen lässt. Deshalb kann die Auswahlentscheidung oft nur anhand von Dokumentationen aus Wissenschaft und Praxis unterstützt werden, in denen auf ihre Eignung untersucht werden, ein vorgegebenes Verfahren spezifisches Optimierungsproblem lösen zu können. Theoretisch fundierte Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Verfahren ist nur teilweise über die Analyse der Grundprinzipien des jeweiligen Optimierungsverfahrens zu gewinnen. Bspw. können lokale Suchverfahren relativ gute Ergebnisse liefern, wenn ähnliche Lösungen eine vergleichbare Güte aufweisen [CHRISTENSEN/OPPACHER 2001, S. 1219ff.]. Hingegen haben etwa Evolutionäre Algorithmen einen gewissen universellen Charakter. Diese Eigenschaft befähigt evolutionäre Algorithmen dazu, verschiedenste realistische Optimierungsprobleme mit dem gleichen Ansatz zu lösen [ZIEGENBALG 2015, S. 319]. Aufgrund des dargelegten Mangels an Bewertungsgrundlagen oder

Vergleichsstudien von Optimierungsverfahren kann bei der Auswahl geeigneter Lösungsverfahren für konkrete, realistische Optimierungsprobleme auf erprobte Verfahren aus der Literatur zurückgegriffen werden. Alternativ lässt sich erfahrungsbasiert abschätzen, ob ein existierendes, realistisches Optimierungsproblem die notwendigen Merkmale aufweist, um über ein dezidiertes exaktes oder heuristisches Optimierungsverfahren gelöst zu werden.

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens betrachtende realistische Optimierungsproblem – die kostenoptimale Funktionspartitionierung in einer E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 5) - stellt die Forscherin vor das o.g. Auswahlproblem. Aufgrund des Mangels an adäquaten Bewertungsgrundlagen oder Vergleichsstudien ist die Forscherin auf persönliche, übertragende und literaturbasierte Erfahrungen sowie ein gewisses Maß an Geschick im Sinne der Exploration angewiesen [FINK/ROTHLAUF 2006, S. 8]: Das vorliegende Optimierungsproblem ist in Umfang und Komplexität begrenzt und durch minimale Unschärfe gekennzeichnet (für Details s. Kapitel 5). Diese Eigenschaft qualifiziert das Optimierungsproblem grundsätzlich dafür, über ein exaktes Optimierungsverfahren gelöst zu werden. Des Weiteren besteht im Forschungsvorhabens die Anforderung Implementierung Rahmen des die Optimierungsverfahrens computerbasiert und so einfach wie möglich umzusetzen (vgl. Kapitel 1 und Kapitel 5). Hintergrund dieser Anforderung ist das Ziel das Optimierungsverfahren als Adaption die auf vergleichbare oder ähnliche Problemstellungen wiederverwenden zu können. Heuristiken erfüllen diese Kriterien nur bedingt und damit weniger geeignet unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Anforderungen. Als weitere Anforderung sollen das Ergebnis des Optimierungsverfahrens sowie die notwendigen Rechenschritte bis zur Identifikation des mathematisch optimalen Ergebnisses reproduzierbar, adaptierbar und nachvollzielbar sein (vgl. Kapitel 1 und Kapitel 5). Auch hier weisen exakte Verfahren eine bessere Eignung auf, nachdem mit heuristischen Optimierungsverfahren prinzipiell nur suboptimale Lösungen erzielbar sind. Für die Anwendung von Heuristiken spräche das zuvor beschriebene Kriterium der Leistungsfähigkeit. Dieses Kriterium ist im Rahmen des Forschungsvorhabens aufgrund der geringen Komplexität und Unschärfe des betrachteten Optimierungsproblems nicht von Relevanz. Zur Ermittlung der mathematisch optimalen Lösung ist ferner im besten Fall nur ein einziger Durchlaufzyklus des Optimierungsverfahrens notwendig, was wiederum mit exakten Lösungsverfahren erzielbar ist, nicht aber mit heuristischen Lösungsverfahren erzielbar ist.

Zusammenfassend weist das betrachtete realistische Optimierungsproblem eine geringe Komplexität und Unschärfe auf. Ferner ist das Optimierungsproblem diskret beschreibbar. Dessen Lösung ist daher und aufgrund der definierten Prämissen mit einem vertretbaren Rechenaufwand möglich (vgl. Kapitel 5) und zwar ohne das Optimierungsproblem gravierend vereinfachen zu müssen. Daher wird im Rahmen des Forschungsvorhabens nach explorativer Anwendung eines Suchalgorithmus, mit unzufrieden stellendem Ergebnis, im zweiten Schritt die Exhaustionsmethode zur Ermittlung der mathematisch optimalen Lösung herangezogen (vgl. Kapitel 5.7). Durch die Anwendung dieser exakten Vollenumeration wird dem Anspruch auf Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit des Ergebnisses sowie der Anwendbarkeit und Referenzzierbarkeit innerhalb der unternehmerischen Praxis nachgekommen. Damit erfüllt die Exhaustionsmethode die für das Forschungsvorhaben relevanten Kriterien.

# 4.2.3. Optimierungsmodellbildung im Operations Research

Für die Erstellung eines Optimierungsmodells finden sich in der Literatur diverse generische Ansätze, die insgesamt große inhaltliche Überschneidungen aufweisen [vgl. u.a. Klein/Scholl 2011, S. 2; Domschke/Scholl 2008, S. 22f.; Domschke/Drext 2011, S. 1f.; Suhl/Mellouli 2009, S. 7]. Die existierenden Ansätze wurden zusammengefasst, ergänzt und in ein prozedurales Vorgehensmodell übertragen. Das Vorgehensmodell beinhaltet sechs Schritte, die sukzessive durchlaufen werden. Dabei können mehrere Iterationsschleifen notwendig sein, bis eine akzeptable Lösung bzw. die optimale Handlungsalternative durch das Optimierungsmodell generiert wird (vgl. Abbildung 4-4).

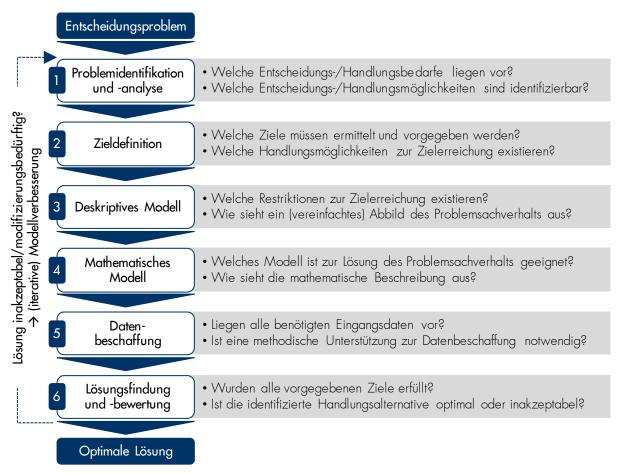


Abbildung 4-4: Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research, eigene Darstellung in Anlehnung an [Klein/Scholl 2011, S. 2; Domschke/Scholl 2008, S. 22f.; Domschke/Drexl 2011, S. 1f.; Suhl/Mellouli 2009, S. 7].

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte näher erläutert [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 2; DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 22f.; DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 1f.; SUHL/MELLOULI 2009, S. 7]:

• Der Phase 1 "Problemidentifikation und Analyse" liegt ein konkretes Entscheidungsproblem wie die Partitionierung von Funktionen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu Grunde (vgl. auch Optimierungsprobleme in Kapitel 4.2.1). Das bedeutet, die Existenz von Entscheidungs- und Handlungsbedarf bzgl. eines gegenwärtigen oder in der Zukunft liegenden Zustands bzw. Problemsachverhalts wurde erkannt. Entsprechend müssen alle Entscheidungs- und Handlungsmöglichkeiten identifiziert werden, die für die Lösung des Entscheidungsproblems relevant sind.

- In der **Phase 2** "*Zieldefinition*" erfolgen die Ermittlung und die explizite Vorgabe der Teilziele, welche bei der Lösung des Entscheidungsproblems zu verfolgen und zu erfüllen sind. Ergänzend dazu müssen alle möglichen Handlungsalternativen zur Erreichung der definierten Ziele identifiziert und beschrieben werden.
- Unter Berücksichtigung der in Phase 1 und 2 erarbeiteten Grundlagen wird in Phase 3 "Deskriptives Modell" ein Abbild des Urbilds aufgebaut. Bevor das deskriptive Modell erstellt werden kann, muss die Vollständigkeit des zur Problemlösung notwendigen Wissens- und Datenstands überprüft werden. In der Regel liegen nicht alle Aspekte vor. Zudem ist die Berücksichtigung aller Aspekte aus verschiedenen Gründen nicht immer zielführend. In diesem Fall müssen Prämissen respektive Restriktionen (Nebenbedingungen) zur Vereinfachung des Modells definiert werden. Erfolgt dies, resultiert entsprechend ein homomorph deskriptives Modell.
- Auf Basis des deskriptiven Modells erfolgt in der Phase 4 "Mathematisches Modell"
  die Formulierung des mathematischen Modells. In der Regel kann hierbei auf bereits
  existierende Typen von Optimierungsmodellen zurückgegriffen bzw. aufgebaut werden
  (vgl. auch Optimierungsmodelle in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2).
- Die für das Mathematische Modell notwendigen Inputgrößen (Daten) werden in der Phase 5 "Datenbeschaffung" gesammelt. Für den Fall, dass notwendige Daten nicht zugänglich oder verfügbar sind, müssen diese mit geeigneten Prognosemethoden und Tools zur Datenbeschaffung generiert werden.
- In **Phase 6** "Lösungsfindung und -bewertung" ist durch das mathematische Modell zunächst eine Lösung zu generieren, die im Anschluss daran auf ihre Korrektheit zu überprüfen ist (z.B. über retrospektive Tests). Wird die Lösung als "inakzeptabel" oder "modifikationsbedürftig" bewertet, so muss das Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung in einer weiteren Iterationsschleife durchlaufen werden, um eine Modellverbesserung zu erzielen. Liegt hingegen die mathematisch optimale Lösung des Optimierungsproblems vor, so kann diese als Entscheidungsgrundlage für das reale Entscheidungsproblem herangezogen werden.

Das hier dargestellte sechsphasige Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung wird in der vorliegenden Arbeit als Orientierungsrahmen für Optimierungsmodelle im Allgemeinen, sowie für das in Kapitel 5 zu konstruierende Optimierungsmodell im Speziellen herangezogen.

# 4.3. Referenzmodelle

Ausgehend von dem in Kapitel 4.1 vorgestellten, allgemeingültigen Modellbegriff werden an dieser Stelle **Referenzmodelle**, auch Referenz-Informationsmodelle genannt,<sup>13</sup> eingeführt, die in der Wirtschaftsinformatik sowie im Business Engineering als zentrales Hilfsmittel bei der Gestaltung unternehmensspezifischer Informationsmodelle<sup>14</sup> angewendet werden

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> **Referenz-Informationsmodelle** und **Referenzmodelle** können synonym verwendet werden, wobei im Folgenden einzig der Begriff Referenzmodell genutzt wird.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Ein **Informationsmodell** wird definiert als das "immaterielle Abbild eines betrieblichen Objektsystems aus Sicht der in diesem verarbeiteten Informationen für Zwecke des Informationssystem- und Organisationsgestalters" [KRCMAR 2015, S.7; ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S. 16].

[FETTKE/LOOS 2002, S. 1; FETTKE 2008, S. 180; KRCMAR 2015, S. 44f.]. Mit der folgenden Erläuterung dieser Modellkategorie wird die Basis für das in Kapitel 6 zu gestaltende Referenzmodell für die Architektur-gesteuerte E/E Baukastenentwicklung geschaffen. Dazu werden zunächst Bedeutung und Zweck von Referenzmodellen dargestellt. Daran anknüpfend werden die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) für Informationsmodelle eingeführt, die als systematische Gestaltungsempfehlungen in das anschließend vorzustellende Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung einfließen.

Referenzmodelle unterstützen Analyse, Entwurf, Implementierung sowie Wartung von unternehmensspezifischen Informationssystemen [FETTKE 2008, S. 180]. Diese Modellkategorie bildet, gemäß dem Kriterium der inhaltlichen Individualität, selbst eine Sonderform von Informationsmodellen und weist somit grundsätzlich auch deren Kerncharakteristikum auf: Die Beschreibung von Strukturen sowie Beziehungen von Informationssystemen [LOOS/SCHEER 1995, S. 185; SCHARL 1997, S. 12]. Dabei heben sich Referenzmodelle in der Hauptsache durch ihre inhaltliche Reichweite und ihren hohen Qualitätsanspruch von unternehmensspezifischen Informationsmodellen ab [ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S.16f.]. Ferner lassen sich Referenzmodelle durch folgende Merkmale weiter abgrenzen [FETTKE/LOOS 2007, S. 4.; FETTKE 2006, S. 19ff.; FETTKE 2008, S. 18; KRCMAR 2015, S. 44f.]:

- Referenzmodelle sind wiederverwendbar, d.h. sie bilden den Bezugspunkt bei der Gestaltung von unternehmensspezifischen Informationsmodellen,
- Referenzmodelle beschreiben Best Practices<sup>15</sup> oder Common Practices<sup>16</sup> zur Gestaltung von Unternehmen,
- Referenzmodelle besitzen Allgemeingültigkeit für bestimmte Anwendungsgebiete.

Das erstgenannte Merkmal ist als Hauptcharakteristikum von Referenzmodellen zu betrachten [Broke/Buddender 2004, S. 341; Hars 1994, S. 15]. Demzufolge sind Referenzmodelle als eine Art Abbildungsempfehlung zu betrachten, die bei der Konstruktion<sup>17</sup> weiterer Modelle von Informationssystemen referenziert werden kann [Krcmar 2015, S. 44f.; Rosemann/Schütte 1997, S.16]. Zudem besitzen sie normativen Charakter, indem sie für die abgebildete Klasse von Problemsachverhalten konkrete Gestaltungsempfehlungen (gemäß Best oder Common Practice) beinhalten [Marent 1995, S. 312]. Vor diesem Hintergrund lassen sich Informationsmodelle genau dann als Referenzmodelle identifizieren, wenn mit ihrer Konstruktion die folgende Zielsetzung verfolgt wird: Der Entwicklung eines Referenzmodells liegt der Anspruch zugrunde, es bei der Konstruktion von unternehmensspezifischen Modellen wiederverwenden zu können [Becker/Knackstedt 2003. S. 19f.; Becker/Delftmann 2004, S. 19f.].

Allgemein wird als "Best Practice" ein bestimmtes Vorgehen bzw. Verfahren bezeichnet, das für eine spezifische Anwendung als beste Handlungsalternative anerkannt wird. Dabei handelt es sich allerdings nicht um einen Standard, sondern lediglich um eine Handlungsempfehlung. Für den hier betrachteten Kontext bedeutet Best Practice folgendes: Mit einem Referenzmodell wird ein komplexes, reales Systeme so abgebildet, dass es ideal und allgemeingültig zur Beschreibung sowie Lösung des konkreten Problemsachverhalts beiträgt.

Allgemein wird unter "Common Practices" ein allgemein übliches und anerkanntes Vorgehen bzw. Verfahren bezüglich eines spezifischen Vorgehens bzw. Verfahrens verstanden. Übertragen auf die Referenzmodellbildung bedeutet dies, ein Referenzmodell bildet ein komplexes, reales System gemäß der allgemein anerkannten und gelebten Praxis ab.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Der Begriff Modellkonstruktion wird in der vorliegenden Arbeit im Sinne des methodischen Konstruktivismus verwendet.

Weiter werden Referenzmodelle durch eine gewisse Allgemeingültigkeit für verschiedene Modellierungssituationen charakterisiert [FETTKE 2008, S.182]. Genauer bedeutet dies, dass sie sich für eine spezifische Klasse von Unternehmen oder Organisationseinheiten wie bspw. OEMs oder die automotive E/E Entwicklung von OEMs verwenden lassen, in deren Kontext sie sich als nützlich erweisen [FETTKE/LOOS 2002, S. 1; BECKER 2001, S. 399f.; SCHWEGEMANN 1999, S. 1].

Vor dem Hintergrund, dass Referenzmodelle eine Spezialisierung von Informationsmodellen darstellen, gilt für die vorliegende Arbeit die Definition nach BECKER und SCHÜTTE. Nach dieser ist ein Referenzmodell "[...] das immaterielle Abbild der in einem realen oder gedachten betrieblichen Objektsystem verarbeiteten Informationen, das für Zwecke des Informationssystem- und Organisationsgestalters Empfehlungscharakter besitzt und als Bezugspunkt für unternehmensspezifische Informationsmodelle dienen kann." [BECKER/SCHÜTTE 1997, S. 428].

Zur Wirkungsbeschreibung von Referenzmodellen finden sich in der Literatur heterogene Aussagen [z.B. Fettke 2008, S. 192; Becker/Schütte 2004, S. 80ff.; Hars 1994, S. 32ff., Becker/Knackstedt 2003, S. 416f.; Krcmar 2015, S. 44f.; Scheer 2011, S. 61], die an dieser Stelle nicht im Detail diskutiert werden sollen. Exemplarisch sei auf das Schema nach Becker und Knackstedt verwiesen, demgemäß über zwanzig Kosten- und Nutzenkategorien in Wirkungsbeziehung mit der Anwendung von Referenzmodellen stehen. Davon hat jede einzelne Kategorie wiederum Auswirkungen auf die fünf im Folgenden genannten Zielgrößen, die sowohl Vor- als auch Nachteile von Referenzmodellen herausstellen [Becker/Knackstedt 2003, S. 416f.]:

- **Kosten:** Die Entwicklung respektive Beschaffung eines Referenzmodells verursacht Kosten. Wiederum können bei der Konstruktion weiterer Modelle auf Basis des Referenzmodells Kosten eingespart werden.
- **Zeit:** Für die Entwicklung oder Suche und Anpassung eines geeigneten Referenzmodells muss Zeit aufgewendet werden. Durch die Konstruktion weiterer Modelle auf Basis eines Referenzmodells ergeben sich unter Umständen deutliche Zeiteinsparpotentiale.
- Qualität: Je höher die Qualität des wiederverwendeten Referenzmodells ist, desto wahrscheinlicher ist auch eine gute Qualität der daraus generierten weiteren Modelle.
- Risiko: Wird ein unternehmensspezifisches Modell in Abhängigkeit eines Referenzmodells entwickelt, so steigert dies das Modellierungsrisiko insofern, als auch die zukünftige Weiterentwicklung des Modells abhängig vom Entwicklungsstand des Referenzmodells ist. Hingegen sinkt das Modellierungsrisiko mit Einsatz eines hochqualitativen, etablierten Referenzmodells.
- Wettbewerbsposition: Werden Referenzmodelle veröffentlicht oder veröffentlichte Referenzmodelle angewendet, so sind diese in der Regel auch den direkten Wettbewerbern zugänglich. Damit können alle zuvor erwähnten Vor- und Nachteile eines Referenzmodells entweder die Wettbewerbsposition eines Unternehmens stärken oder sich neutral bis negativ auswirken. Bspw. dann, wenn das im Referenzmodell enthaltene Wissen auch von den direkten Wettbewerbern genutzt wird.

Nachdem der Referenzmodell-Begriff ausführlich erläutert wurde, wird an dieser Stelle auf die Typen von Referenzmodellen eingegangen. Obwohl Referenzmodelle zu unterschiedlichen Modellzwecken und Zielsetzungen<sup>18</sup> entwickelt werden, versuchen sich ROSEMANN und SCHÜTTE an der Strukturierung der existenten Vielfalt, indem sie grundsätzlich nach zwei Typen von Referenzmodellen differenzieren [ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S.17]:

- Referenz-Organisationsmodelle: Der Schwerpunkt liegt auf der Darstellung organisationsrelevanter Sachverhalte. Ihr Einsatz erfolgt primär zur Verbesserung sowie Dokumentation bestehender Prozesse und Strukturen.
- Referenz-Anwendungssystemmodelle: Diese Kategorie übernimmt die Beschreibung der Funktionalität eines Anwendungssystems aus technikzentrierter Sichtweise und wird daher auch als Software-Referenzmodell bezeichnet.

Hinsichtlich dieser Typisierung lässt sich das in Kapitel 5 dieser Arbeit zu entwickelnde Referenzmodell den Referenz-Organisationsmodellen zuordnen, da es sich bei der modellbasierten Abbildung der architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung um die Darstellung organisationsrelevanter Sachverhalte handelt. Zudem wird hier das Ziel verfolgt, ein stimmiges Gesamtbild des Zusammenspiels von E/E Architektur und E/E Baukästen zu erzeugen, um somit zur Verbesserung des gesamten E/E Entwicklungsprozess beizutragen.

## Referenzmodellbildung nach den GoM

Zum Zweck der Systematisierung von Gestaltungsempfehlungen für Informationsmodelle im Allgemeinen wurde mit den Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) ein entsprechender Rahmen (engl.: Framework) geschaffen. Weil Referenzmodelle eine Form von Informationsmodellen darstellen, können auch bei deren Modellbildung die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung als methodischer Ordnungsrahmen herangezogen werden [ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S. 17]. Allerdings muss dies unter Berücksichtigung des Tatbestands erfolgen, dass sich Referenzmodelle im Wesentlichen durch deren Anspruch an Wiederverwendbarkeit und Qualität von unternehmensspezifischen Informationsmodellen unterscheiden.

Die Anwendung der Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung trägt im positiven Sinne zur gezielten Einschränkung der Freiheitsräume im Rahmen der Modellierung bei und führt damit zur Steigerung von Klarheit, Konsistenzsicherung und Qualität von Referenzmodellen [SCHÜTTE 1997, S.19; BECKER ET AL. 1998, S. 1ff.]. Dabei lassen sich folgende sechs Grundsätze unterscheiden, die wiederum vielfältige wechselseitige Beziehungen untereinander aufweisen [SCHÜTTE 1997, S. 19ff.; BECKER ET AL. 1998, S. 4ff.; ROSEMANN ET AL. 2005, S. 47ff.]:

- Grundsatz der Richtigkeit: Unabdingbar für ein qualitativ hochwertiges Referenzmodell ist, dass es den abzubildenden realen Sachverhalt formal korrekt wiedergibt, also die syntaktische Richtigkeit. Das betrifft sowohl die Beschreibung der Modellstruktur als auch die des Modellverhaltens, die semantische Richtigkeit.
- **Grundsatz der Relevanz:** Ein Referenzmodell muss alle für den Modellierungszweck relevanten Elemente und Beziehungen des realen Sachverhalts enthalten, sollte aber keine irrelevanten Informationen dokumentieren. Elemente und Beziehungen des

Bei den in der Literatur existenten Referenzmodellen herrscht Heterogenität: Die Bandbreite reicht von branchenspezifischen Datenmodellen bis zum ISO-OSI-Schichtenmodell für die Standardisierung von Netzprotokollen. Zur weiteren Vertiefung verschiedener Referenzmodelle sei an dieser Stelle u.a. auf folgende Literatur verwiesen: HARS 1994; KRAMPE 1999; LANG 1997; REMME 1997; SCHÜTTE 1998; SCHWEGEMANN 1999.

realen Sachverhalts sind dann relevant, wenn infolge ihrer Nicht-Verwendung der Nutzeneffekt des Referenzmodells sinken würde.

- Grundsatz der Wirtschaftlichkeit: Der Detaillierungsgrad eines Referenzmodells wird dann als wirtschaftlich optimal definiert, wenn die Kosten einer weiteren Detaillierung deren Nutzen eindeutig überschreiten. Daher ist sicherzustellen, dass die Modellierungsaktivitäten in einem adäquaten Kosten-Nutzen-Verhältnis zueinander stehen.
- Grundsatz der Klarheit: Referenzmodelle müssen so verständlich, anschaulich, strukturiert und intuitiv zugänglich wie möglich modelliert werden, damit diese für die Modelladressaten leicht zugänglich sind. Damit verbunden ist die Reduzierung der Modellelemente auf genau die Anzahl, die zum Verständnis und zur Wiedergabe des Modellierungszwecks elementar notwendig ist.
- Grundsatz der Vergleichbarkeit: Wurden Referenzmodelle unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Modellierungsverfahren erstellt, so müssen diese dennoch untereinander inhaltlich vergleichbar (semantische Vergleichbarkeit) und untereinander kompatibel (syntaktische Vergleichbarkeit) sein. Dieser Grundsatz ist vor allem dann von großer Relevanz, wenn bspw. im Rahmen eines umfassenden Modellierungsprojekts mehrere Modelle konsolidiert werden.
- Grundsatz des systematischen Aufbaus: Mit dem Ziel die Komplexität so gering wie möglich zu halten, werden oftmals nur Teilaspekte des realen Sachverhalts in einem Referenzmodell abgebildet. Daher sind mögliche Schnittstellen zu korrespondierenden Modellen zu definieren: So sollten Inputdaten eines Prozessmodells eine Referenz auf ein Datenmodell aufweisen.

Die skizzierten Grundsätze lassen sich als spezifische Gestaltungsempfehlungen eines Referenzmodells interpretieren [ROSEMANN/SCHÜTTE 1997, S. 17], die in konkrete Maßnahmen aufgegliedert werden können und direkt in ein Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung einfließen. Dazu wurde für die vorliegende Arbeit das von Becker entworfene Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationsmodelle [BECKER ET AL. 1998, S. 11] an die oben genannten Referenzmodell-spezifischen Anforderungen angepasst. Das in Abbildung 4-5 dargestellte Vorgehensmodell umfasst fünf aufeinander aufbauende Phasen, die sukzessive durchlaufen werden, wobei hier mehrere Iterationsschleifen notwendig sein können. Die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells zur Referenzmodellbildung werden im Folgenden näher erläutert [BECKER ET AL. 1998, S. 7ff.]:

- Phase 1 "Zieldefinition": Der Modellzweck wird zu Beginn der Modellbildung festgelegt. Dabei ist es möglich, dass mehrere Zwecke verfolgt werden, die sowohl Einfluss auf die Modellinhalte als auch auf den Detaillierungsgrad des Modells haben.
- Phase 2 "Konstruktion des Ordnungsrahmens": Die Abbildung eines komplexen realen Sachverhalts in einem Referenzmodell führt zwangsläufig zu einer gewissen Komplexität des Modells selbst. Um diese Komplexität beherrschbar zu machen, besteht die Möglichkeit das Modell in einen Ordnungsrahmen einzubetten, der die Navigation durch das Modell deutlich erleichtert, indem die einzelnen Modellelemente inklusive ihrer Beziehungen und Schnittstellen untereinander definiert sowie strukturiert abgebildet werden.

- **Phase 3** "*Modellierung der Struktur*": Auf Basis der vorangegangenen Phase 2 erfolgt hier die Detaillierung und Ausgestaltung des Referenzmodells, d.h. die einzelnen Modellelemente werden mit konkreten Inhalten gefüllt.
- Phase 4 "Konsolidierung und Komplettierung": Nach Abschluss der Phase 3 wird die Konsolidierung aller Modellelemente vorgenommen. Damit einhergehend findet eine vollständige Prüfung der Modellkonsistenz, -inhalte und -schnittstellen statt, um mögliche Redundanzen oder nicht modellierte Tatbestände (Modelllücken) zu identifizieren und zu beheben. Entsprechend kann eine Überarbeitung der Phasen 2 und 3 in mehreren Iterationsschritten erforderlich sein.
- **Phase 5** "*Wiederverwendung*": Schließlich erfolgt die Umsetzung des Referenzmodells, d.h. es wird für die Konstruktion eines unternehmensspezifischen Modells angewendet.

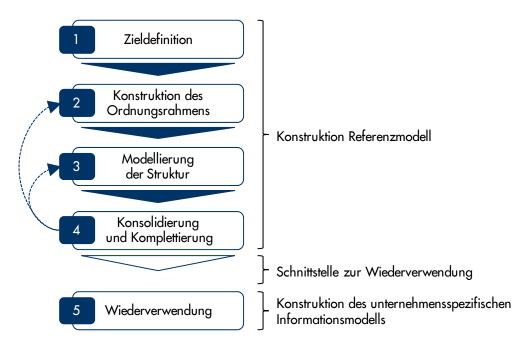


Abbildung 4-5: Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung (vgl. Kapitel 6), eigene Darstellung in Anlehnung an Becker [Becker 1998, S. 7ff.].

Als Ergänzung zum dargestellten Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung wird an dieser Stelle auf das eingangs erwähnte Hauptcharakteristikum von Referenzmodellen verwiesen, das gemäß FETTKE und Loos als **Leitbild der Referenzmodellierung** im Sinne eines idealen, zukünftigen Zustands fungiert. Darunter verstehen sie "die Konstruktion unternehmensspezifischer Modelle auf Basis vorgefertigter Modelle bzw. Modellbausteine" [FETTKE/LOOS 2004, S. 1]. Damit fassen FETTKE und Loos unter dem Begriff Referenzmodellierung mehrere Aspekte zusammen: Die eigentliche Konstruktion des Referenzmodells (Referenzmodellbildung), die im Rahmen der Phasen 1 bis 4 des zuvor eingeführten Vorgehensmodells zur Referenzmodellbildung erfolgt. Zusätzlich auch die Anwendung auf mindestens ein weiteres unternehmensspezifisches Modell (Prozessschritt 5 des Vorgehensmodells). Vor dem Hintergrund der wiederverwendungsorientierten Begriffsauffassung, lässt sich daher die Referenzmodellierung grundsätzlich in die zwei Prozessschritte "Konstruktion" und "Anwendung" unterteilen [FETTKE/LOOS 2004, S. 2]:

- **Konstruktion:** Ein Referenzmodell wird für eine bestimmte Unternehmensklasse konstruiert. Als Prozessergebnis resultiert ein Referenzmodell, das für verschiedene Situationen angewendet werden kann.
- Anwendung: Auf Basis des Referenzmodells wird ein unternehmensspezifisches Modell, das Informationsmodell, in einer spezifischen Modellierungssituation konstruiert.

Um einen fließenden Übergang zwischen beiden Prozessschritten und somit eine adäquate Wiederverwendung des Referenzmodells gewährleisten zu können, muss die Gestaltung des Übergangs, die Schnittstelle, besonders berücksichtigt werden. In der Literatur existieren diesbezüglich heterogene Methodenansätze, zu deren weiterer Vertiefung u.a. auf die folgenden Literaturquellen verwiesen wird [HARS 1994, S. 143f.; KRAMPE 1999, S. 6f., LANG 1997, S. 3f.; REMME 1997, S. 213ff.; SCHÜTTE 1998, S. 291ff.; SCHWEGEMANN 1999, S. 1f].

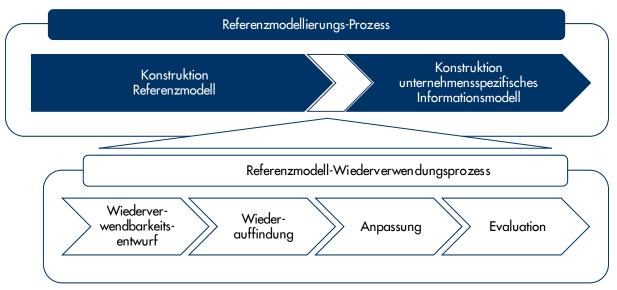


Abbildung 4-6: Referenzmodel-Wiederverwendungsprozess, in Anlehnung an [FETTKE/LOOS 2002, S. 7].

Abbildung 4-6 stellt einen generischen Prozessvorschlag zur Wiederverwendung von Referenzmodellen dar, der sich wiederum in die folgenden vier Teilprozessschritte untergliedert [FETTKE/LOOS 2004, S.3ff.]:

- **Teilprozess Wiederverwendbarkeitsentwurf:** Hier werden Referenzmodelle für die Wiederverwendung aufbereitet und verfügbar gemacht, etwa über eine Referenzmodell-Bibliothek oder (einen)-Katalog.
- Teilprozess Anpassung: Bevor ein Referenzmodell wiederverwendet werden kann, muss es vom Modellgestalter für die unternehmensspezifische Modellierung angepasst werden. Hierfür existieren prinzipiell folgende zwei Kategorien: Kompositorische Maßnahmen, durch welche einzelne Modellbereiche gelöscht, verändert oder ergänzt werden und generische Maßnahmen, durch welche zusätzliche, explizite Möglichkeiten zur Anpassung des Modells beschrieben werden.

Inbegriffen ist die Definition von Regeln und Anpassungsschritten, die für die Anpassung ausgeführt werden müssen.

 Teilprozess Evaluierung: Bei der Wiederverwendung eines Referenzmodells können unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Zum Beispiel ist die Wiederverwendung, aufgrund zuvor unbekannter Randbedingungen, für den betrachteten Kontext nicht sinnvoll oder Unzulänglichkeiten des Referenzmodells werden identifiziert. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen entsprechend ausgewertet und als Erkenntnisgewinn dokumentiert werden.

In Kapitel 6, in dem ein Referenzmodell für das Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten entwickelt wird, liegt der Fokus auf der Konstruktion des Referenzmodells. Die Anwendung eines darauf basierenden unternehmensspezifischen Informationsmodells ist nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens, sondern Gegenstand der Referenzmodell-Wiederverwendung in der unternehmerischen Praxis. Entsprechend werden in Kapitel 6 ausschließlich die ersten vier Phasen des Vorgehensmodells als Orientierungsrahmen bei der Gestaltung des Referenzmodells herangezogen. Dennoch bildet die Referenzmodell-Wiederverwendung für die unternehmerische Praxis einen elementaren Bestandteil der Referenzmodellbildung, der auch bei der Referenzmodellkonstruktion einbezogen werden muss.

# 4.4. Zusammenfassung

Kapitel 4 schafft die normativen Grundlagen für die Modellgestaltung in Kapitel 5 "Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur" und Kapitel 6 "Referenzmodell zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung".

## Allgemeiner Modellbegriff

Als Grundlage wird der allgemeine Modellbegriff – als Abbildung komplexer, realer Systeme – betrachtet und die Unterschiede von strukturgleichen (isomorphen) und strukturähnlichen (homomorphen) Modellen werden herausgearbeitet. Dies ergänzend und um die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu entwickelnden Modelle anhand von unterschiedlichen Ausprägungen der Modellmerkmale zu klassifizieren und damit zu charakterisieren, wird ein Morphologischer Kasten erarbeitet.

## Optimierungsmodelle

Optimierungsmodelle sind Gegenstand des Operations Research. Entsprechend wird für die Optimierungsmodellbildung das Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research eingeführt, welches sechs Phasen umfasst: "Problemidentifikation und Analyse", "Zieldefinition", "Deskriptives Modell", "Mathematisches Modell", "Datenbeschaffung" und "Lösungsfindung und -bewertung" (vgl. Abbildung 4-4). Die Grundlage für die Modellbildung bildet immer die Identifikation und Beschreibung eines Optimierungsproblems. Diese lassen sich durch verschiedene Größen charakterisieren: "Ausgangszustand", "Soll-Zustand bzw. Zielvorgabe", "Handlungsalternativen", "Wirkzusammenhänge" und "Handlungsergebnisse". Die Lösung von Optimierungsmodellen wird unter Anwendung verschiedener Optimierungsverfahren und -methoden generiert. Optimierungsverfahren und -methoden lassen sich in exakte und heuristische Optimierungsverfahren unterscheiden. Mit steigender Komplexität von Optimierungsmodellen erfolgt deren Lösung in Forschung und

Wissenschaft sowie unternehmerischer Praxis auch computerbasiert. Das Ergebnis, d.h. die Lösungen des Optimierungsproblems, dient zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung.

#### Referenzmodelle

Referenzmodelle sind Gegenstand der Wirtschaftsinformatik oder des Business Engineering und werden in Forschung und Wissenschaft sowie der unternehmerischen Praxis als Hilfsmittel bei der Gestaltung unternehmensspezifischer Informationsmodelle herangezogen. Besondere Charakteristika von Referenzmodellen sind, dass diese wiederverwendbar sind, Best Practices und Common Practices beschreiben und eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen. Zur systematischen Gestaltung von Referenzmodellen wird das Vorgehen zur Referenzmodellbildung beschrieben, welches auf den Gestaltungsgrundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) beruht. Dieses Vorgehensmodell umfasst vier Phasen: "Zieldefinition", "Konstruktion des Ordnungsrahmens", "Modellierung der Struktur" und "Konsolidierung und Komplettierung" (vgl. Abbildung 4-5.). Ist die Entwicklung eines Referenzmodells abgeschlossen, so kann dieses im Rahmen einer prototypischen Anwendung oder einer Anwendung in der unternehmerischen Praxis erfolgten. Dazu werden der "Referenzmodell-Wiederverwendungsprozess" und die "Konstruktion eines unternehmensspezifischen Informationsmodells" beschrieben. Im Rahmen des Forschungsvorhabens liegt der Fokus auf der Konstruktion des Referenzmodells. Die Anwendung eines darauf basierenden unternehmensspezifischen Informationsmodells ist nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens.

# 5. Funktionspartitionierung in einer E/E Bordnetzarchitektur

In diesem Kapitel wird ein Lösungsvorschlag zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellung erarbeitet (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2): Wie ist eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren, in welcher komplexe E/E Funktionen vollständig abgebildet werden können? Wesentliches Ziel ist dabei zur Beherrschung der Variantenvielfalt und Komplexität beizutragen, die in der unternehmerischen Praxis (automotive E/E Entwicklung) vorherrschen. Entsprechend wird eine Maßnahme entwickelt, deren Fokus auf der kostenseitigen Optimierung der automotiven E/E Produktstruktur liegt (vgl. Kapitel 1.2). Strukturgebend für das automotive E/E Gesamtsystem ist die automotive E/E Bordnetzarchitektur. Daher setzt das Forschungsvorhaben bei der Neugestaltung der E/E Bordnetzarchitekturstruktur für den baureihenübergreifenden Einsatz an und berücksichtigt dabei technische und kostenseitige Einflussfaktoren sowie Anforderungen [Broy et al. 2011, S.42 ff; Brandt et al. 2012, S.737ff.]. Damit einhergehend wird ein Gestaltungsvorschlag für ein Optimierungsmodell zur Partitionierung von E/E Funktionen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur erarbeitet. Diese Optimierung erfolgt auf Basis von Kosten für E/E Funktionen inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten. Das Ergebnis des Modells – eine kostenseitig optimierte automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz – bildet einen Lösungsvorschlag zur Integration von E/E Funktionen. Als übergreifende Prämisse mit Gültigkeit für den gesamten Prozess der Modellgestaltung, werden Erfahrungen und Wissen von Experten der unternehmerischen Praxis hinsichtlich der Optimierung der automotiven E/E Produktstruktur und der automotiven E/E Bordnetzarchitekturgestaltung im Rahmen von Experteninterviews erfasst, analysiert, integriert bzw. adaptiert.

# 5.1. Vorgehen zur Optimierungsmodellbildung

Die erste Forschungsleitende Fragestellung der Arbeit befasst sich mit der Gestaltung einer kostenoptimierten automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 1.2). Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird im Folgenden ein Modell erarbeitet, welches bei der Gestaltung einer E/E Bordnetzarchitektur unterstützt. Hierbei wird der Ansatz der Kostenoptimierung¹ für die Partitionierung von E/E Funktionen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur verfolgt. Das dabei zugrundeliegende Entscheidungsproblem – die kostenoptimale Partitionierung von E/E Funktionen in einer E/E Bordnetzarchitektur – lässt sich durch ein mathematisches Modell lösen und ist somit als Optimierungsproblem kategorisierbar. Dieses Optimierungsproblem kann mit Hilfe eines geeigneten Optimierungsmodells gelöst werden (vgl. Kapitel 4.1). Anhand der zuvor identifizierten Anforderungen an die kostenseitige Optimierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2) können Modellmerkmale eines entsprechenden Optimierungsmodells konkretisiert und beschrieben werden. Bei der Strukturierung der Anforderungsseite und Beschreibung der Modellmerkmale unterstützt der in

Die Optimierung von Kosten über (mathematische) Modelle wird generell unter der Bedingung angewendet, dass die Kostenstruktur des Produktes (z.B. einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur) eine gewisse Komplexität übersteigt. Liegen für den Betrachtungsgegenstand der Kostenoptimierung alle kostenrelevanten Einflussfaktoren monetär gewichtet vor, so können die Gesamtkosten über ein einkriterielles Modell minimiert werden (vgl. Kapitel 4.1).

Kapitel 4 erarbeitete morphologische Kasten (vgl. Kapitel 4.1 und Abbildung 5-1). Der morphologische Kasten ermöglicht es ein Modell, als Abbildung eines spezifischen Problemsachverhalts, anhand der unterschiedlichen Ausprägungen der Modellmerkmale zu klassifizieren und zu charakterisieren.

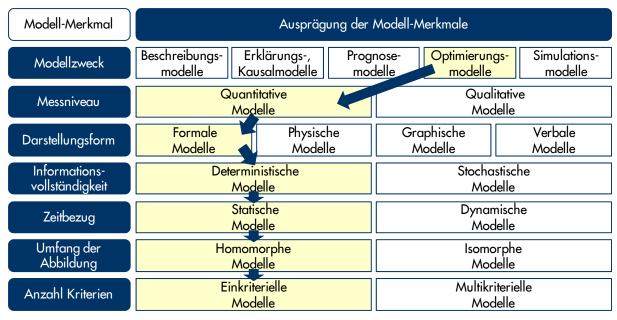


Abbildung 5-1: Klassifizierung und Charakterisierung des Optimierungsmodells anhand der Ausprägungen der verschiedenen Modellmerkmale, eigene Darstellung.

In der ersten Spalte von links des morphologischen Kastens sind Modellmerkmale mit mehreren Ausprägungen aufgeführt. Ausgehend vom Modellzweck, lässt sich damit das im Rahmen des Forschungsvorhabens zu gestaltende Optimierungsmodell sukzessive näher spezifizieren. Dazu ist jeweils eine zutreffende Ausprägung pro Modellmerkmal für den betrachteten Problemsachverhalt zu identifizieren, wobei sämtliche Kombinationen von Ausprägungen der Modellmerkmale in vertikaler Abfolge des morphologischen Kastens möglich sind. Für das Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur lassen sich die folgenden Modell-Merkmale bestimmen (vgl. Abbildung 5-1):

- Modellzweck: Der Zweck der Modellbildung ist die kostenoptimierte Partitionierung von E/E Funktionen in der E/E Architektur. Somit handelt es sich um ein Optimierungsmodell.
- *Messniveau:* Die Kostenoptimierung erfolgt auf Basis quantifizierbarer Eingangsdaten, hier Kosten. Daher liegt ein quantitatives Modell vor.
- *Darstellungsform:* Das Optimierungsmodell wird formal mittels mathematischer Gleichungen beschrieben und ist damit ein formales Modell.
- *Informationsvollständigkeit:* Dem Optimierungsmodell liegen deterministische Eingangsdaten zugrunde, d.h. alle notwendigen Informationen als Eingangsdaten für Zielfunktion oder Nebenbedingungen liegen vor. Entsprechend handelt es sich um ein deterministisches Modell.
- **Zeitbezug:** Die Konstruktion des Optimierungsmodells erfolgt zeitunabhängig, d.h. alle notwendigen Informationen (Eingangsdaten) werden zu einem Zeitpunkt erhoben und bleiben sodann unverändert, somit ist es ein statisches Modell.

- *Abbildungsumfang:* Das Optimierungsmodell stellt als homomorphes Modell eine vereinfachte Version des Urbilds dar, indem bspw. E/E Umfänge wie Verbindungstechnologie und das Energiebordnetz nicht in die Optimierung einbezogen werden.
- Anzahl Kriterien: Das Optimierungsmodell beinhaltet eine zu minimierende Zielfunktion hier Minimierung der Kosten sowie eine Anzahl von Handlungsalternativen, die durch die Nebenbedingungen implizit vorgegeben werden. D.h. es ist ein einkriterielles Modell, dessen optimale Lösung über eine einzige Zielfunktion eindeutig ermittelbar ist.

Als Ergebnis der Klassifizierung und Charakterisierung des Optimierungsmodells anhand der Modellmerkmale ist zur Lösung des vorliegenden Entscheidungsmodells im Rahmen des Forschungsvorhabens ein quantitatives, formales, deterministisches, statisches, homomorphes, einkriterielles, lineares Optimierungsmodell zu erarbeiten (vgl. Abbildung 5-1).² Lineare Optimierungsmodelle sind für die Anwendung in der unternehmerischen Praxis besonders gut geeignet, da für diese Art von Optimierungsmodellen gute Lösungsmethoden existieren. Ferner können – mit wenigen Ausnahmen – alle praxisrelevanten linearen Optimierungsmodelle optimal gelöst werden: Mit der zu minimierenden Kosten-Zielfunktion inkl. definierter Restriktionen (Nebenbedingungen) kann die optimale Handlungsalternative identifiziert werden. Auf Basis einer derartigen Handlungsalternative lässt sich eine rationale Entscheidungsfindung herbeiführen. Entsprechend wird dieser Optimierungsmodelltyp im Rahmen des Forschungsvorhabens zugrunde gelegt, um darauf aufbauend einen Lösungsvorschlag – in Form einer optimalen Handlungsalternative – zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung zu erarbeiten (vgl. Kapitel 1.2).

<u>Optimierungsmodell-Typ:</u> Ein quantitatives, formales, deterministisches, statisches, homomorphes, einkriterielles, lineares Optimierungsmodell, mit einer zu minimierenden Kosten-Zielfunktion inkl. definierten Nebenbedingungen.

Die Erarbeitung des Optimierungsmodells zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur orientiert sich am Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research (vgl. Kapitel 4.2 und Abbildung 5-2). Die Gliederung des vorliegenden Kapitels ist an die sechs Phasen des Vorgehensmodells angelehnt.

Die Lösung des oben definierten Optimierungsmodelltyps ist mittels verschiedener Optimierungsverfahren und -methoden (z.B. Kuhn-Tucker Theorem oder Vollenumeration) oder computerbasierter Optimierungssysteme möglich (vgl. Kapitel 4.2). Die Auswahl des Verfahrens bzw. der Methode ist abhängig vom Anwendungskontext und Komplexitätsgrad der Optimierung. Dem Forschungsvorhaben liegt dabei der Anspruch zugrunde, erarbeitete Ergebnisse im Kontext der unternehmerischen Praxis anzuwenden und anforderungsspezifisch modifizieren zu können. Ferner wird die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der im Rahmen der Modellvalidierung erzeugten Ergebnisse vorausgesetzt. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Komplexität einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur erfolgt daher die Modelllösung im Rahmen des Forschungsvorhabens computerbasierter programmierten Algorithmus. Dazu

Das Modell ist ein quantitatives (Modell-Messniveau), formales (Modell-Darstellungsform), deterministisches (Modell-Informationsvollständigkeit), statisches (Modell-Zeitbezug), homomorphes (Modell-Umfang der Abbildung), einkriterielles (Anzahl der Kriterien), lineares Optimierungsmodell (vgl. Kapitel 4).

wird MATLAB (MATrix LABoratory)<sup>3</sup> – als Standard in Praxis und Wissenschaft – ausgewählt. MATLAB ist eine Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung.

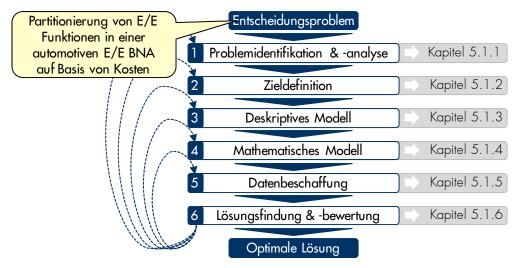


Abbildung 5-2: Kapitelstruktur auf Basis des Vorgehensmodells zur Optimierungsmodellbildung.

Rahmenbedingungen und Eingangsgrößen für die Erarbeitung des Optimierungsmodells basieren auf den geschaffenen Grundlagen (vgl. Kapitel 4.2), ergänzt durch Ergebnisse aus Interviews, welche mit Experten aus der unternehmerischen Praxis durchgeführt wurden. Die Überarbeitung des Optimierungsmodells erfolgt auf Basis von iterativ durchgeführten Reviews mit Experten. Das Ergebnis des Optimierungsmodells – die mathematisch optimale Lösung – fungiert als Entscheidungsgrundlage für das vorliegende Entscheidungsproblem (vgl. Kapitel 4.2), d.h. für die Entscheidung über die künftige Gestaltung einer anforderungsgerechten automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz. Diese erzeugte Entscheidungsgrundlage kann durch Experten der unternehmerischen Praxis mit vorhandenem Fachwissen bewertet, ergänzt und schließlich angewendet werden.

# 5.2. Problemidentifikation und -analyse

Eine ausführliche Problemidentifikation und -analyse des Betrachtungsgegenstands der E/E Entwicklung ist dem einleitenden Kapitel zu entnehmen (vgl. Kapitel 1.1). Im Folgenden liegt der Fokus auf der Zusammenfassung der erfolgten Problemidentifikation und -analyse: Die zunehmende Variantenvielfalt und Komplexität von E/E Funktionen respektive des E/E Gesamtsystems, die sich durch eine Vielzahl endogener und exogener Herausforderungen bedingt (vgl. Kapitel 1.1 und Abbildung 5-3). Beispiele für Varianten- und Komplexitätstreiber sind die steigende on-/offboard Vernetzung von E/E Funktionen, das wachsende Ausstattungsangebot vor Kunde und die Spreizung der OEM-spezifischen Fahrzeugportfolio (vgl. Kapitel 1.1). Die resultierende Herausforderung für OEMs liegt darin im Spannungsfeld aus wettbewerbsbedingtem Leistungs- sowie Kostendruck (Produktivitätsdruck) zu bestehen, um gleichzeitig attraktive, innovative sowie rentable Produkte auf dem Markt anzubieten. Dabei unterstützen

MATLAB (MATrix LABoratory) ist eine Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung. Dabei dient es zur Datenanalyse, Algorithmen-Entwicklung und zur Erstellung von Modellen sowie Anwendungen und ist primär für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt [MATHWORKS 2015, o.S.].

gezielte, nachhaltige Maßnahmen auf Leistungsseite und strukturierende Maßnahmen auf Kostenseite zur Optimierung der Produktstruktur (vgl. Kapitel 1.2 und Abbildung 1-22).

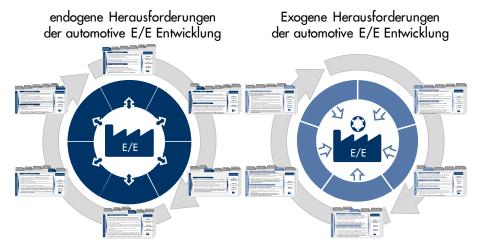


Abbildung 5-3: Herausforderungen der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung (vgl. Kapitel 1.2).

Das Forschungsvorhaben fokussiert auf strukturierende Maßnahmen auf Kostenseite zur Optimierung der Produktstruktur für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand der automotiven E/E Entwicklung. Die E/E Bordnetzarchitektur ist das strukturgebende Element des E/E Gesamtsystems. Folglich bildet die automotive E/E Bordnetzarchitektur den zentralen Ansatzpunkt zur Optimierung der übergreifenden Produktstruktur für sämtliche E/E Umfänge im Fahrzeug (vgl. Kapitel 1.2 und Kapitel 3.1).



#### Zentrale Trends in der automotiven E/E Entwicklung

- Bis zu 90% aller automotiver Innovationen sind E/E basiert.
- Anteil softwarebasierter E/E Funktionen im Fahrzeug ist stetig ansteigend.
- Anzahl vernetzter E/E Funktionen mit on- und offboard Anteilen nimmt zu.
- Lebens- und Innovationszyklen von Software und E/E Umfängen sind deutlich kürzer im Vergleich zum Fahrzeuglebenszyklus.
- Softwarebasierte E/E Funktionen können häufigen Änderungszyklen innerhalb eines Fahrzeuglebenszyklus unterliegen. Die Upgrade- und Updatebarkeit wird immer wichtiger.
- Wiederverwendung, Vor- und Rückwärtskompatibilität von E/E Funktionen inkl. Software-/Hardware-Komponenten sind zentrale Hebel, um Varianten und Kosten einzusparen.
- Zunehmende Trennung von funktionsspezifischer Applikationssoftware und Hardware inkl. hardwarespezifischer Basis-Software.
- Einsatz skalierbarer Standard-Steuergeräte mit funktionsunspezifischem Einsatz nimmt zu.

Ergänzend zur grundlegenden Problemidentifikation und -analyse wurden im einleitenden Kapitel verschiedene Herausforderungen herausgearbeitet, die sich innerhalb der automotiven E/E Entwicklung abzeichnen. Die Fähigkeit, diese Herausforderungen im Rahmen der automotiven E/E Entwicklung erfolgreich zu bewältigen, stellt für OEMs einen kritischen Erfolgsfaktor dar. Entsprechend werden diese Herausforderungen bei der Gestaltung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur im Rahmen des Forschungsvorhabens mit einbezogen (vgl. Kapitel 1.1 und vgl. Abbildung 5-4).

Aus Problemidentifikation und -analyse des Betrachtungsgegenstands resultiert der Bedarf einer problemorientierten Gestaltung inkl. kostenseitiger Optimierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz. Innerhalb dieser Optimierung müssen bestehende und neue E/E Funktionen eines OEMs abgebildet werden können. Ferner sind verschiedene Herausforderungen und Trends bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Zusammengenommen liegt damit ein konkretes, reales Entscheidungsproblem vor, dass sich mittels eines Optimierungsmodells lösen lässt (vgl. Kapitel 4.).

Problemidentifikation und -analyse: Als strukturierende Maßnahme der Kostenseite ist eine Kostenoptimierung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz durchzuführen, in welcher bestehende und neue E/E Funktionen abgebildet werden können. Zentrale endogene und exogene Herausforderungen und Trends der automotiven E/E Entwicklung sind dabei zu berücksichtigen.

# 5.3. Zieldefinition

Die Problemidentifikation und -analyse führt zum ersten Forschungsziel des Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 1.2): Die Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt und Kosten innerhalb der automotiven E/E Entwicklung. Als Lösungsvorschlag wird dazu eine strukturgebende kostenoptimierte automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz erarbeitet, in welcher alle E/E Funktionen abgebildet werden können. Dabei beschränkt sich die Modellierung auf eine homomorphe, d.h. vereinfachte, urbildähnliche Abbildung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Gemäß der im einleitenden Kapitel erfolgten Abgrenzung (vgl. Kapitel 1.2), liegt der Fokus des Forschungsvorhabens auf der Partitionierung von E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur unter Berücksichtigung von Kosten.

<u>Übergreifende Zielsetzung:</u> Modellierung und kostenseitige Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können.

Grundlage der Modellbildung ist die Definition einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur Struktur (vgl. Kapitel 3.5). Dabei sind funktionale und nicht-funktionale Anforderungen sowie o.g. endogene und exogene Herausforderungen und Trends zu berücksichtigen, um einen nachhaltigen Beitrag zur Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt und Kosten in der E/E Entwicklung zu leisten. Als Eingangsgrößen für diesen elementaren Schritt der Strukturdefinition werden die zuvor identifizierten Herausforderungen sowie Ergebnisse aus den Ex-

perteninterviews inkl. der daraus resultierenden Handlungsbedarfe analysiert und in vier Teilzielen zusammengefasst. Die Erfüllung dieser Teilziele wird im Rahmen des Forschungsvorhabens bei der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz vorausgesetzt.

#### Teilziel 1: Befähigung des baureihenübergreifenden Einsatzes

Für den baureihenübergreifenden Einsatz einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur existieren verschiedene Motivatoren. Bspw. ist zu beobachten, dass Fahrzeugportfolios von OEMs regelmäßig um zusätzliche Derivate erweitert werden. Die Markteinführung jedes neuen Fahrzeugmodells verursacht für OEMs zusätzliche Aufwände. Durch die Entwicklung neuer Derivate entstehen etwa zusätzliche Entwicklungsaufwände (Zeit, Kapazität und Kosten) und Varianten. Des Weiteren besteht die Gefahr der Entwicklung proprietärer oder redundanter technischer Lösungen. Somit resultiert ein Anstieg der Komplexität und Kosten innerhalb der E/E Entwicklung. Mit zunehmender Anzahl an Derivaten verringern sich zudem die Technologiesprünge zwischen den einzelnen Modellen (vgl. Kapitel 1.1.1), was sich auf die evolutionäre Weiterentwicklung und den baureihenübergreifenden Einsatz einer E/E Bordnetzarchitektur auswirkt.

Die baureihenübergreifende Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur hilft dabei den beschriebenen Folgen der Einführung zusätzlicher Derivate entgegen zu wirken. Wird eine automotive E/E Bordnetzarchitektur für den konsequenten, durchgängigen baureihenübergreifenden Einsatz – basierend auf einem baureihenübergreifenden Anforderungsmanagement – ausgelegt, können (proprietäre) baureihen- oder fahrzeugprojektspezifische Lösungen reduziert bzw. vermieden werden. Ferner können steigender Variantenvielfalt sowie Komplexität⁴ gezielt entgegengewirkt bzw. diese reduziert werden, ohne dabei das Funktionsangebot vor Kunde einzuschränken. Hieraus ergibt sich das erste Teilziel, eine automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu befähigen.

# Teilziel 2: Wiederverwendung von E/E Funktionen, Technologien und Einsatz von Standards

Die Vermeidung proprietärer oder redundanter technischer Lösungen, unnötiger Varianten und Komplexität kann durch Wiederverwendung von E/E Funktionen respektive technischer Lösungen und Standards unterstützt werden. Der Einsatz einer E/E Bordnetzarchitektur über Baureihen und Derivate hinweg unterstützt diesen Ansatz für E/E Funktionen und stellt selbst eine Art der Wiederverwendung dar.

Die Wiederverwendung von E/E Funktionen respektive technischer Lösungen und Standards ohne Anpassungen wird durch eine baureihenübergreifende, langfristige Ausplanung begünstigt, die durch ein klares Regelwerk bzw. eine Taktung für Technologiesprünge unterstützt wird. Der Einsatz von Industriestandards und Industriebaukästen ist insbesondere bei nicht-differenzierenden Funktionsmerkmalen sinnvoll.

Werden diese Maßnahmen nicht durchgängig umgesetzt bzw. unterstützt, können Neuentwicklungen resultieren. Diese führen zu dem oben beschriebenen Anstieg von Kosten, vermeidbaren Varianten und interner Komplexität (vgl. Kapitel 1.1).

Kosten sowie interne Komplexität können etwa durch die Vermeidung unnötiger oder redundanter technischer Lösungen und Varianten reduziert werden.

#### Teilziel 3: Anderbarkeit bestehender und Integrationsfähigkeit zusätzlicher E/E Funktionen ("Update- und Upgradebarkeit")

Insbesondere exogene Einflussfaktoren (z.B. Gesetzes- oder Kundenanforderungen) können Änderungen bzw. Anpassungen bestehender E/E Funktionen bedingen oder die Entwicklung neuer E/E Funktionen erforderlich machen. Ungeplante funktionale Änderungen oder Erweiterungen sind in vielen Fällen nur unter hohem Aufwand umsetzbar. Zudem können diese zu kostenintensiven, proprietären Lösungen sowie zusätzlicher interner Komplexität und Variantenvielfalt führen (vgl. Kapitel 1.1.).

Vor dem Ziel Komplexität und Kosten beherrschbar zu machen, ist es daher notwendig, potentielle Funktionsänderungen oder -erweiterungen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur aufwandsminimal abbilden zu können. Deshalb sind Möglichkeiten zur Funktionsänderungen oder -erweiterungen im Rahmen der initialen Gestaltung inkl. Partitionierung von E/E Funktionen in einer E/E Bordnetzarchitektur zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.5). Dies schließt die Beachtung sämtlicher funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen sowie Innovations- und Strategie-Roadmaps, etc. mit ein.

#### Teilziel 4: Hebung der Reduzierungspotentiale von Entwicklungs- und Herstellkosten

Mit Zunahme von E/E Umfängen und wachsendem E/E Wertschöpfungsanteil in Automobilen (vgl. Kapitel 1.1), können vermehrt Kostenpotentiale (Entwicklungs- und Herstellkosten) im Rahmen der automotiven E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung gehoben werden: 5 Z.B. mit verschiedenen Maßnahmen auf Kostenseite, die langfristig zur Wettbewerbsfähigkeit eines OEMs beitragen (vgl. Kapitel 1.1).

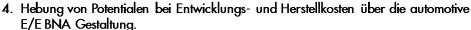
#### Übergreifende Zielsetzung der Entscheidungsproblemlösung

Modellierung und kostenseitige Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E BNA für den Baureihen-übergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können.



- 1. Befähigung des baureihenübergreifenden Einsatzes einer automotiven E/E BNA.
- 2. Wiederverwendung von E/E Funktionen, Technologien und Einsatz von Standards.









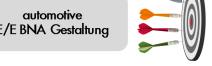


Abbildung 5-5: Zielsetzungen der Entscheidungsproblemlösung, eigene Darstellung.

Neben der kostenoptimierten Partitionierung von E/E Funktionen, zählt dazu auch die Befähigung einer E/E Bordnetzarchitektur hinsichtlich der zuvor aufgeführten drei Teilziele:

Economies of Scale, Sourcing Strategien, Kooperationen über nicht-wettbewerbsdifferenzierende Umfänge, Einsatz von sich durchsetzenden Standards, etc. bieten Potential Kosten im Rahmen der automotiven E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung zu reduzieren.

baureihenübergreifender Einsatz, Wiederverwendung sowie Änderungs- und Ergänzungsfähigkeit von E/E Funktionen. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass mit Gestaltung bzw. Strukturierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur ein Beitrag zur Erfüllung der übergreifenden Zielsetzung inkl. der vier erläuterten Teilziele zu leisten ist (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

# 5.4. Deskriptives Modell

Das deskriptive Modell basiert auf den in Phasen 1 und 2 des Vorgehensmodells geschaffenen Grundlagen (vgl. Kapitel 4.2). Das resultierende vereinfachte Abbild des zu betrachtenden Problemsachverhalts bildet den Ausgangspunkt für dessen anschließende mathematische Modellierung und computerbasierte Lösung. Die Erarbeitung des Deskriptiven Modells erfolgt in zwei Schritten:

- *Abschnitt 1:* Definition einer grundlegenden automotiven E/E Bordnetz-architektur Struktur, die dabei unterstützt, das erste Forschungsziel (vgl. Kapitel 1.2.1) inkl. der definierten vier (Teil-) Ziele zu erreichen (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).
- *Abschnitt 2:* Darstellung des Betrachtungsgegenstands der Optimierungsmodellbildung inkl. Nebenbedingungen (Restriktionen) als Basis für die mathematische Beschreibung und Lösung des Problemsachverhalts zwecks(zur?) Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung (vgl. Kapitel 1.2.1).

Inputgrößen für die Erarbeitung des Deskriptiven Modells sind die geschaffenen Grundlagen (vgl. Kapitel 1-4), ergänzt durch Ergebnisse aus Interviews, die mit Experten der unternehmerischen Praxis geführt wurden. Die Überarbeitung des Deskriptiven Modells erfolgt iterativ auf Basis der Ergebnisse aus durchgeführten Reviews mit Experten.

## 5.4.1. Definition der grundlegenden automotiven Struktur

Die Vorgabe einer grundlegenden Struktur inkl. der Definition eines zugehörigen Sets an Prämissen für die automotive E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung bildet den ersten Schritt, um die übergreifende Zielsetzung inkl. der vier Teilziele erreichen zu können (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Gemäß dem ersten Teilziel ist die E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu befähigen. Eine solche Befähigung ist zielführend, wenn diese unter Berücksichtigung und Abwägung bestehender Rahmenbedingungen sowie Vorgaben stattfindet. Zu diesen gehören insbesondere funktionale und nicht-funktionale Anforderungen sowie kostenseitige Kriterien. Bei der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur sind daher Anforderungen vom kleinsten bis zum größten Fahrzeugsegment<sup>6</sup> eines OEMs gleichermaßen zu betrachten. Eine große Herausforderung besteht dabei darin, dass das Funktionsangebot zw. einzelnen Baureihen und Fahrzeugmodellen eines OEMs divergiert (vgl. Kapitel 3.2.1): Eine automotive E/E Bordnetzarchitektur, die auf das größte Fahrzeugderivat eines OEMs ausgelegt ist und dessen Anforderungen vollständig

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Beispiele für das kleinste **Fahrzeugsegment** eines OEMs ist der BMW 1er (Kompaktklasse) bei BMW oder der VW up! (Kleinstwagen) bei Volkswagen. Beispiele für das größte Fahrzeugsegment eines OEMs ist der BMW 7er (Oberklasse) bei BMW oder der VW Phaeton (Oberklasse) bei Volkswagen.

bedient, würde die Anforderungen des kleinsten Fahrzeugsegments eines OEMs übererfüllen.<sup>7</sup> Für den baureihenübergreifenden Einsatz ist eine solche Lösung kostenseitig nicht zielführend (vgl. Kapitel 3.2.1). Hinsichtlich einer gewünschten Differenzierung zwischen den Fahrzeugklassen vor Kunde ist eine Maximalauslegung der automotiven Bordnetzarchitektur aus Perspektive eines OEMs ebenfalls nicht wünschenswert. Wird eine automotive E/E Bordnetzarchitektur ausschließlich gemäß den Anforderungen des kleinsten Fahrzeugsegments ausgelegt, so wird diese die Anforderungen des größten Segments eines OEMs untererfüllen. Entsprechend ist eine Minimalauslegung aus anforderungsseitigen Gesichtspunkten nicht zielführend.



Abbildung 5-6: Domänen einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, Bilder-Quelle: BMW 4er Coupé/Cabrio, eigene Darstellung

Ein Ansatz zur Lösung dieses Konflikts aus Anforderungsuntererfüllung und -übererfüllung liegt in der Gestaltung einer anforderungsgerechten, skalierbaren, automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Wobei diese in der Minimalauslegung (Basisvariante) alle E/E Basisfunktionen berücksichtigt, die eine baureihenübergreifende Verbaurate von 100 Prozent haben. Ist eine E/E Bordnetzarchitektur skalierbar, kann diese Basisvariante anforderungsgesteuert um E/E Funktionen erweitert werden. Diese zusätzlichen E/E Funktionen sind z.B. derivats-, baureihen- oder länderspezifisch und weisen somit baureihenübergreifende Verbauraten kleiner 100 Prozent auf. Durch diese anforderungsgerechte Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit der automotiven E/E Bordnetzarchitektur wird nicht nur der baureihenübergreifende Einsatz ermöglicht, sondern gleichzeitig lassen sich darüber Kosten, Variantenvielfalt und Komplexität beherrschen. Des Weiteren werden OEMs zu einer bewussten Differenzierung zw. den einzelnen Fahrzeugklassen befähigt. Die Umsetzung einer solchen Struktur bei der E/E Bordnetzarchitektur Gestaltung trägt zur Zielerreichung aller o.g. vier Teilziele bei (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Verglichen mit dem in Kapitel 3.5 vorgestellten Funktionsorientierungs- und Zentralisierungs- ansatz existiert mit dem Domänenansatz ein E/E Bordnetzarchitektur Gestaltungsansatz, welcher eine skalierbare Struktur vorgibt. Entsprechend ist der Domänenansatz als Grundlage für eine baureihenübergreifende, skalierbare E/E Bordnetzarchitekturgestaltung geeignet (vgl. Abbildung 5-6). Diesem Ansatz zufolge gliedert sich eine E/E Bordnetzarchitektur in eine dedizierte Anzahl von Domänen (vgl. Kapitel 3.5). Diese Untergliederung in einzelne Domänen gibt eine Struktur vor, welche die zuvor beschriebene Skalierbarkeit einer E/E Bordnetzarchitektur unterstützt und die Erweiterung sowie Anpassung einer E/E Bordnetzarchitektur

Eine Übererfüllung von Anforderung führt i.d.R. zu Blindverbau von E/E Umfängen und damit zu Kosten, die nicht per Preisweitergabe an den Kunde übertragen werden können. Mit steigendem Blindverbau wächst das Risiko der Verfehlung angestrebter Fahrzeugrenditen oder der Anpassung des Fahrzeugreises in solcher Höhe, dass dieser die Zahlungsbereitschaft des angestrebten Kundensegments übersteigt.

gemäß baureihenspezifischer Anforderungen ermöglicht. Die Anzahl und Schneidung von Domänen kann OEM-spezifisch variieren. Vor dem Anspruch des baureihenübergreifenden E/E Bordnetzarchitektureinsatzes empfiehlt es sich, je OEM eine einzige Architektur für alle Derivate und Baureihen zu definieren (vgl. Kapitel 3.5.3). Jede zusätzliche Domänenarchitektur wäre ein Treiber zusätzlicher Varianten und entsprechender Komplexität. Aufgrund der o.g. Eigenschaften des Domänenansatzes, wird dieser für das Forschungsvorhaben als Gestaltungsansatz mit folgenden Eigenschaften/Randbedingungen/Prämissen festgelegt:

- Eine Domänenarchitektur umfasst fünf Domänen (vgl. Kapitel 3.5): Antrieb, Fahrwerk, Sicherheit und Fahrerassistenz, Karosserie und Komfort, Navigation und Infotainment.
- Jede dieser Domänen umfasst einen dedizierten Funktionsumfang, welcher derivatsspezifisch variieren kann.
- Die fünf Domänen sind voneinander entkoppelt und können grundsätzlich als eine geschlossene Einheit betrachtet werden. Damit wird die Anzahl der Kommunikationspartner innerhalb der automotiven E/E Bordnetzarchitektur bzw. einer Domäne auf ein notwendiges Minimum reduziert. Dies verbessert u.a. Auslastung von Hardware-Ressourcen und reduziert die Komplexität einer E/E Bordnetzarchitektur.
- Jede Domäne besteht aus genau einem Zentralen Steuergerät (ZSG) und mehreren Einzelsteuergeräten (ESG)<sup>8</sup> (vgl. Kapitel 3.5.3).

Die zwei Steuergerätekategorien – ZSG und ESG – weisen Unterschiede hinsichtlich der Möglichkeit zur E/E Funktionspartitionierung<sup>o</sup> auf. Auf einem ZSG werden mehrere E/E Funktionen partitioniert, die auch unabhängig voneinander sein können.<sup>10</sup> Das ZSG fungiert zusätzlich als zentrales Gateway einer Domäne: Wird eine E/E Funktion respektive ein Steuergerät innerhalb einer Domäne verändert oder zusätzlich hinzugefügt, so wird die Kommunikation über das zentrale Gateway so angepasst, dass alle von der Veränderung oder Ergänzung betroffenen E/E Funktionen auf ZSG und/oder ESG unverändert funktionieren. Ggfs. notwendige Anpassungen erfolgen ausschließlich im ZSG. ZSGs sind den ESGs der jeweiligen Domäne hierarchisch übergeordnet (vgl. Kapitel 3.5). Daraus ergibt sich eine sogenannte "Master-Slave-Relation" zwischen diesen zwei Steuergerätekategorien. ESGs können damit als Satelliten eines ZSGs betrachtet werden. Auf einem ESG wird maximal eine E/E Funktion bzw. ein zusammengehöriges E/E Funktionscluster partitioniert (vgl. Kapitel 3.2).<sup>11</sup>

Die Skalierung einer Domäne wird über den Einsatz von ESGs realisiert (vgl. Abbildung 5-7). Die Anzahl von ESGs wird durch E/E Funktionen bzw. zusammengehörige E/E Funktionscluster bestimmt, die nicht auf einem ZSG partitioniert werden. Die maximale Anzahl von ESGs ist somit variabel und abhängig von den jeweiligen derivats- oder baureihenspezifischen Anforderungen, die innerhalb einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur zu berücksichtigen sind.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Für **ESGs** sollen nach Möglichkeit keine OEM-spezifisch entwickelten Steuergeräte eingesetzt werden. Im Idealfall werden als ESG Industriestandardsteuergeräte oder Industriebaukästen eingesetzt.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Die Verortung einer E/E Funktion auf einem ZSG oder ESG ist abhängig von der Entscheidung über deren Partitionierung.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Zu diesen Funktionen gehören insb. E/E Basisfunktionen, die eine baureihenübergreifende Verbaurate gleich 100 Prozent aufweisen.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Zu diesen Funktionen z\u00e4hlen insbesondere derivats- oder baureihenspezifische Funktionen und optionale Ausstattungen, die eine baureihen\u00fcbergreifende Verbaurate kleiner 100 Prozent haben.



ZSG: Zentrales Steuergerät

ESG: Einzelsteuergerät

Abbildung 5-7: Domänenstruktur aus Zentralem Steuergerät (ZSG) und Einzelsteuergeräten (ESG), eigene Darstellung.

Als Voraussetzung, um über die Partitionierung von einzelnen E/E Funktionen bzw. zusammengehörigen E/E Funktionsclustern entscheiden zu können, muss baureihenübergreifende Transparenz über alle E/E Basis- und optionalen Ausstattungsfunktionen eines OEMs erzielt werden. Diese Transparenz kann erlangt werden, indem alle Funktionen in einer übergreifenden Funktionsliste konsolidiert und beschrieben werden. Dabei besteht die Herausforderung darin, eine übergreifende Vergleichbarkeit zu schaffen. Dies setzt eine gleichförmige Beschreibung jeder einzelnen E/E Funktion voraus, welche unabhängig von der jeweiligen Domänenzugehörigkeit erfolgen muss. Darüber hinaus ist es essentiell, dass die Liste alle relevanten Kriterien zur Partitionierung enthält. Hierbei hilft die Vorgabe einer domänenübergreifenden generischen Funktionsliste zur Beschreibung der E/E Funktion, die dedizierte Bewertungskriterien bzw. E/E Funktions-Attribute beinhaltet. Der im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitete Lösungsvorschlag für eine solche Funktionsliste basiert auf dem Erkenntnisgewinn aus Experteninterviews (vgl. Abbildung 5-8).

	2		E	3		4	1	5	6	7	8	9	10		12		13		14	15	16
Funktion	Funktion	"  -	on	nä	ne	Ver Ro			Zwangs- kopplung	Ausschluss	Basis Ausstattung			Kooperation	Hard		edarf <sup>1</sup> Speiche	r	Basis Software	Applikations Software	Test und Absicherung
[Nr.]	[Name]	1	2 :	3 ,	4 5	5 [9	6]	[Nr.]	[Nr.]	[Nr.]	[ja/nein]	[ja/nein]	[ja/nein]	[ja/nein]	CPU [MIPS]	RAM [kB]	ROM [kB]	Flash [kB]	[€]	[€]	[€]
1			+	_	-																
		Ħ	1																		
		H			-																
n			Ī																		

\*1 HW-spezifische Software wird über HW-EK abgedeck

Abbildung 5-8: Funktionsliste zur domänenübergreifenden Konsolidierung von E/E Funktionen, eigene Darstellung.

Diese erarbeitete Funktionsliste umfasst fünfzehn Positionen mit Attributen (Funktionseigenschaften), die eine vergleichbare Charakterisierung aller E/E Funktion ermöglichen (vgl. Abbildung 5-8):

- (1) *Funktionsnummer:* Unter der ersten Position "*Funktionsnummer*" wird jeder E/E Funktion eine Nummer zugewiesen.
- (2) *Funktion:* Auf der zweiten Funktionseigenschaft "*Funktionsname"* wird für jede E/E Funktion ein Name festgelegt.

- (3) *Domäne:* Mit der dritten Funktionseigenschaft "*Domäne*" wird die Zugehörigkeit einer E/E Funktion zu genau einer der fünf Domänen bestimmt.
- (4) *Verbaurate:* Unter der vierten Funktionseigenschaft "*Verbaurate"* wir die jeweilige baureihenübergreifende Verbaurate der E/E Funktion in Prozent angegeben.
- (5) *Variante:* Ist die E/E Funktion eine Variante einer dedizierten Funktion, werden unter der fünften Funktionseigenschaft "*Variante*" die Nummern von allen existierenden Varianten dieser dedizierten Funktion aufgelistet.
- (6) Zwangskopplung: Zwischen Funktionen können Zwangskopplungen existieren. Bspw. ist es möglich, dass eine bestimmte E/E Funktion aus funktionalen oder nichtfunktionalen Gründen nicht ohne mindestens eine weitere Funktion umgesetzt werden kann (z.B. setzt eine "Over-the-Air Updatebarkeit" einzelner Steuergeräte die Vernetzung des Fahrzeugs mit einer IT-Infrastruktur voraus). Für einen derartigen Fall ist die sechste Funktionseigenschaft "Zwangskopplung" in der Funktionsliste vorgesehen, unter der alle Nummern von Funktionen aufgeführt werden können, mit denen eine solche Zwangskopplung besteht. Funktionen, für die eine Zwangskopplung besteht, bilden ein zusammengehöriges Funktionscluster.
- (7) Ausschluss: Unter der siebten Funktionseigenschaft "Ausschluss" werden alle Nummern derjenigen Funktionen aufgeführt, deren Einsatz bei Umsetzung der E/E Funktion ausgeschlossen werden, etwa da sich zwei technische Lösungen gegenseitig ausschließen (z.B. Cabrioverdecköffner und Schiebehebedachöffner) oder es sich um Varianten einer E/E Funktion handelt.
- (8) *Basisfunktion:* Die achte Funktionseigenschaft "*Basisfunktion*" wird mit "*ja*" markiert, wenn es sich bei der E/E Funktion um eine Basisfunktion¹² handelt. Eine E/E Funktion gehört zur Kategorie "*Basisfunktion*", wenn die baureihenübergreifende Verbaurate 100 Prozent entspric ht. Ist die Verbaurate kleiner 100 Prozent, so wird die Attribut-Position "*Basisfunktion*" mit "*nein*" markiert (vgl. Abbildung 5-9).
- (9) *Optionale Ausstattung:* Ist die Verbaurate einer E/E Funktion kleiner als 100 Prozent, so handelt es sich um eine optionale Ausstattungsfunktion<sup>13</sup>. In diesem Fall wird die neunte Funktionseigenschaft "*Optionale Ausstattung*" mit "*ja*" markiert. Ist die Verbaurate der E/E Funktion gleich 100 Prozent, so wird die Funktionseigenschaft "*Optionale Ausstattung*" mit "*nein*" markiert (vgl. Abbildung 5-9).
- (10) *Industriestandard:* Eine E/E Funktion kann Gegenstand oder Bestandteil eines OEM-unspezifischen Industriestandards<sup>14</sup> sein (vgl. Kapitel 3.6). Ist dies zutreffend, so wird

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> E/E Basisfunktionen weisen eine baureihenübergreifende Verbaurate gleich 100 Prozent (Attribut "*Verbaurate"*) auf.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Derivats- oder baureihenspezifische Funktionen und optionale Ausstattung, die eine baureihenübergreifende Verbaurate kleiner 100 Prozent (Attribut "*Verbaurate"*) haben.

Gemäß der Branchen-unspezifischen Begriffsdefinitionen nach DUDEN ist ein Industriestandard ein "ohne offizielle Normierung von den meisten Herstellern eingehaltener technischer Standard bei Produkten" [DUDEN 2014, o.S.]. Gemäß KARACHALIOS sind Industriestandards "[...] veröffentlichte Dokumente mit Spezifikationen und Verfahren, die dafür sorgen sollen, dass täglich genutzte Produkte, Materialien und Dienste möglichst zuverlässig sind. Sie kommen in Produkten in nahezu all unseren Lebensbereichen zum Tragen, von der Luftfahrt und Elektronik über Umwelttechnik bis hin zum Transport- und Bauwesen. Standards sind die Lösung für ein breites Aufgabenspektrum: sie machen Produkte funktionsfähiger und kompatibel und stellen die

die Funktionseigenschaft "*Industriestandard*" mit "*ja*" markiert. Im gegenteiligen Fall wird diese Attribut-Position mit einem "*nein*" befüllt (vgl. Abbildung 5-9).

(11) *Kooperation:* Ist eine E/E Funktion Gegenstand einer OEM-übergreifenden Entwicklungs- und/oder Einkaufskooperation<sup>15</sup>, so wird die Funktionseigenschaft "*Kooperation*" mit "*ja*" befüllt. Trifft dies nicht zu, wird die Attribut-Position "Kooperation" mit "nein" markiert (vgl. Abbildung 5-9).

Sicherheit der Verbraucher sicher. Sie erleichtern die Produktentwicklung und verkürzen die Zeit bis zur Marktreife. "[Karachalios 2014, o.S.]. Beispiel für einen Industriestandard ist IEEE 802.11 ("Wi-Fi®").

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Industriestandards als Standardsteuergeräte definiert, auf denen eine dedizierte E/E Funktion oder ein zusammengehöriges E/E Funktionscluster partitioniert ist. Industriestandards können dabei z.B. auch Lieferanten- oder Industriebaukästen sein (vgl. Kapitel 3.6). Solche Industriestandards, hier auch "Off-the-Shelf-Steuergeräte" genannt, können OEM-übergreifend als Standardumfänge eingesetzt werden. Unter "Off-the-Shelf-Steuergeräte" werden im Kontext des Forschungsvorhabens Steuergeräte-Hardware inkl. hardwarespezifischer Basis-Software verstanden, die OEM-unabhängig in Serienfertigung bei Lieferanten hergestellt und bei OEMs eingesetzt werden. D.h. "Off-the-Shelf-Steuergeräte" erfahren keine funktionsspezifischen Anpassungen.

Unter "Commercial-off-the-Shelf-Produkte" (COTS) wird Soft- oder Hardware zusammengefasst, "[...] die in Serienfertigung hergestellt und unverändert benutzt werden. Alle Produkte, die keine individuelle(n?) Ergänzungen oder Anpassungen haben und "aus dem Regal" gekauft werden, sind COTS-Produkte. Es sind kostengünstige Massenprodukte, die einfach zu installieren sind und mit vorhandenen Systemkomponenten zusammenarbeiten. "[ITWISSEN 2014, o.S.].

Im Vergleich zu Steuergeräten aus OEM-spezifischer Entwicklung und Herstellung können Industriestandards positive Kosteneffekte heben. Dies begründet sich z.B. darin, dass bei Industriestandards Entwicklungsaufwände verhältnismäßig über mehrere OEMs verteilt werden können. Zudem haben steigende Stückzahlen i.d.R. positive Effekte auf die Herstellkosten eines Industriestandards, sofern damit Skaleneffekte erzielt werden.

15 Gemäß der branchenunspezifischen allgemeinen Begriffsdefinitionen nach REFFLINGHAUS ist eine **Kooperation** "[...] eine auf einer Vereinbarung beruhende Zusammenarbeit zwischen rechtlich und wirtschaftlich selbständigen Unternehmen durch Funktionsabstimmung oder Funktionsausgliederung und - übertragung auf Kooperationspartner im wirtschaftlichen Bereich." [REFFLINGHAUS 2000, S. 7] und eine Forschungs- und Entwicklungs-Kooperation eine Kooperation "[...] mit der Absicht durch Forschung und Entwicklung gemeinsame Ziele zu realisieren." [REFFLINGHAUS 2000, S. 8].

Durch Kooperationen versuchen OEM im Wettbewerbskampf um Marktanteile große Investitionen zu unterstützen. Dadurch können OEMs Handlungen der Wettbewerber stärker einschränken und Kostenvorteile heben [PROFF/PROFF 2013, S. 189]. Kooperationen beruhen auf Vereinbarungen zwischen mindestens zwei rechtlich und oft auch wirtschaftlich unabhängigen Unternehmen (z.B. OEM oder Zulieferer). Der Vereinbarungsumfang ist unterschiedlich. Kooperationen beschränken sich auf konkrete Projekte, Produktgruppen oder Geschäftsfelder. Kooperationen gewinnen insb. bei der Produktentwicklung (Entwicklungskooperationen) von Produkten und bei der Markterschließung an Bedeutung. In der Automobilindustrie existieren zahlreiche Beispiele für Kooperationen: Z.B. im horizontalen Wettbewerb zw. OEMs wie Daimler und Renault-Nissan zur Entwicklung und Produktion von Motoren und kleinen Baureihen oder zw. Zulieferern wie ZF und Continental zur Entwicklung der Hybridtechnologie. Beispiele für Kooperationen im vertikalen Wettbewerb (zw. Herstellern und Zulieferern) gibt es z.B. zw. Daimler und Bosch oder Nissan und NEC zur Entwicklung und Produktion von Elektromotoren. Kooperationen zielen auf Synergien z.B. durch gemeinsame Verwendung von Gleich- oder Bauteilen (Entwicklungskooperationen). Durch ein solches Gleich- oder Bauteilmanagement steigen Skalenvorteile in Beschaffung und Produktion [PROFF/PROFF 2013, S. 189ff.].

Als Entwicklungskooperation wird im Rahmen des Forschungsvorhabens die gemeinsame Entwicklung einer dedizierten E/E Funktion bzw. eines zusammengehörigen E/E Funktionsclusters inkl. notwendiger Hardware (Steuergerät inkl. steuergerätespezifischer Software) zwischen mindestens zwei OEMs definiert. Wie auch bei Industriestandards, können aufgrund der anteiligen Verteilung von Entwicklungsaufwänden auf mehrere Kooperationspartner Kosten pro OEM reduziert werden. Ferner resultiert aus einer OEM-übergreifenden Verwendung ein größeres Produktionsvolumen als bei Eigenentwicklungen, wodurch sich aufgrund des Skaleneffekts ggf. auch Herstellkosten reduzieren lassen. OEM-übergreifende Entwicklungskooperationen können in Industriestandards überführt werden.

- (12) *Hardware-Bedarf μController:* Unter der Funktionseigenschaft "*Hardware Bedarf μController*" wird der Bedarf einer E/E Funktion an Leistung des Hauptprozessors (central processing unit (CPU)) in Millionen Instruktionen pro Sekunde (MIPS) angegeben.
- (13) Hardware-Bedarf Speicher: Bei der Funktionseigenschaft "Hardware Bedarf Speicher" wird der Bedarf einer E/E Funktion an Speicher (jeweils RAM, ROM, Flash) in Kilobyte (kB) angegeben.
- (14) *Basissoftware:* Die Angabe der Kosten für die Entwicklung der Basissoftware (AUTOSAR Basissoftware) einer E/E Funktion erfolgt unter der Funktionseigenschaft "*Basissoftware*".
- (15) *Applikationssoftware:* Die Angabe der Kosten für die Entwicklung der E/E Funktion erfolgt unter der Funktionseigenschaft "*Applikationssoftware*".
- (16) *Test und Absicherung:* Die Kosten für Test und Absicherung der E/E Funktion werden unter der Funktionseigenschaft "*Test und Absicherung*" angegeben.

Funktions- Funktions- Funktion SW Funktion Fu	E/E Funktions-Beschreibung						
Basis Ausstattung	<ul> <li>baureihenübergreifende Verbaurate gleich 100 Prozent</li> <li>→ Serienumfang aller Derivate eines OEMs</li> </ul>						
Optionale Ausstattung	<ul> <li>baureihenübergreifende Verbaurate kleiner 100 Prozent</li> <li>kein Serienumfang aller Derivate eines OEMs</li> <li>→ Ausstattungsumfang einzelner Derivate</li> </ul>						
Industriestandard <sup>1)</sup>	<ul> <li>OEM-unspezifisches Standardsteuergerät mit einer dedizierten Funktion oder einem zusammengehörigen Funktionscluster</li> <li>Einsetzbar als Basis- oder Sonderausstattung</li> </ul>						
Entwicklungs- kooperation <sup>1)</sup>	Funktion oder zusammengehöriges Funktionscluster inkl. Hardware, die von mind. zwei OEMs in Kooperation entwickelt wurde     Einsetzbar als Basis oder Optionale Ausstattung						
1) Kategorisierung nach "Basis Ausstattung" oder "Optionale Ausstattung" gemäß baureihenübergreifender Verbaurate							

Abbildung 5-9: Kategorisierung von E/E Funktionen für die Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung.

Umfasst diese Funktionsliste alle E/E Funktionen eines OEMs inkl. der vollständigen Beschreibung aller Attribute, kann in einem weiteren Schritt der Funktionsumfang je Domäne bestimmt werden. Hierzu erfolgt eine attributbasierte, strukturierte Zuordnung jeder einzelnen E/E Funktion zu einer Domäne (Attribut "Domäne").¹6 Für jede Domäne ergibt sich so ein spezifischer Funktionsumfang aus E/E Basisfunktionen (Attribut "Basisfunktion") und optionalen E/E Ausstattungsfunktionen (Attribut "Optionale Ausstattung"), welche auf dem Zentralen Steuergerät (ZSG) und Einzelsteuergeräten (ESG) der entsprechenden Domäne partitioniert werden (vgl. Abbildung 5-10). Diese Entscheidung über die Partitionierung einer E/E Funktion erfolgt auf Basis der Verbaurate und der Optimierung mit dem zu gestaltenden Optimierungsmodell (vgl. Kapitel 5.1).

Domäne 1: "Antrieb"; Domäne 2: "Fahrwerk"; Domäne 3 "Sicherheit und Fahrerassistenz"; Domäne 4: "Karosserie und Komfort"; Domäne 5: "Navigation und Infotainment" Abbildung 5-6).



Abbildung 5-10: Domänenspezifische E/E Funktionsumfänge, eigene Darstellung.

Ergänzend zum Domänenansatz sind weitere Ansätze und Methoden anzuwenden, um zur Befähigung des baureihenübergreifenden Einsatzes einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur sowie der Wiederverwendung, Änderungs- oder Ergänzungsfähigkeit inkl. Upgrade- und Updatebarkeit von E/E Funktionen beizutragen. Dazu zählt insbesondere die konsequente Verwendung von Standards (vgl. Teilziel 2). Als weitere Prämisse im Rahmen des Forschungsvorhabens wird daher die durchgängige Anwendung des offenen Software-Standards AUTOSAR festgelegt, welche durch die Anwendung AUTOSAR-konformer, skalierbarer Steuergeräte ergänzt wird (vgl. Kapitel 3.3- 3.4).

Die Anwendung des offenen Software-Standards AUTOSAR lässt sich anhand einer Vielzahl technischer Vorteile<sup>17</sup> begründen. Ergänzend kommen kostenseitige Vorteile hinzu. Mit AUTOSAR können Aufwandsreduzierungspotentiale in den Bereichen Entwicklung und Herstellung gehoben werden. Z.B. indem Aufwände (Zeit, Kapazitäten und Kosten) für die Entwicklung funktionsspezifischer Steuergeräte reduziert oder proprietäre Lösungen vermieden werden können. Bei konsequenter Anwendung von AUTOSAR kann somit jedes Fahrzeugprojekt eines OEMs durch die relative Reduzierung von Entwicklungskosten profitieren (vgl. Kapitel 3.3.2).

Über die Anwendung des AUTOSAR-Standards können Herstellkosten reduziert werden. Insbesondere dann, wenn funktionsspezifische Steuergeräte mit geringer Verbaurate, hoher Variantenvielfalt und Komplexität durch AUTOSAR-konforme Steuergeräte ersetzt werden: In

• E/E Funktionen werden über funktionsspezifische Anwendungssoftware-Komponenten realisiert und steuergeräteunabhängig entwickelt.

- Bei der E/ E Funktionspartitionierung ist nur der spezifische Hardware-Bedarf (z.B. Speicher (RAM, ROM, Flash) oder Prozessorleistung (CPU) etc.) relevant, nicht aber ein dediziertes funktionsspezifisches Steuergerät. Dadurch ergibt sich eine gewisse Flexibilität bei der initialen, revolutionären Auslegung und Verortung von E/E Funktionen innerhalb einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Auch werden verfügbare Hardwareressourcen ideal ausgenutzt.
- Durch standardisierte Schnittstellen werden Wiederverwendung sowie der baureihenübergreifende Einsatz von E/E funktionsspezifischer Anwendungssoftware erleichtert. Dadurch wird ein Beitrag zur nachhaltigen Verbesserung von Qualität, Zuverlässigkeit sowie Reduzierung der Variantenvielfalt geleistet.
- Funktionsspezifische Software-Komponenten lassen sich anforderungsgerecht anpassen, d.h. die Möglichkeit zur Skalierung eine automotiven E/E Bordnetzarchitektur wird dadurch erhöht.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Zu den **technischen Vorteilen des AUTOSAR Standards** zählen u.a. die folgenden (vgl. Kapitel 3.3.2):

<sup>•</sup> Die E/E Funktionsentwicklung (Anwendungssoftware) wird von der Steuergeräteentwicklung (Hardware inkl. Basissoftwareumfänge) entkoppelt.

<sup>•</sup> Funktionsspezifische Steuergeräte können durch skalierbare AUTOSAR-konforme Steuergeräte inkl. Basissoftware ersetzt und je nach Hardwarebedarf durch leistungsstärkere Steuergeräte ausgetauscht werden.

diesem Fall sinkt die absolute Vielfalt an eingesetzten Steuergeräten bei einer gleichbleibenden Anzahl von E/E Funktionen. Als Konsequenz erhöhen sich die Stückzahlen der verbleibenden Steuergerätevarianten relativ, sofern mehrere E/E Funktionen auf identischen Steuergerätetypen partitioniert werden. Trifft dies zu, können Skaleneffekte erzielt werden, die zu reduzierten Herstellkosten von AUTOSAR-konformen skalierbaren Standard-Steuergeräten ("Offthe-Shelf-Steuergeräte")¹³ führen.

Ein zusätzlicher Aspekt, der indirekt für den Einsatz von AUTOSAR spricht, ist der Effekt den ein Hardware-Blindverbau<sup>19</sup> auf die Herstellkosten eines Steuergeräts hat: Aufgrund des Herstellkosten-Vorteils, der aus Skaleneffekten resultiert, reduziert sich der negative Kosteneffekt bzgl. ungenutzter Hardware-Umfänge auf einem AUTOSAR-konformen Standard-Steuergerät im Vergleich zu ungenutzter Hardware auf funktionsspezifischen Steuergeräten. Weitere positive Effekte einer konsequenten Verwendung des AUTOSAR Standards, die indirekte Auswirkungen auf Kosten haben, sind z.B. Qualitätsverbesserung oder steigende Zuverlässigkeit von E/E Funktionen inkl. Software- und Hardware-Komponenten (vgl. Kapitel 1.1). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich mit Anwendung des AUTOSAR-Standards ein hohes Potential Entwicklungs- und Herstellkostenkosten einzusparen und die bestehende bietet Komplexität beherrschbar zu machen. Aufgrund der verschiedenen technischen und kostenseitigen Vorteile wird daher die konsequente Anwendung des AUTOSAR-Standards im Rahmen des Forschungsvorhabens als Prämisse festgelegt.

#### Definition automotive E/E Bordnetzarchitektur Struktur:

- Die automotive E/E Bordnetzarchitektur umfasst fünf Domänen.
- Jede Domäne umfasst einen domänenspezifischen, baureihenübergreifenden E/E Funktionsumfang.
- Eine E/E Bordnetzarchitekturdomäne besteht aus einem Zentralen Steuergerät (ZSG) und mehreren Einzel-Steuergeräten (ESG), woraus eine Master-Slave-Relation sowie eine Skalierbarkeit resultieren.
- Für ZSG und ESG werden AUTOSAR-konforme skalierbare Standard-Steuergeräte eingesetzt.
- Die E/E Funktionsentwicklung erfolgt gemäß AUTOSAR Standard.
- Die Partitionierung von E/E Funktionen erfolgt entscheidungsbasiert auf ZSG oder ESG.

# 5.4.2. Betrachtungsgegenstand des Optimierungsmodells

Der gewählte Ansatz für die Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur fokussiert auf die Optimierung von Kosten. Entsprechend liegt der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens auf der Entwicklung eines Gestaltungsvorschlags für ein Optimierungsmodell (vgl.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden **Industriestandards** als Standardsteuergeräte definiert, auf denen eine dedizierte E/E Funktion oder ein zusammengehöriges E/E Funktionscluster partitioniert ist. Industriestandards können dabei z.B. auch Lieferanten- oder Industriebaukästen sein (vgl. Kapitel 3.6). Solche Industriestandards, hier auch "*Off-the-Shelf-Steuergeräte*" genannt, können OEM-übergreifend als Standardumfänge eingesetzt werden. Unter Off-the-Shelf-Steuergeräte werden im Kontext des Forschungsvorhabens Steuergeräte-Hardware inkl. hardwarespezifischer Basis-Software verstanden, die OEM-unabhängig in Serienfertigung bei Lieferanten hergestellt und bei OEMs eingesetzt werden. D.h. Off-the-Shelf-Steuergeräte erfahren keine funktionsspezifischen Anpassungen.

Unter Hardware-Blindverbau ist die Verortung von Hardware (z.B. Halbleiter auf einer Platine) zu verstehen, die nicht benötigt wird. Hardware-Blindverbau kann dann sinnvoll sein, wenn bei einer sehr hohen Steuergeräte-Verbaurate eine zusätzliche Steuergeräte-Variante teurer ist als ein Verbau von Hardware, die nicht in jedem Fahrzeug benötigt wird.

Kapitel 4.2) zur Partitionierung von E/E Funktionen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur auf Basis von Kosten. Grundlage für diese Optimierung bildet die hergeleitete Struktur einer E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz (vgl. Schritt 1). Eine baureihenübergreifende automotive E/E Bordnetzarchitektur kostenseitig zu optimieren, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können, ist dabei das übergreifende Ziel, wobei die vier definierten Teilziele gleichermaßen berücksichtigt werden sollen. Als Voraussetzung für eine Entscheidung bzgl. der Partitionierung von E/E Funktionen innerhalb einer E/E Bordnetzarchitektur Domäne sind entsprechende Bedarfe und Aufwände je E/E Funktion zu erheben. Die Detaillierungstiefe bzw. der Abbildungsumfang des zu gestaltenden Optimierungsmodelles ist vorab kritisch abzuwägen und festzulegen, um die benötigten Angaben hinsichtlich Bedarfe und Aufwänden eindeutig bestimmen zu können.

Bei der Allokation der Summe aller betrieblichen Aufwendungen, 20 die mit einer E/E Bordnetzarchitektur Entwicklung auf OEM-Seite in Zusammenhang gebracht werden können, sind verschiedene Kostenarten zu berücksichtigen. Um den Aufwand zur Erhebung der Eingangsdaten in einem angemessenen und in der unternehmerischen Praxis anwendbaren Rahmen zu halten, sind Vereinfachungen zu treffen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden diese Vereinfachungen auf Basis von Ergebnissen aus Experteninterviews der unternehmerischen Praxis abgeleitet: Bei der durchzuführenden Optimierung werden die zwei Kostenarten<sup>21</sup> Entwicklungs- und Herstellkosten berücksichtigt, die für E/E Funktionen inkl. der zugehörigen Soft- und Hardware-Komponenten<sup>22</sup> entstehen. Auf die Berücksichtigung weiterer Kostenarten (z.B. Fixkosten wie Gebäudemieten, Versicherungen, etc.) wird im Rahmen des Forschungsvorhabens verzichtet und auf folgende Literatur verwiesen: COENENBERG ET. AL. 2012; GÖTZE 2010; GROB/BENSBERG 2005; HABERSTOCK (I) 2008; HABERSTOCK (II) 2008; HEINHOLD 2010; 2007; KEILUS/MALTRY 2006; SCHILDBACH/HOMBURG HOITSCH ET. AL. SCHWEITZER/KÜPPER 2011. Diese Eingrenzung erfolgt, da Entwicklungs- und Herstellkosten den größten Anteil an den Produktentstehungskosten haben [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 122; GOETZE 2004, S. 266].<sup>23</sup> Ferner lässt sich die Höhe von Entwicklungs- und Herstellkosten im Rahmen der frühen Produktentwicklungsphase am stärksten beeinflussen [BECKER 1997, S. 42; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 21; OPITZ 1970, S. 525]. Diese zwei Kostenarten werden im Folgenden näher erläutert [COENENBERG ET. AL. 2012; GÖTZE 2010; GROB/BENSBERG 2005;

\_

Rahmen der Optimierung nicht berücksichtigt.

außergewöhnlicher Höhe anfallen [SCHMOLKE/DEITERMANN 2000, S. 351]. Letztere Kategorie wird im

<sup>20</sup> SCHMOLKE und Deitermann betriebliche Aufwendungen (d.h. Kosten) als "[...] den gesamten Eigenkapital mindernden Werteverzehr im Unternehmen an Gütern, Diensten und Abgaben während einer Abrechungsperiode" [SCHMOLKE/Deitermann 2000, S. 350]. Dabei entstehen Kosten, bei mengenmäßigen Verbräuchen oder gesetzlichen Abgaben, "[...] die zur Leistungserstellung und -verwertung getätigt werden und die in Geldbeträgen bewertet sind" [SCHMOLKE/Deitermann 2000, S. 350].

Betrieblichen Aufwendungen stehen neutrale Aufwendungen gegenüber, die in keinem direkten Zusammenhang mit der Beschaffung, Produktion und dem Absatz stehen oder unregelmäßig in

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Kosten für Planung und Entwicklung unter Entwicklungskosten zusammengefasst.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Die von einer E/E Funktion benötigte Hardware umfasst die applikationsspezifische Hardware inkl. der funktionsunspezifischen Steuergerätehardware inkl. zugehöriger Basissoftware.

Eine weitere Kostenkategorie, auf die die Produktentwicklung großen Einfluss nimmt, bilden die Komplexitätskosten [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 154f.]. Da der gewählte Optimierungsansatz neben der Kostenoptimierung darauf abzielt, die existente Komplexität der E/E Produktentstehung beherrschbarer zu gestalten, werden die Komplexitätskosten indirekt mitberücksichtigt.

Haberstock (I) 2008; Haberstock (II) 2008; Heinhold 2010; Hoitsch et. al. 2007; Keilus/Maltry 2006; Schildbach/Homburg 2008; Schweitzer/Küpper 2011].

Entwicklungskosten sind stückzahlunabhängige Einmalaufwände, die bei einem OEM z.B. für die Entwicklung<sup>24</sup> einer E/E Funktion inkl. zugehöriger Software- und Hardware-Komponenten entstehen. Dabei setzen sich Entwicklungskosten aus verschiedenen Aufwänden für Ressourcen (Einsatzmittel) zusammen, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses verbraucht bzw. benötigt werden [LINDEMANN/MÖRTL 2010; SCHMIDT 2008, S. 133f.]:

- Kosten für dispositive Faktoren (z.B. für Geschäftsleitung, Planung und Organisation),
- Kosten für die Arbeitsleistungen von Entwicklern und Entwicklungsdienstleistern,
- Kosten für die benötigte Infrastruktur (z.B. für IT oder Messinstrumente),
- Kosten für Simulation und Prototypen (z.B. Vorserienmuster, Steuergeräteprototyp),
- Kosten für Absicherung und Test (z.B. für Testracks, Erprobungsträger, Absicherungsfahrten).

Unter Berücksichtigung der Prämisse der konsequenten Verwendung des AUTOSAR-Standard inkl. des Einsatzes von AUTOSAR-konformen skalierbaren Steuergeräten, lassen sich die Kostenanteile für funktionsspezifische Software-Komponenten (Attribut "Applikationssoftware") und funktionsunspezifische Hardware-Komponenten (Attribut "Hardware-Bedarf µController" und "Hardware-Bedarf Speicher") inkl. Basissoftware (Attribut "Basissoftware") separat voneinander ausweisen. Für eine E/E Funktion ergeben sich Entwicklungskosten aus den eingesetzten Ressourcen für die Entwicklung inkl. Simulation von funktionsspezifischer Software und funktionsunspezifischer Hardware-Komponenten mit Basissoftware, Test und Absicherung. Die gesamten Entwicklungskosten einer E/E Funktion ergeben sich aus der Summe aller Kostenanteile, d.h. Einsatzmittelkosten für die E/E Funktionsentwicklung.

 $Entwicklungskosten \ = \sum \textit{Einsatzmittelkosten f\"{u}r die E/E Funktionsentwicklung}$ 

Formel 5-1: Berechnung von Entwicklungskosten

Funktionsspezifische Software-Komponenten werden unabhängig von der zur Realisierung der E/E Funktion benötigten Hardware-Komponenten entwickelt. Bei der Entwicklung der Hardware-Komponenten entfällt der größte Kostenanteil auf den μController<sup>25</sup> und Speicher<sup>26</sup> (vgl. Kapitel 3.4) inkl. zugehöriger hardwarespezifischer Basissoftware (vgl. Kapitel 3.3). Für die funktionsspezifische Softwareentwicklung resultieren die Kosten im Wesentlichen aus den aufzubringenden Kapazitäten für die Entwicklungsleistung von Anwendungssoftware und ggf. für Software-Lizenzgebühren [KRCMAR 2015, S. 71f.].<sup>27</sup> Die Simulation sowie funktionale Tests

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Während der Entwicklungsphase werden bis zu 90 Prozent der späteren Produktkosten festgelegt [BURGER 1999, S. 5; EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S.14 und 119ff.]

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Das Herzstück des μControllers ist der **Prozessor**, auch Zentrale Recheneinheit genannt (engl. Central Processing Unit (CPU)) (vgl. Kapitel 3.4).

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Die am häufigsten verwendeten Speicher sind **RAM, ROM** und **FLASH** (vgl. Kapitel 3.4).

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Software-Lizenzkosten sind Kosten, die für das Recht anfallen eine bestimmte Software benutzen zu dürfen. Dieses Nutzungsrecht ist i.d.R. abhängig von der Anzahl der Nutzer bzw. des Einsatzes oder wird pauschal vereinbart. Erworben werden Nutzungsrechte dabei für einen fest definierten Zeitraum oder aber auf

und Absicherung einer E/E Funktion erfolgen unter Berücksichtigung des Zusammenspiels von Software- und Hardware-Komponenten. Entsprechend steigt der Aufwand mit dem Vernetzungsgrad und der Anzahl der zu berücksichtigenden Hardware-Komponenten.

Die Zusammensetzung und Höhe der Entwicklungskosten einer E/E Funktion werden davon beeinflusst, ob diese auf dem ZSG oder einem ESG einer Domäne partitioniert wird. Wie zuvor definiert, umfasst ein ESG nur eine E/E Funktion bzw. ein zusammengehöriges E/E Funktionscluster. Ein ZSG beinhaltet mehrere E/E Funktionen bzw. E/E Funktionscluster. Entsprechend sind hardwarespezifische Aufwände für eine E/E Funktion auf einem ESG i.d.R. verhältnismäßig höher als die für mehrere E/E Funktionen auf einem ZSG: Die für ein ESG verwendeten Hardware-Komponenten können nicht immer optimal ausgenutzt werden, z.B. wenn verfügbare AUTOSAR-konforme skalierbare "Off-the-Shelf-Steuergeräte" mit den dazugehörigen Hardware-Komponenten, Steckverbindungen sowie Schnittstellen nicht deckungsgleich mit den Anforderungen einer E/E Funktion oder eines zusammengehörigen E/E Funktionsclusters sind. Hardwarespezifische Aufwände eines ZSG verteilen sich anteilig auf alle E/E Funktionen, die darauf partitioniert sind. So sind die Aufwände – trotz höherer Komplexität – je E/E Funktion auf einem ZSG potentiell geringer als für E/E Funktionen, die auf einem ESG partitioniert sind. Analog verhält es sich mit den Aufwänden für Test und Absicherung.

Wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben, können Entwicklungskosten durch die Verwendung von Industriestandards oder Industriebaukästen reduziert werden: Werden E/E Funktionen auf Industriestandard-Steuergeräten oder als Industriebaukästen realisiert, können branchentypische Reduzierungspotentiale bzgl. hardwarespezifischer Entwicklungsaufwände gehoben werden. Aufwände für die funktionalen Tests und Absicherung der E/E Funktion inkl. Software- und Hardware-Komponenten bleiben bestehen. Gemäß Expertenaussagen ergeben sich mit Einsatz von Industriestandards und Industriebaukästen für OEMs branchentypische Einsparungspotentiale bei Entwicklungskosten gegenüber einer Neuentwicklung in Höhe von:

- 5 bis zu 15 Prozent Entwicklungskostenreduzierungen bei Einsatz einzelner Industriestandard-Komponenten für Steuergeräte,
- 25 bis zu 50 Prozent Entwicklungskostenreduzierungen bei Einsatz von Industriestandard-Steuergeräten.

Eine weitere Option zur Reduzierung von Entwicklungskosten besteht für OEMs darin, E/E Funktionen in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern zu entwickeln. Bei Entwicklungskooperationen können Expertenaussagen gemäß 25 Prozent bis zu 50 Prozent der Entwicklungskosten im Vergleich zu einer zu OEM-spezifischen Neuentwicklungen eingespart werden. Eine Halbierung der Entwicklungskosten für die beteiligten Kooperationspartner ist jedoch nur in Ausnahmefällen erzielbar, da die jeweiligen Anforderungen der Kooperationspartner an die Funktionsumsetzung in vielen Fällen variieren und sehr komplex sind. Folglich stellen die Ergebnisse von Entwicklungskooperationen oftmals Kompromisslösungen dar, die den Anforderungen aller beteiligten OEMs gerecht werden. Folglich sind diese Lösungen verglichen mit einer OEM-spezifischen Einzelentwicklung anforderungsbedingt von größerer Komplexität und entsprechend höheren Kosten. Zudem erfolgen Entwicklungsschritte wie Test und Absicherung i.d.R. bei jedem Kooperationspartner separat, wodurch auch die damit verbundenen Kosten bei jedem OEM separat anfallen.

unbestimmte Zeit. Die jeweilige Höhe der Software-Lizenzkosten werden im Rahmen der Lizenzvereinbarungen festgelegt.

Herstellkosten umfassen sämtliche Kosten für Material und Fertigung eines Produkts (z.B. Steuergerät) inklusive aller zugehörigen Umfänge [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 161]. Bei der Berechnung der Herstellkosten wird unterschieden in stückzahlabhängige Herstelleinzelkosten, d.h. direkt zuordenbare verbrauchte Ressourcen, wie z.B. Platinen und stückzahlunabhängige Herstellgemeinkosten, d.h. indirekt verbrauchte Ressourcen, wie z.B. Bestückautomaten [BECKER 1997, S. 42; SCHMIDT 2008, S. 133f.]. Herstellkosten für die Produktherstellung (z.B. die Herstellung von Steuergeräten) setzen sich aus den stückzahlabhängigen Herstelleinzelkosten und stückzahlunabhängigen Herstellgemeinkosten zusammen. Damit entstehen Herstellkosten durch den Verbrauch von Rohstoffen (z.B. Silizium), Hilfsstoffen (z.B. Lötzinn), Betriebsstoffen (z.B. Energie) und Zulieferteile (z.B. Gehäuse). Rohstoffe, Zulieferteile und Hilfsstoffe fließen direkt in die Herstellung ein. Dabei bilden Rohstoffe sowie Zulieferteile den Hauptbestandteil und -wert des Produkts. Hilfsstoffe haben mengen- als auch wertmäßig einen geringen Anteil. Betriebsstoffe werden zu verschiedenen Zwecken im Produktionsprozess eingesetzt und bilden keinen direkten Bestandteil des Produkts [STEGER 2012, S. 180f.]. Fertigungskosten beinhalten Fertigungslohnkosten, Fertigungsgemeinkosten, z.B. für Werkzeugmaschinen oder Maschinenrüstzeiten, und Sondereinzelkosten der Fertigung, z.B. für Werkzeugspezialanfertigungen [EHRLENSPIEL ET AL. 2014, S. 422f.].

Herstellkosten = Herstelleinzelkosten + 
$$\frac{1}{\text{Stückzahl}} \times \text{Herstellgemeinkosten}$$

Formel 5-2: Berechnung von Herstellkosten

Mit steigender Stückzahl bzw. Produktionsauslastung können Herstellkosten sinken, da sich die Herstellgemeinkosten relativ reduzieren (Skaleneffekte). Auch können dedizierte Maßnahmen der Produktentwicklung (z.B. Baukastenbauweise) oder der Produktionsplanung (z.B. Prozessstandardisierung) einen positiven Effekt auf Material-, Teilefertigungs- und Montagekosten haben [Ehrlenspiel et al. 2014, S. 161ff.; Steger 2003, S. 104ff.].

Für E/E Funktionen inkl. funktionsspezifischer Software-Komponenten<sup>28</sup> fallen keine Herstellkosten an, da die Applikationssoftware hardwareunabhängig ist. D.h. Herstellkosten entstehen ausschließlich für die Produktion von Hardware-Komponenten bzw. Steuergeräten (ESGs und ZSG). Dabei ergeben sich die Herstellkosten aus den Einflussgrößen Ressourcennutzung sowie Stückzahl: Neben den allgemeinen Fertigungskosten fallen z.B. hohe Materialkosten für die Hardware-Komponenten in Prozessoren (μController) und Speicher (RAM, ROM, FLASH) an. Die genaue Zusammensetzung und Höhe der anteilig auf eine E/E Funktion entfallenden Herstellkosten kann davon abhängen, ob diese auf dem ZSG oder einem ESG einer Domäne realisiert wird. Wird eine E/E Funktion bzw. eine zusammengehöriges E/E Funktionscluster auf einem ESG partitioniert, wird dieses Steuergerät inklusive der zugehörigen Hardware-Komponenten ausschließlich für diese Funktion eingesetzt und genutzt. Handelt es sich bei den Hardware-Umfängen um Industriestandards (z.B. Standard AUTOSAR-konforme "Off-the-Shelf-Steuergeräte" oder Industriebaukasten), so hat dies – wie zuvor beschrieben – positive Auswirkung auf die Herstellkosten (vgl. Kapitel 5.4). Je nach Verbaurate einer E/E Funktion kann die Fertigungslosgröße eines ESGs von sehr hoch bis sehr niedrig variieren, wodurch die

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Im Rahmen des Herstellungsprozesses wird die Software (Anwendungs- und Basissoftware) auf der Hardware implementiert. Flashen beschreibt den Vorgang des Codierens/Parametrierens und Programmierens der Steuergeräte mit Software-Umfängen. In Analogie zur physischen Ersatzteilversorgung, muss das Flashen eines Steuergeräts über einen Zeitraum von bis zu 15 Jahren nach Produktionsauslauf sichergestellt werden.

verhältnismäßigen Herstellkosten relativ hoch bis niedrig sein können. Im Fall einer Verortung von E/E Funktionen auf dem ZSG werden Hardwarekomponenten von mehreren Funktionen gleichzeitig genutzt. Entsprechend liegen ZSGs höhere Anforderungen hinsichtlich der Performance von Prozessoren, Speicher und Leistungselektronik zugrunde. Damit verbunden sind hohe Materialkosten und ggf. steigende Fertigungskosten. Vor der Annahme, dass ein ZSG einer Domäne mit einer Verbaurate von 100 Prozent baureihenübergreifend eingesetzt wird, können sich die Herstellkosten über eine hohe Fertigungslosgröße reduzieren. Zudem werden Kosten für Gehäuse, Steckverbindungen etc. anteilig auf die auf dem ZSG verorteten E/E Funktionen verteilt. In Analogie zu den Entwicklungskosten ist für dieses Szenario daher anzunehmen, dass die anteiligen Herstellkosten je E/E Funktion im Durchschnitt geringer sind als bei der Verortung auf einem ESG.

Die Gesamtkosten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur ergeben sich aus der Summe aller Kosten (Entwicklungs- und Herstellkosten), für die darin zu partitionierenden E/E Funktionen inkl. Software und Hardware -Komponenten. Abbildung 5-11 zeigt die Struktur der Kostenkategorien Entwicklungs- und Herstellkosten einer E/E Funktion. Maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Gesamtkosten hat die E/E Funktionspartitionierung, die im Folgenden näher beschrieben wird.



Abbildung 5-11: Struktur der Entwicklungs- und Herstellkosten einer E/E Funktion eigene Darstellung.

Für die E/E Funktionspartitionierung stehen unterschiedliche Handlungsalternativen mit unterschiedlichen Merkmalen zur Auswahl, insb. bzgl. der Partitionierung einer E/E Funktion auf einem ZSG oder ESG. Um das Entscheidungsproblem einzugrenzen und die Komplexität der Optimierung zu reduzieren, werden zunächst vereinfachende Prämissen für die Entscheidung über Verortung von E/E Funktionen je Domäne auf ZSG und ESG in zwei Schritten festgelegt (vgl. "Schritt 1" und "Schritt 2"). Diese bilden die Basis für die Funktionsverortung gemäß einer Kostenoptimierung im dritten Schritt (vgl. "Schritt 3"):

- Schritt 1: Zusammenführung aller E/E Funktionen in einer Funktionsliste inkl. Ordnung aller E/E Funktionen in der Funktionsliste nach Domänenzugehörigkeit.
- Schritt 2: Ordnung aller E/E Funktionen einer Domäne nach Funktionskategorien (Industriestandards, Kooperationen) inkl. der Verortung von E/E Funktionen der Kategorien Industriestandard und Kooperation auf ESGs.
- Schritt 3: Verortung von E/E Funktionen der Kategorie Basisausstattung und optionale Ausstattungsumfänge anhand von Kostenoptimierung auf ZSG oder ESGs.

#### Schritt 1: Domänenzugehörigkeit einer E/E Funktion.

Der erste Schritt setzt eine Erfassung sämtlicher E/E Funktionen für alle Domänen einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur voraus. Herausforderung dabei ist, die E/E Funktionen vollständig und in einer vergleichbaren Form zu erfassen, welche unabhängig von der jeweilig zu erfüllenden Aufgabe und Domänenzugehörigkeit ist. Die Konsolidierung der E/E Funktion erfolgt in einer dafür vorgesehenen generischen Funktionsliste, wie sie oben beschrieben wurde (vgl. Abbildung 5-12). Diese Funktionsliste beschreibt alle E/E Funktionen eines OEMs detailliert und kann anforderungsgesteuert um zusätzliche Attribute erweitert werden.

Funktion	Funktion	Domäne		Don		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne		Domäne					Ausschluss	Basis			Kooperation	Hard	ware-B	edarf <sup>1</sup>		Basis Software	Applikations Software	Test und Absicherung
								Rate		kopplung		Ausstattung	Ausstattung	standard		μController	S	peiche	1	Software	Software	Absicherung																						
[Nr.]	[Name]	1	2 3	4	5	[%]	[Nr.]	[Nr.]	[Nr.]	[ja/nein]	[ja/nein]	[ja/nein]	[ja/nein]	CPU [MIPS]	RAM [kB]	ROM [kB]	Flash [kB]	[€]	[€]	[€]																								
1																																												
2																																												
n																																												

1 HW-spezifische Software wird über HW-EK abgedeck

Abbildung 5-12: Funktionsliste zur Konsolidierung und Beschreibung von E/E Funktionen, eigene Darstellung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die Beschreibung jeder einzelnen E/E Funktion anhand der zuvor eingeführten fünfzehn Attribut-Positionen festgelegt. Ist die Funktionsliste inkl. aller Attribut-Positionen vollständig für alle E/E Funktionen eines OEMS befüllt, wird für jede einzelne E/E Funktion die Zugehörigkeit zu einer der fünf zuvor definierten Domänen (Abbildung 5-6) strukturiert abgefragt. Dabei liegt die Prämisse zugrunde, dass jede E/E Funktion genau einer dedizierten Domäne zugeordnet werden kann. Ist diese Zugehörigkeitsabfrage vollständig erfolgt, resultiert für jede der fünf Domänen ein spezifischer Funktionsumfang (vgl. Abbildung 5-13).

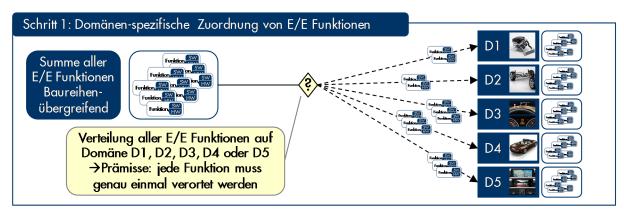


Abbildung 5-13: Domänenspezifische Zuordnung von E/E Funktionen, eigene Darstellung.

#### Schritt 2: Verortung der E/E Funktionskategorien Industriestandard und Kooperation

Im zweiten Schritt erfolgt eine strukturierte Abfrage der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Funktionskategorie für jede einzelne E/E Funktion eines domänenspezifischen Funktionsumfangs (vgl. Abbildung 5-14).

Dabei werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die zuvor eingeführten Kategorien Industriestandard, Kooperation, optionale Ausstattung sowie Basisausstattung unterschieden (vgl. Abbildung 5-9). Jeder E/E Funktion kann genau einer Kategorie zugeordnet werden. Die

Information über die jeweilige Zugehörigkeit zu einer dedizierten Kategorie ist in der übergreifenden Funktionsliste je E/E Funktion enthalten (vgl. Abbildung 5-12). Die strukturierte Abfrage erfolgt für jede Domäne einer E/E Bordnetzarchitektur analog unter Berücksichtigung von drei Prämissen (vgl. Abbildung 5-14).

#### Prämissen für die strukturierte Abfrage von E/E Funktionen einer Domäne

- Ist eine E/E Funktion Teil eines Industriestandards und/oder einer Entwicklungskooperation, so wird diese auf einem ESG partitioniert.
- Ist eine E/E Funktion eine optionale Ausstattungsfunktion (Verbaurate kleiner 100 Prozent), oder eine Basisfunktion (Verbaurate 100 Prozent), erfolgt deren Partitionierung auf Basis der Kostenoptierung in Schritt 3 und wird damit in Schritt 2 nicht weiter betrachtet.

Abbildung 5-14: Prämissen der strukturierten Abfrage von E/E Funktionen für jede Domäne einer E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung.

Den zugrunde gelegten Prämissen gemäß, prüft die strukturierte Abfrage in Schritt 2 zunächst jede E/E Funktion des domänenspezifischen Funktionsumfangs daraufhin, ob diese Teil eines Industriestandards und/ oder einer Entwicklungskooperation ist (vgl. Abbildung 5-15, Punkt 1).

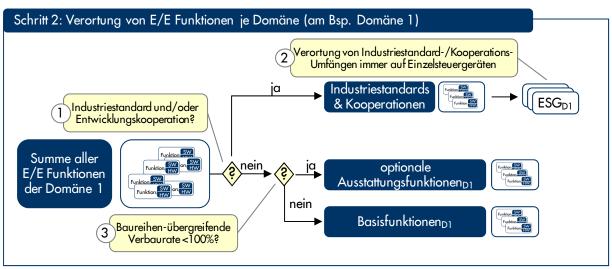


Abbildung 5-15: Domänenspezifische Verortung von E/E Funktionen, eigene Darstellung.

Jede E/E Funktion, die sich als Industriestandards und/ oder einer Entwicklungskooperation identifizieren lässt, wird der Kategorie "*Industriestandards und Kooperationen*" zugeordnet. Für E/E Funktionen dieser Kategorie wird festgelegt, dass diese jeweils einzeln oder mit dazugehörigen E/E Funktionen auf einem ESG verortet werden (vgl. Abbildung 5-15, Punkt 2). Für alle übrigen E/E Funktionen des domänenspezifischen Funktionsumfangs erfolgt die strukturierte Abfrage gemäß der Verbaurate (vgl. Abbildung 5-15, Punkt 3). Ist die baureihenübergreifende Verbaurate einer E/E Funktion kleiner als 100 Prozent, so wird diese der Kategorie von optionalen Ausstattungsfunktionen zugeordnet. Ist die baureihenübergreifende Verbaurate einer E/E Funktion gleich 100 Prozent, so wird diese der Kategorie E/E Basisfunktionen zugeordnet.

# Schritt 3: Verortung von E/E Funktionen der Kategorie Basisausstattung und optionale Ausstattungsumfänge

Im dritten Schritt erfolgt die Verortung der verbleibenden E/E Funktionen: optionale Ausstattungsfunktionen und Basisfunktionen. Die Entscheidung über die Verortung dieser zwei Funktionskategorien wird im Schritt 3 mittels Kostenoptimierung getroffen. D.h. je nach Ergebnis der Optimierung kann die Partitionierung entweder auf dem ZSG oder einem ESG einer Domäne erfolgen (vgl. Abbildung 5-16).

Die Eingangsparameter für die domänenspezifische Optimierung bilden die jeweiligen funktionsspezifischen Bedarfe an Prozessorleistung (CPU) und Speicher (RAM, ROM, FLASH), die je E/E Funktion aus der übergreifenden Funktionsliste zu entnehmen sind. Eine zweite Eingangsgröße bilden domänenspezifische Steuergeräteklassen mit jeweils dediziert verfügbarer Prozessorleistung (CPU), Speicher (RAM, ROM, FLASH) sowie den entsprechenden Kosten je Steuergerätklasse. Sämtliche Eingangsparameter wurden gemeinsam mit Experten der Unternehmerischen Praxis erhoben (Details s. Kapitel 5.1.5). Die Optimierung und Lösung des Modells erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens über die in MATLAB programmierte Exhaustionsmethode zur Verteilung von E/E Basisfunktionen und E/E optionalen Ausstattungsfunktionen auf ZSG und ESG (vgl. Kapitel 5.7).

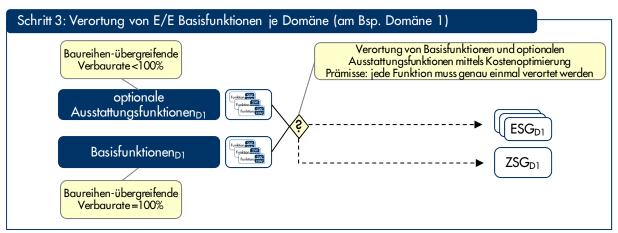


Abbildung 5-16: Domänenspezifische Verortung von E/E Basisfunktionen, eigene Darstellung.

### 5.5. Mathematisches Modell

Bei dem zu entwickelnden mathematischen Modell handelt es sich um ein einkriterielles deterministisches Optimierungsmodell (vgl. Kapitel 4.2.1). Gegenstand der Optimierung ist dabei die Entscheidung über die Verortung der E/E Basisfunktionen auf dem Zentralen Steuergerät oder Einzelsteuergeräten einer Domäne anhand von Kosten. Die Verortung der übrigen Funktionskategorien erfolgt gemäß den zuvor definierten Prämissen. Die Optimierung wird mittels einer in MATLAB programmierten Exhaustionsmethode durchgeführt (vgl. Kapitel 5.7). Dabei erfolgt die Optimierung jeweils für jede Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur separat. Die Ergebnisse der Optimierung fließen entsprechend in die Berechnung der Gesamtkosten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur ein (vgl. Abbildung 5-17).

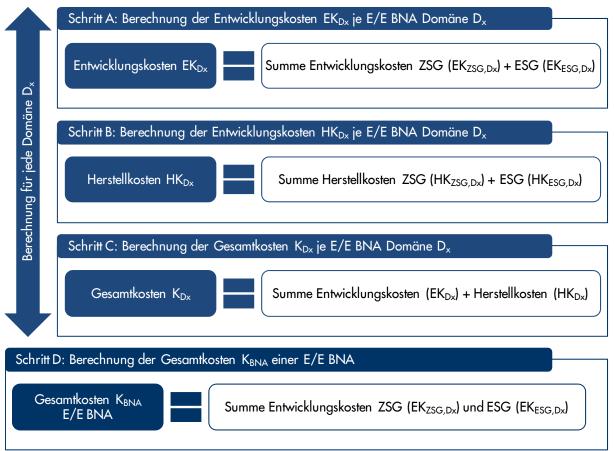


Abbildung 5-17: Vier Schritte zur Gesamtkostenberechnung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung.

Die Berechnung der Gesamtkosten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur setzt sich im Rahmen des hier entwickelten Modells aus den folgenden vier Schritten zusammen (vgl. Abbildung 5-17):

- "Schritt A": Die gesamten Entwicklungskosten einer Domäne (EK<sub>Dx</sub>) werden berechnet. Diese setzen sich aus der Summe der Entwicklungskosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (EKzsg,Dx) und der Summe der Entwicklungskosten für die verschiedenen Einzelsteuergeräte einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) zusammen. Die Entwicklungskosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (EKzsg.dx) ergeben sich dabei aus der Summe der Entwicklungsaufwände je E/E Funktion inkl. der dazugehörigen Software- und Hardware-Komponenten, die darauf implementiert werden. Die Entwicklungskosten für die Einzelsteuergeräte einer Domäne (EKESG,Dx) ergeben sich aus der Summe der Entwicklungsaufwände der E/E Funktion inkl. der entsprechenden Software- und Hardware-Komponenten, die darauf verortet werden.
- "Schritt B": Die gesamten Herstellkosten einer Domäne (HK<sub>Dx</sub>) werden berechnet. Diese resultieren aus der Summe der Herstellkosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (HKzsg,Dx) und der Summe von Herstellkosten für die Einzelsteuergeräte einer Domäne (EKesg, Dx). Die Herstellkosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (HKzsg,Dx) ergeben sich aus der Summe der Herstellaufwände je E/E Funktion inkl. der dazugehörigen Software- und Hardware-Komponenten, die darauf verortet werden. Die Herstellkosten für die Summe der Einzelsteuergeräte einer Domäne lassen sich aus der Summe der Herstellaufwände pro E/E Funktion inkl. dazugehöriger Software- und Hardware-Komponenten berechnen, die darauf implementiert werden.

- "Schritt C": Die Gesamtkosten für jede Domäne (K<sub>Dx</sub>) einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur summieren sich auf aus den gesamten Entwicklungskosten einer Domäne (EK<sub>Dx</sub>) (vgl. "Schritt A") und den gesamten Herstellkosten einer Domäne (HK<sub>Dx</sub>) (vgl. "Schritt B").
- "Schritt D": Die Gesamtkosten für eine automotive E/E Bordnetzarchitektur (K<sub>BNA</sub>) berechnet sich aus der Summe der Gesamtkosten jeder Domäne (D<sub>x</sub>) (vgl. "Schritt C"). Das Ergebnis dieser Berechnung sollte dem Kosten-seitigen Optimum einer E/E Bordnetzarchitektur entsprechen.

#### Schritt A: Berechnung der Entwicklungskosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne

Die gesamten Entwicklungskosten einer Domäne (EK<sub>Dx</sub>) berechnen sich aus der Summe der Entwicklungskosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (EK<sub>ZSG,Dx</sub>) und der Entwicklungskosten für die ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) (vgl. Formel 5-3).

$$EK_{D_x} = EK_{ZSG,D_x} + EK_{ESG,D_x}$$

Formel 5-3: Berechnung der gesamten Entwicklungskosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

Die Entwicklungskosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (EKzsg,Dx) ergeben sich aus der Summe der Entwicklungsaufwände je E/E Funktion (z) inkl. dazugehöriger Software-Komponenten (SW) und Hardware-Komponenten (CPU, RAM, ROM, Flash), die darauf verortet werden sowie Aufwände für Test und Absicherung (T) (vgl. Formel 5-4).

$$EK_{ZSG,D_x} = \sum_{z=1}^{Z} EK_{z,D_x}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, T)$$

Formel 5-4: Berechnung der Entwicklungskosten eines ZSG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

Die Berechnung der Entwicklungskosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (EKzsg,Dx) erfolgt unter den folgenden Nebenbedingungen:

$$EK_{z,D_x}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T) \ge 0$$
  $f\ddot{u}r\ z=1,...,Z$   $Z+E+I+K+OS=F$   $f\ddot{u}r\ Z,E,I,K,OS,F,\in\mathbb{Z}$ 

Dabei bedeuten die einzelnen aufgeführten Variablen:

- **EK**<sub>z,Dx</sub> (**SW**,**CPU**,**RAM**,**ROM**,**FLASH**,**T**): Entwicklungskosten einer E/E Funktion (EK<sub>z</sub>) auf dem Zentralen Steuergerät in Abhängigkeit von Softwareentwicklung (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH), Test- und Absicherung (T).
- **Z**: Summe aller E/E Basisfunktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>), die gemäß Kostenoptimierung auf dem Zentralen Steuergerät verortet wird.
- E: Summe aller E/E Basisfunktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>), die gemäß Kostenoptimierung auf Einzelsteuergräten verortet wird.

- I: Summe aller E/E Funktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>), die Umfang eines Industriestandards sind und auf Einzelsteuergeräten verortet wird.
- **K:** Summe aller E/E Funktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>), die Umfang einer Entwicklungskooperation sind und auf Einzelsteuergräten verortet wird.
- **OS:** Summe aller E/E Funktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>), die Umfang einer optionalen Ausstattung sind und auf Einzelsteuergräten verortet wird.
- **F:** Summe aller E/E Funktionen einer Domäne (D<sub>x</sub>).

Die Summe der Entwicklungskosten von ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) ergibt sich aus der Summe aller Entwicklungsaufwände für die E/E Funktionen (e, i, k, os) inkl. dazugehöriger Software-Komponenten (SW) und Hardware-Komponenten (CPU, RAM, ROM, Flash), die darauf verortet werden, sowie Test und Absicherung (T) (vgl. Formel 5-5).

$$EK_{ESG,D_x} = \sum_{e=1}^{E} EK_{e,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, T)$$

$$+ \sum_{i=1}^{I} EK_{i,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, T)$$

$$+ \sum_{k=1}^{K} EK_{k,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, T)$$

$$+ \sum_{sa=1}^{SA} EK_{sa,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, T)$$

Formel 5-5: Berechnung der Entwicklungskosten für die ESG einer Domäne.

Die Berechnung der Entwicklungskosten für die ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) erfolgt unter Berücksichtigung der nachfolgenden Nebenbedingungen:

```
EK_{e,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T)\geq 0 f\ddot{u}r\ e=1,...,E EK_{i,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T)\geq 0 f\ddot{u}r\ i=1,...,I EK_{k,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T)\geq 0 f\ddot{u}r\ k=1,...,K EK_{sa,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T)\geq 0 f\ddot{u}r\ sa=1,...,SA
```

Dabei bedeuten die einzelnen aufgeführten Variablen:

• **EK**<sub>e,Dx</sub>(**SW**,**CPU**,**RAM**,**ROM**,**FLASH**,**T**): Entwicklungskosten eines ESGs (EK) einer E/E Basisfunktion (e), die gemäß Kostenoptimierung nicht auf dem Zentralen Steuergerät der Domäne D<sub>x</sub> verortet wurde, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH), Simulation sowie Test- und Absicherung (T).

- **EK**<sub>i,Dx</sub>(**SW**,**CPU**,**RAM**,**ROM**,**FLASH**,**T**): Entwicklungskosten eines ESGs (EK) einer E/E Funktion (i) der Domäne D<sub>x</sub>, die Umfang eines Industriestandards ist, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH), Simulation sowie Test- und Absicherung (T).
- **EK**<sub>k,Dx</sub>(**SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,T**): Entwicklungskosten eines ESGs (EK) einer E/E Funktion (k) der Domäne D<sub>x</sub>, die Umfang einer Kooperation ist, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH), Simulation sowie Test- und Absicherung (T).
- **EK**<sub>0s,Dx</sub>(**SW**,**CPU**,**RAM**,**ROM**,**FLASH**,**T**): Entwicklungskosten eines ESGs (EK) einer optionalen E/E Funktion (os) der Domäne D<sub>x</sub>, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH), Simulation sowie Test- und Absicherung (T).

#### Schritt B: Berechnung der Herstellkosten für ZSG und ESG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne

Die gesamten Herstellkosten einer Domäne (HK<sub>Dx</sub>) berechnen sich aus der Summe der Herstellkosten für das Zentrale Steuergerät einer Domäne (HK<sub>ZSG,Dx</sub>) und der Herstellkosten für die ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) (vgl. Formel 5-6).

$$HK_{D_{x_i}} = HK_{ZSG,D_x} + HK_{ESG,D_x}$$

Formel 5-6: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ZSG und ESG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

Die Herstellkosten ( $HK_{ZSG,Dx}$ ) für das Zentrale Steuergerät einer Domäne  $D_x$  ergeben sich aus der Summe der Herstellaufwände je E/E Funktion (z) inkl. dazugehöriger Software-Komponenten (SW) und Hardware-Komponenten (CPU, RAM, ROM, Flash), die darauf verortet werden sowie der Stückzahl (S) (vgl. Formel 5-7).

$$HK_{ZSG,D_x} = \sum_{z=1}^{Z} HK_{z,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S)$$

Formel 5-7: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ZSG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

Die Berechnung der Herstellkosten ( $HK_{ZSG,Dx}$ ) für das Zentrale Steuergerät einer Domäne  $D_x$  erfolgt unter den Nebenbedingungen:

$$HK_{z,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S) \ge 0$$
  $f\ddot{u}r z = 1, ..., Z$ 

$$Z + E + I + K + SA = F$$
  $f \ddot{u} r Z, E, I, K, SA, F \in \mathbb{Z}$ 

Dabei bedeuten die einzelnen Variablen:

HK<sub>z,Dx</sub>(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S): Herstellkosten (HK<sub>z</sub>) einer E/E Basisfunktion auf dem Zentralen Steuergerät einer Domäne D<sub>x</sub>, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung

von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH) sowie der Stückzahl (S).

Die Herstellkosten für die ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) ergeben sich aus der Summe der Herstellaufwände der E/E Funktion (e, i, k, os) inkl. dazugehöriger Software-Komponenten (SW) und Hardware-Komponenten (CPU, RAM, ROM, Flash), die darauf verortet werden, sowie der Stückzahl (S) (vgl. Formel 5-8).

$$HK_{ESG,D_x} = \sum_{e=1}^{E} HK_{e,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S)$$

$$+ \sum_{i=1}^{I} HK_{i,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S)$$

$$+ \sum_{k=1}^{K} HK_{k,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S)$$

$$+ \sum_{os=1}^{OS} HK_{os,Dx}(SW, CPU, RAM, ROM, FLASH, S)$$

Formel 5-8: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ESG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

Die Berechnung der Herstellkosten für die ESG einer Domäne (EK<sub>ESG,Dx</sub>) erfolgt unter den nachfolgenden Nebenbedingungen:

```
HK_{e,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S) \geq 0 f\ddot{u}r\ e=1,...,E HK_{i,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S) \geq 0 f\ddot{u}r\ i=1,...,I HK_{k,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S) \geq 0 f\ddot{u}r\ k=1,...,K HK_{os,Dx}(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S) \geq 0 f\ddot{u}r\ sa=1,...,OS
```

Dabei bedeuten die einzelnen Variablen:

- HK<sub>e,Dx</sub>(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S): Herstellkernkosten eines ESGs (KEHK) einer Funktion (e) der Domäne D<sub>x</sub> in Abhängigkeit von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH) sowie sowie Stückzahl (S).
- HK<sub>i,Dx</sub>(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S): Herstellkosten (HK<sub>z</sub>) einer E/E Funktion

   (i) der Domäne D<sub>x</sub>, die Umfang eines Industriestandards ist, , abhängig von Software
   (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH) sowie der Stückzahl (S).
- **HK**<sub>k,Dx</sub>(**SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S**): Herstellkosten (HK<sub>z</sub>) einer E/E Funktion (k) der Domäne D<sub>x</sub>, die Umfang einer Kooperation ist, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH) sowie der Stückzahl (S).

• HK<sub>os,Dx</sub>(SW,CPU,RAM,ROM,FLASH,S): Herstellkosten (HK<sub>os,Dx</sub>) einer optionalen E/E Funktion der Domäne D<sub>x</sub>, abhängig von Software (SW), Ressourcennutzung von zentralen Recheneinheiten (CPU), Speicher (RAM, ROM und FLASH) sowie der Stückzahl (S).

#### Schritt C: Berechnung Gesamtkosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne

Die Gesamtkosten für jede Domäne ( $K_{Dx}$ ) eine automotiven E/E Bordnetzarchitektur ergibt sich aus der Summe der gesamten Entwicklungskosten einer Domäne ( $EK_{Dx}$ ) und der gesamten Herstellkosten einer Domäne ( $HK_{Dx}$ ) (vgl. Formel 5-9).

$$K_{Dx} = EK_{D_x} + HK_{D_x}$$

Formel 5-9: Berechnung der Gesamtkosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.

#### Schritt D: Berechnung Gesamtkosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne

Schließlich lassen sich die Kosten für die gesamte automotive E/E Bordnetzarchitektur (K<sub>BNA</sub>) mit der Aufsummierung der Gesamtkosten jeder einzelnen Domäne berechnen (vgl. Formel 5-10).

$$K_{BNA} = \sum_{Dx=1}^{5} (EK + HK)_{Dx} \quad f\ddot{u}r \, Dx \in \mathbb{Z}$$

Formel 5-10: Berechnung der Gesamtkosten einer E/E Bordnetzarchitektur.

$$K_{BNA} \geq 0$$
  $f\ddot{u}r D_x = 1, ..., 5$ 

Dabei bedeuten die einzelnen Variablen:

- **K**<sub>BNA</sub>: Kosten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur
- **D**<sub>x</sub>: Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur

Die Eingangsparameter für die domänenspezifische Optimierung bilden die jeweiligen funktionsspezifischen Bedarfe an Prozessorleistung (CPU) und Speicher (RAM, ROM, FLASH), die je E/E Funktion aus der übergreifenden Funktionsliste zu entnehmen sind. Eine zweite Eingangsgröße bilden domänenspezifische Steuergeräteklassen mit jeweils dediziert verfügbarer Prozessorleistung (CPU), Speicher (RAM, ROM, FLASH) sowie den entsprechenden Kosten je Steuergerätklasse. Sämtliche Eingangsparameter wurden gemeinsam mit Experten der Unternehmerischen Praxis erhoben (Details s. Kapitel 5.1.5). Die Optimierungsmodelllösung erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens über die in MATLAB programmierte Exhaustionsmethode zur Verteilung von E/E Basisfunktionen und E/E optionale Ausstattungsfunktionen auf ZSG und ESG (vgl. Kapitel 5.7, Abbildung 6-20).

# 5.6. Datenbeschaffung

Die für das mathematische Modell benötigten Eingangsgrößen (Daten) werden im Rahmen des Forschungsvorhabens – analog zum Vorgehen in der unternehmerischen Praxis – mit den verantwortlichen Fachstellen (CoCs) in den entwickelnden Abteilungen sowie dem Einkauf erhoben und plausibilisiert. Entsprechend erfolgt die Datenbeschaffung für das Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur auf Basis von Ergebnissen aus Interviews mit Experten der unternehmerischen Praxis (vgl. Kapitel 5.7). Mit Berücksichtigung dieser konsolidierten Fachkompetenz wird die Auswahl, Konsistenz, sowie der Praxisbezug inkl. -nutzen der Eingangsdaten für das Optimierungsmodell gewährleistet

Der ersten Schritt der Datenbeschaffung sieht gemäß deskriptivem Modell die vollständige Erfassung sämtlicher E/E Funktionen anhand der zuvor beschriebenen sechzehn Attribute (Funktionseigenschaften) für alle Domänen einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur vor (vgl. Kapitel 5.1.3), welche in der konsolidierenden Funktionsliste dokumentiert wird (vgl. Kapitel 5.1.4). Die dabei zugrundeliegende Herausforderung besteht darin, eine domänenübergreifende Vergleichbarkeit der spezifischen Angaben von Daten je E/E Funktion (Beschreibung der sechszehn Attribute) zu gewährleisten. Die Bewältigung dieser Herausforderung ist im Rahmen des Forschungsvorhabens aus verschiedenen Gründen nicht darstellbar. Zum einen liegt eine solche Vergleichbarkeit für E/E Funktionen in der unternehmerischen Praxis nicht vor. Aufgrund der hohen Anzahl von bis zu über 700 kundenerlebbaren Funktionen in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse (z.B. in der BMW 3er, 5er und 7er Baureihe) [BURGDORF 2010, S. 1], ist es im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht zweckmäßig, jede E/E Funktion einzeln zu erheben, um für diese eine Vergleichbarkeit herzustellen. Zum anderen liegt der zweite Grund darin, dass den Restriktionen bzgl. bestehender Geheimhaltungsvereinbarungen gemäß die Darstellung einer vollständigen Liste mit E/E Funktionen eines OEMs im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht zulässig ist. Ferner liegt der Anspruch des Forschungsvorhabens nicht darin, eine dedizierte automotive E/E Bordnetzarchitektur inkl. zugehörigen E/E Funktionsumfang für einen OEM zu generieren. Vielmehr ist es das Ziel, einen Lösungsvorschlag für die Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur unter Berücksichtigung von Kosten zu schaffen, in welcher grundsätzlich sämtliche E/E Funktionen eines OEMs abgebildet werden können. Zusammenfassend wird eine vollständige Erfassung und Darstellung einer Funktionsliste mit sämtlichen E/E Funktionen eines OEMs im Rahmen des Forschungsvorhabens als nicht zielführend bewertet.<sup>29</sup> Um das Ziel- die Modellierung und kostenseitige Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können – zu erreichen, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens gemeinsam mit Experten der unternehmerischen Praxis branchentypische Durchschnittswerte für Funktionsklassen und Steuergeräteklassen über eine bestimmte Logik erhoben, die zur Validierung des Optimierungsmodells herangezogen werden (vgl. Abbildung 5-18).

Die Datenerhebung, zum Zweck der Modellvalidierung in Kapitel 5.2, erfolgt mittels einer Logik zur Generierung von "Referenzwerten" auf Basis von in der unternehmerischen Praxis

Als Anmerkung sei angeführt, dass bei der Anwendung des Optimierungsmodells zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur in der unternehmerischen Praxis eine vollständige Liste mit sämtlichen E/E Funktion des OEMs vorliegen muss.

existenten realen Werten. Dieser Ansatz sieht die Festlegung einer sinnvollen Anzahl baureihenübergreifender Funktionsklassen vor. Jede repräsentiert eine Klasse an E/E Funktionen mit einem bestimmten Hardware-Bedarf (vgl. Abbildung 5-18). Entsprechend wird für verschiedene E/E Funktion der Bedarf an Leistung des Hauptprozessors (CPU) in Millionen Instruktionen pro Sekunde (MIPS) sowie an Speicher (jeweils Flash, RAM, ROM) in Kilobyte (kByte) abgefragt, um darüber Anzahl und Charakterisierung der Funktionsklassen herzuleiten. Diese Bedarfs-Abfrage erfolgt analog zur Beschreibung der Attribut-Positionen 11 und 12 in der übergreifenden Funktionsliste. Auf Basis der Abfrageergebnisse lassen sich vier verschiedene Funktionsklassen ableiten (vgl. Abbildung 5-18):

- *Funktionsklasse 1*: Kleine E/E Funktionen bzw. Funktionscluster, z.B. Electronic Power Steering (EPS).
- *Funktionsklasse 2:* Mittlere E/E Funktionen bzw. Funktionscluster, z.B. Längsmomentverteiler, Audioverstärker.
- *Funktionsklasse 3:* Große E/E Funktionen bzw. Funktionscluster, z.B. Elektronische Getriebesteuerung.
- *Funktionsklasse 4:* Sehr große E/E Funktionen bzw. Funktionscluster, z.B. komplexe Fahrerassistenzfunktionen.

Die Höhe der ermittelten Hardware-Bedarfe jeder einzelnen Funktionsklasse entspricht den ermittelten Durchschnittswerten vergleichbarer E/E Funktionen der automotiven Praxis (vgl. Abbildung 5-18). Alle weiteren Funktionseigenschaften werden in der übergreifenden Funktionsliste beschrieben. Die Funktionsliste ist die erste von zwei Eingangsgrößen bzw. - tabellen für die computerbasierte Modelllösung mit der in MATLAB programmierten Exhaustionsmethode (vgl. Kapitel 5.7).

Hardware	Funktionsklassen <sup>2)</sup>									
Bedarf <sup>1)</sup>	Funktionsklasse 1	Funktionsklasse 2	Funktionsklasse 3	Funktionsklasse 4						
CPU [MIPS]	32	64	128	200						
Flash [kByte]	64	256	512	1000						
RAM [kByte]	16	32	64	128						
ROM [kByte]	2	2	4	8						

Bei Anwendung des AUTOSAR Standards werden ausschließlich 32Bit µController eingesetzt.
 Branchentypische Durchschnittswerte für E/E Funktionsklassen bzw. E/E Funktionscluster exkl. Basissoftware.

Abbildung 5-18: Baureihenübergreifende Klassen von E/E Funktionen, eigene Darstellung.

Im zweiten Schritt der Datenbeschaffung für das Optimierungsmodell müssen Steuergeräteklassen je Domäne definiert werden. Für diese Steuergeräteklassen müssen zum einen die Hardware-Komponenten (CPU, Flash, RAM, ROM) festgelegt und zum anderen die Kosten ermittelt werden. Diese bilden die zweite Eingangsgröße bzw. -tabelle für die computerbasierte Modelllösung mit der in MATLAB programmierten Exhaustionsmethode (vgl. Kapitel 5.7), um über eine kostenbasierte Partitionierung von E/E Funktionen in der automotiven E/E Bordnetzarchitektur entscheiden zu können.

Aufgrund des großen Angebots an μControllern mit unterschiedlichen Ausprägungen und Eignungen, die für den automotiven Einsatz existieren, wird zur Ermittlung der Steuergeräteklassen im Rahmen des Forschungsvorhabens ebenfalls ein vereinfachender Ansatz entwickelt. Dieser beinhaltet die Festlegung einer sinnvollen Anzahl von Steuergeräteklassen je E/E Bordnetzarchitektur Domäne. Gemäß ermittelter Durchschnittswerte in der automotiven Praxis von Steuergeräten hinsichtlich Hardware-Komponenten und Kosten werden somit vier Steuergeräteklassen je Domäne festgelegt(vgl. Abbildung 5-19). Aufgrund der Vergleichbarkeit der Anforderungen zur Realisierung von E/E Funktionen bzgl. Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, etc. innerhalb der Domänen Antrieb (z.B. Motor- oder Getriebesteuerung), Fahrwerk (ABS, DSC, Brems-Rekuperation) sowie Sicherheit und Fahrerassistenz (z.B. zentrale Koordination der Sensor- und Navigationsdaten, Umfelderkennung) als auch der Domänen Karosserie und Komfort (z.B. Bedienen, elektrische Ein-/ Verstellfunktionen von Fahrzeugkomponenten wie Sitz, Scheiben, etc.) sowie Infotainment (z.B. Anzeige und Bedienen von Infotainment- oder Navigationsfunktionen), werden im Rahmen des Forschungsvorhabens einzig zwei verschiedene Gruppen von Steuergeräteklassen definiert (vgl. Abbildung 5-19).

		Domäne A	ntrieb							
		Domäne Fo	ıhrwerk		Domär	Domäne Karosserie und Komfort				
	Domäne S	icherheit ur	nd Fahrerass	sistenz	Domäne	Domäne Navigation und Infotainment				
		Steuergerö	iteklassen <sup>2)</sup>			Steuergeräteklassen <sup>2)</sup>				
Hardware <sup>1)</sup>	SG 1.1	SG 1.2	SG 1.3	SG 1.4	SG 2.1	SG 2.2	SG 2.3	SG 2.4		
CPU [MIPS]	150	300	600	1200	64	128	300	800		
Flash [kByte]	1000	2000	4000	8000	728	1500	1500	3000		
RAM [kByte]	64	128	256	512	32	64	128	512		
ROM [kByte]	16	32	64	128	8	8	32	64		
Kosten [€]	5,00	10,00	15,00	20,00	4,00	8,00	10,00	16,00		
	1) Bei Anwendung des AUTOSAR Standards werden ausschließlich 32Bit µController eingesetzt.									

Abbildung 5-19: Domänenspezifische Klassen von Steuergeräteklassen, eigene Darstellung

2) Branchentypische Durchschnittswerte für Steuergeräteklassen.

Die Steuergeräteklassen 1 bis 3 eignen sich grundsätzlich für den Einsatz als ESG, d.h. um darauf einzelne E/E Funktionen bzw. größere zusammengehörige E/E Funktionscluster darauf zu partitionieren. Die Steuergeräteklasse 4 eignet sich hingegen aufgrund der sehr hohen μController Performance und der großen Speicher dafür, eine größere Anzahl von E/E Funktionen aufzunehmen. Entsprechend wird die Steuergeräteklasse 4 im Rahmen der Lösungsfindung und Bewertung als ZSG verwendet (vgl. Kapitel 5.7). Die exakte Zuordnung von Steuergeräteklassen zu ESG oder ZSG für die Funktionskategorien Basisausstattung und optionale Ausstattung erfolgt im Rahmen der Optimierung.

# 5.7. Lösungsfindung und Bewertung inkl. optimale Lösung

Die Lösung des zuvor definierten Optimierungsmodelltyps ist mittels verschiedener Optimierungsmethoden und computerbasierten Optimierungssystemen möglich (vgl. Kapitel 4.2). Die Auswahl des Verfahrens bzw. der Methode ist abhängig vom Anwendungskontext und Komplexitätsgrad der Optimierung. Dem Forschungsvorhaben liegt dabei der Anspruch zugrunde, erarbeitete Ergebnisse im Kontext der unternehmerischen Praxis anzuwenden und anforderungsspezifisch modifizieren zu können. Ferner wird die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der im Rahmen der Modellvalidierung erzeugten Ergebnisse vorausgesetzt. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Komplexität einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur erfolgt daher die Modelllösung computerbasiert. Dazu wird MATLAB (MATrix LABoratory)<sup>30</sup> – als Standard in Praxis und Wissenschaft – ausgewählt.

## 5.7.1. Computerbasierte Lösung des Optimierungsproblems

Die Lösung des vorliegenden ganzzahligen linearen Optimierungsproblems ist eine NP31schwere Aufgabe, für die im Rahmen des Forschungsvorhabens kein effizienter Algorithmus identifiziert werden konnte. Der Grund dafür liegt darin, dass die Lösung eines solchen Optimierungsproblems über die Anwendung eines klassischen Lösungsverfahren im Operations Research (z.B. "Branch and Bound Verfahren", "Schnittebenenverfahren von Gomory" oder "Branch and Cut Verfahren") im Allgemeinen mit einem hohen, exponentiellen Rechenaufwand verbunden ist [DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 129ff.; NICKEL ET AL. 2011, S. 190ff]. Daher werden für die Lösung ganzzahliger linearer Optimierungsprobleme in der Praxis oftmals heuristische Suchverfahren angewendet [DOMSCHKE/DREXL 2011, S.128; NICKEL ET AL. 2011, S. 221; SUHL/MELLOULI 2009, S. 13f]. Der Vorteil von Heuristiken liegt darin, dass diese mit einem vertretbaren Rechenaufwand möglichst gute Lösungen ermitteln. Woraus sich auch begründen lässt, warum die Akzeptanz von Heurisiken der Experten der unternehmerischen Praxis als relativ hoch zu bewerten ist (vgl. Kapitel 5.7.2). Jedoch kann über die Anwendung von Heuristiken nicht garantiert werden, dass damit eine im mathematischen Sinne optimale Lösung identifiziert wird. Darüber hinaus besteht keine Abschätzung darüber, wie weit die gefundene beste Lösung vom mathematischen Optimum entfernt ist [DOMSCHKE/DREXL 2011, S.128; SUHL/MELLOULI 2009, S. 13]. Aufgrund der genannten Vorteile inkl. Einschätzung der Experten der unternehmerischen Praxis von Heuristiken, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ein heuristisches Suchverfahren zur computerbasierten Identifizierung einer besten Lösung hinsichtlich der kostenoptimierten Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne in MATLAB programmiert.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> MATLAB (MATrix LABoratory) ist eine Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung. Dabei dient es zur Datenanalyse, Algorithmen-Entwicklung und zur Erstellung von Modellen sowie Anwendungen und ist primär für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt [MATHWORKS 2014, o.S.].

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> "NP" ist die Menge aller nicht-deterministisch polynominal lösbaren Entscheidungsprobleme. Ein Entscheidungsproblem ist nicht-deterministisch polynominal lösbar, wenn ein (geratener) Input in polynominaler Zeit als ein solcher nachgewiesen werden kann [NICKEL et al. 2011, S. 201].

#### Inputgrößen für die Optimierungsproblemlösung

Als Inputgrößen für die computerbasierte Optimierungsproblemlösung mit MATLAB hinsichtlich der kostenoptimierten Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne, werden zwei Tabellen ("Funktionstabelle" und "Hardwaretabelle") erzeugt. Die erste Tabelle "Funktionstabelle" umfasst eine Auflistung von 100 E/E Funktionen, die auf Basis der zuvor definierten vier Funktionsklassen gemäß einer gewissen Logik generiert wurden (vgl. Abbildung 5-18). Die Struktur der Tabelle entspricht der zuvor festgelegten und beschriebenen Funktionsliste (vgl. Abbildung 5-12). Die so generierte Funktionsliste ist kein Abbild realer E/E Funktionen der unternehmerischen Praxis, sondern stellt einen exemplarischen Auszug einer repräsentablen Anzahl beispielhafter Referenzwerte dar. Die bei der Generierung der 100 E/E Funktionen zugrunde liegende Logik beinhaltet, dass die Funktionszuordnung zu den fünf Domänen gleichverteilt erfolgt (vgl. Abbildung 5-6). So umfasst die Domäne 1 "Antrieb" 20 E/E Funktionen, die Domäne 2 "Fahrwerk" 20 E/E Funktionen, die Domäne 3 "Sicherheit und Fahrerassistenz" 20 Funktionen, die Domäne 4 "Karosserie und Komfort" 20 E/E Funktionen und die Domäne 5 "Navigation und Infotainment" 20 E/E Funktionen. Zusätzlich wird jeder E/E Funktion eine dedizierte Verbaurate im Intervall von 0 bis 100 Prozent zufällig zugewiesen. Ferner werden 8 der 100 E/E Funktionen als "Industriestandard" definiert und 4 der 100 E/E Funktionen als "Entwicklungskooperation" festgelegt und zufällig auf die fünf Domänen verteilt. Gemäß der in Kapitel 5.4 erläuterten Verortungslogik werden diese 12 E/E Funktionen der Funktionskategorien "Industriestandard" und "Entwicklungskooperation" grundsätzlich auf Einzelsteuergeräte verortet und damit nicht mit in die Optimierung einbezogen (vgl. Abbildung 5-15). Somit verbleibt in Summe eine Anzahl von 88 E/E Funktionen<sup>32</sup> der Funktionskategorien "Basisausstattung" und "optionaler Ausstattung" als Inputgrößen für die Optimierung der Funktionspartitionierung auf ZSG und ESGs je Domäne: Domäne 1 "Antrieb" 18 E/E Funktionen, Domäne 2 "Fahrwerk" 19 E/E Funktionen, Domäne 3 "Sicherheit und Fahrerassistenz" 17 Funktionen, Domäne 4,, Karosserie und Komfort" 19 E/E Funktionen und Domäne 5 "Navigation und Infotainment" 15 E/E Funktionen. Die zweite Tabelle ist Inputgrößen für die Optimierung der kostenoptimierten Funktionspartitionierung entspricht der in Kapitel 5.6 hergeleiteten "Hardwaretabelle", welche die domänenspezifischen vier Steuergeräteklassen inkl. CPU, RAM, ROM, Flash und Hardwarekosten enthält (vgl. Abbildung 5-19).

#### Heuristik für die Optimierungsproblemlösung

Dem in MATLAB programmierten heuristischen Suchverfahren liegt das Ziel zugrunde die beste Lösung für eine kostenoptimierte Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne zu identifizieren. Das MATLAB Programm liest zunächst die Daten der zwei Tabellen ("Funktionstabelle" und "Hardwaretabelle") ein. Im nächsten Schritt filtert es die 100 E/E Funktionen in der Funktionstabelle gemäß der jeweiligen Domänenzugehörigkeit und generiert eine Liste von E/E Funktionen je Domäne. Darauf folgend werden die E/E Funktionen je

\_

Nach Abzug der 19 E/E Funktionen der Funktionskategorien "Industriestandard" und "Entwicklungskooperation" verbleiben für die Optimierung in den jeweiligen Domänen entsprechend eine reduzierte Anzahl von 131 E/E Funktionen der Funktionskategorien "Basisausstattung" und "optionaler Ausstattung", wodurch sich die folgende Anzahl von E/E Funktionen für die Optimierung je Domäne ergibt: Domäne 1 "Antrieb" 26 E/E Funktionen, die Domäne 2 "Fahrwerk" 28 E/E Funktionen, die Domäne 3 "Sicherheit und Fahrerassistenz" 22 Funktionen, die Domäne 4 "Karosserie und Komfort" 35 E/E Funktionen und die Domäne 6 "Navigation und Infotainment" 21 E/E Funktionen.

Domäne identifiziert, die nicht Bestandteil der Optimierung sind. D.h. alle E/E Funktionen der Funktionskategorien "Industriestandard" und "Entwicklungskooperation", die in den jeweiligen Domänen direkt auf einem ESG partitioniert und somit für die Berücksichtigung im Rahmen der Optimierung ausgeschlossen werden. Ist dieser Schritt abgeschlossen, werden alle für die Optimierung verbleibenden E/E Funktionen je Domäne identifiziert, auf Basis derer eine neue Liste von E/E Funktionen generiert wird.

Das MATLAB-Programm beinhaltet einen heuristischen Suchalgorithmus, welcher für eine frei bestimmbare Anzahl von Iterationsschleifen nach der besten Lösung je Domäne sucht (vgl. Abbildung 6-20). Die beste Lösung je Iterationsschleife ist jeweils das Minimum von Herstellkosten für jede Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Die Anzahl der möglichen Permutationen ergibt sich für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand aus dem Binomialkoeffizienten. Dieser ist eine mathematische Funktion, mit dem sich eine der Grundaufgaben der Kombinatorik lösen lässt. Der Binomialkoeffizient gibt an, auf wie viele verschiedene Arten Objekte (k) aus einer Menge (n) von verschiedenen Objekten ausgewählt werden können. Die Anzahl aller Teilmengen ergibt sich aus der Summation (vgl. Formel 5-11). Domäne 4 "Karosserie und Komfort" beinhalten mit 19 E/E Funktionen die größte Anzahl von Funktionen. Entsprechend ergibt sich daraus die notwendige Anzahl Iterationsschleifen in Höhe von  $2^{19} = 524.288$ , um alle möglichen Permutationen zu bilden und darüber die optimale Lösung zu identifizieren.

$$\sum_{k=0}^{n} {n \choose k} = {n \choose 0} + {n \choose 1} + \dots + {n \choose n} = 2^{n}$$

Formel 5-11: Berechnung des Binomialkoeffizientens.

Mit Berechnung des Binomialkoeffizienten ( $2^{19} = 524.288$ ) ergibt sich die minimale Anzahl der notwendigen Schleifen bis zur Identifikation der besten Lösung. Das Programm erzeugt für jede dieser einzelnen Schleifen eine zufällige Reihenfolge der E/E Funktionen pro Domäne. Auf Basis dieser Reihenfolge beginnt der Algorithmus die E/E Funktionen der Reihe nach auf dem ZSG zu verorten, bis die ZSG-Hardwarekapazitäten ausgelastet sind. Für das ZSG wird dabei jeweils die größtmögliche Steuergeräteklasse aus der Hardwaretabelle ausgewählt, die domänenspezifisch zur Verfügung steht ("SG 1.4" für Domäne 1 bis 3 und "SG 2.4" für Domäne 4 und 5). Alle E/E Funktionen, die innerhalb einer Schleife nicht auf dem ZSG verortet werden, werden automatisch auf ESGs partitioniert. Aufgrund der zugrundeliegenden, definierten Prämissen ergibt sich die Anzahl der ESGs je Schleife aus der Anzahl von E/E Funktionen, die nicht auf dem ZSG partitioniert (vgl. Kapitel 5.4.2). Ist eine Schleife abgeschlossen, werden für diese die Herstellkosten je Domäne über die Formel zur Kostenberechnung ausgegeben. Die Herstellkosten je Domäne ergeben sich aus den Kosten für das ZSG und den Kosten für die ESGs multipliziert mit der jeweiligen Verbaurate. Der Wert der Herstellkosten wird mit dem jeweils aktuell vorliegendem Minimum ("1. Check", vgl. Abbildung 6-20) und Maximum (,, 2. Check", vgl. Abbildung 6-20) verglichen. Ist der Wert kleiner als das aktuelle Minimum, so ist das neue Minimum identifiziert und der Wert wird als mögliche Lösung gespeichert. Ist der Wert größer als das aktuelle Minimum, aber kleiner als das aktuelle Maximum, so wird der Wert als neues Maximum gespeichert. Für den Fall, dass der Wert größer ist als das aktuelle Maximum, so wird dieser als nicht zulässiges Ergebnis verworfen. Alle Werte, die kleiner sind als die Summe aus 80 Prozent des aktuellen Minimums und 20 Prozent des aktuellen Maximums ("3. Check", vgl. Abbildung 6-20) werden als gute Lösungen in dem Lösungsvektor gespeichert.

```
🗦 for j = 1:268435256
     % get default permutation of indices 1:count
     [~,ind] = sort( rand( [count,1] ) );
     for i = 1:count
        success = CanHandle( funcZsg( ind(1:i) ), zsgHw );
        if success, continue; end
        cost = GetCost( funcZsg, deviceZsg, zsgHw, ind(1:i-1), ind(i:count), deviceEsg );
        % 1. check
        if cost < min
            min = cost;
            if debug
               disp( '-----'
               disp( min );
            end
        end
        % 2. check
        if cost > max
            max = cost;
            if debug
               disp( '----' )
               disp( max );
            end
        % 3. check: take the best indices
        if cost < (0.8*min + 0.2*max)</pre>
            bestInd = [bestInd; ind(1:i-1)];
        break:
     end
```

Abbildung 5-20: Suchalgorithmus zur Identifikation der besten Kosten für eine E/E Bordnetzarchitektur.

Die Heuristik, d.h. der Suchalgorithmus, durchläuft die Anzahl der zuvor definierten Iterationsschleifen. Für den hier vorliegenden Fall läge das optimale Ergebnis nach  $2^{28} = 268.435.256$ Iterationsschleifen vor. Allerdings kann mit den programmierten heuristischen Suchalgorithmus nicht ausgeschlossen werden, dass dedizierte Einzellösungen nicht mehrfach identifiziert werden (vgl. Abbildung 6-20). Entsprechend liefert das Programm nach Durchlauf der Schleifenanzahl  $2^{28} = 268.435.256$  zwar eine gute, suboptimale Lösung für eine kostenoptimierte Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne, jedoch nicht die mathematisch optimale Lösung. Darüber hinaus besteht keine Abschätzung darüber, wie weit die gefundene beste Lösung vom tatsächlichen mathematischen Optimum entfernt ist. Hinzu kommt, dass die mit dem MATLAB Programm erzeugten Ergebnisse nicht reproduzierbar sind, da für jede der zu durchlaufenden einzelnen Schleifen jeweils eine zufällige Reihenfolge der E/E Funktionen pro Domäne generiert wird. Nachdem mit dem programmierten heuristischen Suchverfahren die optimale Lösung für die kostenoptimierte Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne nicht identifiziert werden kann und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen nicht gegeben ist, wird dessen Verwendung zur Generierung einer Entscheidungsgrundlage bei der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur von den einbezogenen Experten der unternehmerischen Praxis als nicht nützlich und zulässig bewertet (vgl. Kapitel 5.7.2). Damit wird das zugrundeliegende Ziel des in MATLAB programmierten heuristischen Suchalgorithmus, die beste Lösung für eine kostenoptimierte Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne zu identifizieren, nicht erfüllt.

#### Exhaustionsmethode für die Optimierungsproblemlösung

Nachdem die Lösungsfindung mittels des Suchalgorithmus nicht zielführend ist, wird eine Methode ausgewählt, mit der die mathematisch optimale Lösung bzgl. der kostenoptimierten Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne identifiziert werden kann: Die "Exhaustionsmethode" (engl.: "Brute-Force-Method"). Die Exhaustionsmethode bildet den natürlichsten und einfachsten Ansatz zu einer algorithmischen Lösung des vorliegenden Optimierungsproblems, da darin alle potenziellen Lösungen, d.h. mögliche Permutationen, durchprobiert werden, bis die mathematisch optimale Lösung gefunden ist. Entsprechend eignet sich diese Methode für die Lösung des hier vorliegenden ganzzahligen einkriteriellen linearen Optimierungsproblems (vgl. Kapitel 5.1), da diese alle möglichen Permutationen in Höhe von  $2^{28} = 268.435.256$  für das vorliegende Beispiel in die Lösungsfindung einbezieht (vgl. Formel 5-11). Ferner ist die Exhaustionsmethode verhältnismäßig einfach in MATLAB zu implementieren. Jedoch ist der Aufwand an Rechenoperationen proportional zur Anzahl der zu probierenden, möglichen Optimierungsproblemlösungen (Permutationen).

Das MATLAB Programm liest zunächst die Daten der zwei Tabellen ("Funktionstabelle" und "Hardwaretabelle") ein. Im nächsten Schritt filtert es die 100 E/E Funktionen in der Funktionstabelle gemäß der jeweiligen Domänenzugehörigkeit und generiert eine Liste von E/E Funktionen je Domäne. Darauf folgend werden die E/E Funktionen je Domäne identifiziert, die nicht Bestandteil der Optimierung sind. Alle E/E Funktionen der Funktionskategorien "Industriestandard" und "Entwicklungskooperation", werden in den jeweiligen Domänen direkt auf einem ESG partitioniert und somit für die Berücksichtigung im Rahmen der Optimierung ausgeschlossen. Ist dieser Schritt abgeschlossen, werden alle für die Optimierung verbleibenden E/E Funktionen je Domäne identifiziert, auf Basis derer eine neue Liste von E/E Funktionen generiert wird.

Zur Erzeugung aller möglichen Permutationen (2<sup>19</sup> = 524.288) generiert das MATLAB-Programm Bitvektoren (vgl. Formel 5-11). Die Bits entsprechen dabei der Anzahl von E/E Funktionen je Domäne und werden von links nach rechts der Reihe nach durchnummeriert, beginnend mit Position 0. Die Bitvektoren sind demnach endlich und enthalten an jeder Position '0' oder '1'. Das Programm sucht über Iterationsschleifen nach der besten (kostenoptimalen) Lösung für die Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne. Die beste Lösung je Iterationsschleife ist jeweils das Minimum von Herstellkosten für jede Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Mit Berechnung des Binomialkoeffizienten (2<sup>19</sup> = 524.288) ergibt sich die minimale Anzahl der notwendigen Schleifen bis zur Identifikation der besten Lösung (vgl. Abbildung 5-21).

```
% loop 1: random order of functions for ZSG
while true
     bitVect = bitVect.Next();
     if isempty( bitVect ), break; end
     if debug
        irun = irun + 1;
        if mod( irun, 1000 ) == 0
            disp( irun / 1000 )
        end
     end
     indZsg = bitVect.Bits;
     indEsq = ~bitVect.Bits;
     success = CanHandle( funcZsg( indZsg ), zsgHw );
     if ~success, continue; end
     cost = GetCost( funcZsg, deviceZsg, zsgHw, indZsg, indEsg, deviceEsg );
     % 1. check
     if cost < minCost
        minCost = cost;
        minZsg = indZsg;
        minEsg = indEsg;
        if debug
            disp('----')
            disp(minCost);
        end
     end
     % 2. check
     if cost > maxCost
        maxCost = cost;
        if debug
            disp('----')
            disp( maxCost );
        end
     end
```

Abbildung 5-21: Exhaustionsmethode zur Identifikation der optimalen Kosten für eine E/E Bordnetzarchitektur.

Das Programm erzeugt für jede einzelne Schleife einen neuen Bitvektor für die E/E Funktionen pro Domäne (vgl. Abbildung 5-21). Auf Basis dieses Bitvektors beginnt der Algorithmus die E/E Funktionen auf dem ZSG zu verorten, bis die ZSG-Hardwarekapazitäten ausgelastet sind. Für das ZSG wird dabei jeweils die größtmögliche Steuergeräteklasse aus der Hardwaretabelle ausgewählt, die domänenspezifisch zur Verfügung steht ("SG 1.4" für Domäne 1 bis 3 und "SG 2.4" für Domäne 4 und 5). Alle E/E Funktionen, die innerhalb einer Schleife nicht auf dem ZSG verortet werden, werden automatisch auf ESGs partitioniert. Aufgrund der definierten Prämissen ergibt sich die Anzahl der ESGs je Schleife aus der Anzahl von E/E Funktionen, die

nicht auf dem ZSG partitioniert (vgl. Kapitel 5.4.2). Ist eine Schleife abgeschlossen, werden für diese die Herstellkosten je Domäne über die Formel zur Kostenberechnung ausgegeben. Die Herstellkosten je Domäne ergeben sich aus den Kosten für das ZSG und den Kosten für die ESGs multipliziert mit der jeweiligen Verbaurate. Der Wert der Herstellkosten wird mit dem jeweils aktuell vorliegenden Minimum ("1. Check", vgl. Abbildung 5-21) und Maximum ("2. Check", vgl. Abbildung 5-21) verglichen. Ist der Wert kleiner als das aktuelle Minimum, so ist das neue Minimum identifiziert und der Wert wird als mögliche Lösung gespeichert. Ist der Wert größer als das aktuelle Minimum, aber kleiner als das aktuelle Maximum, so wird der Wert als neues Maximum gespeichert. Für den Fall, dass der Wert größer ist als das aktuelle Maximum, so wird dieser als nicht zulässiges Ergebnis verworfen. (vgl. Abbildung 5-21).

Das Programm ist beendet, wenn für jede mögliche Permutation je Domäne in einem Bitvektor abgebildet und gemäß dem oben beschrieben Prüfschema mit dem jeweils aktuellen Minimum und Maximum verglichen wurde. Als Ergebnis wird die mathematisch optimale Lösung bzgl. der kostenoptimierten Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne ausgegeben. Für den hier vorliegenden Fall liegt das optimale Ergebnis nach  $2^{28} = 268.435.256$  Iterationsschleifen vor. Entsprechend berechnet das Programm nach Durchlauf dieser Schleifenanzahl die optimalen Herstellkosten je Domäne und addiert dieses mit den Einmalaufwänden für alle darin partitionierten E/E Funktion (vgl. Abbildung 5-22).

	ZSG Funktionen	HK <sub>Dx,ZSG</sub>	ESG Funktionen	HK <sub>Dx,ESG</sub>
Domäne Antrieb D <sub>1</sub>	3, 4, 20, 21, 32, 46, 50, 89, 92		11, 23, 35, 43, 45, 53, 68, 80, 97, 71, 87	
	Summe: 9 ZSG Funktionen	20,00€	Summe: 11 ESG Funktionen	26,25€
Domäne Fahrwerk D <sub>2</sub>	6, 9, 16, 19, 22, 51, 72, 79, 93		12, 18, 30, 48, 58, 60, 69, 91, 96, 100, 26	
	Summe: 9 ZSG Funktionen	20,00€	Summe: 11 ESG Funktionen	24,20€
Domäne Sicherheit und	10, 25, 29, 33, 52, 54, 63, 70, 88		14, 24, 27, 49, 67, 77, 81, 83, 1, 36, 98	
Fahrerassistenz D <sub>3</sub>	Summe: 9 ZSG Funktionen	20,00€	Summe: 11 ESG Funktionen	32,25€
Domäne Karosserie und Komfort D₄	7, 13, 31, 40, 44, 56, 65, 84		2, 28, 37, 41, 64, 73, 75, 82, 85, 86, 95, 55	
und Komforf D <sub>4</sub>	Summe: 8 ZSG Funktionen	16,00€	Summe: 12 ESG Funktionen	53,52€
Domäne Navigation	8, 15, 17, 42, 61, 74, 90		5, 34, 39, 59, 62, 78, 94, 99, 38, 47, 57, 66, 76	
und Infotainment D <sub>5</sub>	Summe: 7 ZSG Funktionen	16,00€	Summe: 13 ESG Funktionen	73,12€
E/E BNA K <sub>BNA,HK</sub>	42 Funktionen	92,00€	58 Funktionen	209,34€

D<sub>1</sub>: Domäne 1; D<sub>2</sub>: Domäne 2; D<sub>3</sub>: Domäne 3; D<sub>4</sub>: Domäne 4; D<sub>5</sub>: Domäne 5

ZSG: Zentrales Steuergerät; ESG: Einzelsteuergerät; E/E BNA: E/E Bordnetzarchitektur

HK<sub>Dx,ZSG</sub>: ZSG Herstellkosten Domäne x; HK<sub>Dx,ESG</sub>: ESG Herstellkosten Domäne x; K<sub>BNA,HK</sub>: Herstellkosten E/E BNA

Abbildung 5-22: Optimale optimalen Herstellkosten je Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung.

Daraus lassen sich die optimalen Kosten für die gesamte automotive E/E Bordnetzarchitektur (K<sub>BNA</sub>) über die Aufsummierung der Gesamtkosten jeder einzelnen Domäne berechnen (vgl. Formel 5-10). Als Berechnungsbasis wird eine repräsentative Gesamtstückzahl von einer Millionen automotiver E/E Bordnetzarchitekturen und einer Entwicklungskostenpauschale

(Entwicklungskosten für "*Basissoftware*", "*Applikationssoftware*" sowie "*Test und Absicherung*", vgl. Abbildung 5-8) in Höhe von 500.000 Euro je E/E Funktion angenommen. Daraus ergeben sich Gesamtkosten in Höhe von *K*<sub>BNA,opt</sub> = 335,34 *Mio*. € für die kostenoptimale Partitionierung von E/E Funktionen auf ein ZSG und ESGs in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur für das vorliegende Beispiel (vgl. Abbildung 5-23).

	ZSG Funktionen	ESG Funktionen	EK <sub>Dx</sub> + HK <sub>Dx</sub>		
Domäne Antrieb D <sub>1</sub>	3, 4, 20, 21, 32, 46, 50, 89, 92	11, 23, 35, 43, 45, 53, 68, 80, 97, 71, 87	56,25 Mio.€		
	Summe: 9 ZSG Funktionen	Summe: 11 ESG Funktionen			
Domäne Fahrwerk D <sub>2</sub>	6, 9, 16, 19, 22, 51, 72, 79, 93	12, 18, 30, 48, 58, 60, 69, 91, 96, 100, 26	54,20 Mio. €		
	Summe: 9 ZSG Funktionen	Summe: 11 ESG Funktionen			
Domäne Sicherheit und Fahrerassistenz D <sub>3</sub>	10, 25, 29, 33, 52, 54, 63, 70, 88	14, 24, 27, 49, 67, 77, 81, 83, 1, 36, 98	62,25 Mio. €		
1 dill ci d33131ci12 D3	Summe: 9 ZSG Funktionen	Summe: 11 ESG Funktionen			
Domäne Karosserie und Komfort D₄	7, 13, 31, 40, 44, 56, 65, 84	2, 28, 37, 41, 64, 73, 75, 82, 85, 86, 95, 55	79,52 Mio. €		
	Summe: 8 ZSG Funktionen	Summe: 12 ESG Funktionen			
Domäne Navigation	8, 15, 17, 42, 61, 74, 90	5, 34, 39, 59, 62, 78, 94,			
und Infotainment D <sub>5</sub>	Summe: 7 ZSG Funktionen	99, 38, 47, 57, 66, 76	83,12 Mio. €		
		Summe: 13 ESG Funktionen			
E/E BNA K <sub>BNA</sub>	Summe: 42 ZSG Funktionen	Summe: 58 ESG Funktionen	335,34 Mio. €		

 $D_1$ : Domäne 1;  $D_2$ : Domäne 2;  $D_3$ : Domäne 3;  $D_4$ : Domäne 4;  $D_5$ : Domäne 5; ZSG: Zentrales Steuergerät; ESG: Einzelsteuergerät; E/E BNA: E/E Bordnetzarchitektur; HK $_{Dx,ZSG}$ : ZSG Herstellkosten Domäne x; HK $_{Dx,ESG}$ : ESG Herstellkosten Domäne x; EK $_{Dx,ZSG}$ : ZSG Entwicklungskosten Domäne x; K $_{BNA}$ : Gesamtkosten E/E BNA

Abbildung 5-23: Optimale Gesamtkosten (Herstellkosten und Einmalaufwände) einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung.

Die mit mittels der in MATLAB programmierten Exhaustionsmethode berechnete Lösung für eine kostenoptimale Partitionierung von E/E Funktionen auf ein ZSG und ESGs je Domäne wird von den Experten der unternehmerischen Praxis als valide Entscheidungsgrundlage für eine Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur anerkannt (vgl. Abbildung 6-21). Jedoch ist der Aufwand an Rechenoperationen proportional zur Anzahl der zu probierenden, möglichen Optimierungsproblemlösungen (Permutationen) und ist daher aus Zeiteffizienzgründen nur für eine beschränkt hohe Anzahl von Permutationen sinnvoll anwendbar.

# 5.7.2. Validierung des Optimierungsmodells

Der notwendige Wissens- und Erkenntnisgewinn, als Grundlage für die Optimierungsmodellbildung inkl. der Entwicklung des computerbasierten Optimierungsmodells und die Optimierungsmodellvalidierung, erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens durch enge Einbeziehung verschiedener Experten (vgl. Abbildung 6-23). Die Identifikation und Auswahl der notwendigen Experten basierte auf den der Modellierung zugrundeliegenden Fragestellungen und Zielen (vgl. Kapitel 5.3).

Um ein tiefes Verständnis für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Entwicklung inkl. der E/E Bordnetzarchitektur zu gewinnen, wurden Spezialisten für E/E Architekturgestaltung und E/E Komponentenentwicklung, E/E Funktionsarchitektur, E/E Funktionsentwicklung, Softwarearchitektur/AUTOSAR ausgewählt. Für ein übergreifendes Verständnis und Abbildung der Aufwandsseite wurden Spezialisten für Einkauf von Halbleitern, Cost Engineering Technologien und Halbleiterbaukasten mit einbezogen. Vervollständigt wurde der Expertenkreis der unternehmerischen Praxis durch einen Fahrzeugteilprojektleiter E/E für ein detailliertes Verständnis der Spezifika von Fahrzeugprojekten bzw. Baureihen. Vor dem Ziel eine gewisse neutrale Außensicht mit in die Modellierung des Optimierungsmodells einfließen zu lassen, wurden darüber hinaus drei Vertreter von zwei internationalen Strategieberatungen mit Spezialisierung auf die Automobilindustrie in den Expertenkreis aufgenommen (vgl. Abbildung 5-24). Aus Gründen der Geheimhaltungspflicht unterbleiben die Nennung von Namen, Unternehmen bzw. Unternehmensberatungshäusern sowie genaue Funktions- und Tätigkeitsbeschreibungen im Rahmen des Forschungsvorhabens.

Tei	Inehmer Experten-Workshops und Experten-Interviews
7 Teilnehmer 1:	Spezialist für Einkauf von Halbleitern eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 2:	Spezialist für Cost Engineering Technologien eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 3:	Spezialist für E/E Architekturgestaltung eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 4:	Spezialist für E/E Komponentenentwicklung eines deutschen OEMs
Teilnehmer 5:	Spezialist für E/E Funktionsarchitektur eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 6:	Spezialist für E/E Funktionsentwicklung eines deutschen OEMs
Teilnehmer 7:	Spezialist für Softwarearchitektur/AUTOSAR eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 8:	Fahrzeugteilprojektleiter für E/E eines deutschen OEMs
Teilnehmer 9:	Spezialist für Halbleiterbaukasten eines deutschen OEMs
Teilnehmer 10:	Principal einer internationalen Strategieberatung
7 Teilnehmer 11:	Partner einer internationalen Strategieberatung
Teilnehmer 12:	Partner einer internationalen Strategieberatung

Abbildung 5-24: Liste der Teilnehmer an Experten-Workshops und Experten-Interviews, eigene Darstellung.

Mit den ausgewählten Experten wurden sechs aufeinander aufbauende Workshops durchgeführt. Dazu wurden die Experten in zwei Teams eingeteilt (vgl. Abbildung 5-25). Die Aufteilung der Experten in zwei Teams erfolgte vor den zwei Zielstellungen, die jeweiligen Fachkenntnisse und Expertisen ideal für den Wissens- und Erkenntnisgewinn nutzen zu können und eine gewisse gegenseitige Kontrolle und ein Gleichgewicht bei der Erarbeitung und Bewertung der Ergebnisse gemäß dem "*Checks and Balances Prinzip*" zu gewährleisten. Das Team 1, bestehend aus sechs Experten, nahm an den Workshops I, II, III, IV, und VI teil. Das Team 2, bestehend aus sechs Experten, nahm an den Workshops IV, V und VI teil (vgl. Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25). Die zwei Teams setzten sich wie folgt zusammen:

• *Team 1:* Spezialist E/E Architekturgestaltung, Spezialist E/E Komponentenent-wicklung, Spezialist E/E Funktionsarchitektur, Spezialist E/E Funktionsentwicklung, Spezialist Softwarearchitektur/AUTOSAR, Principal internationale Strategieberatung.

• **Team 2:** Spezialist Einkauf Halbleiter, Spezialist Cost Engineering Technologien, Fahrzeugteilprojektleiter E/E, Spezialist Halbleiterbaukasten, Partner internationale Strategieberatung, Partner internationale Strategieberatung.

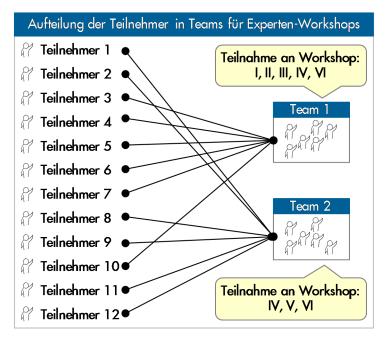


Abbildung 5-25: Zuordnung der Teilnehmer auf Teams inkl. Experten-Workshop, eigene Darstellung.

Die sechs aufeinander aufbauenden Workshops wurden mit dem Ziel durchgeführt, über mehrere Iterationsschleifen sukzessive den notwendigen Wissens- und Erkenntnisgewinn zu steigern und darüber die Modellierung der Bestandteile des Optimierungsmodells gemäß den zugrundeliegenden Zielen durchführen zu können (vgl. Kapitel 5.3). Wobei die jeweiligen Workshop-Ergebnisse im Nachgang unter Einbeziehung von semistrukturierten Experteninterviews aufbereitet wurden. Jeder der sechs Workshops hatte dabei schwerpunktmäßig ein dediziertes Thema zum Gegenstand (Abbildung 5-26):

- *Workshop I:* Gestaltungsansätze von E/E Bordnetzarchitekturen.
- *Workshop II*: Spezifika von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen.
- *Workshop III:* Spezifika von automotiven E/E Funktionen.
- Workshop IV: Modellbeschreibung.
- Workshop V: Festlegung der Inputgrößen inkl. Datenbeschaffung.
- Workshop VI: Lösungsfindung und Lösungsbewertung.

Im Fokus von Workshop I mit Team 1 standen Gestaltungsansätze automotiver E/E Bordnetzarchitekturen. Ziel war dabei ein tiefes Verständnis bestehender Gestaltungsansätze sowie
deren Charakteristika zu gewinnen. Die Ergebnisse flossen sowohl in die grundlegende
Begriffsdefinition und Bewertung der Gestaltungsansätze automotiver E/E Bordnetzarchitekturen als auch die Modellierung des Optimierungsmodells ein (vgl. Kapitel 3.5 und Kapitel
5). Betrachtungsgegenstand des Workshops II mit Team 1 waren die Spezifika von automotiven
E/E Bordnetzarchitekturen, die insbesondere für die Partitionierung von E/E Funktionen von
Relevanz sind. Der Workshop III mit Team 1 beschäftigte sich mit den entsprechenden
Spezifika von E/E Funktionen. Der darauf gewonnene Wissens- und Erkenntnisgewinn ging in

die Modellierung des gesamten Optimierungsmodells ein. Auf den Wissens- und Erkenntnisgewinn der ersten drei Workshops setzte Workshop IV mit beiden Teams auf. Dessen Gegenstand war die Definition und dedizierte Beschreibung der Optimierungsmodellelemente als Grundlage für das deskriptive Modell. Workshop V mit Team 2 beschäftigte sich mit der Definition und Bestimmung der notwendigen Inputgrößen für das Optimierungsmodell, d.h. der Datenbeschaffung. Nachdem der gesamte Input für das Optimierungsmodell zusammengetragen wurde und die Optimierungsmodellbildung abgeschlossen war ist, folgte im Workshop VI mit beiden Teams die Lösungsfindung und -bewertung auf Basis des in MATLAB implementierten Optimierungsmodells. Gegenstand dieses Workshops war, das Ergebnis des Optimierungsmodells für die E/E Funktionspartitionierung in einer E/E Bordnetzarchitektur zu überprüfen und zu validieren. Aus diesem Workshop ging als Ergebnis die allgemeine Übereinstimmung der Experten hervor, dass im Sinne der Forschungseffizienz eine weitere Iterationsschleife zur Optimierungsmodellüberarbeitung nicht mehr sinnvoll ist, da eine weitere Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn als nicht nutzenstiftend bewertet wurde und das Ergebnis als Entscheidungsgrundlage bei der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur von adäquatem Nutzen ist.

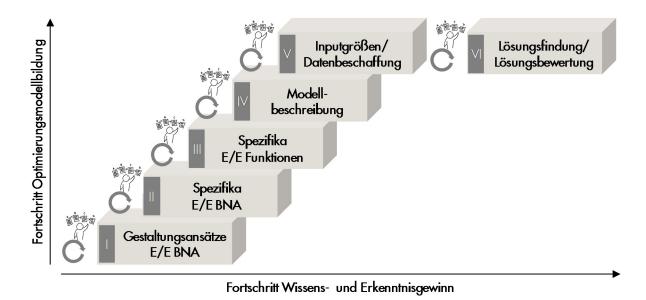


Abbildung 5-26: Experten-Workshops zur Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn sowie Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung.

Unterstützend zur Bewertung der Modellreife und -vollständigkeit wurden Bewertungskriterien mit den Experten definiert, die ebenfalls als Entscheidungsgrundlage in die Modellbewertung in Workshop VI mit einfließen (vgl. Abbildung 5-27). Die Bewertungskriterien basieren dabei auf den dem Optimierungsmodell zugrunde gelegten Zielen (vgl. Kapitel 5.3). Mit dem ersten Bewertungskriterium wurde nach der Erfüllung des übergreifenden Ziels gefragt, d.h. der Modellierung und kostenseitigen Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können. Darüber hinaus wurde mit dem zweiten und dritten Bewertungskriterium geprüft, ob die Befähigung des baureihenübergreifenden Einsatzes der automotiven E/E Bordnetzarchitektur erzielt und die Wiederverwendung von E/E Funktionen, Technologien und Einsatz von Standards in der E/E Bordnetzarchitektur ermöglicht wird. Ferner wurde mit dem vierten Bewertungskriterium nach einer grundsätzlichen Änderbarkeit bzw. Integrationsfähigkeit hinsichtlich bestehender und zusätzlicher E/E Funktionen ("Update-

und Upgradebarkeit") in der erzeugten E/E Bordnetzarchitektur gefragt. Mit dem fünften Bewertungskriterium wurde zur Diskussion gestellt, ob mit der erfolgten Gestaltung der E/E Bordnetzarchitektur Reduzierungspotentiale bzgl. Entwicklungs- und Herstellkosten gehoben werden können. Mit den Bewertungskriterien sechs und sieben wurde abschließend überprüft, ob eine weitere Iteration im Sinne der Forschungseffizienz sinnvoll ist, zum einen hinsichtlich der Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn und zum anderen bzgl. der einer möglichen Verbesserung der Optimierungsmodellbildung. Alle sieben Kriterien wurden im Rahmen des Workshops VI positiv bestätigt, wodurch das erarbeitete Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur als vollständig und validiert bewertet gilt. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass das Optimierungsmodell einen normativen Charakter aufweist, indem es für die abgebildete Klasse von Problemsachverhalten – der Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur – konkrete Gestaltungsempfehlungen korrekt beinhaltet. Dadurch hat das Optimierungsmodell Relevanz für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Baukastenentwicklung und ist damit ein valider Lösungsvorschlag der ersten Forschungsleitenden Fragestellung.

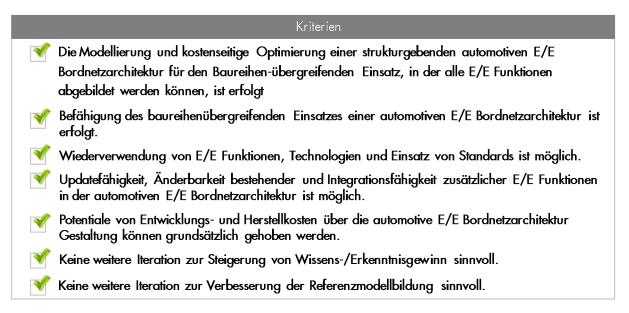


Abbildung 5-27: Kriterien zur Bewertung des Fortschritts der Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung.

## 5.8. Zusammenfassung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Erarbeitung eines Lösungsvorschlags zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellung, welche sich mit der Gestaltung einer kostenoptimierten automotiven E/E Bordnetzarchitektur befasst. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird ein Optimierungsmodell erarbeitet, welches bei der Gestaltung einer E/E Bordnetzarchitektur unterstützt. Der verfolgte Ansatz ist die Kostenoptimierung für die Partitionierung von E/E Funktionen in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Das dabei zugrundeliegende Entscheidungsproblem – die kostenoptimale Partitionierung von E/E Funktionen in einer E/E Bordnetzarchitektur – lässt sich durch ein mathematisches Modell lösen und ist somit als Optimierungsproblem kategorisiert. Die Erarbeitung des Optimierungsmodells orientiert sich am Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research, welches sechs Phasen umfasst: "Problemidentifikation und -analyse", "Zieldefinition", "Deskriptives

Modell", "Mathematisches Modell", "Datenbeschaffung" und "Lösungsfindung und -bewertung".

### Problemidentifikation und -analyse

Aus der Problemidentifikation und -analyse des Betrachtungsgegenstands der E/E Entwicklung resultiert der Bedarf einer problemorientierten Gestaltung inkl. der kostenseitigen Optimierung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz. Innerhalb der E/E Bordnetzarchitektur sind sowohl bestehende als auch neue E/E Funktionen abzubilden. Ferner sind dabei zentrale endogene und exogene Herausforderungen und Trends der automotiven E/E Entwicklung zu berücksichtigen.

### Zieldefinition

Die Problemidentifikation und -analyse führt zum ersten Forschungsziel des Forschungsvorhabens: Die Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt und Kosten innerhalb der automotiven E/E Entwicklung. Als Lösungsvorschlag dazu erfolgt die Modellierung und kostenseitige Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können. Dabei verfolgte Teilziele sind: Die Befähigung des baureihenübergreifenden Einsatzes, die Wiederverwendung von E/E Funktionen, Technologien und Einsatz von Standards, die Änderbarkeit bestehender und Integrationsfähigkeit zusätzlicher E/E Funktionen ("*Updateund Upgradebarkeit*"), die Hebung der Reduzierungspotentiale von Entwicklungs- und Herstellkosten.

### Deskriptives Modell

Das Deskriptive Modell beschreibt sämtliche Elemente und erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens in zwei Abschnitten:

**Abschnitt 1** – Definition und Beschreibung der Domänenarchitektur als Struktur für die E/E Bordnetzarchitektur, die dabei unterstützt die definierten Ziele zu erreichen:

- Die automotive E/E Bordnetzarchitektur umfasst fünf Domänen.
- Jede Domäne umfasst einen domänenspezifischen, baureihenübergreifenden E/E Funktionsumfang.
- Eine E/E Bordnetzarchitektur Domäne besteht aus einem Zentralen Steuergerät (ZSG) und mehreren Einzel-Steuergeräten (ESG), woraus eine Master-Slave-Relation sowie eine grundlegende Skalierbarkeit resultieren.
- Für ZSG und ESG werden AUTOSAR-konforme skalierbare Standard-Steuergeräte eingesetzt.
- Die E/E Funktionsentwicklung erfolgt gemäß AUTOSAR Standard.

**Abschnitt 2** – Detaillierung des Betrachtungsgegenstands der Optimierungsmodellbildung inkl. Nebenbedingungen (Restriktionen) als Basis für die mathematische Beschreibung und Lösung des Problemsachverhalts zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung.

### Mathematisches Modell

Das erarbeitete mathematische Modell ist ein einkriterielles deterministisches Optimierungsmodell. Gegenstand der Optimierung ist dabei die Entscheidung über die Verortung der E/E Basisfunktionen auf dem ZSG oder ESG einer Domäne auf Basis einer Kostenbetrachtung. Die Verortung der übrigen Funktionskategorien erfolgt gemäß den zuvor gesetzten Prämissen. Die Optimierung wird mittels eines in MATLAB programmierten Algorithmus vorgenommen. Dabei erfolgt die Optimierung jeweils für jede Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur separat. Die Ergebnisse der Optimierung fließen entsprechend in die Berechnung der Gesamtkosten einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur ein.

### Datenbeschaffung

Die für das mathematische Modell benötigten Eingangsgrößen (Daten) sind – analog zum Vorgehen in der unternehmerischen Praxis – im Rahmen des Forschungsvorhabens mit den verantwortlichen Fachstellen (CoCs) in den entwickelnden Abteilungen sowie dem Einkauf erhoben und plausibilisiert worden.

Um das Ziel – die Modellierung und kostenseitige Optimierung einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz, in der alle E/E Funktionen abgebildet werden können – zu erreichen, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens branchentypische Durchschnittswerte für Funktionsklassen und Steuergeräteklassen über eine Logik zur Generierung von "*Referenzwerten*" erhoben, die zur Validierung des Optimierungsmodells herangezogen werden. Die Höhe der ermittelten Hardware-Bedarfe jeder einzelnen Funktionsklasse entspricht den ermittelten Durchschnittswerten vergleichbarer E/E Funktionen der automotiven Praxis.

Im zweiten Schritt der Datenbeschaffung für das Mathematische Modell sind Steuergeräteklassen je Domäne festzulegen. Für diese Steuergeräteklassen müssen zum einen die adäquaten Hardware-Komponenten (CPU, Flash, RAM, ROM) und zum anderen die Kosten ermittelt werden. Aufgrund des großen Angebots an µControllern mit unterschiedlichen Ausprägungen und Eignungen für den automotiven Einsatz, wird zur Ermittlung der Steuergeräteklassen im Rahmen der Expertenworkshops ein vereinfachender Ansatz entwickelt, der die Festlegung einer sinnvollen Anzahl von Steuergeräteklassen je E/E Bordnetzarchitektur Domäne vorsieht. Für diese Anzahl von Steuergeräteklassen werden jeweils die Hardware-Komponenten inkl. Kosten auf Basis ermittelter Durchschnittswerte in der automotiven Praxis bestimmt.

### Lösungsfindung und Bewertung inkl. optimaler Lösung

Die Lösung des definierten Optimierungsmodelltyps ist mittels verschiedener Optimierungsmethoden und computerbasierter Optimierungssysteme möglich. Die Auswahl des Verfahrens bzw. der Methode ist abhängig vom Anwendungskontext und Komplexitätsgrad der Optimierung. Dem Forschungsvorhaben liegt der Anspruch zugrunde, die erarbeiteten Ergebnisse im Kontext der unternehmerischen Praxis anzuwenden und anforderungsspezifisch modifizieren zu können. Ferner ist eine Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der im Rahmen der Modellvalidierung erzeugten Ergebnisse Voraussetzung. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Komplexität einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur erfolgt zunächst der Versuch einer Modelllösung mittels eines computerbasierten programmierten heuristischen Suchalgorithmus. Nachdem mit dem heuristischen Suchverfahren die optimale Lösung für die

kostenoptimierte Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne nicht identifiziert werden kann und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen nicht gegeben ist, wird dessen Verwendung zur Generierung einer Entscheidungsgrundlage bei der Gestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur von den einbezogenen Experten der unternehmerischen Praxis als nicht nützlich und zulässig bewertet.

Nachdem die Lösungsfindung mittels des Suchalgorithmus nicht zielführend ist, wird eine Methode ausgewählt, mit der die mathematisch optimale Lösung bzgl. der kostenoptimierten Funktionspartitionierung auf ein ZSG und ESGs je Domäne identifiziert werden kann: Die "Exhaustionsmethode" (engl.: "Brute-Force-Method"). Die Exhaustionsmethode bildet den natürlichsten und einfachsten Ansatz zu einer algorithmischen Lösung des vorliegenden Optimierungsproblems, da darin alle potenziellen Lösungen, d.h. mögliche Permutationen, durchprobiert werden, bis die mathematisch optimale Lösung gefunden ist. Entsprechend eignet diese Methode für die Lösung des hier vorliegenden ganzzahligen einkriteriellen linearen Optimierungsproblems, da diese alle möglichen Permutationen in Höhe von 2<sup>28</sup> = 268.435.256 für das vorliegende Beispiel in die Lösungsfindung einbezieht (vgl. Formel 5-11). Ferner ist die Exhaustionsmethode verhältnismäßig einfach in MATLAB zu implementieren. Jedoch ist der Aufwand an Rechenoperationen proportional zur Anzahl der zu probierenden, möglichen Optimierungsproblemlösungen (Permutationen) und ist daher aus Zeiteffizienzgründen nur für eine beschränkt hohe Anzahl von Permutationen sinnvoll anwendbar.

### Validierung des Referenzmodells

Die Bewertung des Optimierungsmodells zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur auf Relevanz und Vollständigkeit erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens durch enge Einbeziehung von Experten der unternehmerischen Praxis, d.h. der automotiven E/E Entwicklung und internationaler Strategieberatungen. Nach iterativer Überarbeitung der Optimierungsmodellinhalte im Rahmen von sechs Workshops folgt die Modellvalidierung. Die dazu definierten sieben Bewertungskriterien basieren dabei auf den dem Optimierungsmodell zugrundliegenden Zielen. Alle sieben Kriterien werden im Rahmen des Workshop VI durch die Experten positiv bestätigt, wodurch das erarbeitete Optimierungsmodell zur Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur als vollständig und validiert bewertet wird. Demgemäß hat das Optimierungsmodell Relevanz für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Bordnetzarchitekturgestaltung und ist damit ein valider Lösungsvorschlag zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung.

### Beitrag

Der in diesem Kapitel geschaffene Beitrag für die unternehmerischen Praxis der automotiven E/E Entwicklung sowie für die Forschung und Wissenschaft, besteht in der Modellierung eines Optimierungsmodells für die Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Eine Darstellung in dieser Form ist bisher nicht im wissenschaftlichen Schrifttum vorhanden. Mit dem Optimierungsmodell wird damit ein Lösungsvorschlag für eine durchgängige, baureihenübergreifende Gestaltung von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen geschaffen, als Grundlage zur gezielten Umsetzung differenzierender Kundenwünsche und weiterer funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen aus exogenen und endogenen Umwelteinflüssen z.B. in Form von automotiven E/E Baukästen.

Darüber hinaus wird mit dem Optimierungsmodell ein Ansatz dafür entwickelt, wie eine konsequente Ausgestaltung von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen ermöglicht werden dadurch langfristig Reduzierungspotentiale hinsichtlich Entwicklungskosten zu heben. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, das Optimierungsmodell für die Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur eine Gestaltungsgrundlage von E/E Bordnetzarchitekturen für einen baureihenübergreifenden Einsatz im Rahmen der unternehmerischen Praxis der automotiven E/E Entwicklung bildet.

### Ausblick und Diskussion des gewählten Kostenmodells

Das dem Optimierungsmodell zugrunde gelegte Kostenmodell berücksichtigt sämtliche Kosten einer E/E Funktion für die Phasen der Entwicklung, Implementierung sowie Test- und Absicherung auf Teil- und Gesamtsystemebene innerhalb eines V-Modells³³ (vgl. Abbildung 5-28). Damit werden alle Kosten von der Funktionsspezifikation bis zur Serienreife abgedeckt. Zusätzlich werden z.B. kostensenkende Einflussfaktoren auf Einmalaufwände berücksichtigt, wie der Einsatz von Industriestandards oder von unterschiedlichen Kooperationstypen (vgl. Kapitel 5.4.1). Erhoben und dokumentiert werden die Kosten, Einflussfaktoren, etc. je E/E Funktion mit Hilfe der dafür erarbeiteten Funktionsliste (vgl. Abbildung 5-12).

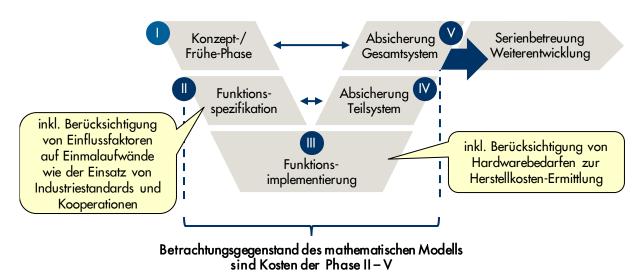


Abbildung 5-28: Betrachtungsgegenstand des Kostenmodells zur Funktionspartitionierung, eigene Darstellung.

Nicht im Kostenmodell beinhaltet sind Einmalaufwände für die erste Phase im V-Modell, der Konzept- bzw. Frühen-Phase der E/E Funktionsentwicklung. Des Weiteren nicht enthalten sind die nach "*Start of Production"* (SOP) anfallenden Kosten, z.B. für die Qualitätssicherung innerhalb der Phase der Serienbetreuung oder Einmalaufwände für die E/E Funktionsweiterentwicklung, welche dem V-Modell nachgelagert ist (vgl. Abbildung 5-28).

Das V-Modell ist ein phasenorientiertes Vorgehensmodell, bei welchem jeder konstruktiven Phase eine Verifikations- oder Validierungsphase gegenübersteht. Innerhalb der automotiven E/E Funktionsentwicklung ist dieses aufgrund der strikten Systemorientierung hilfreich, um z.B. die Anforderungsspezifikation auf Teiloder Gesamtsystemebene inkl. der Verknüpfung mit der jeweiligen Umsetzung in Software- und Hardwareumfänge durchzuführen. Das hier abgebildete V-Modell orientiert sich am Standard V-Modell XT (vgl. Abbildung 5-28).

Die Auswahl der im Kostenmodell abgebildeten Kosten wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens gezielt und sogfältig getroffen: Die Einmalaufwände für die erste Phase im V-Modell – d.h. Kosten für die Konzeptarbeit in der Frühen-Phase – stellen keine sinnstiftende Inputgröße für das mathematische Modell dar. Mit dem Optimierungsmodell zur E/E Funktionspartitionierung ist ein Werkzeug entwickelt worden, um in der Frühen-Phase eine Kostenabschätzung für die nachfolgenden Entwicklungsschritte zu treffen und ist somit selbst Bestandteil der Konzeptphase und Entscheidungsgrundlage innerhalb dieser. Das mit dem Optimierungsmodell generierte Ergebnis ist daher sowohl Ausgangspunkt für die übergreifende Konzeption der automotiven E/E Bordnetzarchitektur, als auch für alle darin enthaltenen Teilsysteme, d.h. für einzelne E/E Funktionen und E/E Funktionscluster.

Die Kosten für die Serienbetreuung – d.h. Kosten für Betrieb, Wartung und Qualitätssicherung einer E/E Funktion fallen innerhalb der Phase von Produktionsbeginn bis -ende und darüber hinaus an. Diese Kosten sind i.d.R. unabhängig von der Funktionspartitionierung. Sie entstehen etwa für die Qualitätssicherung von Daten wie Real Time Traffic Information (RTTI) oder Point of Interest (POI). Weitere Beispiele sind Betrieb und Wartung der IT-Infrastruktur inkl. der darin enthaltenen Systeme, Datenbanken und Schnittstellen. Die Kosten für die Weiterentwicklung von Funktionen E/Ewerden im Rahmen Forschungsvorhabens als nicht wesentlich für die initiale Konzeptgestaltung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur bewertet. Wobei eine Ausnahme identifiziert wurde: In der Weiterentwicklungsphase kann es erforderlich sein, zusätzliche funktionale und nichtfunktionale Anforderungen umzusetzen, z.B. aufgrund neuer Gesetzesanforderungen bzgl. Datenschutz oder Datenübertragung. Handelt es sich dabei um gravierende Änderungen von E/E Bestandsfunktionen respektive E/E Funktionsclustern kann dadurch eine evolutionäre oder sogar revolutionäre Weiterentwicklung der bestehenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur initiiert werden.

Die Datenqualität der Inputgrößen kann zusätzlich durch eine Dynamisierung des Kostenmodells verbessert werden und zwar indem historische Daten bzw. Erfahrungs- oder Referenzwerte konsistent in die Kostenerhebung eingebracht werden (vgl. Abbildung 5-29).

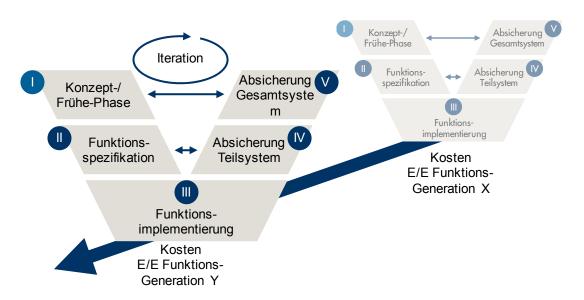


Abbildung 5-29: Kostenplausibilisierung über historische Referenzwerte, eigene Darstellung.

Im Sinne des "Checks and Balances Prinzips"<sup>34</sup> können so die von Experten der unternehmerischen Praxis erhobenen Werte mittels realer Werte früherer Generationen plausibilisiert werden (vgl. Kapitel 5.6). Dies setzt jedoch die Existenz von vergleichbaren historischen Daten voraus. Aufgrund der hohen Innovationsdichte innerhalb der automotiven E/E Entwicklung – z.B. in den Feldern Elektromobilität, Remote Softwareupdate oder hochautomatisiertes Fahren (siehe Kapitel ASD) – ist dies jedoch nicht immer gegeben. Für etablierte E/E Bestandsfunktionen hingegen, kann auf zahlreiche Referenzwerte zurückgegriffen werden, z.B. die einer E/E Funktionsgeneration X für eine neue E/E Funktionsgeneration Y (vgl. Abbildung 5-29).

Die Kostenplausibilisierung mittels historischer Referenzwerte ist möglich, da vollumfängliche Neuentwicklungen von einer E/E Funktionsgeneration zur nachfolgenden Generation i.d.R. nicht stattfinden. Ein Großteil der E/E Funktionen wird zum Generationssprung übernommen, geringfügig angepasst oder nur in Teilen weiterentwickelt. Im Gegensatz hierzu stellt die oben genannte Umsetzung von Innovationen eine wirkliche Funktionsmehrung dar. Daraus resultierende Mehraufwände für eine neue E/E Funktionsgeneration werden in der automotiven Praxis durch den Entfall von bestehenden Funktionen (z.B. Entfall physischer Laufwerke) und durch Kostenanspannungen auf die Aufwände der jeweiligen Referenzgeneration kompensiert. Eine Kosteneffizienzsteigerung für Bestandsfunktionen von Generation X zu Y von etwa 20% ist branchenüblich (vgl. Abbildung 5-30).

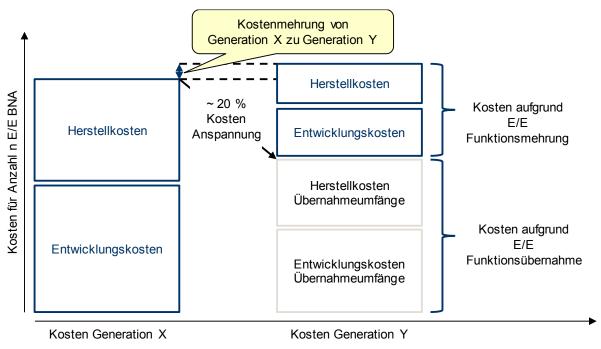


Abbildung 5-30: Referenzwerte als Grundlage zur Ermittlung von Zielkosten für eine neue E/E Funktionsgeneration, eigene Darstellung.

Die sich daraus ergebende Summe an zulässigen Kosten inkl. der zulässigen Kostenmehrung für Innovationsumfänge ist damit das Kostenziel für die neue E/E Funktionsgeneration und dient als Messgröße für das "Checks and Balances Prinzips".

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Das "Checks and Balances Prinzip" hat seinen Ursprung in der Politik und beschreibt das Prinzip einer bestehenden Macht eine Gegenmacht gegenüber zu stellen, um dadurch einen Ausgleich von Macht, von unterschiedlichen Interessen herzustellen. Dabei liegt das Ziel zugrunde ein Gleichgewicht zu schaffen, um dadurch langfristig für Stabilität zu sorgen.

## 6. Architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Erarbeitung eines Referenzmodells zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung (vgl. Kapitel 1.2.1): Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert? Ziel des Referenzmodells ist daher einerseits die spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen zu beschreiben (vgl. Kapitel 3.6). Zum anderen soll das Referenzmodell E/E Baukästen und die strukturgebende E/E Bordnetzarchitektur miteinander harmonisieren (vgl. Kapitel 5). Die Basis für die Referenzmodellbildung wurde im Grundlagenkapitel zur Modellbildung geschaffen (vgl. Kapitel 4.3). Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung – als spezifische Gestaltungsempfehlungen eines Referenzmodells – fließen in das Vorgehen zur Referenzmodellbildung nach BECKER als Grundlage ein (vgl. Kapitel 4.3). Dabei beschränkt sich der Betrachtungsgegenstand auf die Konstruktion des Referenzmodells (vgl. Kapitel 4.4). Der notwendige Wissens- und Erkenntnisgewinn als Grundlage für die Referenzmodellierung, erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens durch enge Einbeziehung verschiedener Experten über Workshops und Interviews. Die Identifikation und Auswahl der notwendigen Experten basiert auf den der Modellierung zugrundeliegenden Fragestellungen und Ziele (vgl. Kapitel 6.1 und 6.2).

## 6.1. Vorgehen zur Referenzmodellbildung

Die zweite Forschungsleitende Fragestellung befasst sich mit der Frage nach einem Referenzmodell, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert. Referenzmodelle beschreiben Strukturen und Beziehungen von Informationssystemen. Die Kerncharakteristika von Referenzmodellen sind die Wiederverwendbarkeit, die Integration von Best Practices oder Common Practices innerhalb der Modelle sowie die Allgemeingültigkeit für einen konkreten Anwendungsfall (vgl. Kapitel 4.3). Die Anwendung dieses Modelltyps ist für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand insofern adäquat, als dass dieser die Erarbeitung eines OEM- unspezifischen Lösungsvorschlags für die adressierte zweite Forschungsleitende Fragestellung ermöglicht, welcher anforderungsspezifisch angepasst und wiederverwendet werden kann. Folglich zeichnet sich der angestrebte Ergebnistyp – d.h. der Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung – durch drei Aspekte aus:

- In die Erarbeitung des Lösungsvorschlags fließen Best und Common Practices Ansätze der unternehmerischen Praxis d.h. der automotiven E/E Entwicklung ein. Damit umfasst dieser sowohl neueste Erkenntnisse als auch umfangreiches, erprobtes Wissen und Erfahrungswerte der automotiven E/E Entwicklung.
- Der Lösungsvorschlag besitzt für das Anwendungsgebiet der automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung eine gewisse Allgemeingültigkeit und ist nicht OEM-spezifisch.
- Aufgrund der Allgemeingültigkeit des Lösungsvorschlags, eignet sich dieser für die Wiederverwendung im Rahmen einer konkreten, OEM-spezifischen Gestaltung und

Anwendung. Durch diese Eigenschaft lässt sich der Lösungsvorschlag auf verschiedene OEMs der Automobilbranche anwenden und kann als Grundlage für eine OEMspezifische Lösung herangezogen werden.

Um einen derartigen Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung zu entwickeln, wird im Rahmen dieses Kapitels ein entsprechendes Referenzmodell konstruiert, welches den Fokus auf das Zusammenspiel von E/E Baukästen und E/E Bordnetzarchitektur legt und dabei die relevanten Systemelemente und ihre Beziehungen zueinander beschreibt. Die hier vorliegende Referenzmodellentwicklung orientiert sich am Vorgehen zur Referenzmodellbildung (vgl. Kapitel 4.3). Dabei beschränkt sich der Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Kapitels auf die Konstruktion des Referenzmodells, d.h. auf die ersten vier Phasen "Zieldefinition", "Konstruktion des Ordnungsrahmens", "Modellierung der Struktur" und "Konsolidierung und Komplettierung", welche die Struktur für das Kapitel damit inhärent vorgeben (vgl. Abbildung 6-1). Die Schnittstelle zur Wiederverwendung sowie die Konstruktion des unternehmensspezifischen Informationsmodells ist nicht Gegenstand der Modellbildung im Rahmen des Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 4.4).

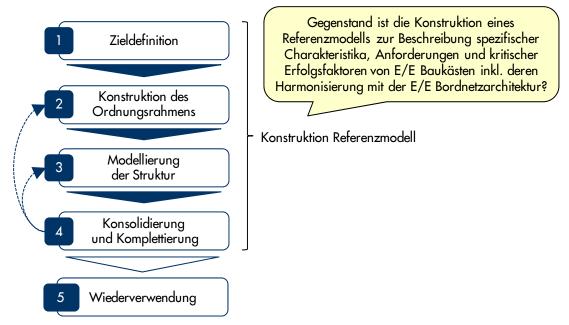


Abbildung 6-1: Konstruktion Referenzmodell, Phasen 1 bis 4 des Vorgehensmodells zur Referenzmodellbildung, eigene Darstellung in Anlehnung an BECKER [BECKER 1998, S. 7ff.].

## 6.2. Zieldefinition

Im einleitenden Kapitel wurden nach Darlegung von endogenen und exogenen Herausforderungen die zentralen Problemstellung für das Forschungsvorhabens abgeleitet: Die Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt sowie Bewältigung von Handlungs- und Produktivitätsdruck (Innovations- und Kostendruck) innerhalb der automotiven E/E Entwicklung (vgl. Kapitel 1.1). Zur Bewältigung dieser Problemstellungen wurde im Kapitel 5 eine strukturgebende automotive E/E Bordnetzarchitektur entwickelt (vgl. Kapitel 5). Der konsequente, baureihenübergreifende Einsatz von E/E Baukästen, ist eine dies ergänzende Maßnahme zur betriebswirtschaftlichen Optimierung der Produktstruktur. Die Auswahl des Baukastenansatzes erfolgt aus nachstehenden Gründen:

- Die durchgängige, baureihenübergreifende Gestaltung von E/E Baukästen schafft die Grundlage dafür, gezielt differenzierende Kundenwünsche innerhalb der automotiven E/E Entwicklung umsetzen zu können. Kundenwünsche haben unter den Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen eine exponierte Bedeutung, da deren Erfüllung den Erfolg des Produkts "Fahrzeug" inkl. technischer Lösungen (z.B. optionale Ausstattungen) im Markt maßgeblich beeinflusst.
- Intelligent strukturierte, modulare E/E Baukästen ermöglichen die Realisierung individueller Lösungen im Fahrzeug bei gleichzeitiger marktfähiger Kostenstruktur und Preisweitergabe an den Kunden.
- Die konsequente und langfristige Ausgestaltung von E/E Baukästen bietet das Potential baureihenübergreifend Skalen- und Verbundeffekte zu realisieren. Skaleneffekte sind auf verschiedenen Ebenen zu erzielen: vom Baukastenelement über die -komponente sowie von der Architektur bis hin zur Technologie.

Die Herausforderung besteht dabei in einer langfristigen und zukunftsfähigen Planung und Ausgestaltung der automotiven E/E Baukästen. Nur so können Skaleneffekte langfristig gehoben werden. Voraussetzung, um die aufgezeigten Potentiale erschließen zu können, ist eine konsequente Vorgehensweise bei der Entwicklung automotiver E/E Baukästen, welche mit der strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert ist. Diese Voraussetzung leitet zur zweiten Forschungsleitenden Fragestellung des Forschungsvorhabens über (vgl. Kapitel 1.2). Dieses Vorhaben unterteilt sich in zwei Schritte (vgl. Abbildung 6-2):

- **Schritt 1:** Erarbeitung der spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren, welche automotiven E/E Baukästen zugrunde liegen.
- **Schritt 2:** Harmonisierung der Zyklen von automotiven E/E Baukästen mit denen einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur.



Abbildung 6-2: Zielsetzung der Referenzmodellierung, eigene Darstellung.

Wesentlich für die Erarbeitung des Lösungsvorschlags ist die Definition des Referenzmodellordnungsrahmens inkl. der Identifikation zentraler Systemelemente im nachfolgenden Kapitel. Dabei sind neben der strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, endogene und exogene Herausforderungen sowie Trends mit einzubeziehen, um ganzheitlich und nachhaltig zur Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt sowie Kosten in der E/E Entwicklung beitragen zu können. Als Eingangsgrößen für diesen elementaren Schritt der Strukturdefinition dienen die zuvor identifizierten Herausforderungen sowie Ergebnisse aus den Experteninterviews inkl. daraus abgeleiteter Handlungsbedarfe (vgl. Kapitel 1.1).

## 6.3. Konstruktion des Ordnungsrahmens

Allgemein dient ein Ordnungsrahmen im Kontext der Referenzmodellbildung zur Strukturierung eines Systems, indem es dessen einzelne Systemelemente umfasst und anhand ihrer Beziehungen untereinander anordnet (vgl. Kapitel 4.3). Für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand – der Harmonisierung von E/E Baukästen mit einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur – lassen sich drei wesentliche Systemelemente identifizieren:

- **Systemelement 1:** Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.
- Systemelement 2: Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.
- Systemelement 3: Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.

Für diese drei Systemelemente wird ein Ordnungsrahmen konstruiert (vgl. Abbildung 6-3). Dabei liegt die Prämisse zugrunde, dass es sich bei dem zu gestaltenden Referenzmodell um ein homomorphes Modell handelt, d.h. um eine vereinfachte Version des Urbilds, welches den Fokus auf das Zusammenspiel von automotiver E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten legt (vgl. Kapitel 1.2.2).

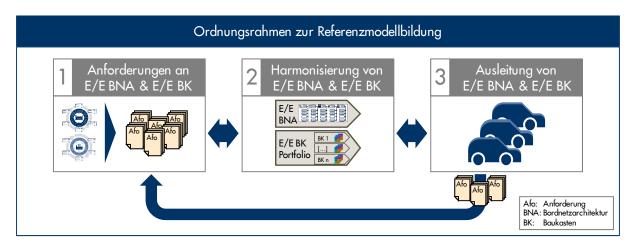


Abbildung 6-3: Ordnungsrahmen zur Referenzmodellbildung, eigene Darstellung.

Das erste Systemelement "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" umfasst die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die automotive E/E Bordnetz- und Baukastenentwicklung, welche sich u.a. aus endogenen und exogenen Herausforderungen, der E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung sowie aus den Baureihen bzw. Fahrzeugprojekten eines OEMs ableiten (vgl. Kapitel 1.1). Die Harmonisierung des Zusammenspiels aus automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenzyklen ist Gegenstand des zweiten Systemelements "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" im Ordnungsrahmen. Dieses Systemelement stellt gleichzeitig den Kern des Referenzmodells dar, in welchem zunächst die Beschreibung von spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen erfolgt (vgl.

Abbildung 6-3). Gegenstand des dritten Systemelements "Ausleitung von E/E Bordnetz-architektur und E/E Baukasten" ist die baureihenübergreifende Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, d.h. deren Integration in die Fahrzeugprojekte eines OEMs (vgl. Abbildung 6-3).

## 6.4. Modellierung der Struktur

Die Detaillierung und Ausgestaltung des Referenzmodells erfolgt innerhalb der Phase "*Modellierung der Struktur*". Darin werden die Modellelemente nach BECKER [BECKER 1998, S. 7ff.] um wesentliche Elemente und Inhalte der unternehmerischen Praxis angereichert, welche aus den Ergebnissen, z.B. Workshops Interviews mit Experten etc., abgeleitet wurden. Die Detaillierung und Ausgestaltung des Referenzmodells orientiert sich dabei an den drei Systemelementen, die durch den Ordnungsrahmen vorgegeben werden (vgl. Abbildung 6-3).

### 6.4.1. Systemelement 1 – Anforderungen

Gegenstand des ersten Systemelements sind die "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-7). Dies schließt insbesondere auch endogene Anforderungen mit ein, die aus den Prozessen der E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung sowie den Baureihen oder dedizierten Fahrzeugprojekten eines OEMs kontinuierlich eingesteuert werden (vgl. Abbildung 6-3).

### Modellierung Systemelement 1 - Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten:

• Definition von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen.

- Definition der Aufgaben des Requirements Engineerings:
  - 1. Ermittlung neuer Anforderungen
  - 2. Spezifizierung von Anforderungen
  - 3. Analyse von Anforderungen
  - 4. Validierung von Anforderungen
  - 5. Modellierung von Anforderungen
- Definition der Aufgaben des Requirements Managements:
  - 1. Priorisierung der Anforderungen bzgl. der Notwendigkeit, der Reihenfolge
  - 2. Vorgabe des Zeitpunkts zur Anforderungs-Ausleitung
  - 3. Ausleitung der Anforderungen
  - 4. Steuerung des Anforderungs-Änderungsmanagements

Abbildung 6-4: Modellierung von Systemelement 1 – Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

Aufgrund von Komplexität und Themenspezifität der Referenzmodellierung wird vor der eigentlichen Entwicklung des Modells kurz in die spezifische relevante Theorie zu Anforderungen sowie Requirements Engineering und Requirements Management eingeführt, um sodann auf dieser Basis das erste Systemelement des Referenzmodells im Detail zu definieren und als Gesamtsicht den E/E Baukastengestaltungsprozess darzustellen.

Die Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen haben Auswirkung darauf, welche Eigenschaften die zu entwickelnde E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen haben sollen. Dabei lassen sich diese in funktionale sowie nicht-funktionale Anforderung unterteilen (vgl. Abbildung 6-5). Funktionale Anforderungen beschreiben gewünschte Funktionalitäten eines softwarebasierten Systems bzw. einer E/E (Kunden-) Funktion (z.B. E/E Baukasten).

Funktionale Anforderungen können in Anforderungen aufgegliedert werden, welche Statik, Dynamik und Logik eines Systems bzw. einer E/E (Kunden-) Funktion beschreiben (vgl. Kapitel 3) [BALZERT 2009, S. 456; BROY/WEBERS 2013; S. 64ff.]¹. Zum Beispiel ist die funktionale Anforderung eines Scheibenwischers, dass die Funktion "Wischen der Scheiben" ausgeführt werden soll.

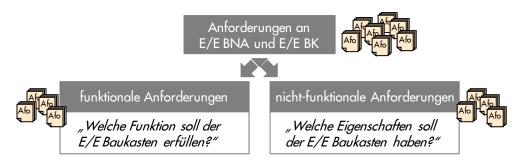


Abbildung 6-5: Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, eigene Darstellung.

Nicht-funktionale Anforderungen werden in "Qualitätsanforderungen" und "unterspezifizierte funktionale Anforderungen" unterschieden [POHL 2007, S.16ff.]. Wobei nicht-funktionale bzw. Qualitätsanforderungen quantitative und qualitative Eigenschaften eines Systems bzw. einer E/E (Kunden-) Funktion (z.B. E/E Baukasten) festlegen [BALZERT 2009, S. 463f.; BROY/WEBERS 2013; S. 64ff.]. Die ISO/IEC 9126-1:2001 definiert ein aus sechs Merkmalen bestehendes Qualitätsmodell, welches auf jede Art von Software und damit auf softwarebasierte Systeme oder E/E (Kunden-) Funktion anwendbar ist [ISO/IEC 9126-1:2001]:

- Funktionalität: Bereitstellung der Funktion unter Berücksichtigung der Aspekte Angemessenheit, Genauigkeit, Interoperabilität, Sicherheit sowie Konformität der Funktionalität.
- Zuverlässigkeit: Bewahrung eines spezifizierten Leistungsniveaus unter Berücksichtigung der Aspekte Reife, Fehlertoleranz, Wiederherstellbarkeit sowie Konformität der Zuverlässigkeit.
- *Benutzbarkeit:* Benutzbarkeit unter Berücksichtigung der Aspekte Verständnis, Erlernbarkeit, Bedienbarkeit, Attraktivität sowie Konformität der Benutzbarkeit.
- Effizienz: Angemessenes Leistungsniveau der eingesetzten Ressourcen unter Berücksichtigung der Aspekte Zeitverhalten, Verbrauchsverhalten sowie Konformität der Effizienz.
- *Wartbarkeit:* Änderungsfähigkeit unter Berücksichtigung der Aspekte Analysierbarkeit, Änderbarkeit, Stabilität, Testbarkeit sowie Konformität der Wartbarkeit.
- *Portabilität*: Übertragbarkeit unter Berücksichtigung der Aspekte Anpassbarkeit, Installierbarkeit, Koexistenz, Austauschbarkeit sowie Konformität der Portabilität.

"Unterspezifizierte funktionale Anforderungen" lassen sich i.d.R. über Anforderungsverfeinerung bzw. -detaillierung in funktionale Anforderungen oder Qualitätsanforderungen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Zur weiteren Vertiefung der drei Sichten – Statik, Dynamik und Logik – zur Beschreibung, Spezifizierung, Modellierung, Analyse, Entwurf sowie Programmierung eines softwarebasierten Systems, wird an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur verwiesen [z.B. BALZERT 2009, S.99ff.].

Nicht-funktionale Anforderungen werden oftmals mit Qualitätsanforderungen gleichgesetzt, entsprechend werden diese auch im Rahmen des Forschungsvorhabens synonym verwendet.

überführen [BALZERT 2009, S. 465; BROY/WEBERS 2013; S. 64ff.]. Als Beispiel für eine nichtfunktionale Anforderung dient an dieser Stelle, dass E/E Baukästen eines OEMs grundsätzlich baureihenübergreifend, skalierbar und wiederverwendbar zu gestalten sind.

Der Ursprung der Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten sind vielfältig: Die Betrachtung der unterschiedlichen Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung ist Umfang der Analyse im einleitenden Kapitel (vgl. Kapitel 1.1).3 Die dort identifizierten Quellen für endogene und exogene Anforderungen an die automotive E/E Entwicklung, macht die Einführung und Etablierung eines durchgängigen "Requirements Engineering und Management "4" notwendig. Das dabei verfolgte Ziel ist die systematische Ermittlung, Beschreibung, Modellierung und Analyse der Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung in Abstimmung mit dem Anforderungsgeber und Anforderungsnehmer unter Einsatz geeigneter Methoden und Werkzeuge. Die aus Umwelteinflüssen resultierenden Anforderungen sind zu identifizieren bzw. zu ermitteln und auf Relevanz für E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen zu analysieren. Die als relevant identifizierten Anforderungen sind zu spezifizieren und schließlich zu validieren, bevor diese an die E/E Bordnetz- und E/E Baukastenentwicklung ausgeleitet werden. Sämtliche Aufgaben die mit diesen Arbeitsschritten, d.h. der Anforderungsaufbereitung, im Zusammenhang stehen, obliegen dem Requirements Engineering<sup>5</sup> und können wie folgt in fünf Schritten zusammengefasst und beschrieben werden (vgl. Abbildung 6-6) [BALZERT 2009, S. 444f. und S. 547]:

- *Schritt 1:* Ermittlung neuer Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung aus den bekannten Quellen (endogene und exogene Umwelteinflüsse) inkl. Identifikation neuer Anforderungsquellen.
- *Schritt 2:* Spezifizierung der ermittelten Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung unter Berücksichtigung definierter Methoden, Vorgaben und Ziele.
- Schritt 3: Analyse der spezifizierten Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitekturund E/E Baukastenentwicklung hinsichtlich Richtigkeit, Vollständigkeit und Spezifikationslücken.

Als Quellen für endogene Anforderungen wurden der E/E Umfang und Innovationen, die Onboard-Vernetzung, die Kommunikationstechnologien, die Offboard-Vernetzung, die Consumer Electronics Integration sowie die E/E Systemkomplexität und Variantenvielfalt innerhalb der automotiven E/E Entwicklung identifiziert. Als Quelle für exogene Anforderungen wurden die ökonomische, die technologische, die gesellschaftliche, die ökologische sowie die politisch-rechtliche Umwelt als Umwelteinflüsse auf die automotive E/E Entwicklung identifiziert.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Die Begriffsdefinitionen von **Requirements Engineering** variieren. Jedoch verweisen sämtliche Definitionen auf die immer gleichen Kernaktivitäten des Requirements Engineering (z.B. ermitteln, spezifizieren und prüfen), die an Anforderungen (z.B. Systemeigenschaften und Rahmenbedingungen) vollzogen werden. Der dies begleitende Prozess heißt Requirements Management. Das Requirements Management verfolgt Änderungen von Anforderungen, verwaltet Anforderungsdokumente über den gesamten Lebenszyklus sowie plant, organisiert und kontrolliert die Kernaktivitäten des Requirements Engineering [CMU/SEI 2006, S. 143; SOMMERVILLE 2011, S. 111; POHL 2010, S. 594].

Dem **Requirements Engineering** obliegen die **Aufgaben** der Erhebung, Analyse und Dokumentation von Anforderungen an die automotive E/E Bordnetzarchitektur oder E/E Baukästen. Desweiteren ist es Aufgabe des Requirements Engineering, Widersprüche aufzulösen sowie Anforderungen zu verifizieren und validieren [SOMMERVILLE 2011, S. 111; POHL 2010, S. 594].

- *Schritt 4:* Validierung der spezifizierten und analysierten Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung hinsichtlich der zugrundeliegenden Vorgaben und Ziele.
- *Schritt 5:* Modellierung von Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung, d.h. Erarbeitung einer fachlichen Lösung, die die korrekte und vollständige Umsetzung der Anforderungen beinhaltet.

Die aufgeführten Aktivitäten werden in der unternehmerischen Praxis oft unter dem Begriff der "Anforderungsspezifikation" zusammengefasst [BALZERT 2009, S. 444f. und S. 547]. Entsprechend wird dieser Oberbegriff im Rahmen des Forschungsvorhabens für die aufgeführten Arbeitsschritte synonym verwendet: Die Anforderungsspezifikation – als Ergebnis der Abarbeitung der aufgeführten Aktivitäten – umfasst alle ermittelten, spezifizierten sowie validierten Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten und wird in einem Anforderungslastenheft<sup>6</sup> dokumentiert.

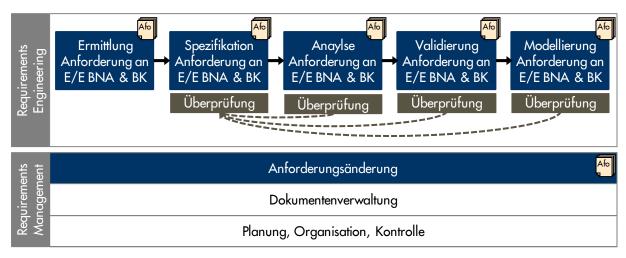


Abbildung 6-6: Aufgaben des Requirements Engineering und Management, Darstellung in Anlehnung an [BALZERT 2009, S. 444f. und S. 547; PATIG/DIBBERN 2015, o.S.].

Die fertiggestellten Anforderungsspezifikationen werden in einen Anforderungsfilter überführt und gesammelt. Auf Basis dieses Arbeitsschritts erfolgt die Vorbereitung für die Anforderungsausleitung in die automotive E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung. Die Art und Weise der Anforderungsausleitung unterliegt einem klaren Regelwerk,

- *Schritt 1:* Priorisierung der Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten bzgl. der Notwendigkeit der Reihenfolge
- *Schritt 2:* Vorgabe des Zeitpunkts der Ausleitung an E/E Bordnetzarchitekturentwicklung und E/E Baukastenentwicklung
- *Schritt 3:* Ausleitung der Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Ein **Lastenheft** wird im Rahmen der DIN 69901-5 wie folgt definiert: "Vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferung und Leistung eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrags" [DIN 69901-5, S.3].

Diese Prozessschritte übernimmt ein konsequent durchgeführtes Requirements Management.<sup>7</sup> Eine weitere zentrale Aufgaben des Requirements Management ist die Änderungs- und Konfigurationsverwaltung von Anforderungen (vgl. Abbildung 6-6): Die Änderungs- und Konfigurationsverwaltung ist notwendig, wenn sich Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitekturund E/E Baukastenentwicklung über die Zeit verändern, d.h. deren Anforderungsspezifikation geändert bzw. überarbeitet und anschließend versioniert werden muss. Geänderte Anforderungen werden wieder in den Anforderungsfilter überführt und analog zu neuen Anforderungen in die automotive E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung ausgeleitet. Aus Kombination der beschriebenen Bestandteile ergibt sich die Gesamtsicht für das erste Systemelement (vgl. Abbildung 6-7).

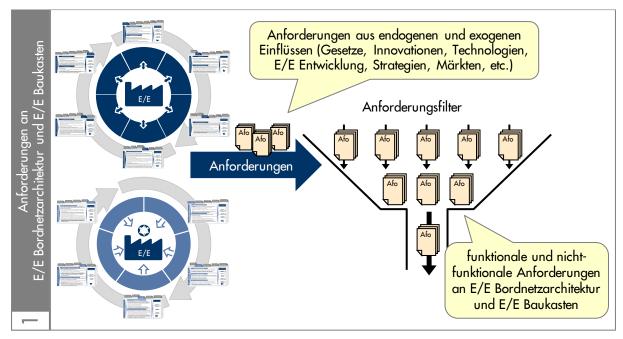


Abbildung 6-7: Systemelement 1 – Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

## 6.4.2. Systemelement 2 – Harmonisierung

Die Harmonisierung des Zusammenspiels aus automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenzyklen ist Gegenstand des zweiten Systemelements im Ordnungsrahmen: Die "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-3 und Abbildung 6-8). Dieses Systemelement stellt gleichzeitig den Kern des Referenzmodells dar, da es sich zentral mit der Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung befasst. Die Beschreibung dieses zweiten Systemelements untergliedert sich in die Schritte:

• *Schritt 1:* Beschreibung der spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen.

Das **Requirements Management** übernimmt Aufgaben wie die Verwaltung von Anforderungen inkl. deren Ausleitung sowie Kommunikation an sämtliche Stakeholder (z.B. an die für die E/E Baukastenentwicklung verantwortlichen CoCs). Weitere Aufgaben sind die Änderungs- und Konfigurationsverwaltung für Anforderungen (z.B. mittels Versionsverwaltung sowie Abschätzung der Einflüsse von Anforderungsänderungen), die Anforderungsentwicklung anhand von Anforderungsattributen oder Listen offener Punkte zu verfolgen und zu steuern, die Beziehungen zwischen den Anforderungen u. a. zwecks Rückverfolgbarkeit zu pflegen [SOMMERVILLE 2011, S. 111; POHL 2010, S. 594].

- *Schritt 2:* Auslegung und Harmonisierung von Entwicklungs-, Ausleitungs- und Überarbeitungszyklen einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten inkl. Beschreibung des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- *Schritt 3:* Definition des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur, E/E Baukasten und Schnittstelleninstanzen innerhalb der E/E Entwicklung.

# rmonisierung von E BNA & E/E BK

2

### Modellierung Systemelement 2 – Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten:

- Beschreibung von automotiven E/E Baukästen:
  - 1. Charakteristika von E/E Baukästen
  - 2. Anforderungen, Rahmenbedingungen und Prämissen bzgl. E/E Baukästen
  - 3. Kritische Erfolgsfaktoren von E/E Baukästen
- Harmonisierung der E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung:
  - 1. Entwicklungszyklus einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- 2. Ausleitungszyklus einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- 3. Überarbeitungszyklen einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- Definition des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur, E/E Baukasten und Schnittstellen.

Abbildung 6-8: Modellierung von Systemelement 2 – Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

### Schritt 1: Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren von E/E Baukästen

Die Erläuterung des allgemeinen Baukastenbegriffs sowie die Charakterisierung automotiver E/E Baukästen ist Gegenstand des technischen Grundlagen Kapitels (vgl. Kapitel 3.6): Das Baukastenprinzip – als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip – zeichnet sich durch verschiedene Eigenschaften aus, die zur Erfüllung der im Forschungsvorhaben fokussierten Ziele beitragen:

- Eignung zur Optimierung der Produktstruktur,
- Unterstützung bei der Beherrschung von interner Variantenvielfalt und Komplexität,
- Potential zur Hebung von Synergie- und Skaleneffekte, um die Effizienz sowie Wirtschaftlichkeit in der Produktentwicklung zu steigern.

Die Herausforderungen bei der Gestaltung automotiver E/E Baukästen liegen in der Herstellung eines optimalen Gleichgewichts aus interner sowie externer Varianz und Komplexität. Die systematische Gestaltung eines stimmigen automotiven E/E Baukastenportfolios für den baureihenübergreifenden Einsatz unterstützt dabei, verschiedene Potentiale innerhalb der automotiven E/E Entwicklung zu heben. Dazu zählen die Reduzierung der Einmalaufwände und Herstellkosten, die Verkürzung von Entwicklungszeiten und die Steigerung von Produkt-Qualität sowie -Robustheit. Als Voraussetzung für eine solche systematische Gestaltung automotiver E/E Baukästen, sind Rahmenbedingungen bzw. Prämissen zu definieren und innerhalb der E/E Entwicklung zu berücksichtigen. Auf Basis des in der unternehmerischen Praxis erzielten Wissens- sowie Erkenntnisgewinns wurden entsprechende Rahmenbedingungen bzw. Prämissen in drei Kategorien – Strategie, (Organisation-) Struktur und Prozess –identifiziert (vgl. Abbildung 6-9).



Ausplanung und Vorgabe der strategischen:

- Produktanforderungen unter Berücksichtigung endogener und exogener Umwelteinflüsse,
- Positionierung im Spannungsfeld aus Standardisierung und Individualisierung,
- baureihenübergreifenden Auslegung von automotiven E/E BK,
- Minimierung von Varianz und Komplexität innerhalb automotiver E/E BK,
- E/E BK-Roadmap in Abstimmung mit Unternehmens- und Innovationsstrategie,
- langfristigen Ausplanung von Roadmaps für E/E Funktionen, Komponenten und Standards.

Aufgaber
 Aufgaber

### Definition und Vorgabe der/des:

- Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten der strukturgebenden E/E BNA.
- Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten des automotiven E/E BK.
- E/E BK-Steuerung bzgl. E/E BK-Entwicklung und Implementierung.
- Organisationsstrukturen für ein harmonisiertes Zusammenspiel von E/E BNA und E/E BK.
- erforderliche Fach- und Methodenwissen für die automotive E/E BK-Entwicklung.

Prozess

a

### Definition und Vorgabe der/des:

- E/E BK-Entwicklungsprozess in Abstimmung mit bestehenden Entwicklungsprozessen.
- Integration aller relevanten Fachstellen in den E/E BK-Entwicklungsprozess.
- baureihenübergreifenden Anforderungsmanagements für die E/E BK-Entwicklung.
- betriebswirtschaftlichen Zielvorgaben sowie Controlling-Mechanismen für E/E BK.
- baureihenübergreifenden Spezifikations- und Lastenheftprozess für E/E BK.

Abbildung 6-9: Rahmenbedingungen für die automotive E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung.

Zu den strategischen Rahmenbedingungen zählt die Ausplanung und Vorgabe der strategischen Produktanforderungen unter Berücksichtigung endogener und exogener Umwelteinflüsse. Die resultierenden OEM-spezifischen Anforderungen hinsichtlich Innovationen, E/E Funktionen, Ausstattungen, Sicherheit, Komfort, Design, etc. sind im Rahmen der E/E Baukastenentwicklung zu berücksichtigen. Ferner ist die OEM-spezifische Positionierung im Spannungsfeld aus Standardisierung und Individualisierung festzulegen und als Orientierungsrahmen für die automotive E/E Baukastenentwicklung vorzugeben. Hintergrund dazu ist, dass der Einsatz automotiver E/E Baukästen nur dann zielführend ist, wenn dieser den OEM dabei unterstützt, sich in diesem Spannungsfeld optimal zu positionieren, um dem Kundenwunsch nach innovativen Funktionen, Individualisierung und Differenzierung gerecht zu werden.

Eine weitere strategische Rahmenbedingung ist die Vorgabe E/E Baukästen grundsätzlich für den baureihenübergreifenden Einsatz auszugestalten. Auch ist die Varianz und Komplexität innerhalb der automotiven E/E Baukästen unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen immer zu minimieren.

Als Grundlage für eine langfristige, strategische Planung ist eine automotive E/E Baukasten-Roadmap in Abstimmung mit der Unternehmens- sowie Innovationsstrategie zu erstellen. Basis für diese E/E Baukasten-Roadmap ist die langfristige Ausplanung von E/E Funktionen, Software- und Hardware-Komponenten (inkl. Modulen und Gleichteilen) sowie Standards (z.B. bzgl. Schnittstellen, Protokollen oder Komponenten) mittels Roadmaps, um ungeplante E/E Baukastenänderungen zu minimieren (vgl. Abbildung 6-9).

Zu den Rahmenbedingungen, die die Organisationsstruktur und Qualifizierung der Mitarbeiter betreffen, gehört die Definition und Vorgabe der Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten sowie von sämtlichen dazugehörigen Schnittstellenpartnern innerhalb der (E/E) Entwicklungsabteilungen eines OEMs (z.B. Gesamtfahrzeugarchitektur, übergreifende Baukastensteuerung und Entwicklungsabteilungen). Für die Steuerung von automotiver E/E Baukastenentwicklung und -implementierung sind klare Verantwortlichkeiten zu definieren. Die Definition von Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten unterstützt bei der Definition des notwendigen Zusammenarbeitsmodells von E/E Baukasten und E/E Bordnetzarchitektur und bei der entsprechenden Anpassung der Organisationsstrukturen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung. Die Bereitstellung des erforderlichen Fach- und Methodenwissen für die E/E Baukastenentwicklung, E/E Baukastensteuerung und E/E Bordnetzarchitektur ist Grundvoraussetzung für eine zielgerichtete Bearbeitung und Erfüllung der damit verbundenen Aufgaben innerhalb der automotiven E/E Entwicklung (vgl. Abbildung 6-9).

Die grundlegende Voraussetzung für eine strukturierte Entwicklung von automotiven E/E Baukästen ist die Definition und Vorgabe eines entsprechenden E/E Baukästenentwicklungsprozesses. Dieser ist mit bestehenden Entwicklungsprozessen (z.B. für die automotive E/E Bordnetzarchitekturentwicklung) zu harmonisieren und mit den Schnittstellenpartnern (z.B. übergreifende Baukästensteuerung und E/E Bordnetzarchitektur) abzustimmen. Sämtliche relevanten Fachstellen (z.B. E/E CoCs, E/E Bordnetzarchitektur, Einkauf, etc.) sind von Beginn an in den automotiven E/E Baukästenentwicklungsprozess einzubinden, um maximale Standardisierungspotenziale und Synergieeffekte heben zu können. Ergänzend zum Entwicklungsprozess ist ein baureihenübergreifendes Anforderungsmanagement sowie ein Spezifikations- und Lastenheftprozess für die automotive E/E Baukästenentwicklung zu etablieren. Ferner sind die betriebswirtschaftlichen Zielvorgaben sowie Controlling-Mechanismen für die automotiven E/E Baukästen zu definieren und zu vereinbaren. Diese unterstützen u.a. bei Entscheidungen hinsichtlich der Umsetzung und Gestaltung eines dedizierten E/E Funktionsumfangs als E/E Baukästen für den baureihenübergreifenden Einsatz, welche i.d.R. auf Basis einer sorgfältigen Abwägung des Kosten-Nutzen-Verhältnissens erfolgen.

Die Neuentwicklung von Standards, Software- und Hardware-Komponenten (inkl. Modulen oder Gleichteilen) für E/E Baukästen ist hinsichtlich der Umsetzbarkeit, des Aufwands und Nutzens systematisch technisch sowie wirtschaftlich zu bewerten und hinsichtlich einer Umsetzung als OEM-übergreifende Entwicklungskooperation zu überprüfen. Dabei ist die Standardisierung und Vereinfachung von E/E (Kunden-)Funktionen konsequent nachzuhalten, um davon ausgehend fixe Merkmale bzw. Elemente des automotiven E/E Baukastens definieren zu können. Diese fixen Merkmale bzw. Elemente können sich sowohl auf Hardware- und Softwarestandards als auch auf Funktions-, Technologie- oder Geometrie- bzw. Bauraumstandards beziehen. (vgl. Abbildung 6-9).

Die Vielzahl an Rahmenbedingungen bzw. Prämissen wird innerhalb des Forschungsvorhabens durch die zentralen kritischen Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen ergänzt (vgl. Abbildung 6-10). Unter kritischen Erfolgsfaktoren sind dabei Faktoren und Schlüsselgrößen zu verstehen, die für die Erreichung der Gesamtziele bei Entwicklung und Einsatz von automotiven E/E Baukästen von zentraler Bedeutung sind. Entsprechend ist die Berücksichtigung dieser kritischen Erfolgsfaktoren im Rahmen der E/E Baukastenentwicklung immanent notwendig, um mit dem Einsatz von E/E Baukästen dem gesetzten Ziel – der

Beherrschung von Komplexität, Variantenvielfalt und Kosten innerhalb der automotiven E/E Entwicklung – gerecht zu werden. Entsprechend fließen sowohl die erarbeiteten Voraussetzungen bzw. Prämissen als auch die daraus abgeleiteten kritischen Erfolgsfaktoren in die Ausgestaltung des nachfolgenden Schritts 2 der Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen als wesentliche Einflussgrößen ein.

### Kritische Erfolgsfaktoren von automotiven E/E Baukästen

- Baureihenübergreifender Einsatz von E/E Baukasten
- Maximaler Einsatz von Standards
- Minimale Varianz und Komplexität
- Modularer Aufbau
- Wiederverwendung von Modulen und Gleichteilen
- Nutzung von Kommunalität
- Existenz einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur
- Stimmigkeit von E/E Baukasten mit E/E Bordnetzarchitektur

Abbildung 6-10: Kritische Erfolgsfaktoren für die automotive E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung.

### Schritt 2: Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen

Die Harmonisierung des Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung setzt eine übergreifende Synchronisation der entsprechenden Zyklen voraus (vgl. Abbildung 6-11). Im Rahmen des Design Science über Expertenworkshops und -interviews wurden drei zentrale bzw. relevante Zyklen für E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen identifiziert und festgelegt (vgl. Kapitel 6.5):

- **Zyklus 1**: Entwicklungszyklus einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- **Zyklus 2**: Ausleitungszyklus einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.
- **Zyklus 3**: Überarbeitungszyklen einer "Genration X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten.

Im "Zyklus 1 – Entwicklung GenX" wird die "Generation X" einer E/E Bordnetzarchitektur und der dazugehörigen E/E Baukästen initial entwickelt. Bei der Ausführung der Aufgaben und Tätigkeiten, die mit der Entwicklung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten im Zusammenhang stehen, werden resultierende Synergien bestmöglich gehoben, existierende Interdependenzen berücksichtigt und mögliche Konflikte aufwandsminimal und effizient aufgelöst. Der Ergebnistyp dieses ersten Zyklus ist ein zusammengehöriges Set aus E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio für den baureihenübergreifenden Einsatz, welches alle zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen erfüllt (vgl. Abbildung 6-11).

Nach dem Entwicklungszyklus folgt die Phase "Anwendung GenX" einer "Generation X". Diese Phase erstreckt sich über die Ausleitung "Zyklus 2 - Ausleitung GenX" und die Überarbeitung "Zyklus 3 -Überarbeitung einer GenX" (vgl. Abbildung 6-11).

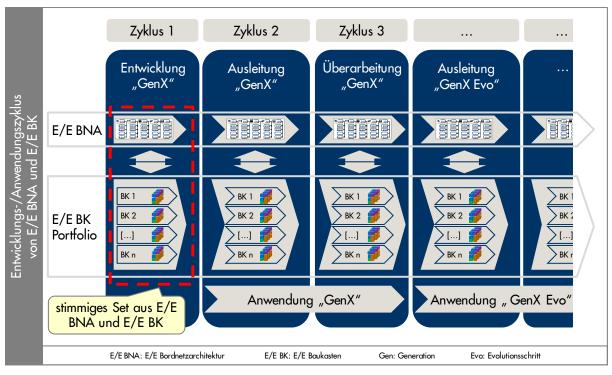


Abbildung 6-11: Entwicklungs-/Anwendungszyklus von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

Im Ausleitungszyklus wird die "Generation X" in Fahrzeugprojekte eines OEMs ausgeleitet. Die Länge bzw. Dauer dieses zweiten Zyklus wird dadurch bestimmt, wie lange die Lösungsseite – d.h. die E/E Bordnetzarchitektur inkl. E/E Baukastenportfolio – und die Anforderungsseite kongruent zueinander sind. Sobald Lösungs- und Anforderungsseite deutlich divergieren, wird der Überarbeitungszyklus (Zyklus 3) einer "Generation X" eingeleitet. Dies kann z.B. dann eintreffen, wenn neue Technologien mit geringem Änderungsaufwand bzgl. der E/E Bordnetzarchitektur mit Kommunikation/Datenübertragung etc. im Fahrzeug umgesetzt werden, wie etwa die Updatefähigkeit einzelner Steuergeräte inkl. dazu notwendiger Anpassungen der Bordnetztopologie. Innerhalb dieses Zyklus 3 werden E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio evolutionär weiterentwickelt. D.h. die "Generation X" wird anforderungsgerecht überarbeitet und weiterentwickelt bis die Lösungsseite wieder kongruent zur Anforderungsseite ist. Der Ergebnistyp dieses Überarbeitungszyklus wird im Rahmen von Workshops mit Experten der unternehmerischen Praxis als "Generation X Evo" definiert (vgl. Kapitel 6.5). Die Ausleitung inkl. Überarbeitung der "Generation X Evo" erfolgt analog zur "Generation X".

Die Anwendungsphase inkl. evolutionärer Überarbeitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio wird von einem OEM so lange iterativ durchlaufen, bis die Anforderungsseite eine grundlegende, revolutionäre Überarbeitung bzw. Neuentwicklung der Lösungsseite notwendig macht. Dies wird z.B. dann notwendig, wenn grundlegende neue Technologien mit großem Änderungsaufwand im Fahrzeug umgesetzt werden sollen, wie etwa für das hochautomatisierte Fahren oder neue Antriebskonzepte. In diesem Fall wird die Entwicklung einer neuen "Generation Y" von E/E Bordnetzarchitektur und/oder E/E Baukästen initiiert, welche die alte "Generation X" für neue Fahrzeugprojekte eines OEMs ersetzt.

Dem innerhalb der unternehmerischen Praxis erzielten Wissens- sowie Erkenntnisgewinn gemäß, stehen die drei Zyklen – Entwicklungs-, Ausleitungs- und Überarbeitungszyklus – der automotiven E/E Bordnetzarchitektur und des E/E Baukastens grundsätzlich in direkter

Abhängigkeit. Davon abgeleitet wird im Rahmen des Forschungsvorhabens für diese drei Zyklen eine synchrone Taktung fest vorgegeben: D.h. der Zeitpunkt des Beginns und des Endes eines Zyklus inkl. dedizierter Meilensteine oder Synchronisationspunkte gilt für die E/E Bordnetzarchitektur als auch den E/E Baukasten gleichermaßen. Damit wird eine Asynchronität einzelner Zyklen kategorisch ausgeschlossen. Dadurch wird u.a. sichergestellt, dass die mit einem Zyklus verbundenen Aufgaben und Tätigkeiten – insb. während der Entwicklung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten – immer parallel zueinander erfolgen, wodurch resultierende Synergien bestmöglich gehoben, existierende Interdependenzen berücksichtigt und mögliche Konflikte aufwandsminimal aufgelöst werden können (vgl. Abbildung 6-11).

### Schritt 3: Definition des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur, E/E Baukasten

Mit dem Setzen dieser Prämisse – der Synchronisation von Entwicklungs-, Ausleitungs- und Überarbeitungszyklus – wird ein erster wesentlicher Beitrag zur Harmonisierung des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung geschaffen. Dies ergänzend wird ein klares Regelwerks aufgestellt, welches die Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten innerhalb der automotiven E/E Entwicklung definiert, um einen zusätzlichen und wesentlichen Beitrag zur weiteren Harmonisierung des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio zu leisten.

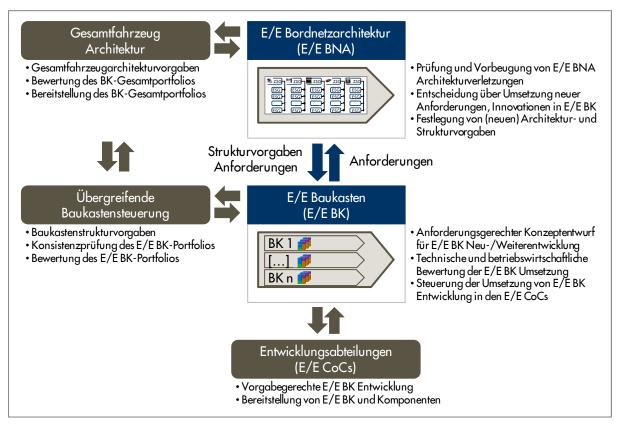


Abbildung 6-12: Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

Die Identifikation und Strukturierung der Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten gründet auf dem in der unternehmerischen Praxis erzielten Wissens- sowie Erkenntnisgewinn. Im Kontext des dazu durchgeführten Workshops sowie nachgelagerter Interviews mit Experten der automotiven E/E Entwicklung, wurde

die Einbeziehung von drei zusätzlichen Instanzen innerhalb der automotiven Entwicklung als immanent notwendig identifiziert (vgl. Kapitel 6.5 und Abbildung 6-12):

- Gesamtfahrzeugarchitektur,
- Übergreifende Baukastensteuerung,
- E/E Entwicklungsabteilungen, auch E/E Center of Competence (E/E CoC).

Die *Gesamtfahrzeugarchitektur* definiert die übergreifenden Architekturvorgaben und –ziele (z.B. Bauraum, Gewicht, EMV, etc.), die an die automotive E/E Bordnetzarchitektur als Prämissenset übergeben werden. Damit verknüpft, bewertet die Gesamtfahrzeugarchitektur das Baukastengesamtangebot – d.h. das übergreifende, gesamthafte Angebot von Baukästen aller Entwicklungsbereiche eines OEMs – und bestimmt über Art und Umfang der Umsetzung des Gesamtangebots (vgl. Abbildung 6-12).

Die *übergreifende Baukastensteuerung* übernimmt Vorgaben und Ziele bzgl. des Baukastengesamtangebots von der Gesamtfahrzeugarchitektur. Zusätzlich obliegen der übergreifenden Baukastensteuerung Aufgaben wie die Vorgabe der Struktur von Baukästen. Ferner überprüft die übergreifende Baukastensteuerung das Baukastengesamtangebot über alle Entwicklungsbereiche eines OEMs hinweg hinsichtlich Konsistenz und Durchgängigkeit. So bewertet die Baukastensteuerung auch das E/E Baukastenportfolio (vgl. Abbildung 6-12).

Die *E/E Entwicklungsabteilungen* nehmen die Aufträge inkl. Vorgaben und Zielen zur Ausgestaltung dedizierter E/E Baukästen bzw. E/E Baukastenkomponenten vom E/E Baukasten entgegen und entwickeln diese vorgabegerecht. Zu den Vorgaben durch den E/E Baukasten zählen etwa die Verwendung von Standardsteuergeräten, -komponenten und -schnittstellen sowie die Anwendung des AUTOSAR Standards, um minimale Varianz und Komplexität sowie maximale Kommunalität und Skaleneffekte zu schaffen. Die Ergebnisse in Form von E/E Baukästen oder E/E Baukasten-Komponenten werden von den E/E Entwicklungsabteilungen dem E/E Baukasten als Lösungsangebot zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 6-12).

Der automotiven E/E Bordnetzarchitekturentwicklung obliegt die übergreifende Verantwortung, eine konsistente und stimmige E/E Bordnetzarchitektur, Genreration X" für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten (vgl. Abbildung 6-12). Die Entwicklung und Überarbeitung der automotiven E/E Bordnetzarchitektur richtet sich nach den übergreifenden Architekturvorgaben und -zielen, die von der Gesamtfahrzeugarchitektur als Prämissenset vorgegeben wird. Ferner obliegt der E/E Bordnetzarchitektur die Definition sowie Bereitstellung von Strukturvorgaben für das E/E Gesamtsystem inkl. Integration von Anforderungen, Technologien und Innovationen sowie die Definition und Bereitstellung von Strukturvorgaben für die E/E Baukastengestaltung und -integration. Die E/E Bordnetzarchitektur legt die Bordnetzstruktur, die Partitionierung inkl. Funktionsumfang, die Schnittstellen und Bustypen bzw. Verbindungstechnologien, das Energiemanagement, Geometrie und Systemfunktionen fest. Weitere Aufgaben sind die Prüfung auf mögliche Architekturverletzungen bei einer Umsetzung von (Änderungs-) Anträgen. Solche (Änderungs-) Anträge können z.B. bzgl. der Anforderungs-/ Innovationsumsetzung innerhalb bestehender oder neuer E/E Baukästen gestellt werden. Damit verbunden ist die Entscheidung über den Zeitpunkt der Umsetzung, d.h. ob diese innerhalb des Entwicklungszyklus, Ausleitungszyklus oder des Überarbeitungszyklus erfolgen soll. Die E/E Bordnetzarchitektur nimmt die Anforderungen des E/E Baukasten entgegen und berücksichtigt diese im Rahmen der Bordnetzarchitekturentwicklung. Ferner obliegt der E/E Bordnetzarchitektur die Verantwortung für das entsprechende E/E BordnetzarchitekturÄnderungswesen und die Entscheidung über die Umsetzung und Durchführung von Änderungen.

Das übergreifende Ziel der automotiven E/E Baukastenentwicklung ist die Sicherstellung des gesamtunternehmerischen Optimums in Form eines anforderungsgerechten, konsistenten und stimmigen E/E Baukastenportfolios einer "Genreration X" als Lösungsangebot für den baureihenübergreifenden Einsatz (vgl. Abbildung 6-12). Der automotive E/E Baukasten beachtet die Strukturvorgaben, die von der automotiven E/E Bordnetzarchitektur als Prämissenset vorgeben werden und orientiert sich damit an der Architekturfestlegung. Aufgabe der E/E Baukastenentwicklung ist die Definition von Strukturvorgaben für die Neugestaltung bzw. Überarbeitung von automotiven E/E Baukästen. Ferner obliegt der E/E Baukastenentwicklung die Aufgabe, (Änderungs-)Anträge und Innovationen dahingehend zu überprüfen, ob die darin adressierten Anforderungen innerhalb bestehender oder in neuen E/E Baukästen umgesetzt werden sollten. Zusätzlich steuert und konsolidiert die E/E Baukastenentwicklungen die technische und wirtschaftliche Bewertung von Anforderungsumsetzung in bestehenden oder neuen E/E Baukästen. Das aus diesem Arbeitsschritt resultierende Ergebnis – die Darlegung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses hinsichtlich der Anforderungsumsetzung – dient als Entscheidungsgrundlage für die Art der Anforderungsumsetzung innerhalb des E/E Baukastens. Sind bspw. Innovationen lokal im E/E Baukasten aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar, erfolgt eine Anforderungseinsteuerung mit Architekturrelevanz. Solche Anforderungen aus E/E Baukasten-Sicht werden gebündelt an die automotive E/E Bordnetzarchitektur adressiert.

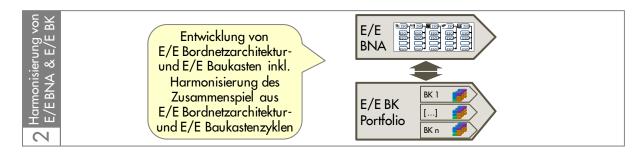


Abbildung 6-13: Systemelement 2 – Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung

Weitere Aufgabe der automotiven E/E Baukastenentwicklung ist die Vermeidung bzw. Reduzierung von E/E Baukastenelementen zur Minimierung der Varianten von E/E Baukasten und E/E Baukastenelementen, d.h. das Variantenmanagement und die Variantenoptimierung. Die Steuerung der Entwicklung bzw. Überarbeitung von automotiven E/E Baukästen erfolgt ebenfalls durch den automotiven E/E Baukasten: Unter Berücksichtigung aller Vorgaben, Ziele und Anforderungen wird die Beauftragung zur Entwicklung bzw. Überarbeitung von E/E Baukästen bei den verantwortlichen E/E Entwicklungsabteilungen (E/E CoCs) eingesteuert. Lösungsangebote und mögliche Alternativszenarien bzgl. der Entwicklung von E/E Baukästen werden gemeinsam mit den CoCs erarbeitet. Darüber hinaus obliegt dem E/E Baukasten die Verantwortung für das entsprechende E/E Baukasten-Änderungswesen und die Entscheidung über die Umsetzung und Durchführung von Änderungen. Als Ergebnis der detaillierten Beschreibung und Definition der einzelnen Bestandteile ergibt sich die Gesamtsicht auf das zweite Systemelement (vgl. Abbildung 6-13).

### 6.4.3. Systemelement 3 – Ausleitung

Gegenstand des dritten Systemelements "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" ist die baureihenübergreifende Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an die Baureihen eines OEMs (vgl. Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15).

Ausleitung von E/E BK

Modellierung Systemelement 3 – Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten:

- Definition des allgemeinen Fahrzeugentwicklungsprozess.
- Definition des Übergabeprozesses einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio an ein Fahrzeugprojekt in der Baureihe eines OEMs.
- Beschreibung der Platzierung neuer Fahrzeugprojekte am Markt.
- Beschreibung der Erschließung von Skalen- und Verbundeffekten durch eine Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio.

Abbildung 6-14: Modellierung von Systemelement 3 – Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung

Die Entwicklung eines Fahrzeugprojekts untergliedert sich in die Definitionsphase, bestehend aus Ziel- und Konzeptdefinition, sowie die Produktentwicklungsphase, bestehend aus Konzept- und Serienentwicklung, und endet mit dem Beginn der Fahrzeugproduktion (auch: "Start of Production" (SOP)) (vgl. Abbildung 6-15).

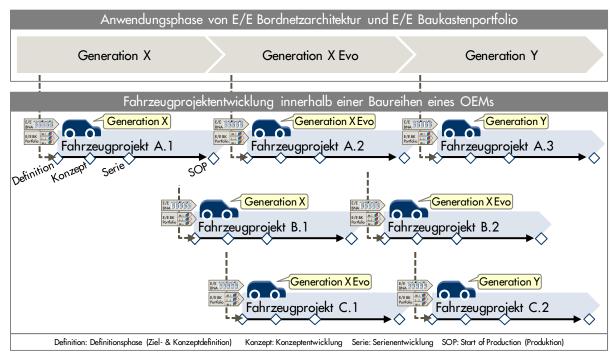


Abbildung 6-15: Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an Fahrzeugprojekte innerhalb einer Baureihe eines OEMs, eigene Darstellung.

Plant ein OEM innerhalb einer Baureihe ein neues Fahrzeugprojekt bzw. eine neue Fahrzeuggeneration oder die Weiterentwicklung<sup>8</sup> eines bestehenden Fahrzeugprojekts (z.B.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Die Weiterentwicklung eines Fahrzeugs kann aufgrund verschiedener Gründe erfolgen. Dazu zählen etwa die Umsetzung von Maßnahmen zur Qualitätsoptimierung, Kostenreduzierung, zwingende Umsetzung von Gesetzesanforderungen, etc. Darüber hinaus können Weiterentwicklungen mit regulär eingeplanten technischen

Modellüberarbeitungen), wird in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung – der Definitionsphase – das stimmige Set aus strukturgebender E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio als Gesamtangebot eingesteuert (z.B. "Generation X"). Die Umsetzung ist dabei verpflichtend für das jeweilige Fahrzeugprojekt. Aus diesem Gesamtangebot werden alle für das Fahrzeugprojekt benötigten E/E Baukästen anforderungsbedingt, gemäß den Vorgaben der strategischen Produktplanung, ausgewählt und durch weitere in der strategischen Produktplanung festgelegten derivatsspezifischen Produktinhalte und Funktionalitäten ergänzt. Gesamthaft werden diese in einer Anforderungsliste auf Gesamtfahrzeugebene konsolidiert. Der Ergebnistyp dieser Definitionsphase bzw. der Konzeptdefinition bildet das Fahrzeuglastenheft, welches Funktions- und Qualitätsanforderungen, Produktmerkmale, Freigabekriterien, etc. umfasst. Damit umfasst das Lastenheft sämtliche Vorgaben des stimmigen Sets aus automotiver E/E Bordnetzarchitektur und den ausgewählten E/E Baukästen (vgl. Abbildung 6-15).

Auf Basis des Fahrzeuglastenhefts beginnt die Konzeptentwicklung, als erster Schritt der eigentlichen Produktentwicklungsphase. Ziel der Konzeptentwicklung ist es ein zielkonfliktfreies Gesamtfahrzeugkonzept zu entwickeln, welches an die Serienentwicklung übergeben werden kann. Dazu wird das Fahrzeuglastenheft auf Funktions- und Komponentenebene in technische Lösungen umgesetzt. Die Auswahl der Lösungen für die Serienentwicklung erfolgt anhand des jeweiligen Erfüllungsgrads der zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie Zielen, d.h. auf Basis von technischen und wirtschaftlichen Kriterien. Die technischen Lösungen von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen sind jedoch in diesem Schritt unverändert, d.h. gemäß Vorgabe, zu übernehmen. Ein Alternativangebot wird nicht vorgehalten und ist unzulässig. Die Konzeptentwicklungsphase endet mit der Festlegung des Gesamtfahrzeugkonzepts, als stimmiges Gesamtkonzept aus den ausgewählten technischen Lösungen. Der zweite Schritt der Produktentwicklungsphase ist die Serienentwicklung, deren Ergebnistyp eine vollständige und detaillierte Fahrzeugbeschreibung, d.h. Produktbeschreibung, darstellt. In diesem Schritt werden die einzelnen entwickelten technischen Lösungen, d.h. Funktionen und Komponenten, in das Gesamtfahrzeug integriert. Daran anknüpfend, werden als Produktionsvorbereitung erste Vorserienstände (Versuchsträger) unter seriennahen Bedingungen produziert und unter realen Bedingungen erprobt. Die Serienproduktion beginnt, sobald die Fahrzeugentwicklung Serienreife erzielt hat (vgl. Abbildung 6-15).

OEMs bringen neue Derivate bzw. neue Generationen bestehender Derivate in der Regel nicht zeitgleich auf den Markt. Insbesondere aus Gründen der Vermarktbarkeit, aber auch aufgrund limitierter Ressourcen (insb. Zeit und Kapazitäten) werden Derivate zu unterschiedlichen Zeitpunkten entwickelt und im Markt platziert (vgl. Abbildung 6-11) [ESCH 2013, S. 25ff.]. So tritt die Erschließung von Skaleneffekten durch eine neue Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten nicht mit Einsatz im ersten Fahrzeugprojekt ein, sondern erst über die Zeit mit Einsatz bspw. einer "Generation X" baureihenübergreifend und in mehreren Fahrzeugprojekten, d.h. mit steigender Stückzahl. Eine durchgängige und zukunftsorientierte Gestaltung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten ist Voraussetzung dafür, Skaleneffekte über sukzessive Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten zu erschließen.

Überarbeitungen oder Modellüberarbeitungen eines Fahrzeugs einhergehen, welche i.d.R. Designüberarbeitungen und Funktions- bzw. Innovationshübe umfassen.

Als Ergebnis der detaillierten Beschreibung und Definition der einzelnen Bestandteile ergibt sich die Gesamtsicht auf das dritte Systemelement (vgl. Abbildung 6-16).

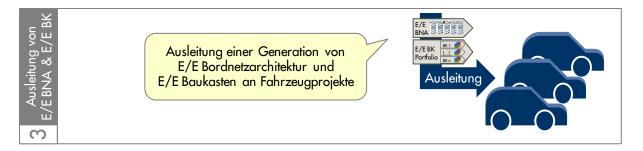


Abbildung 6-16: Systemelement 3 – Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an ein Fahrzeugprojekt, eigene Darstellung

## 6.5. Konsolidierung und Komplettierung

Nachdem die drei Systemelemente durch den Ordnungsrahmen strukturiert vorliegen, werden diese in einem nächsten Schritt konsolidiert und komplettiert. In dieser Phase werden dazu vorab die einzelnen Systemelemente zusammengeführt, indem deren Schnittstellen betrachtet und beschrieben werden.

### 6.5.1. Schnittstellen der Systemelemente

Der Fokus des folgenden Abschnitts liegt auf den jeweiligen Schnittstellen zwischen den Systemelementen 1 und 2, den Systemelementen 2 und 3 sowie den Systemelementen 3 und 1. Die drei Schnittstellen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schnittstelle 1: Ausleitung von Anforderungen aus Systemelement 1 "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" an Systemelement 2 "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" im Rahmen des initialen Entwicklungszyklus, des Ausleitungszyklus oder des Überarbeitungszyklus einer "Generation X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio.
- Schnittstelle 2: Übergabe einer "Generation X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio von Systemelement 2 "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" an Systemelement 3 "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten", d.h. an die Fahrzeugprojekte in den Baureihen eines OEMs.
- *Schnittstelle 3:* Ausleitung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio von Systemelement 3 "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" an Systemelement 1 "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten".

Diese drei Schnittstellen werden im Folgenden näher betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Schnittstelle 1, da der Ausleitung von Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung ein komplexer Bewertungs- und Entscheidungsprozess zugrunde liegt. Die Schnittstellen 2 und 3 stellen hingegen weniger komplexe Punkte der Übergabe dar. Für

Schnittstelle 2 handelt es sich dabei um die Übergabe von Entwicklungsergebnis inkl. zugehöriger Verantwortung, z.B. die Übergabe einer "Generation X" an die Fahrzeugprojekte einer Baureihe. Hingegen werden bei Schnittstelle 3 Anforderungen aus den Fahrzeugprojekten bzw. aus den Baureihen eines OEMs zurück gemeldet und die Entscheidung über deren Umsetzung bzgl. technischer Lösung und Zeitpunkt an das Requirements Engineering und Management übergeben.

### Schnittstelle 1 – Ausleitung von Anforderungen an eine "Generation X"

Die erste Schnittstelle verbindet das Systemelement 1 "Anforderungen an E/E Bordnetz-architektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-7) mit dem Systemelement 2 "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-13).

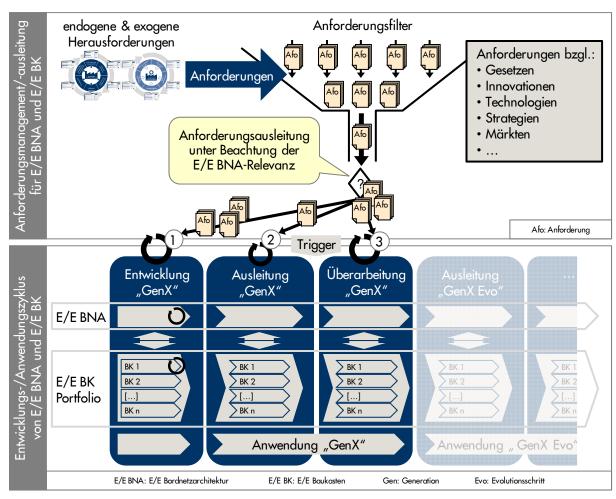


Abbildung 6-17: Drei Fälle der Ausleitung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

Gegenstand dieser Schnittstelle ist die Ausleitung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen, die direkten Einfluss auf die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung haben. Diese Anforderungsausleitung kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen (vgl. Abbildung 6-17):

• *Fall 1:* Anforderungsausleitung im Rahmen des initialen Entwicklungszyklus einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio.

- *Fall 2:* Anforderungsausleitung im Rahmen des Ausleitungszyklus einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio.
- *Fall 3:* Anforderungsausleitung im Rahmen des Überarbeitungszyklus einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio.

Wird eine "Generation X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio initial entwickelt, so werden die dafür relevanten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen durch das Requirements Engineering und Management zunächst identifiziert, aufbereitet und in den Entwicklungszyklus der "Generation X" eingesteuert (vgl. Fall 1 in Abbildung 6-17).

Entscheidung, sondern vielmehr die Notwendigkeit des Zeitpunkts einer Anforderungsausleitung. Essentiell ist dabei die Harmonisierung bzw. die Priorisierung der Anforderungen untereinander. Werden bspw. Zielkonflikte bzgl. der Umsetzung verschiedener Anforderungen identifiziert, so entscheidet die jeweilige Anforderungspriorität über deren Einsteuerung in den Entwicklungszyklus einer "Generation X". Die konfliktären Anforderungen, die aufgrund einer nachgelagerten Priorität nicht ausgeleitet werden, verbleiben im Anforderungsfilter und werden erst bei einer nachfolgenden Option zur Anforderungsausleitung wieder betrachtet. Die Anforderung zur Updatefähigkeit sämtlicher E/E Baukästen kann mit sicherheitsrelevanten Anforderungen mit hoher Priorität für einzelne E/E Baukästen im Konflikt stehen, sodass eine übergreifende Updatefähigkeit des Gesamtverbunds nicht umgesetzt werden kann. In diesem Fall würde die Anforderung der Überarbeitung sämtlicher E/E Baukästen hinsichtlich der Befähigung zur Over-the-Air-Updatefähigkeit zurück in den Anforderungsfilter überführt werden.

Für das Anforderungsset, welches zur Ausleitung in den Entwicklungszyklus bestimmt wird, wird die Prämisse gesetzt, dass dieses im Rahmen der initialen Entwicklung einer "Generation X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio zwingend umzusetzen ist. Parallel dazu besteht die Option, dass aus der E/E Bordnetzarchitektur- oder E/E Baukastenentwicklung funktionale und nicht-funktionale Anforderungen in das Systemelement 1 "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" zurück eingesteuert werden. Solche Anforderungen werden nach Möglichkeit direkt im Rahmen der Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio einer "Generation X" umgesetzt. Ist dies für einzelne Anforderungen dieser Kategorie nicht möglich, so werden diese ebenfalls in den Anforderungsfülter eingesteuert und erst wieder bei einer nachfolgenden Option zu Anforderungsausleitung bewertet.

Befindet sich eine "Generation X" bereits im Ausleitungszyklus, d.h. in der Anwendungsphase, können Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur oder E/E Baukasten nur noch bedingt ausgeleitet werden (vgl. Fall 2 in Abbildung 6-17). In diesem Fall sind sowohl die Art und der Umfang der Anforderungen als auch die Notwendigkeit des Zeitpunkts einer Anforderungsausleitung entscheidend. Dementsprechend kann eine Anforderungsausleitung im Rahmen des Ausleitungszyklus einer "Generation X" nur dann erfolgen, wenn diese keine Verletzung des Gesamtzusammenspiels aus E/E Bordnetzarchitektur oder E/E Baukastenportfolio zur Folge hat. So könnte das o.g. Anforderungsbeispiel der Updatefähigkeit des Gesamtverbunds im Rahmen des Ausleitungszyklus nicht umgesetzt werden, da diese sowohl eine Verletzung der E/E Bordnetzarchitektur als auch der sicherheitskritischen E/E Baukästen zur Folge hätte. Solche Anforderungen verbleiben im Anforderungsfilter. Hingegen können z.B. Anforderungen an E/E Baukästen ausgeleitet werden, wie etwa Mehrwertfunktionen hinsichtlich der Navigation, die keine Verletzung der E/E Bordnetzarchitektur mit sich bringen.

### Trigger für die Überarbeitung einer E/E BNA und E/E BK "GenX"

- Eine signifikante Anzahl zwingend notwendiger Anforderungsumsetzungen ist im Rahmen des Anwendungszyklus nicht möglich.
- "Muss-Anforderungen" (z.B. (länderspezifische) Gesetzesanforderung) sind nicht im Rahmen des Anwendungszyklus umsetzbar.
- Neue Technologien/Innovationen (z.B. Befähigung zum hochautomatisierten Fahren) sind nicht im Rahmen des Anwendungszyklus realisierbar.
- Eine gewünschte Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb ist mit dem bestehenden Baukastenportfolio nicht darstellbar. → Technologievorsprung).
- Eine signifikante Anzahl bestehender E/E Funktionen auf ZSG wird durch neue E/E Funktionen ersetzt.
- "Muss-Anforderungen" erfordern die Entwicklung neuer E/E BK, die im Rahmen der bestehenden E/E BNA nicht integrierbar sind.
- Neue Fahrzeugkonzepte werden entwickelt, die nicht mit der bestehenden E/E BNA realisiert werden können (z.B. alternative Antriebskonzepte wie Elektro- oder Wasserstofffahrzeuge).
- ...

Abbildung 6-18: Trigger für die Überarbeitung einer Generation E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung.

Die Entscheidung zur Überarbeitung einer "Generation X" erfolgt triggerbasiert (vgl. Abbildung 6-17 und Abbildung 6-18). Dieser Trigger greift dann, wenn bspw. eine signifikante Anzahl von zwingend notwendigen Anforderungen im Anforderungsfilter vorliegt, die im Rahmen des Ausleitungszyklus nicht umsetzbar sind. Auch können "Muss-Anforderungen" wie Gesetzesanforderungen zugrunde liegen, die kurzfristig umgesetzt werden müssen, jedoch eine Verletzung des Gesamtzusammenspiels aus E/E Bordnetzarchitektur oder E/E Baukastenportfolio zur Folge hätten und somit ebenfalls nicht im Rahmen des Ausleitungszyklus ausgeleitet werden können. Sofern solche Anforderungen keine revolutionäre Neuentwicklung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio erforderlich machen, initiiert dieser Trigger die evolutionäre Überarbeitung der "Generation X" im Rahmen des Überarbeitungszyklus. Damit einhergehend beginnt die Ausleitung von Anforderungen, (vgl. Fall 3 in Abbildung 6-17). Diese Anforderungsausleitung ist vergleichbar mit der innerhalb des Entwicklungszyklus. Der Unterschied im Überarbeitungszyklus besteht wie o.g. darin, dass keine grundlegende Neuentwicklung der E/E Bordnetzarchitektur durchgeführt wird und damit nur solche Anforderungen umgesetzt werden können, die keine Verletzung der Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio zur Folge haben. Existieren "Muss-Anforderungen", die eine grundlegende Verletzung der Harmonisierung einer bestehenden "Generation X" unumgänglich machen, so wird auf eine Überarbeitung zu einer "Generation X Evo" verzichtet. In einem solchen Fall beginnt die revolutionäre Neuentwicklung einer "Generation Y" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio. Im Rahmen dieser erfolgt die Anforderungsausleitung analog zum Entwicklungszyklus der "Generation X".

Als Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der Umsetzung der Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung im Entwicklungs-, Ausleitungs- oder Überarbeitungszyklus dient ein im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelter Entscheidungsbaum (vgl. Abbildung 6-19). Eingangsgröße für diesen Entscheidungsbaum sind funktionale und nicht-funktionale Anforderungen aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung, die mittels Requirements Engineering ermittelt, spezifiziert, analysiert, validiert und modelliert sowie durch das

Requirements Managements in den Anforderungsfilter überführt und schließlich zur Umsetzung ausgeleitet werden (vgl. Abbildung 6-6). Folglich muss der Entscheidungsbaum für jede einzelne Anforderung durchlaufen werden.

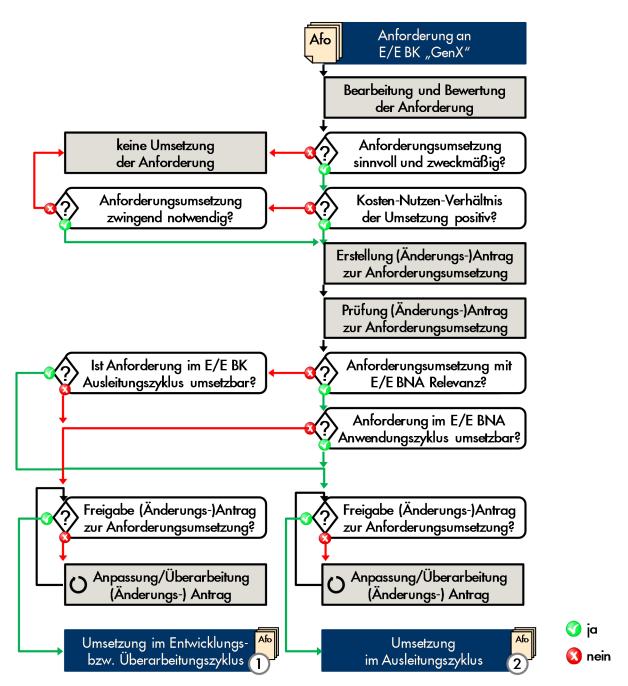


Abbildung 6-19: Anforderungsausleitung an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten unter Beachtung der E/E Architekturrelevanz, eigene Darstellung.

Im Rahmen der beschriebenen Anforderungsaufbereitung wird im Entscheidungsbaum zunächst die grundsätzliche Frage gestellt, ob die Umsetzung einer jeden dedizierten Anforderung sinnvoll und zweckmäßig ist. Sofern die Antwort auf diese Frage negativ ist, wird die Anforderung nicht umgesetzt. Ist die Antwort hingegen positiv, so folgt die Frage nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis der Anforderungsumsetzung.

Kommt die entsprechende Prüfung bzgl. des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu einem negativen Ergebnis, ist zu überprüfen, ob die Anforderungsumsetzung zwingend notwendig ist. Ist diese nicht notwendig, wird die Anforderung nicht umgesetzt. Tritt hingegen einer der beiden Fälle

ein, dass entweder das Kosten-Nutzen-Verhältnis negativ, aber die Anforderungsumsetzung zwingend notwendig ist oder aber das Kosten-Nutzen-Verhältnis positiv ist, wird ein Änderungsantrag zwecks Anforderungsumsetzung gestellt.

Ist der Änderungsantrag gestellt, erfolgt die Prüfung zur Umsetzung des Änderungsantrags. Dieser Prüfung liegt die Fragestellung zugrunde, ob die Anforderungsumsetzung Relevanz für die E/E Bordnetzarchitektur hat. D.h., ob aus der Anforderungsumsetzung eine Verletzung oder Änderungsbedarf der bestehenden E/E Bordnetzarchitektur resultiert.

Kann eine E/E Bordnetzarchitekturverletzung ausgeschlossen werden, hat die Anforderung Relevanz für die E/E Baukastenentwicklung. Im letzteren Fall ist im nächsten Schritt zu hinterfragen, ob die Anforderungsumsetzung im E/E Baukastenportfolio innerhalb des Ausleitungszyklus realisiert werden kann.

Ist die Anforderungsumsetzung innerhalb des Ausleitungszyklus umsetzbar, so wird der Änderungsantrag zur Freigabe der Anforderungsumsetzung im Entwicklungszyklus oder im Überarbeitungszyklus eingesteuert (vgl. Fall 1 und Fall 3 in Abbildung 6-17).

Sofern ein Änderungsantrag zwar von Relevanz für die E/E Bordnetzarchitektur ist, sich jedoch nicht innerhalb des Anwendungszyklus umsetzen lässt, so wird der Änderungsantrag zur Freigabe der Anforderungsumsetzung im Entwicklungszyklus oder im Überarbeitungszyklus eingesteuert (vgl. Fall 1 und Fall 3 in Abbildung 6-17).

Ist der Änderungsantrag von Relevanz für die E/E Bordnetzarchitektur und die Anforderung im Rahmen des Anwendungszyklus realisierbar, wird der Änderungsantrag zur Freigabe der Anforderungsumsetzung im Ausleitungszyklus eingesteuert (vgl. Fall 2 in Abbildung 6-17).

Für alle drei beschriebenen Fälle setzt die Freigabe einen vollständig und vorgabekonform befüllten Änderungsantrag durch das Requirements Management voraus. Folglich kann im Rahmen des Freigabeprozesses eine iterative Überarbeitung des Änderungsantragsdokuments notwendig sein, bis die finale Freigabe zur Umsetzung gegeben wird.

### Schnittstelle 2 – Ausleitung einer "Generation X" an Fahrzeugprojekte einer Baureihe

Die zweite Schnittstelle bildet den Punkt der Übergabe einer "Generation X" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio von Systemelement 2 "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-13) an Systemelement 3 "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-16), d.h. an die Fahrzeugprojekte in den Baureihen eines OEMs. Dieser Vorgang setzt die Entwicklung eines stimmigen Sets aus strukturgebender E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio voraus, welches in Summe alle zugrundeliegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen aus endogen wie exogenen Umwelteinflüssen erfüllt (vgl. Systemelement 2). Voraussetzung für die Ausleitung einer "Generation X" ist, dass der Entwicklungs- bzw. der Überarbeitungszyklus der jeweiligen Generation erfolgreich abgeschlossen sind. Damit erfolgt die Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und dazugehörigem E/E Baukastenportfolio in ein Fahrzeugprojekt ausschließlich im Rahmen der Anwendungsphase der "Generation X" (vgl. Abbildung 6-11).

Zum Zeitpunkt der Übergabe – der Definitionsphase eines Fahrzeugprojekts – wird die "*Generation X*" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio an ein dediziertes Fahrzeugprojekt ausgeleitet (vgl. Abbildung 6-20). Dieser Schritt wird durch einen Übergabevertrag

dokumentiert. In diesem Dokument wird festgehalten, dass die Entwicklung der übergebenen "Generation X" vollständig abgeschlossen und E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio miteinander harmonisiert sind. Damit wird eine Garantie dafür gegeben, dass sämtliche zugrunde gelegten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen im Rahmen der Entwicklung umgesetzt wurden und ein stimmiges Set von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio erzeugt wurde, welches vorbehaltslos für die Ausleitung an und Übernahme durch ein Fahrzeugprojekt einer Baureihe geeignet ist. Des Weiteren wird in dem Übergabevertrag dokumentiert, dass das Fahrzeugprojekt ein stimmiges Set von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio entgegen nimmt. Mit dieser Bestätigung der Übergabe der "Generation X" wird auch automatisch die Verantwortung an das Fahrzeugprojekt vollumfänglich übertragen. Damit einhergehend wird die Umsetzung der eingesteuerten E/E Bordnetzarchitektur und des E/E Baukastenportfolios mit Einschränkung für das jeweilige Fahrzeugprojekt verpflichtend. Die Einschränkung hinsichtlich der Umsetzung des E/E Baukastenportfolios bezieht sich darauf, dass nicht für jedes Fahrzeugprojekt eine gesamthafte Umsetzung zielführend ist. Entsprechend obliegt es dem Fahrzeugprojekt, die Auswahl der benötigten E/E Baukästen aus dem Gesamtangebot auszuwählen. Dieser Schritt erfolgt auf Basis der einem Fahrzeugprojekt zugrundeliegenden Ziele und Anforderungen, gemäß den Vorgaben aus strategischer Produktplanung.

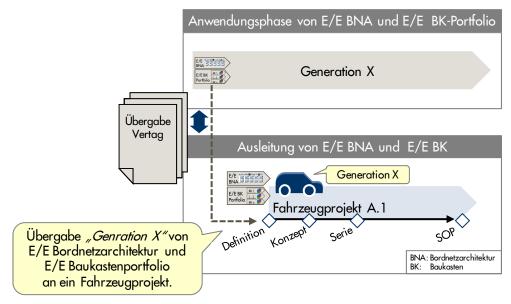


Abbildung 6-20: Übergabe einer "Genration X" an ein Fahrzeugprojekt, eigene Darstellung.

## Schnittstelle 3 – Einsteuerung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten

Die dritte Schnittstelle verknüpft das Systemelement 3 "Ausleitung von E/E Bordnetz-architektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-16) mit dem "Systemelement 1 "Anforder-ungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" (vgl. Abbildung 6-7). Der Gegenstand dieser Schnittstelle ist die Adressierung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforder-ungen aus den Baureihen an die E/E Bordnetzarchitektur und das E/E Baukastenportfolio, welche entlang des gesamten Entwicklungsprozesses eines Fahrzeugprojekts kontinuierlich identifiziert werden können (vgl. Abbildung 6-21).

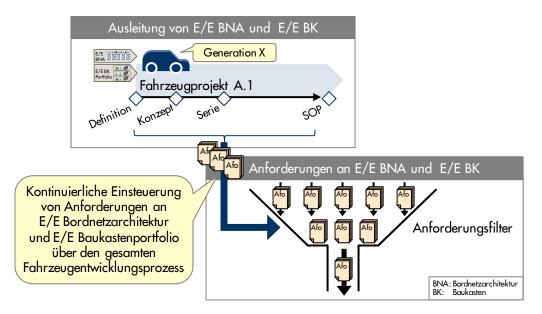


Abbildung 6-21: Adressierung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten durch Fahrzeugprojekte, eigene Darstellung.

Gründe für die Identifikation zusätzlicher Anforderungen können vielseitig sein. Ein Beispiel für solche Anforderungen ist, Kosten für einen dedizierten E/E Baukastenumfang zu reduzieren oder alternative, kostengünstigere Varianten zu entwickeln. Ferner können qualitätsrelevante Fehler innerhalb der Fahrzeugentwicklung oder Sicherheitslücken von Kommunikationsschnittstellen erkannt werden. Des Weitern ist es möglich, dass aus der Fahrzeugproduktion Anforderungen hinsichtlich der Optimierung des Montageprozesses gestellt werden.

Solche Anforderungen werden vom Systemelement 3 "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" an das Systemelement 1 "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" überführt, wo diese im Rahmen des Requirements Engineering aufbereitet werden und über das Requirements Management zunächst in den Anforderungsfilter eingesteuert und zum nächstmöglichen Zeitpunkt an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung ausgeleitet werden. Die Adressierung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten ist dabei grundsätzlich über sämtliche Phasen des Fahrzeugentwicklungsprozesses möglich. Es sind jedoch zwei Fälle der Anforderungsumsetzung zu unterscheiden:

- Direkte Anforderungsumsetzung inkl. Ausleitung der technischen Lösung.
- Keine direkte Anforderungsumsetzung, d.h. Speicherung der Anforderung im Anforderungsfilter für eine spätere Umsetzung und Ausleitung.

Handelt es sich um Anforderungen, die innerhalb des Ausleitungszyklus einer "Generation X" umgesetzt werden können, erfolgt eine Prüfung der direkten Anforderungsumsetzung inkl. Ausleitung der technischen Lösung. Dadurch wird es möglich, dass die Lösung zur Anforderung noch in dem Fahrzeugprojekt umgesetzt werden kann, welches die Anforderung gestellt hat. Ist die gestellte Anforderung jedoch nicht im Rahmen des Ausleitungszyklus, sondern erst im Überarbeitungs- oder Entwicklungszyklus einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio möglich, so wird die Lösung zur gestellten Anforderung erst für nachfolgende Fahrzeugprojekte erarbeitet werden können. Die Klärung einer Anforderungsumsetzung erfolgt zwischen dem Requirements Management und dem Fahrzeugprojekt in Abstimmung mit der E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung.

# 6.5.2. Validierung des Referenzmodells

Mit Beschreibung der drei Schnittstellen ist die Modellierung der sechs Bestandteile des Referenzmodells für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung vervollständigt. Zur Zusammenfassung dieser einzelnen Bestandteile folgt die Verknüpfung der drei zuvor modellierten Systemelemente über die definierten drei Schnittstellen (vgl. Abbildung 6-22).

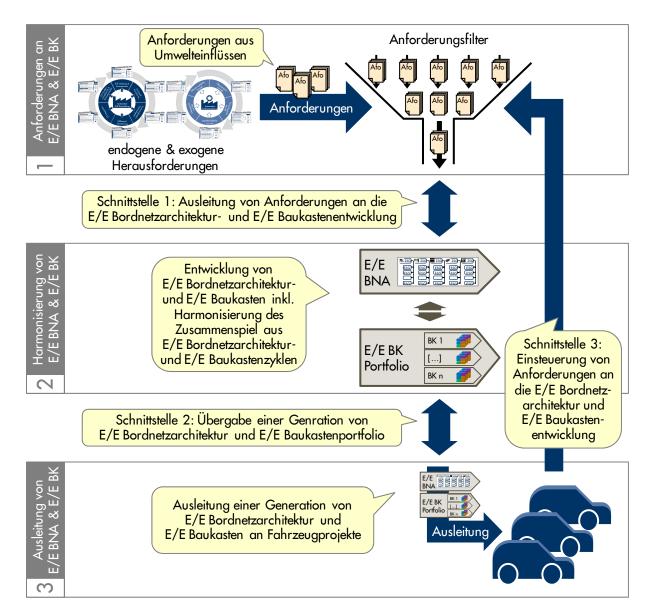


Abbildung 6-22: Referenzmodell für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung.

Gesamthaft bilden Systemelemente und Schnittstellen das vollständige Referenzmodell für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung. Dieses erarbeitete Ergebnis liefert einen Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung (vgl. Abbildung 6-22), indem zum einen die spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren von automotiven E/E Baukästen beschrieben werden und zum anderen die Harmonisierung der Zyklen automotiver E/E Baukästen mit denen einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur erzielt wird.

Der notwendige Wissens- und Erkenntnisgewinn als Grundlage für die Referenzmodellierung, die Durchführung der Modellierung der einzelnen Systemelemente, der Schnittstellen sowie

deren Zusammenspiel und die Referenzmodell-Validierung erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens durch enge Einbeziehung verschiedener Experten (vgl. Abbildung 6-23). Der Identifikation und Auswahl der notwendigen Experten basiert auf den der Modellierung zugrundeliegenden Fragestellungen und Zielen (vgl. Kapitel 6.1).

Um ein tiefes Verständnis für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Entwicklung inkl. der E/E Bordnetz- und E/E Baukastenentwicklung zu gewinnen, wurden Spezialisten für E/E Architekturgestaltung, E/E Baukastenentwicklung, E/E Komponentenentwicklung, E/E Funktionsarchitektur, Softwarearchitektur und E/E Anforderungsmanagement ausgewählt. Für ein übergreifendes Verständnis für die Gesamtfahrzeugentwicklung werden Spezialisten für Gesamtfahrzeugarchitektur, Baukastenentwicklung und -prozesse mit einbezogen. Vervollständigt wurde der Expertenkreis der unternehmerischen Praxis durch einen Fahrzeugteilprojektleiter E/E für ein detailliertes Verständnis der Spezifika von Fahrzeugprojekten bzw. Baureihen und einen Experten für E/E Kooperationen und Industriebaukasten. Vor dem Ziel eine gewisse neutrale Außensicht in die Modellierung des Referenzmodells mit einfließen zu lassen, wurden darüber hinaus drei Vertreter von zwei internationalen Strategieberatungen mit Spezialisierung auf die Automobilindustrie in den Expertenkreis aufgenommen. Aus Gründen der Geheimhaltungspflicht unterbleibt die Nennung von Namen, Unternehmen sowie genaue Funktions- und Tätigkeitsbeschreibungen.

	Teilnehmer Experten-Workshops und Experten-Interviews
Teilnehmer 1:	Spezialist für Gesamtfahrzeugarchitekturgestaltung eines deutschen OEMs
Teilnehmer 2:	Spezialist für E/E Architekturgestaltung eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 3:	Spezialist für Baukastenentwicklung/-entwicklungsprozess eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 4:	Spezialist für E/E Baukastenentwicklung eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 5:	Spezialist für E/E Komponentenentwicklung eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 6:	Abteilungsleiter für E/E Funktionsarchitektur eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 7:	Spezialist für Softwarearchitektur/AUTOSAR eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 8:	Fahrzeugteilprojektleiter für E/E eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 9:	Spezialist für E/E Anforderungsmanagement eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 10:	Abteilungsleiter für E/E Kooperationen und Industriebaukasten eines deutschen OEMs
7 Teilnehmer 11:	Principal einer internationalen Strategieberatung
Teilnehmer 12:	Partner einer internationalen Strategieberatung
Teilnehmer 13:	Partner einer internationalen Strategieberatung

Abbildung 6-23: Liste der Teilnehmer an Experten-Workshops und Experten-Interviews, eigene Darstellung.

Mit den ausgewählten Experten wurden sechs aufeinander aufbauende Workshops durchgeführt. Dazu wurden die Experten in zwei Teams eingeteilt (vgl. Abbildung 6-24). Die Aufteilung der Experten in zwei Teams erfolgte vor den zwei Zielstellungen die jeweiligen Fachkenntnisse und Expertisen ideal für den Wissens- und Erkenntnisgewinn nutzen zu können und, um eine gewisse gegenseitige Kontrolle und ein Gleichgewicht bei der Erarbeitung und Bewertung der Ergebnisse gemäß dem "*Checks and Balances Prinzip*" zu gewährleisten. Das Team 1, bestehend aus sieben Experten, nahm an den Workshops I, II, IV, V und VI teil. Das Team 2, bestehend aus sechs Experten, nahm an den Workshops III, IV, V und VI teil (vgl. Abbildung 6-24).

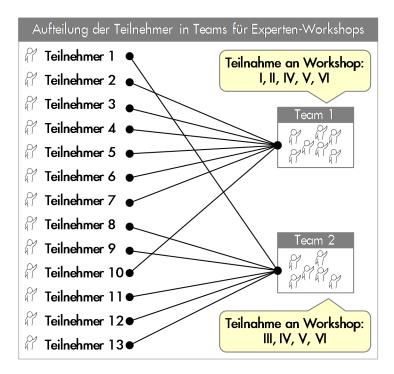


Abbildung 6-24: Zuordnung der Teilnehmer zu Teams inkl. Experten-Workshop, eigene Darstellung.

Die zwei Teams setzten sich wie folgt zusammen:

- *Team 1:* Spezialist E/E Architekturgestaltung, Spezialist Baukastenentwicklung und Baukastenentwicklungsprozess, Spezialist E/E Baukastenentwicklung, Spezialist E/E Komponentenentwicklung, Abteilungsleiter E/E Funktionsarchitektur eines deutschen OEMs, Spezialist für Softwarearchitektur/AUTOSAR, Abteilungsleiter für E/E Kooperationen und Industriebaukasten.
- *Team 2:* Spezialist Gesamtfahrzeugarchitekturgestaltung, Fahrzeugteilprojektleiter E/E, Spezialist E/E Anforderungsmanagement, Principal und zwei internationalen Strategieberatungen.

Die sechs aufeinander aufbauende Workshops wurden mit dem Ziel durchgeführt, über mehrere Iterationsschleifen sukzessive den notwendigen Wissens- und Erkenntnisgewinn zu steigern und darüber die Modellierung der Bestandteile des Referenzmodells gemäß der zugrundeliegenden Ziele durchzuführen zu können (vgl. Kapitel 6.1). Wobei die jeweiligen Workshop-Ergebnisse im Nachgang unter Einbeziehung von semistrukturierten Experteninterviews aufbereitet wurden. Jeder der sechs Workshops hatte dabei schwerpunktmäßig ein dediziertes Thema zum Gegenstand (Abbildung 6-25):

- *Workshop I:* Spezifika von automotiven E/E Baukästen.
- *Workshop II*: Spezifika von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen.
- *Workshop III*: Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen.
- Workshop IV: Definition und Modellierung der Referenzmodell-Systemelemente.
- Workshop V: Definition und Modellierung der Referenzmodell-Schnittstellen.
- Workshop VI: Konsolidierung und Komplettierung des Referenzmodells.

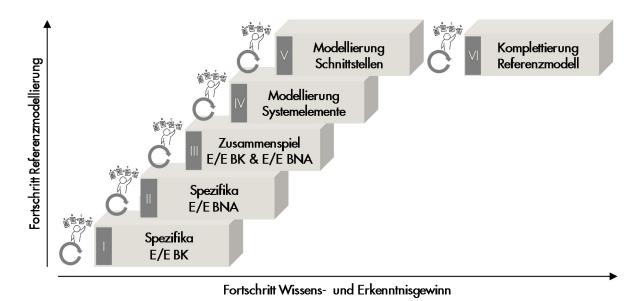


Abbildung 6-25: Experten-Workshops zur Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn sowie Referenzmodellierung, eigene Darstellung.

Im Fokus von Workshop I mit Team 1 standen automotive E/E Baukästen. Ziel war dabei ein tiefes Verständnis von E/E Baukästen sowie deren Charakteristika, Anforderungen, Rahmenbedingungen und kritische Erfolgsfaktoren zu gewinnen. Die Ergebnisse flossen sowohl in die grundlegende Definition des E/E Baukastenbegriffs als auch in die Entwicklung des Referenzmodells ein. Betrachtungsgegenstand des Workshops II mit Team 1 waren die Spezifika von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen hinsichtlich des Zusammenspiels mit E/E Baukästen. Im Rahmen dessen wurden die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten herausgearbeitet. Auf den Wissens- und Erkenntnisgewinn der ersten zwei Workshops setzte Workshop III mit Team 2 auf. Dessen Gegenstand war das Zusammenspiel sowie die Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung. Zentraler Ergebnistyp dieses Workshops ist die Definition eines entsprechenden Regelwerks inkl. Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten für die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung unter Berücksichtigung direkter Schnittstellen innerhalb der automotiven (E/E) Entwicklung. Im Workshop IV kamen initial beide Teams zusammen. Ziel dieses Workshops war zunächst die Definition des Ordnungsrahmens des Referenzmodells inkl. der darin notwendigen Systemelemente sowie deren Beschreibung und Modellierung. Auf der in diesem Workshop definierten Grundstruktur des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung setzte der Workshop V auf, der mit beiden Teams stattfand. Betrachtungsgegenstand waren hier die Schnittstellen zwischen den Systemelementen, um diese darüber miteinander verknüpfen zu können. Dadurch wurden die notwendigen Grundlagen geschaffen, um das Referenzmodell zu konsolidieren und zu komplettieren. Dieser Schritt fand im Workshop VI statt, an welchem beide Teams teilnehmen. Gegenstand dieses Workshops war, das Referenzmodell für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung aus den jeweils drei Systemelementen und Schnittstellen auf Vollständigkeit zu überprüfen und zu validieren. Aus diesem Workshop ging als Ergebnis die allgemeine Übereinstimmung der Experten hervor, dass im Sinne der Forschungseffizienz eine weitere Iterationsschleife zur Referenzmodellüberarbeitung nicht mehr sinnvoll wäre, da eine weitere Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn als nicht nutzenstiftend bewertet wurde.

Unterstützend zur Bewertung der Modellreife und -vollständigkeit wurden entsprechende Bewertungskriterien mit den Experten definiert, die ebenfalls als Entscheidungsgrundlage in die Modellbewertung in Workshop VI mit einflossen (vgl. Abbildung 6-26). Die Bewertungskriterien basierten dabei auf den dem Referenzmodell zugrunde gelegten Zielen (vgl. Kapitel 6.1). Mit dem ersten Bewertungskriterium wurde hinterfragt, ob das Referenzmodell grundsätzlich Best Practices und Common Practices der unternehmerischen Praxis der E/E Entwicklung berücksichtigt. Das zweite Bewertungskriterium überprüft, ob der entwickelte Lösungsansatz für das Anwendungsgebiet der automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzt, dieser den inhaltlichen Betrachtungsgegenstand abdeckt und damit die Interdependenzen zw. E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukasten getroffen werden. Die Bestätigung dieses Bewertungskriteriums war Voraussetzung für eine positive Aussage zum dritten Bewertungskriterium, welches danach fragt, ob das Referenzmodell sich grundsätzlich für die Wiederverwendung im Rahmen einer spezifischen Anwendung eignet, d.h. für eine Instanziierung innerhalb eines prototypischen Anwendungsfalls oder eines Unternehmens. Mit den Bewertungskriterien vier und fünf wurde überprüft, ob keine weitere Iteration im Sinne der Forschungseffizienz sinnvoll wären, zum einen hinsichtlich der Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn und zum anderen bzgl. der einer möglichen Verbesserung der Referenzmodellbildung. Alle fünf Kriterien wurden im Rahmen des Workshop VI positiv bestätigt, wodurch das erarbeitete Referenzmodell zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung als vollständig und validiert bewertet gilt. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass das Referenzmodell einen normativen Charakter aufweist, indem es für die abgebildete Klasse von Problemsachverhalten – der architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung – konkrete Gestaltungsempfehlungen gemäß Best und Common Practices korrekt beinhaltet. Dadurch hat das Referenzmodell Relevanz für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Baukastenentwicklung und ist sodann ein valider Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung.

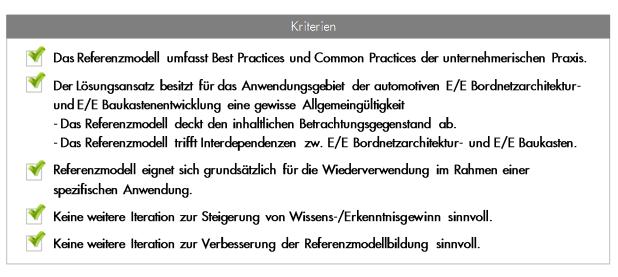


Abbildung 6-26: Kriterien zur Bewertung des Fortschritts der Referenzmodellierung, eigene Darstellung.

# 6.6. Zusammenfassung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Erarbeitung eines Referenzmodells als Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung (vgl. Kapitel 1.2.1). Die

Referenzmodellbildung im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt auf Basis eines Vorgehensmodells (vgl. Kapitel 4.3), welches sich in die vier Phasen "Zieldefinition", "Konstruktion des Ordnungsrahmens", "Modellierung der Struktur" und "Konsolidierung und Komplettierung" gliedert.

#### Zieldefinition

Mit dem Referenzmodell wird das Ziel verfolgt, einen Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung zu geben. Dieses Vorhaben lässt sich in zwei Schritte unterteilen (vgl. Abbildung 6-2):

- **Schritt 1:** Erarbeitung der spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren, welche automotiven E/E Baukästen zugrunde liegen.
- **Schritt 2:** Harmonisierung der Zyklen von automotiven E/E Baukästen mit denen einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur.

Das übergreifende Ziel ist dabei die automotive E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung zu harmonisieren, um eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung zu ermöglichen.

## Konstruktion des Ordnungsrahmes

Der konstruierte Ordnungsrahmen für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand – der Harmonisierung von E/E Baukästen mit einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur – besteht aus den drei Systemelementen:

- **Systemelement 1:** Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.
- Systemelement 2: Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.
- **Systemelement 3:** Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten.

## Modellierung der Struktur

Im Rahmen der Modellierung der Struktur werden die durch den Ordnungsrahmen vorgegebenen Systemelemente mit konkreten Inhalten der unternehmerischen Praxis gefüllt.

Gegenstand der Modellierung des ersten Systemelements sind die "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten", welche sich aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen ableiten und für die E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen von OEMs von Relevanz sind. Zusätzlich wird ein durchgängiges "Requirements Engineering und Management" eingeführt, zur systematischen Ermittlung, Beschreibung, Modellierung, Analyse und Ausleitung der Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung in Abstimmung mit dem Anforderungsgeber und Anforderungsnehmer unter Einsatz geeigneter Methoden und Werkzeuge.

Die "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" ist Gegenstand des zweiten Systemelements, welches den Kern des Referenzmodells darstellt. Die Beschreibung dieses zweiten Systemelements untergliedert sich in zwei Schritte:

- *Schritt 1:* Beschreibung der spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen als Grundlage für die Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastenentwicklung.
- Schritt 2: Auslegung und Harmonisierung von Entwicklungs-, Ausleitungs- und Überarbeitungszyklen einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten inkl. Beschreibung des Zusammenspiels von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten sowie der zentralen Schnittstellenpartner Gesamtfahrzeugarchitektur, Übergreifende Baukastensteuerung und E/E Entwicklungsabteilungen, auch E/E Center of Competence (E/E CoC).

Gegenstand des dritten Systemelements "Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" ist die baureihenübergreifende Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an die Fahrzeugprojekte eines OEMs. Dazu wird zunächst der Fahrzeugentwicklungsprozess skizziert, um darauf aufbauend die Ausleitung eines stimmigen Sets aus strukturgebender E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio als Gesamtangebot eingesteuert (z.B. "Generation X") in die frühe Phase der Fahrzeugentwicklung – der Definitionsphase – inkl. Regelwerk detailliert zu beschreiben.

## Konsolidierung und Komplettierung

Nachdem die einzelnen drei Systemelemente durch den Ordnungsrahmen strukturiert und detailliert vorliegen, werden diese in einem nächsten Schritt konsolidiert und komplettiert. In dieser Phase "Konsolidierung und Komplettierung" werden dazu die einzelnen Systemelemente zusammengeführt, indem deren drei Schnittstellen betrachtet und detailliert beschrieben werden:

- *Schnittstelle 1:* Ausleitung von Anforderungen aus Systemelement 1 an Systemelement 2.
- *Schnittstelle 2:* Übergabe einer "*Generation X*" von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio von Systemelement 2 an Systemelement 3.
- *Schnittstelle 3:* Adressierung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukastenportfolio von Systemelement 3 an Systemelement 1.

Der Fokus liegt dabei auf der Schnittstelle 1, da der Ausleitung von Anforderungen an die E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung ein komplexer Bewertungs- und Entscheidungsprozess zugrunde liegt. Die Schnittstellen 2 und 3 stellen hingegen weniger komplexe Punkte der Übergabe dar.

# Referenzmodell für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung

Abschließend werden die zuvor modellierten Systemelemente "Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten", "Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" mit den drei Schnittstellen "Ausleitung von Anforderungen an eine Generation X", "Ausleitung einer Generation X an Fahrzeugprojekte einer Baureihe" sowie "Einsteuerung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten" miteinander verknüpft. Das Ergebnis ist das Referenzmodell für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung und stellt einen Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung dar,

indem zum einen die spezifischen Charakteristika, Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren von automotiven E/E Baukästen beschrieben werden und zum anderen die Harmonisierung der Zyklen automotiver E/E Baukästen mit denen einer strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur erzielt wird. Das Referenzmodell bildet die Grundlage für eine spezifische Wiederverwendung im Rahmen der unternehmerischen Praxis der automotiven E/E Entwicklung oder aber einer prototypischen Anwendung innerhalb der Forschung und Wissenschaft.

## Validierung des Referenzmodells

Die Bewertung des Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung, d.h. der einzelnen Systemelemente, Schnittstellen inkl. deren Zusammenspiel, auf Relevanz und Vollständigkeit erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens durch enge Einbeziehung von Experten der unternehmerischen Praxis, d.h. der automotiven E/E Entwicklung und internationaler Strategieberatungen. Nach iterativer Überarbeitung der Referenzmodellinhalte im Rahmen von sechs Workshops folgt dessen Validierung. Die dazu definierten fünf Bewertungskriterien basieren dabei auf den dem Referenzmodell zugrundliegenden Zielen. Alle fünf Kriterien werden im Rahmen des Workshop VI durch die Experten positiv bestätigt, wodurch das erarbeitete Referenzmodell zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung als vollständig und validiert bewertet wird. Demgemäß hat das Referenzmodell Relevanz für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Baukastenentwicklung und ist damit ein valider Lösungsvorschlag zur Beantwortung der zweiten Forschungsleitenden Fragestellung.

## Beitrag

Der damit geschaffene Beitrag für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Entwicklung sowie für Forschung und Wissenschaft, liegt in der detaillierten Beschreibung der einzelnen Systemelemente, der notwendigen Schnittstellen und deren Zusammenspiel. Eine Darstellung in dieser Form ist bisher nicht im wissenschaftlichen Schrifttum vorhanden. Mit dem Referenzmodell wird damit ein Lösungsvorschlag für eine durchgängige, baureihenübergreifende Gestaltung von E/E Baukästen geschaffen, als Grundlage zur gezielten Umsetzung differenzierender Kundenwünsche und weiteren funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen aus exogenen und endogenen Umwelteinflüssen. Ferner unterstützt das Referenzmodell bei der intelligenten Strukturierung modularer E/E Baukästen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur. Darüber hinaus wird mit dem Referenzmodell ein Ansatz dafür entwickelt, wie eine konsequente Ausgestaltung von E/E Baukästen ermöglicht werden kann, um dadurch langfristig baureihenübergreifend Skaleneffekte und Verbundeffekte zu heben. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass das Referenzmodell für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung die Grundlage für eine Instanziierung in der unternehmerischen Praxis oder einer prototypischen Anwendung innerhalb der Forschung und Wissenschaft bildet.

# 7. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit ist die Identifikation einer unzureichenden Konzeptualisierung und Ausarbeitung von Maßnahmen zur kostenseitigen Optimierung der E/E Produktstruktur sowie die Frage danach, wie eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren ist, in welcher komplexe E/E Funktionen vollständig abgebildet werden können (Forschungsfrage 1), und wie ein Referenzmodell zu gestalten ist, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert (Forschungsfrage 2). In diesem letzten Kapitel wird eine Zusammenfassung der erarbeiteten Erkenntnisse und wesentlichen Ergebnisse gegeben. Ein Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe bildet den Abschluss der Arbeit.

# 7.1. Einordnung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in das Gebiet der Ingenieurswissenschaften einzuordnen. Dafür notwendige Tätigkeiten und Aufgaben basieren auf der zweckgemäßen Kombination interdisziplinären Wissens (vgl. Abbildung 1-27) [CZICHOS 2008, S. 1ff.]:

- *Technologische Grundlagen:* Werkstoffkunde, Mechanik, Thermodynamik, Elektrotechnik, Messtechnik, Regelungstechnik, Steuerungstechnik und Informatik.
- *Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen:* aus Mathematik, Physik und Chemie.
- *Normative Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen:* Konstruktionstechnik, Produktionstechnik, Betriebswirtschaftslehre und Rechtswissenschaften.

Der Fokus des Forschungsvorhabens liegt auf den spezifischen Feldern der automotiven E/E Bordnetzarchitektur- und Baukastenentwicklung. Damit ist es innerhalb der Ingenieurswissenschaften schwerpunktmäßig dem Automotive Software Engineering, der Mechatronik und der Kraftfahrzeugelektronik zuzuordnen. So werden die technologischen Grundlagen vornehmlich dem wissenschaftlichen und praktischen Schrifttum der Kraftfahrzeugelektronik, aber auch dem Automotive Software Engineering und der Informatik entnommen (vgl. Kapitel 3). Dabei orientiert sich die Forscherin an bestehenden Vorgaben sowie Anforderungen der automotiven E/E Entwicklung und geht in zwei Schritten vor: Im ersten Schritt wird die E/E Bordnetzarchitekturgestaltung inkl. der Partitionierung von softwarebasierten E/E Funktionen auf Steuergeräten, d.h. auf "Funktionen und Anforderungen" und "Logische Architektur" fokussiert (vgl. Architektur-Systemebenen-Modell, Kapitel 3.1.2). Gegenstand des zweiten Schritts ist das Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur- und E/E Baukastengestaltung.

Normative Grundlagen werden dem Operations Research und der Wirtschaftsinformatik entnommen (vgl. Kapitel 4). Das Operations Research liefert die Grundlagen für die Optimierungsmodellgestaltung zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur (vgl. Kapitel 5). Die Wirtschaftsinformatik schafft die Grundlagen für die Referenzmodellgestaltung zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung (vgl. Kapitel 6).

Zur Beschreibung des Forschungsvorhabens inkl. Forschungsdesign und Forschungsmethoden, orientiert sich die vorliegende Arbeit am wissenschaftstheoretischen Ordnungsrahmen nach

BECKER ET AL. (vgl. Kapitel 2.1, Abbildung 1-29, Abbildung 2-1) [BECKER ET AL. 2003, S. 5]. Für die Analyse des o.g. Untersuchungsgegenstands wird die gestaltungsorientierte Forschung (engl.: Design Science) als methodisches Rahmenkonzept ausgewählt [BECKER/PFEIFFER 2006; FRANK 2006; HEVNER ET AL. 2004; SCHAUER/FRANK 2007]. Insbesondere die unzureichende Existenz wissenschaftlicher Erkenntnisse bzw. Dokumentationen verlangt eine gewisse Flexibilität und Offenheit bei der Auswahl unterstützender Forschungsmethoden. Aus diesem Grund wird die Exploration als Forschungsmethode herangezogen, da diese sich besonders für die Sammlung von Informationen über einen gering erforschten Untersuchungsgegenstand mit starkem Praxisbezug eignet und dabei der Forscherin relativ große Freiräume einräumt [BORTZ/DÖRING 2015, S. 54, S. 354].

# 7.2. Forschungsziele und -ergebnisse

Die Analyse der auf die E/E Entwicklung einwirkenden endogenen Umwelteinflüsse im einleitenden Kapitel führte zu zwei zentralen Problemstellungen, mit denen sich die Forscherin unter Anwendung der Forschungsmethode Exploration beschäftigt (vgl. Kapitel 1.1):

- **Problemstellung 1:** Die Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt.
- **Problemstellung 2:** Die Bewältigung von Innovations- und Kostendruck.

Zur Lösung dieser Problemstellungen innerhalb der automotiven E/E Entwicklung können Maßnahmen auf Leistungs- und Kostenseite unterstützen [KOHLHASE 1997, S. 19]. Maßnahmen der Leistungsseite wirken dem wachsenden Innovationsdruck entgegen. Zu diesen zählen die Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte, die Pflege und Erweiterung bestehender Produktportfolios sowie die Erschließung rentabler Produktnischen mit neuen Derivaten und die Erweiterung von Diensteangeboten [BRANDT ET AL. 2012, S. 737; PICOT ET AL. 2003, S. 3; KERSTEN 2002; S. 2; WILHELM 2001, S. 50; RENNER 2007, S. 2]. Maßnahmen der Kostenseite dienen der Kostensenkung, Effizienzsteigerung sowie zur Beherrschung von Komplexität und Variantenvielfalt. Hierbei setzen OEMs neben Standardisierung und Normierung sowie allgemeinen Profitabilitäts- und Transformationsprogrammen zusätzlich auf dedizierte strukturierende Maßnahmen zur betriebswirtschaftlichen Optimierung der Produktstruktur [FRANKE ET AL. 2002, S. 62f.; RAPP 1999, S. 9ff.; SCHUH/SCHWENK 2001, S. 74]. Strukturierende Maßnahmen können auf Gesamt-/ Teilsystemebene (z.B. E/E Bordnetzarchitektur) und auf Produktkomponentenebene (z.B. E/E Baukästen) realisiert werden. Die Mehrzahl strukturierender Maßnahmen ist den Feldern Fahrzeugarchitekturen und Gestaltungsfeldern des Packages (insb. Plattform- und Baukastenansatz) zugeordnet [Braess/Seifert 2013, S. 149ff.; Broy et al. 2011, S. 44; ERICSSON/ERIXON 1999, S. 5ff.; REIF 2010, S. 211; REINER/ KRIEGER 2011, S. 14ff.; RENNER 2007, S. 41; SCHÖNMANN 2012, S. 7; SCHUH 1989, S. 58f]. Hier setzt das Forschungsvorhaben an, indem dessen Fokus auf strukturierende Maßnahmen zur kostenseitigen Optimierung der Produktstruktur gerichtet wurde. Das erste Forschungsziel des Forschungsvorhabens konzentrierte sich auf die Untersuchung und Gestaltung bzw. Modellierung des strukturgebenden Elements des E/E Gesamtsystems (vgl. Kapitel 1.1.3): Die automotive E/E Bordnetzarchitektur. Das zweite Forschungsziel des Forschungsvorhabens befasste sich mit der Produktstrukturoptimierung auf Teilsystemebene mittels Anwendung des Baukastenprinzips in der automotiven E/E Entwicklung. Beiden Forschungszielen lag jeweils eine Forschungsfrage zugrunde:

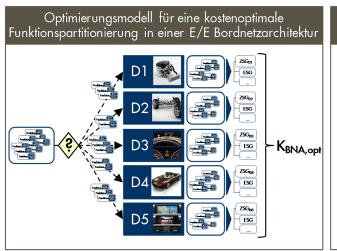
• *Forschungsfrage 1:* Wie ist eine strukturgebende, automotive E/E Bordnetzarchitektur für den baureihenübergreifenden Einsatz zu gestalten und kostenseitig zu optimieren, in welcher komplexe E/E Funktionen vollständig abgebildet werden können?

• *Forschungsfrage 2:* Wie ist ein Referenzmodell zu gestalten, welches spezifische Charakteristika, Anforderungen und kritische Erfolgsfaktoren automotiver E/E Baukästen beschreibt und diese mit einer strukturgebenden automotiven E/E Bordnetzarchitektur harmonisiert?

Zur Beantwortung der ersten Forschungsleitenden Fragestellung, wurde ein Optimierungsmodell zur E/E Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur entwickelt. Der damit geschaffene Beitrag für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Entwicklung sowie für Forschung und Wissenschaft, besteht in der Schaffung eines Optimierungsmodells für die Funktionspartitionierung in einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur. Eine Darstellung in dieser Form ist bisher nicht Gegenstand des wissenschaftlichen Schrifttums. Mit dem Optimierungsmodell wird somit ein neuer Lösungsvorschlag für eine durchgängige, baureihenübergreifende Gestaltung von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen geschaffen. Gleichzeitig bietet dieses Artefakt die Grundlage zur gezielten Umsetzung differenzierender Kundenwünsche und Anforderungen aus exogenen und endogenen Umwelteinflüssen, z.B. in Form von automotiven E/E Baukästen. Mit dem Optimierungsmodell wurde darüber hinaus ein holistischer Ansatz entwickelt, wie eine konsequente Ausgestaltung von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen umgesetzt werden kann, um langfristig Reduzierungspotentiale hinsichtlich Herstell- und Entwicklungskosten erschließen zu können. Zusammenfassend zeigt sich, dass das Optimierungsmodell für die Funktionspartitionierung eine Gestaltungsgrundlage von automotiven E/E Bordnetzarchitekturen für einen baureihenübergreifenden Einsatz bei OEMs darstellt (vgl. Abbildung 7-1).

Daran anknüpfend befasste sich die zweite Forschungsfrage mit der Gestaltung eines Referenzmodells zur architekturgesteuerten E/E Baukastenentwicklung. Dabei wurde die konsequente baureihenübergreifende Anwendung des Baukastenansatzes in Abhängigkeit des strukturgebenden Elements des E/E Gesamtsystems - der E/E Bordnetzarchitektur - als zentrale Prämisse zugrunde gelegt. Der damit geschaffene Beitrag für die unternehmerische Praxis der automotiven E/E Entwicklung sowie für Forschung und Wissenschaft, liegt in der detaillierten Beschreibung der einzelnen Systemelemente, der notwendigen Schnittstellen und deren Zusammenspiel. Ergänzend wurde eine klare Regelung des Zusammenspiels von automotiver E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukästen definiert, welche bei deren Gestaltung und Produktstrukturverbesserung als Hilfestellung fungiert. Eine Darstellung in dieser umfänglichen Form ist bisher nicht im wissenschaftlichen Schrifttum vorhanden. Mit dem Referenzmodell wurde damit ein Lösungsvorschlag für eine durchgängige, baureihenübergreifende Gestaltung von E/E Baukästen geschaffen. Parallel bietet dieses die Grundlage zur gezielten Umsetzung differenzierender Kundenwünsche und ergänzender funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen aus exogenen und endogenen Umwelteinflüssen. Ferner unterstützt das Referenzmodell bei der intelligenten Strukturierung modularer E/E Baukästen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der strukturgebenden E/E Bordnetzarchitektur. Darüber hinaus wurde mit dem Referenzmodell ein Ansatz entwickelt, der beschreibt, wie eine konsequente Ausgestaltung von E/E Baukästen ermöglicht werden kann, um dadurch langfristig baureihenübergreifend Skaleneffekte und Verbundeffekte zu heben. In Summe ist herauszustellen, dass das Referenzmodell für eine architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung die Grundlage für eine spezifische Wiederverwendung in der unternehmerischen Praxis der automotiven E/E Entwicklung oder

eine prototypische Instanziierung innerhalb der Forschung und Wissenschaft bildet: Es kann als eine Art Abbildungsempfehlung betrachtet werden, welche bei der Konstruktion neuer Modelle referenziert werden kann. Daher lag bei der Referenzmodellbildung der Anspruch zugrunde, es zukünftig bei der Konstruktion von unternehmensspezifischen Modellen wiederverwenden zu können. Eine entsprechende Verifikation eines solchen Referenzmodells erfolgt i.d.R. über dessen Wiederverwendung, welche entweder in Form einer repräsentativen, prototypischen Anwendung oder einer unternehmensspezifischen Instanziierung erfolgen kann. Bei der Wiederverwendung eines Referenzmodells können unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Bspw., dass die Wiederverwendung, aufgrund zuvor unbekannter Randbedingungen, sich für den betrachteten Kontext als nicht sinnvoll erweist. Des Weiteren können unvorhergesehene Unzulänglichkeiten des Referenzmodells identifiziert werden. Aufgrund von Restriktionen hinsichtlich des unternehmensinduzierten Informationsschutzes sowie der Projektgrößenordnung im Kontext der Entwicklungsorganisation eines OEMs ist eine Instanziierung innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht durchführbar. Vielmehr bildet dies den Ansatzpunkt für weitere Forschungsaktivitäten in wissenschaftlichen Verbundprojekten aus Industrie und Wissenschaft (vgl. Abbildung 7-1).



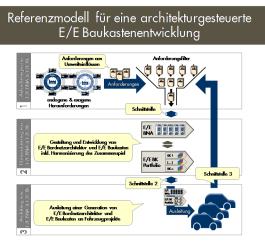


Abbildung 7-1: Erarbeitete Lösungsvorschläge zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellungen, eigene Darstellung.

Als Resümee von Forschungszielen und -ergebnissen, wird mit der vorliegenden Arbeit ein breites Feld innerhalb der automotiven E/E Entwicklung abgedeckt, in dem durchschnittlich bei deutschen OEMs ca. 6.000 Mitarbeiter beschäftigt sind und in welchem jährlich bis zu bis zu drei Milliarden Euro Forschungs- und Entwicklungsaufwände investiert werden. Ferner lässt sich konstatieren, dass die mit der Beantwortung der beiden Forschungsfragen einhergehenden Ergebnisse positiv nachhaltige Auswirkungen auf den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn in der Produktentwicklung für automotiven E/E Architektur- und Baukastengestaltung haben. Gleichzeitig stiften die erarbeiteten Artefakte einen Mehrwert für die unternehmerische Praxis und deren Prozesslandschaft in der Automobilindustrie (vgl. Abbildung 7-1).

# 7.3. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die mit der Forschungsmethode "Exploration" in der Design Science verknüpfte Offenheit zur Erarbeitung der beiden Maßnahmen für die kostenseitige Optimierung der E/E Produktstruktur,

lässt Raum für eine Vielzahl weiterer Forschungsfragen und -bedarfe. Neben der Verifikation im Rahmen einer prototypischen Anwendung respektive einer unternehmensspezifischen Instanziierung für den allgemeinen Fall, sind beide Maßnahmen auf ihre Eignung für spezielle Anwendungsfälle hin zu überprüfen (vgl. Abbildung 7-1): Aktuell sehen sich OEMs mit völlig neuen Themen und Herausforderungen konfrontiert, die strategisch und ökonomisch hochrelevant sind.

Zu diesen Themenfeldern zählen "Big Data" und "Internet of Things". Bspw. werden im Zusammenhang mit Big Data und Internet of Things die Interdependenzen sowie Schnittmengen von Fahrzeug und CE-Devices (insb. Smartphones, Tablets und Wearables) massiv verstärkt. Der direkte Kundenzugang zur Datenerhebung einhergehend mit der gleichzeitigen sowie gezielten Produktvermarktung werden bspw. von Digitalen Playern wie Google oder Apple als Kernbestandteil ihres Geschäftsmodells genutzt. Mit ihren Initiativen "iOS in the car" von Apple und "Android for Automotive" von Google drängen diese in den angestammten Markt der OEMs, indem direkte Versuche unternommen werden, auf Fahrzeugdaten zuzugreifen, Funktionen zu etablieren und in direkten Kontakt mit den Kunden zu treten. Dadurch würden OEMs essentielle Potentiale wie z.B. das Wissen über den Kunden und seine Bedürfnisse oder die Steuerung des Kundenerlebnisses verlieren. Neben den Versuchen der CE-Industrie sich im Fahrzeug zu etablieren, wächst auf Kundenseite der Wunsch, das persönliche App-Ökosystem auch im Fahrzeug nutzen und bedienen zu können. Darüber hinaus steigt mit Verbreitung des Internet of Things die Integration des Fahrzeugs über intelligente Smart Home Systeme in die Lebenswelt des Kunden. Übergreifend stehen OEMs damit vor entscheidenden Herausforderungen, neue digitale Geschäftsmodelle für sich zu erschließen und zeitgleich Angriffsversuche von außen über die Entwicklung und Integration innovativer technischer On- und Offboard-Lösungen abzukehren. Betroffen sind hiervon insbesondere E/E Baukästen aus der Domäne "Infotainment und Kommunikation", wie bspw. Anzeigeelemente inkl. Features (Kombi, Zentrale Informationsdisplays) oder Navigationsgeräte mit erweiterter Komforttelefonie als Bestandteil des ZSG Headunit.

Als Vorbereitung des "Hochautomatisierten Fahrens" werden immer mehr vernetze "Fahrerassistenzsysteme" im Fahrzeug integriert. Dazu gehören Stauassistenten bis 60-65 km/h für eine weitgehend autonome Fahrweise, die Nutzung von Cloud und Backend Diensten für Hochautomatisiertes Fahren hinsichtlich Straßenzustand und Aggregation von Umfeld-Sensordaten aus den Fahrzeugen, Surround View Kameras, Parkassistenten für Längs- und Querparklücken mit Fahrerbetätigung von Gas und Bremse, Querverkehrsassistent bei Rückwärtsfahren oder aber die Ausstiegswarnung beim Öffnen der Tür hinsichtlich Fahrzeugen und Fahrrädern von hinten. Als Befähigung benötigen Fahrzeuge dazu, neben intelligenten Kamerasystemen, Laser- und Radarsensoren sowie hochsensiblen Ultraschallsensoren, vor allem eine Vernetzung mit der Umwelt über Telematiksteuergeräte. Viele dieser Fahrerassistenzsysteme setzen sogar eine permanente Echtzeitvernetzung voraus.

Darüber hinaus stellen sich OEMs einer zunehmenden Internationalisierung bei gleichzeitigen regionalen Spezialisierungen. Aktueller Fokus liegt dabei auf dem Absatzmarkt China, der mit 50 Milliarden Dollar in 2014 über ein Drittel zum Gesamtgewinn der Automobilindustrie beigetragen hat. In diesem Markt müssen sich OEMs im Bereich digitaler Geschäftsfelder mit

großen chinesischen Unternehmen (insb. "Alibaba", "Baidu" und "Tenzent")¹ gegenüber neuen Wettbewerbern mit deutlich kürzeren Entwicklungszyklen behaupten, was zwangsläufig zu einer zunehmenden Verkürzung von Innovationszyklen innerhalb der Automobilindustrie führen wird.

Zusammengenommen haben die Entwicklungen in den aufgezeigten Feldern massive Auswirkungen auf die Automobilindustrie. Daraus lassen sich weitere Forschungsfragen und bedarfe für den innerhalb des Forschungsvorhabens fokussierten Ausschnitt der E/E Entwicklung ableiten: Die geschaffenen Artefakte (vgl. Abbildung 7-1) sind daraufhin zu überprüfen, ob die darin beschriebenen Ansätze, Prozesse und Zyklen sich auf den allgemeinen Anwendungsfall beschränken oder, ob diese bereits dafür ausgelegt sind mit den Anforderungen aus den oben skizzierten Innovationsfeldern umzugehen. Damit verbunden ist zu valideren, ob diese neuen Anforderungen einer Überarbeitung der Artefakte bedürfen. Übergreifend besteht weiterer Forschungsbedarf darin, zu verifizieren, ob die Eignung der geschaffenen Artefakte zukunftsfähig, d.h. anforderungsgerecht erweiterbar sowie adaptierbar für entsprechende innovative technische On- und Offboard-Lösungen ist.

-

<sup>&</sup>quot;Alibaba" stellt eine globale onlinebasierte Handelsplattform und verwandte Dienste zur Verfügung. "Baidu" ist Betreiber der gleichnamigen Suchmaschine sowie verwandter onlinebasierter Dienste. "Tencent" ist ein Beispiel für einen chinesischen Internetanbieter, der zahlreiche onlinebasierte Dienste anbietet wie z.B. Instant Messaging, Soziale Netzwerke, Onlinemedien, interaktive Unterhaltung und E-Commerce.

# I. Abkürzungsverzeichnis

**3D** drei Dimensionen

**ABS** Antiblockiersystem

ACC Adaptive Cruise Control

**AFS** Active Front Steering

AG Aktiengesellschaft

Aufl. Auflage

AUTOSAR AUTomotive Open System Architecture

**BK** Baukasten

**BMW** Bayerische Motorenwerke

BNA Bordnetzarchitektur

**BRIC** Wachstumsmärkte Brasilien, Russland, Indien und China

**Bsp.** Beispiel

**bspw.** beispielsweise

**bzgl.** bezüglich

**bzw.** beziehungsweise

ca. circa

**CAN** Controller Area Network

**CARB** California Air Resources Board

**CD** Compact Disc

**CE** Consumer Electronics

**CMMI** Capability Maturity Model Integration

**CMU/SEI** Carnegie Mellon Software Engineering Institute

CO<sub>2</sub> Kohlenstoffdioxid

**CoC** Center of Competence

**COTS** Commercial-off-the-Shelf-Produkte

**CPU** Central Processing Unit

d.h. das heißt

**DAB** Digital Audio Broadcasting

**DIN** Deutsches Institut für Normen

**DME** Digitale Motor Elektronik

**DRAM** Dynamic Random Access Memory

**DSC** Dynamische Stabilitäts Control

**DTC** Dynamic Traction Control

DVD Digital Versatile DiscE/E Elektrik/Elektronik

**EBN** Energiebordnetz

**ECU** Electronic Controll Unit

**EEPROM** Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

**EFA** Eingabe-Funktion-Ausgabe

**EG** Europäische Gemeinschaft

**EGS** Einzelgetriebesteuerung

elektrisch

**EMV** Elektromagnetische Verträglichkeit

**ENB** Energiebordnetz

engl. englisch

**EPA** Environmental Protection Agency

**EPROM** Erasable Programmable Read-Only Memory

**EPS** Electronic Powered Steering

**ESG** Einzelsteuergerät

**ESP** Elektronisches Stabilitätsprogramm

et. al et alii

etc. et cetera

**EU** Europäische Union

**EUR-LEX** Datenbank für Rechtsvorschriften der Europäischen Union

**EV** Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)

**f.** folgende

**F&E** Forschung und Entwicklung

**ff.** folgende

**FZD** Funktionszentrum Dach

ggf. gegebenenfalls
GM General Motors

GmbH & Co. KG Gesellschaft mit beschränkter Haftung und Compagnie

Kommanditgesellschaft

**GmbH** Gesellschaft mit beschränkter Haftung

GoM Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung

**GT** Grand Tourismo

HW Hardwarei.d.R. in der Regel

I/O Input/Output

**IEC** International Electrotechnical Commission

**IEEE** Electrical and Electronics Engineers

inkl. inklusive

insb. insbesondere

**ISO** International Organization for Standardization

IT Informationstechnologie

**kByte** Kilobyte

km Kilometer

**KPMG** Klynveld, Peat, Marwick und Goerdeler

LIN Local Interconnect Network

mind. mindestens

MIPS Million Instructions Per Second

MOST Media Oriented System Transport

MP3 MP3-Audiodatei

**o.g.** oben genannt

**o.S.** ohne Seite

**OEM** Original Equipment Manufacturer

**OR** Operations Research

**OSEK/VDX** Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im

Kraftfahrzeug/Vehicle Distributed Executive ....

PC Personal Computer

PEP Produktentstehungsprozess

PHEV Plug-in-Hybrid-Electric-Vehicle

**PROM** Programmable Read Only Memory

**PSA** Peugeot Société Anonyme

**PWC** PricewaterhouseCoopers

**ROM** Read Only Memory

**RTM** Real Time Monitoring

**RTTI** Real Time Traffic Information

S. Seite

**s.u.** siehe unten

SG Steuergerät

**SIM** subscriber identity module

**SRAM** Static Random Access Memory

**SW** Software

TPL Teilprojektleiter

TSG Türsteuergerät

TTP Time Triggered Protocol

TV Television

u.a. unter anderemUS United States

**u.U.** unter Umständen

überar. überarbeitet

**UNECE** United Nations Economic Commission for Europe

**USB** Universal Serial Bus

**VDA** Verband der Automobilindustrie

vgl. vergleiche

vs. versus

VW Volkswagen

**WPAN** Wireless Personal Area Network

**z.B.** zum Beispiel

**ZSG** Zentrales Steuergerät

zw. zwischen

# II. Abbildungsverzeichnis

der BMW 7er Baureihe, eigene Darstellung
Abbildung 1-2: Entwicklung des E/E Wertschöpfungsanteils am Produktionswertes des Gesamtfahrzeug am Bsp. Oberklassefahrzeuge, eigene Darstellung [HARDUNG ET AL. 2004, S. 203; PRETSCHNER ET AL. 2007, S.1; WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 19]
Abbildung 1-3: Endogene Herausforderungen der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.
Abbildung 1-4: Endogene Herausforderungen bzgl. steigendem E/E Umfang inkl. Innovationen führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung
Abbildung 1-5: Anzahl von Steuergeräten und Kommunikationssystemen am Beispiel von drei durchschnittlich ausgestatteten Fahrzeuggenerationen der Luxus-/Oberklasse und oberen Mittelklasse in Anlehnung an [TRAUB 2010,S. 2; NÖRENBERG 2012, S. 5; JAENSCH 2012, S. 4]
Abbildung 1-6: Endogene Herausforderungen bzgl. der Onboard Vernetzung führen zu steigendem Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.
Abbildung 1-7: Endogene Herausforderungen bzgl. Kommunikationstechnologien führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.
Abbildung 1-8: Drahtlose Offboard-Kommunikation, Darstellung nach HOFFMANN [HOFFMANN 2010, S. 40]
Abbildung 1-9: Endogene Herausforderungen bzgl. der Offboard-Vernetzung führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung
Abbildung 1-10: Endogene Herausforderungen bzgl. Anbindung und Integration von CE-Geräten führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, Variantenvielfalt und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung
Abbildung 1-11: Bsp. eines merkmalsorientierten Varianten-/Strukturvariantenbaums, eigene Darstellung in enger Anlehnung an [PULM 2004, S. 131]
Abbildung 1-12: Endogene Herausforderungen bzgl. Komplexität und Variantenvielfalt führen zu steigendem Kostendruck in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.
Abbildung 1-13: Endogene Herausforderungen steigern die Komplexität und Variantenvielfals innerhalb der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung

eigene Darstellung.	. 18
Abbildung 1-15: Herausforderungen der Ökonomischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung	_
Abbildung 1-16: Herausforderungen der Technologischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.	
Abbildung 1-17: Divergierende Produktlebenszyklen, eigene Darstellung in Anlehnung an BALZERT, BURGDORF und RAUBOLD [BALZERT 2009, S. 35; BURGDORF 2010; S. 13; RAUBOLD 2011, S. 42]	. 22
Abbildung 1-18: Herausforderungen der Gesellschaftlichen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.	. 23
Abbildung 1-19: Herausforderungen der Ökologischen Umwelt führen zu steigendem Innovations- und Kostendruck, eigene Darstellung	. 24
Abbildung 1-20: Herausforderungen der politisch-rechtlichen Umwelt führen zu steigenden Innovations- und Kostendruck sowie erhöhter Dynamik und Komplexität in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.	
Abbildung 1-21: Die Umwelteinflüsse der Makroumwelt erzeugen Innovations- und Kostendruck auf die automotive E/E Entwicklung, eigene Darstellung	. 29
Abbildung 1-22: OEMs reagieren auf endogene und exogene Herausforderungen mit Maßnahmen der Kosten- und Leistungsseite, eigene Darstellung in Anlehnung an [RATHENOW 1993, S. 42; SCHÖNMANN 2012, S. 5; SCHUH 2005, S. 121].	. 31
Abbildung 1-23: Produktstruktur als wesentlicher Schlüsselfaktor für Leistungsoptimierung [RAPP 1999, S. 92; Schuh/Schwenk 2001, S. 77; SCHUH 2005, S. 12]	
Abbildung 1-24: Herausforderungen, Problemstellungen und Handlungsbedarfe aus endogenen und exogenen Umwelteinflüssen auf die automotive E/E Entwicklung, eige Darstellung.	
Abbildung 1-25: Abbildung 1-26:Herausforderungen, Problemstellungen und Handlungsbedarfe aus endogenen und exogenen Herausforderungen erweitert um die Forschungsleitende Fragestellung, eigene Darstellung.	. 35
Abbildung 1-27: Ingenieursleistungen basieren auf kombiniertem, interdisziplinären Wisser [Czichos 2008, S.13]	
Abbildung 1-28: Forschungsvorhaben fokussiert die Felder automotive E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten, eigene Darstellung	. 38
Abbildung 1-29: Ordnungsrahmen für den Entwurf eines Forschungsdesigns [BECKER ET Al 2003, S. 3].	

Abbildung 1-30: Übersicht über den Aufbau der Arbeit, eigene Darstellung
Abbildung 2-1: Ordnungsrahmen für den Entwurf eines Forschungsdesigns nach BECKER ET AL. [BECKER ET AL. 2003, S. 5].
Abbildung 2-2: Kombinationsmöglichkeiten ontologischer und epistemologischer Grundpositionen nach BECKER ET AL. [BECKER ET AL. 2003, S. 8]
Abbildung 2-3: Grundposition gemäß dem kritischen Rationalismus, eigene Darstellung in Anlehnung an BECKER und HOFFMANN [BECKER ET AL. 2003, S. 6; HOFFMANN 2010, S. 14].
Abbildung 2-4: Erkenntnis- und Gestaltungsziele mit unterschiedlichen Schwerpunkten, eigene Darstellung
Abbildung 2-5: Forschungsziele des technologiegetriebenen Forschungsvorhabens, eigene Darstellung. 49
Abbildung 2-6: Gestaltungsprozess im Design Science [VAISHNAVI/KUECHLER 2004, O.S.]. 51
Abbildung 2-7: Vier Vorgehensweisen der explorativen Forschung, eigene Darstellung 55
Abbildung 3-1: Schematischer Entwicklungsprozess eines automotiven E/E Gesamtsystems inkl. automotiver E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung in Anlehnung an FRIEDMANN/MAYER 1998, S. 15; JENSCH 2012, S. 3; MATHEIS ET AL. 2006, S. 66; SCHAAF 1999, S. 26; SCHÖNMANN 2012, S. 86; STREICHERT/TRAUB 2012, S. 7FF.; WILDEMANN 2004, S.266
Abbildung 3-2: Systemebenen-Modell einer automotiven Elektrik/Elektronik Bordnetzarchitektur, Darstellung in Anlehnung an Streichert/Traub [Streichert/Traub 2012, S. 15].
Abbildung 3-3: Der Betrachtungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens liegt auf der Partitionierung von E/E Funktionen inkl. zugehöriger Software- und Hardware- Komponente, eigene Darstellung
Abbildung 3-4: Partitionierung von E/E Funktionen auf ein Steuergerät, eigene Darstellung.69
Abbildung 3-5: E/E Kundenfunktionen untergliedern sich in E/E Basisfunktionen und optionale Funktionen, eigene Darstellung
Abbildung 3-6: Adaptive Fahrgeschwindigkeitsreglung-Systemstruktur [eigene Darstellung in Anlehnung an BOSCH 2011, S. 17; BROY 2006, S. 13; WALLENTOWITZ/REIF 2010, S. 435]
Abbildung 3-7: AUTOSAR entkoppelt anwendungsspezifische Software von der Steuergeräte Hardware, eigene Darstellung
Abbildung 3-8: Software-Architektur eines Steuergeräts nach AUTOSAR [AUTOSAR 2014, o.S.]

Umwelt" Gesamtsystem, Darstellung nach Schäuffele und Zurawka  [Schäuffele/Zurawka, S. 38f.]
Abbildung 3-10: Vereinfachter Aufbau eines Mikrocontrollers in Anlehnung an SCHÄUFFELE/ZURAWKA [SCHÄUFFELE/ZURAWKA 2010, S. 49ff.]
Abbildung 3-11: Nichtflüchtiger und flüchtiger Speicher, eigene Darstellung in Anlehnung an Schäuffele/Zurawka und Borgeest[Schäuffele/Zurawka 2010; Borgeest 2014].
Abbildung 3-12: Vereinfachte technische Architektur "aktives Vorderachslenksystems" [vgl. WINNER ET AL. 2012, S. 91]
Abbildung 3-13: Bewertung des Gestaltungsansatzes der Funktionsorientierung, eigene Darstellung
Abbildung 3-14: Bewertung des Zentralisierungsansatzes, eigene Darstellung
Abbildung 3-15: Bewertung des Domänenansatzes, eigene Darstellung
Abbildung 3-16: Vergleich der drei Gestaltungsansätze, eigene Darstellung
Abbildung 3-17: Beherrschung versus Vermeidung interner Varianz & Komplexität, eigene Darstellung in enger Anlehnung an KAISER [KAISER 1995, S. 102]
Abbildung 3-18: Schematische Darstellung des Baukastenprinzips, eigene Darstellung 99
Abbildung 3-19: OEM-spezifische Baukästen versus Lieferantenbaukästen, eigene Darstellung
Abbildung 4-1: Modellmerkmale zur Gruppierung von Modellen, eigene Darstellung in Anlehnung an [Lindemann 2009, S. 11, Adam/Witte 1976, S. 1ff.; Klein/Scholl 2011, S. 32ff.; Pfohl/Stölzle 1997, S. 52ff.; Scholl 2001, S. 17]
Abbildung 4-2: OR-Vorgehen zur Lösung eines Optimierungsproblems, eigene Darstellung.
Abbildung 4-3: Drei Modell-Typen deterministischer einkriterieller Optimierungsmodelle, eigene Darstellung nach [Domschke/Drexl 2011, S. 13ff, S121ff., S.176ff.; Klein/Scholl 2011, S47f., S. 461ff., S. 485ff.]
Abbildung 4-4: Vorgehensmodell zur Optimierungsmodellbildung im Operations Research, eigene Darstellung in Anlehnung an [KLEIN/SCHOLL 2011, S. 2; DOMSCHKE/SCHOLL 2008, S. 22f.; DOMSCHKE/DREXL 2011, S. 1f.; SUHL/MELLOULI 2009, S. 7]
Abbildung 4-5: Vorgehensmodell zur Referenzmodellbildung (vgl. Kapitel 6), eigene Darstellung in Anlehnung an BECKER [BECKER 1998, S. 7ff.]
Abbildung 4-6: Referenzmodel-Wiederverwendungsprozess, in Anlehnung an [FETTKE/LOOS 2002, S. 7]
Abbildung 5-1: Klassifizierung und Charakterisierung des Optimierungsmodells anhand der Ausprägungen der verschiedenen Modellmerkmale eigene Darstellung

Optimierungsmodellbildung
Abbildung 5-3: Herausforderungen der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung (vgl. Kapitel 1.2)
Abbildung 5-4: Herausforderungen in der automotiven E/E Entwicklung, eigene Darstellung.
Abbildung 5-5: Zielsetzungen der Entscheidungsproblemlösung, eigene Darstellung 139
Abbildung 5-6: Domänen einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, Bilder-Quelle: BMW 4er Coupé/Cabrio, eigene Darstellung
Abbildung 5-7: Domänenstruktur aus Zentralem Steuergerät (ZSG) und Einzelsteuergeräten (ESG), eigene Darstellung
Abbildung 5-8: Funktionsliste zur domänenübergreifenden Konsolidierung von E/E Funktionen, eigene Darstellung. 143
Abbildung 5-9: Kategorisierung von E/E Funktionen für die Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung.
Abbildung 5-10: Domänenspezifische E/E Funktionsumfänge, eigene Darstellung 147
Abbildung 5-11: Struktur der Entwicklungs- und Herstellkosten einer E/E Funktion eigene Darstellung
Abbildung 5-12: Funktionsliste zur Konsolidierung und Beschreibung von E/E Funktionen, eigene Darstellung
Abbildung 5-13: Domänenspezifische Zuordnung von E/E Funktionen, eigene Darstellung.
Abbildung 5-14: Prämissen der strukturierten Abfrage von E/E Funktionen für jede Domäne einer E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung
Abbildung 5-15: Domänenspezifische Verortung von E/E Funktionen, eigene Darstellung. 155
Abbildung 5-16: Domänenspezifische Verortung von E/E Basisfunktionen, eigene Darstellung
Abbildung 5-17: Vier Schritte zur Gesamtkostenberechnung einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung
Abbildung 5-18: Baureihenübergreifende Klassen von E/E Funktionen, eigene Darstellung.
Abbildung 5-19: Domänenspezifische Klassen von Steuergeräteklassen, eigene Darstellung
Abbildung 5-20: Suchalgorithmus zur Identifikation der besten Kosten für eine E/E Bordnetzarchitektur

Bordnetzarchitektur
Abbildung 5-22: Optimale optimalen Herstellkosten je Domäne einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung
Abbildung 5-23: Optimale Gesamtkosten (Herstellkosten und Einmalaufwände) einer automotiven E/E Bordnetzarchitektur, eigene Darstellung
Abbildung 5-24: Liste der Teilnehmer an Experten-Workshops und Experten-Interviews, eigene Darstellung
Abbildung 5-25: Zuordnung der Teilnehmer auf Teams inkl. Experten-Workshop, eigene Darstellung
Abbildung 5-26: Experten-Workshops zur Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn sowie Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung
Abbildung 5-27: Kriterien zur Bewertung des Fortschritts der Optimierungsmodellbildung, eigene Darstellung.
Abbildung 5-28: Betrachtungsgegenstand des Kostenmodells zur Funktionspartitionierung, eigene Darstellung
Abbildung 5-29: Kostenplausibilisierung über historische Referenzwerte, eigene Darstellung.
Abbildung 5-30: Referenzwerte als Grundlage zur Ermittlung von Zielkosten für eine neue E/E Funktionsgeneration, eigene Darstellung
Abbildung 6-1: Konstruktion Referenzmodell, Phasen 1 bis 4 des Vorgehensmodells zur Referenzmodellbildung, eigene Darstellung in Anlehnung an BECKER [BECKER 1998, S. 7ff.]
Abbildung 6-2: Zielsetzung der Referenzmodellierung, eigene Darstellung
Abbildung 6-3: Ordnungsrahmen zur Referenzmodellbildung, eigene Darstellung
Abbildung 6-4: Modellierung von Systemelement 1 – Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-5: Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, eigene Darstellung 190
Abbildung 6-6: Aufgaben des Requirements Engineering und Management, Darstellung in Anlehnung an [BALZERT 2009, S. 444f. und S. 547; PATIG/DIBBERN 2015, o.S.]
Abbildung 6-7: Systemelement 1 – Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-8: Modellierung von Systemelement 2 – Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-9: Rahmenbedingungen für die automotive E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung

Abbildung 6-10: Kritische Erfolgsfaktoren für die automotive E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung
Abbildung 6-11: Entwicklungs-/Anwendungszyklus von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-12: Zusammenspiel von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-13: Systemelement 2 – Harmonisierung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-14: Modellierung von Systemelement 3 – Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-15: Ausleitung von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an Fahrzeugprojekte innerhalb einer Baureihe eines OEMs, eigene Darstellung
Abbildung 6-16: Systemelement 3 – Ausleitung einer Generation von E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten an ein Fahrzeugprojekt, eigene Darstellung 204
Abbildung 6-17: Drei Fälle der Ausleitung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-18: Trigger für die Überarbeitung einer Generation E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten, eigene Darstellung
Abbildung 6-19: Anforderungsausleitung an E/E Bordnetzarchitektur und E/E Baukasten unter Beachtung der E/E Architekturrelevanz, eigene Darstellung
Abbildung 6-20: Übergabe einer "Genration X" an ein Fahrzeugprojekt, eigene Darstellung. 210
Abbildung 6-21: Adressierung von Anforderungen an E/E Bordnetzarchitektur und Baukasten durch Fahrzeugprojekte, eigene Darstellung
Abbildung 6-22: Referenzmodell für die architekturgesteuerte E/E Baukastenentwicklung, eigene Darstellung
Abbildung 6-23: Liste der Teilnehmer an Experten-Workshops und Experten-Interviews, eigene Darstellung
Abbildung 6-24: Zuordnung der Teilnehmer zu Teams inkl. Experten-Workshop, eigene Darstellung
Abbildung 6-25: Experten-Workshops zur Steigerung von Wissens- und Erkenntnisgewinn sowie Referenzmodellierung, eigene Darstellung
Abbildung 6-26: Kriterien zur Bewertung des Fortschritts der Referenzmodellierung, eigene Darstellung
Abbildung 7-1: Erarbeitete Lösungsvorschläge zur Beantwortung der Forschungsleitenden Fragestellungen, eigene Darstellung

FORMELVERZEICHNIS XIII

# III. Formelverzeichnis

Formel 5-1: Berechnung von Entwicklungskosten	150
Formel 5-2: Berechnung von Herstellkosten	152
Formel 5-3: Berechnung der gesamten Entwicklungskosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.	158
Formel 5-4: Berechnung der Entwicklungskosten eines ZSG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.	158
Formel 5-5: Berechnung der Entwicklungskosten für die ESG einer Domäne.	159
Formel 5-6: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ZSG und ESG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.	160
Formel 5-7: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ZSG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.	160
Formel 5-8: Berechnung der gesamten Herstellkosten für ESG je E/E Bordnetzarchitektur Domäne.	161
Formel 5-9: Berechnung der Gesamtkosten je E/E Bordnetzarchitektur Domäne	162
Formel 5-10: Berechnung der Gesamtkosten einer E/E Bordnetzarchitektur	162
Formel 5-11: Berechnung des Binomialkoeffizientens.	168

LITERATURVERZEICHNIS XIV

# IV. Literaturverzeichnis

ADAM, D.; WITTE, T. (1975):

Betriebswirtschaftliche Modelle: Aufgaben, Aufbau, Eignung.

WISU - Das Wirtschaftsstudium 4.

ADAM, D.; WITTE, T. (1976):

Typen betriebswirtschaftlicher Modelle.

WISU – Das Wirtschaftsstudium 5.

ADLER, N.; GEBAUER, D.; REICHMANN, C.; MÜLLER-GLASER, K. D. (2011):

Modelbasierte Erfassung von Optimierungsaktivitäten als Grundlage zur

Systemoptimierung von Elektrik/Elektronik-Architekturen. FZI Karlsruhe. In: Frank

Oppernheimer (Hg.): Workshop Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen.

MBMV; GI/ITG/GMM-Workshop und Verifikation. Berlin: VDE-Verlag.

ANTON, THOMAS H. F. (2011):

Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatik Simulation.

1. Aufl., München: Dr. Hut Verlag.

ARNOLD, D.; HEINRICH M. (2010):

Applied technology and innovation management. Insights and experiences from an industry-leading innovation centre.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

ARNOLD, D.; ISERMANN, H.; KUHN A.; TEMPELMEIER, H. (2008):

Handbuch Logistik. Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier.

3. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

ARNOLD, U., EßIG, M. (1997):

Einkaufskooperationen in der Industrie.

Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

ASSMUS, D. (2005):

Lean Products — Maximierung von Kundennutzen und Skaleneffekten.

Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik.

Online verfügbar: http://www.lean-innovation.de/de/veroeffentlichungen/lean\_products\_maximierung von kundennutzen und skaleneffekten.pdf, zuletzt geprüft am 12.07.2013.

ATTESLANDER, P. (2010):

Methoden der empirischen Sozialforschung.

Neue Aufl., Berlin: Erich Schmidt Verlag.

ATTESLANDER, P.; CROMM, J. (2003):

Methoden der empirischen Sozialforschung.

10. Aufl., 104. - 111. Tsd. Berlin: de Gruyter Verlag.

AUTOSAR (2014):

Online verfügbar unter www.autosar.org, zuletzt geprüft am 05.07.2014.

LITERATURVERZEICHNIS XV

#### BACKHAUS, K.; BÜSCHEN, J.; VOETH, M. (2003):

Internationales Marketing.

5. Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

#### BÄKER, B. (2008):

Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug, III. Systeme von morgen - Technische Innovationen und Entwicklungstrends.

1. Aufl. Renningen: expert-Verlag.

#### BÄKER, B. (2013):

Elektrik/Elektronik-Architektur.

TU Dresden, Institut für Automobiltechnik, Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik. Dresden.

Online verfügbar unter: http://tu-

dresden.de/die\_tu\_dresden/fakultaeten/vkw/iad/professuren /fm/forschung, zuletzt geprüft am 05.07.2014.

## BALZERT, H. (2009):

Lehrbuch der Software-Technik.

3. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akad. Verlag.

#### BARON, J.; McAlinden, S.; Chen, Y.; Schroeder, G. (2011):

The U.S. Automotive Market and Industry in 2025. CAR Center for Automotive Research. Online verfügbar unter: http://www.cargroup.org/assets/files/ami.pdf, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

#### BARON, J.; SWIECKI, B.; CHEN, Y. (2006):

Vehicle Technology Trends in Electronics for the North American Market; Opportunities for the Taiwanese Automotive Industry. CAR Center for Automotive Research.

Online verfügbar unter: http://www.cargroup.org/assets/files/taiwan 12-18-

06 website version .pdf., zuletzt geprüft am 30.06.2014.

#### BARTELT, C.; HEROLD, S. (2006):

Modellorientiertes Variantenmanagement.

In: Modellierung 82, S. 173–182.

#### BEA, F. X.; FRIEDL, B.; SCHWEITZER, M.L (HG.) (2005):

Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Planung und Steuerung.

9. Aufl., Stuttgart: Lucius & Lucius (1082).

#### BECKER, H. (2007):

Auf Crashkurs. Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb;

2. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### BECKER, J. (2001):

Referenzmodel. In: P. Mertens, A. Back, (Hg): Lexikon der Wirtschaftsinformatik.

4. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### BECKER, J.; DELFMANN, P.; KNACKSTEDT, R. (2004):

Adaption fachkonzeptioneller Referenzprozessmodelle.

Industrie Management, 20(1).

#### BECKER, J.; DELFTMANN, P (2004):

Referenzmodellierung. Grundlagen, Techniken und domänenbezogene Anwendung. Heidelberg: Physika Verlag.

LITERATURVERZEICHNIS XVI

### BECKER, J.; DELFTMANN, P.; KNACKSTEDT, R.; KUROPKA, D. (2002):

Konfigurative Referenzmodellierung. In: Wissensmanagement mit Referenzmodellen:

Konzepte für die Anwendungssystem- und Organisationsgestaltung. Hrsg.: Becker, J.;

Knackstedt, R..

Heidelberg: Pysica Verlag.

#### BECKER, J.; KNACKSTEDT, R. (2003):

Konstruktion und Anwendung fachkonzeptioneller Referenzmodelle im Data

Warehousing. In: Wolfgang Uhr; Werner Esswein; Eric Schoop (Hrsg.):

Wirtschaftsinformatik 2003/Band II - Medien - Märkte - Mobilität.

Heidelberg: Physica Verlag.

#### BECKER, J.; KNACKSTEDT, R. (2004):

Referenzmodellierung im Data-Warehousing – State-of-the-Art und konfigurative Ansätze für die Fachkonzeption. In: Wirtschaftsinformatik.

## BECKER, J.; KÖNIG, W.; SCHÜTTE, R.; WENDT, O.; ZELEWSKI, S. (1999):

Wirtschaftsinformatik und Wissenschaftstheorie. Bestandsaufnahme und Perspektiven. Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### BECKER, J.; PFEIFFER, D. (2006):

Konzeptionelle Modelle in der Wirtschaftsinformatik — Konstruktion und Evaluation. Das Wirtschaftsstudium, 35(12) 2006..

#### BECKER, J.; ROSEMANN, M.; SCHÜTTE, R. (1998):

Referenzmodellierung. State-of-the-Art und Entwicklungsperspektiven.

1.Aufl., Heidelberg: Physica Verlag.

#### BECKER, J.; SCHÜTTE, R. (2004):

Handelsinformationssysteme: Domänenorientierte Einführung in die

Wirtschaftsinformatik, mi-Wirtschaftsbuch.

2. Aufl., Redline Wirtschaft, MI-Wirtschaftsbuch.

#### BECKER, W. (1997):

Aufgaben und Instrumente der frühzeitigen kostenpolitischen Steuerung.

1. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### BECKER, W. (2002):

Network of Automotive Excellence als Lösungsansatz für den Wandel in der Entwicklung/Produktion und Markenpolitik. Vorgestellt auf der 2nd European Engineering User Conference, Brüssel.

#### BENTENRIEDER, M; WANDRES, S. (2011):

Partner Networks Will Determine Tomorrow's Urban Mobility. *Oliver Wyman*. 19. Mai 2011.

Online verfügbar unter: http://www.oliverwyman.com/content/dam/oliverwyman/global/en/files/archive/2011/ManSum\_Charts\_Oliver\_Wyman\_Urban\_Mobility, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

#### BIEGERT, H. (1971):

Die Baukastenbauweise als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip. Karlsruhe: Polyfoto Dr. Vogt KG.

LITERATURVERZEICHNIS XVII

#### Blume, J.; Kern, T. A.; Richter, P. (2013):

Head-up-Display. Die nächste Genaration mit Augemented-Reality-Technik.

In: ATZ elektronik 8. (04).

#### BMW Fahrzeugkonfigurator (2012)

Online verfügbar: http://www.bmw.de/de/home.html, zuletzt geprüft am 20.07.2012.

#### BÖLG, A.; KOBLER, M.; SCHREF, M. (2006):

Wiederverwendung von Prozessmodellen. In: Fink, K.; Polder, C. (Hg.):

Wirtschaftsinformatik als Schlüssel zum Unternehmenserfolg.

Wiesbaden: DUV.

#### BORGEEST, K. (2014):

Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement.

3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag.

### BOROWSKI, K.-H. (1961):

Das Baukastensystem in der Technik.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### BORTZ, J.; DÖRING, N. (2015):

Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler.

4. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### BOSCH, R. (2011):

Automotive Handbook. 8. ed., revis. and expanded, May 2011.

Plochingen: Bosch.

#### BOSSEL, H. (1992):

Modellbildung und Simulation.

Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

#### Braess, H.-H.; Seifert, U. (2013):

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.

7. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg.

#### Brandt, L. S.; Krämer, N.; Metzger, J.; Lindemann, U. (2012):

Optimization Approach for Functionpartitioning in an automotive Electric Electronic System Architecture.

Dubrovnik – Croatia: International Design Conference – Design 2012.

#### BRIDGWATER, J. (2012):

Energieeffiziente Halbleiter für Infotainment Systeme.

In: ATZ elektronik Sonderheft electronica 2012.

#### BROCKE, J.; BUDDENDICK, C. (2004):

Konstruktionstechniken für die Referenzmodellierung. In: Referenzmodellierung:

Grundlagen Techniken und domänenbezogene Anwendungen. Hrsg.: Becker, J.;

Delftmann, P...

Heidelberg: Physica Verlag.

#### Broy, M. (2005):

The Impact of Models in Software Development. In: Goos, G.: Hartmanis, J.; Leeuwen, J.;

LITERATURVERZEICHNIS XVIII

Hutter, D.; Stephan, W. (Hg.): Mechanizing Mathematical Reasoning. Bd. 2605. Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### BROY, M. (2006):

Automotive software connected services in mobile networks. Revised selected papers.

Automotive Software Workshop1, 2004, San Diego, California.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

Broy, M.; Feilkas, M.; Grünbauer, J.; Gruler, A.; Harhurin, A.; Hartmann, J. et al. (2008):

Umfassendes Architekturmodell für das Engineering eingebetteter Software-intensiver Systeme. Veröffentlichung. Technische Universität München, München. Institut für Informatik. Online verfügbar unter http://www4.in.tum.de/publ/papers/TUM-I0816.pdf, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Broy, M.; Geisberger, E.; Kazmeier, J.; Rudorfer, A.; Beetz, K. (2007):

Ein Requirements Engineering Referenzmodell.

In: GI Informatik Spektrum 30 (3) 2007.

Broy, M.; Gleirscher, Mario; Merenda, S.; Wild, D.; Kluge, P.; Krenzer, W. (2009): Toward a Holistic and Standardized Automotive Architecture Description.

In: IEEE Computer, Vol.42, No. 12 2009.

#### Broy, M.; Pree, W. (2003):

Ein Wegweiser für Forschung und Lehre im Software-Engineering eingebetteter Systeme.

In: Informatik Spektrum 26 (1), S. 3–7. Online verfügbar unter:

http://rd.springer.com/article/10.1007%2Fs00287-002-0233-9, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Broy, M.; Reichart, G.; Rothhardt, L. (2011):

Architekturen softwarebasierter Funktionen im Fahrzeug: von den Anforderungen zur Umsetzung.

In: Informatik Spektrum, Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### Broy, M.; Webers, K. (2013):

Anforderungsmanagement in der Softwareentwicklung.

In: ATZ elektronik 8. (01) 2013.

#### BUND, M. (2009):

F- & E- Outsourcing. Planung – Kontrolle – Integration.

1. Aufl., Wiesbaden: Dt. Universitäts-Verlag (Gabler Edition Wissenschaft).

#### BURGDORF, F. (2010):

Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

#### BURGER, A. (1999):

Kostenmanagement.

München: Oldenbourg Verlag.

#### BURKERT, A. (2012):

System-on-Chip-Plattform verbindet Endgeräte- und Automobiltechnik.

In: ATZ elektronik Sonderheft electronica 2012.

LITERATURVERZEICHNIS XIX

#### BURKERT, A. (2013):

Perspektiven softwarebasierter Konnektivität.

In: ATZ elektronik 8. (01) 2013.

#### BURKHARDT, H.-J.; PRIONOTH, R. (2014):

Ein Auto ist kein Computer.

In: Informatik Spektrum (1) 2014.

#### BUTZ, T.; WURSTER, U.; TROMMER, G.; WANKERL, M. (2012):

Simuliertes GPS-Space-Segment und Sensorfusion zur spurgenauen Positionsbestimmung. In: ATZ elektronik 7. (03) 2012.

#### CAMPHAUSEN, B. (2007):

Strategisches Management: Planung, Entscheidung, Controlling.

3. Aufl., München: De Gruyter Oldenbourg Verlag.

#### CAMPHAUSEN, B.; VOLLMER, T. (2014):

Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Bachelor Kompaktwissen,

3. Aufl., München: De Gruyter Oldenbourg Verlag.

#### CARB (2012):

Air Ressource Board.

Online verfügbar: http://www.arb.ca.gov/homepage.htm, zuletzt überprüft am 20.08.2012.

#### CARNEGIE MELLON SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE CMU/SEI (2006):

CMMI® for Development, Version 1.2. CMU/SEI-2006-TR-008, ESC-TR-2006-008. Carnegie Mellon University.

#### CHRISTENSEN, S.; OPPACHER, F. (2001):

What can we learn from No Free Lunch? In: Spector L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2001

San Francisco Morgan Kaufmann Publisher, S. 1219–1226.

#### COENENBERG, A. G.; FISCHER, T. M., GÜNTHER, T. (2012):

Kostenrechnung und Kostenanalyse.

8. Aufl., Schäfer Poeschel, Stuttgart.

#### CZICHOS, H. (2008):

Mechatronik. Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme.

2. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

#### DIEKMANN, A. (2007):

Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen.

4. Aufl., Hamburg: Rohwohlt Verlag.

#### Dietz, W. (2012):

Geschäftsmodell Mobilität. Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister.

In: ATZ elektronik 7 (2) 2012.

#### DIETZ, W.; MEFFERT, H.; BRACHAT, H. (1994):

Grundlagen der Automobilwirtschaft.

Ottobrunn: Autohaus Automobilwirtschaft.

LITERATURVERZEICHNIS XX

#### DIN 69901-5 (2009):

Project management - Project management systems - Part 1: Fundamentals.

Berlin: Deutsches Institut für Normung DIN 69901.

#### DINKELBACH, W (1982):

Entscheidungsmodelle.

Berlin u.a.: W. de Gruyter Verlag.

# DINKELBACH, W. UND KLEINE, A. (1996):

Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### DOMSCHKE W. UND DREXL, A. (2011):

Einführung in Operations Research.

8. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### DOMSCHKE, W. UND SCHOLL, A. (2008):

Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht.

4. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## DOMSCHKE, W.; DREXL, A. (2007)

Einführung in Operations Research

Berlin u.a.: Springer Verlag.

## DRESSBACH, S. (1999):

Epistemologische Überlegung zu Modellen in der Wirtschaftsinformatik. In: Becker, J.;

König, W.; Schütte, R.; Wendt, O.; Zelewski, S. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik und

Wissenschaftstheorie: Bestandsaufnahme und Perspektive.

Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### Drews, G.; Hillebrand, N. (2007):

Lexikon der Projektmanagement-Methoden.

1. Aufl., München: Rudolf Haufe Verlag GmbH & Co. KG.

# **DUDEN (2015):**

Online verfügbar unter: http://www.duden.de/rechtschreibung/Industriestandard, zuletzt geprüft am 20.03.2015

## DZIOBEK, C.; LOEW, J.; PRZYSTAS, W.; WEILAND, J. (2008):

Von Vielfalt und Variabilität – Handhabung von Funktionsvarianten in Simulink-Modellen.

Elektronik automotive (2) 2008.

# EHMER, M. (2002):

Mobile Dienste im Auto — Die Perspektive für Automobilhersteller?.

In: Reichwald, R.: Mobile Kommunikation. Wertschöpfung, Technologien, neue Dienste.

1. Aufl., Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

# EHRLENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.; MÖRTL, M. (2014):

Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung.

7. Aufl.; Berlin u.a.: Springer Vieweg.

LITERATURVERZEICHNIS XXI

## ELLINGER, T.; BEUERMANN, G.; LEISTEN, R. (2003):

Operations research. Eine Einführung.

6. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

# ERICSSON, A.; ERIXON, G. (1999):

Controlling Design Variants: Modular Product Platforms.

New York: Society of Manufacturing Engineers.

# ESCH, F.-R. (2013):

Strategie und Technik des Automobilmarketing,

1. Aufl., Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

#### ESCH, S.; LANG, B.(2008):

Leketronik- und Vernetzungsarchitektur mit gesteigerter Leistungsfähigkeit.

In: ATZ Extra – Der neue Audi Q5. Vieweg+Teubner GWV Verlag GmbH.

# EUR-LEX (2012):

Online verfügbar unter: http://eur-lex.europa.eu/legal-

content/DE/ALL/?uri=CELEX:32008R0692, zuletzt geprüft am 20.08.2012,

#### FAHRENKOPF, A. (2013):

Universell einsetzbares Steuergerät für Kleinserien und Prototypen.

In: ATZ elektronik 8. (01) 2013.

# FEILKAS, M.; PFALLER, C.; SALZMANN, C.; PAGEL, M. (2013):

Autosar-Architektur. Konformität der Implementierung automatisch prüfen.

In: ATZ elektronik 8. (03) 2013.

# FENNEL, H.; BUNZEL, S.; HEINECKE, H.; BIELEFELD, JÜRGEN; FÜRST, S.; SCHNELLE, K.-P.;

GROTE, W.; MALDENER, N.; WEBER, T.; WOHLGEMUT, F.; RUH, J.; LUNDH, L.; SANDÉN, T.;

HEITKÄMPER, P.; RIMKUS, R.; LEFOUR, J.; GILBERT, A.; VIRNICH, U.; VOGET, S.;

NISHIKAWA, K.; KAJIO, K.; LANGE, K. SCHARNHORST, T.; KUNKEL, B. (2006):

Achivements and exploitation of the AUTOSAR development partnership – AUTOSAR Partnership, CTEA.

Online verfügbar unter: http://www.bmw-

carit.com/downloads/publications/Achievements%20and%

20exploitation%20of%20the%20%20%20AUTOSAR%20development%20partnership.pd f, zuletzt geprüft am 20.08.2012.

#### FETTKE, P. (2006):

Referenzmodellevaluation. Konzeption der strukturalistischen Referenzmodellierung und Entfaltung ontologischer Gütekriterien.

Berlin: Logos Verlag.

#### FETTKE, P. (2008):

Empirisches Business Engineering Grundlegung und ausgewählte Ergebnisse.

Habilitationsschrift, Saarbrücken.

# FETTKE, P.; LOOS, P. (2002):

Methoden zur Wiederverwendung von Referenzmodellen – Übersicht und Taxonomie.

In: Becker, J.; Grob, H. L.; Klein, S.; Kuchen, H.; Müller-Funk, U.; Vossen, G. (2002):

Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik.

Arbeitsbericht Nr. 90, Münster, S.9-30.

LITERATURVERZEICHNIS XXII

# FETTKE, P.; LOOS, P. (2004):

Systematische Erhebung von Referenzmodellen – Ergebnisse einer Voruntersuchung. Working Papers of the Research Group Information Systems & Management, Paper 19, Mainz.

## FETTKE, P.; LOOS, P. (2007):

Reference Modeling for Business Systems Analysis.

Hershey: Idea Group Publishing.

#### FINK, A.; ROTHLAUF, F. (2006):

Heuristische Optimierungsverfahren in der Wirtschaftsinformatik Working Paper 10 / 2006

## FINK, A.; SCHNEIDEREIT, G.; VOB, S. (2001):

Grundlagen der Wirtschaftsinformatik.

Heidelberg: Physica Verlag.

## FLICK, U. (2011):

Qualitative Sozialforschung – Eine Einführung,

4. Aufl., Hamburg: Rowohlt Verlag.

# FÖRSTER, M. (2003):

Variantenmanagement nach Fusion in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus. München.

Frank, E.; Wilhelm, R.; Ernst, R.; Sangiovanni-Vincentelli, A.; Di Natale, M. (2008): Methods, Tools and Standards for the Analysis, Evaluation and Design of Modern Automotive Architectures. In: Proceedings of the conference on Design, Automation & Test in Europe.

# FRANK, U. (2006):

Towards a Pluralistic Conception of Research Methods in Information Systems Research. ICB Research Report, No. 7, Universität Duisburg-Essen.

## Franke, H.-J.; Hesselbach, J.; Huch, B.; Firchau, N. L. (2002):

Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung,

München: Carl Hanser Verlag.

# FRANZ, K. P., KAJÜTER, P. (1997):

Proaktives Kostenmanagement als Daueraufgabe, in: Kostenmanagement -

Wettbewerbsvorteile durch systematische Kostensteuerung.

Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

## FRICKENSTEIN, E. (2008):

Autosar sorgt für einen Paukenschlag.

In: ATZ Elektronik 3. (06) 2008.

## FRIEDMANN, O; MAYER, H.-H. (1998):

Ergebnisorientiertes Projektcontrolling in der Produktentwicklung.

In: Zeitschrift für Automobilwirtschaft, 1, (1) 1998.

#### FRIEDRICH, M. O. (2011):

Funktionsorientiertes Konzept zur Unterstützung früher Phasen der Produktentwicklung in

LITERATURVERZEICHNIS XXIII

der Informatik.

München: Suedwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.

# FRITZ, W. (2001):

Marketing. Elemente marktorientierter Unternehmensführung.

3. Aufl., Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

## GAAG, A. (2010):

Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.

1. Aufl., München: Dr. Hut Verlag.

GÄRTNER, U.; FREITAG, R.; SCHMID, T.; ZACHAY, A.; DETTINGER, T. (2013):

Infotainment neu definiert.

In: ATZ extra Mercedes-Benz S-Klasse.

#### GETHMANN, C. F. (1995):

Deduktion.

In: Mittelstraß, J. (Hrsg.): Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie.

Band 1 Stuttgart, Weimar.

# GLÄSER, J.; LAUDEL, G. (2010):

Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse.

4. Aufl., Wiesbaden: VS.

# GLEICH, R.; NESTLE, V.; SOMMER, L. (2009):

Innovationsorientiertes Performance Measurement. Entwicklung und Implementierung einer innovativen Scorecard am Beispiel der Festo AG & Co. KG. IN: Fisch, J. H.; Roß, J.-H. (2009): Fallstudien zum Innovationsmanagement. Methodengestützte Lösung von Problemen aus der Unternehmenspraxis.

1. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### GÖPFERT, J. (1998):

Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.

Wiesbaden: Gabler Verlag.

## GÖTZE, U. (2004):

Kostenrechnung und Kostenmanagement.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### GÖTZE, U. (2010):

Kostenrechnung und Kostenmanagement,

5. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### GRAF, A.; KOSITZA, J.; RAITHEL, T. (2013):

Architekturstudie zur Leistungsverteilung im Kfz.

In: ATZ elektronik 8. (03), 2013.

# Greiner, E.; Steuer, C.; Schaser, J. (2012):

Variablität durch Standardisierung.

In: ATZ extra Mercedes-Benz A-Klasse, 2012.

LITERATURVERZEICHNIS XXIV

## GROB, H. L.; BENSBERG, F. (2005):

Kosten- und Leistungsrechnung, Theorie und SAP(R)-Praxis.

München: Vahlen Verlag.

## GROHMANN, D.; CIERULLIES, J.; HAJVAZOVIC, K. (2013):

Bordnetz für Start-Stop-Systeme.

In: ATZ extra Mercedes-Benz S-Klasse, 2013.

# GUBA, E. G. (1990):

The Alternative Paradigm Dialog.

In Guba, E.G. (Hrsg.): The Paradigm Dialog, Newbury Park.

# HABERMANN, A.; BURTON, S. (2012):

Safety systematisch verankern – Modellbasierte funktionale Sicherheit in der E/E-Systementwicklung.

In: Automobil Elektronik 02/2012.

# HABERSTOCK, L. (I) (2008):

Kostenrechnung I, Einführung mit Fragen, Aufgaben, einer Fallstudie und Lösungen.

13. Aufl., Berlin: Erich Schmidt Verlag.

#### HABERSTOCK, L. (II) (2008):

Kostenrechnung II, (Grenz-)Plankostenrechnung.

10. Aufl., Hamburg: Erich Schmidt Verlag.

#### HARD, M.; GROß-RHODE, M. (2008):

Funktionsorientierte Systementwicklung mit AUTOSAR – Von Softwarekomponenten zu architekturzentrierten Prozessen.

In: ATZ elektronik, 3. (06), 2008.

# HARDUNG, B; KÖLZOW, T.; KRÜGER, A. (2004):

Reuse of software in distributed embedded automotive systems.

In: Proceeding EMSOFT '04 Proceedings of the 4th ACM international conference on Embedded software, ACM New York.

### HARS, A. (1994):

Referenzdatenmodelle – Grundlagen effizienter Datenmodellierung.

Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

## HAUSCHILDT, J.; SALOMO, S. (2011):

Innovationsmanagement.

5. Aufl., München: Vahlen Verlag.

## HEIGL, K. M.; RENNHAK, C. (2008):

Zukünftige Wettbewerbsstrategien für Automobilzulieferer. Chancen und Risiken der dritten Revolution in der Automobilindustrie.

Stuttgart: Ibidem-Verlag.

## HEINA, J. (1999):

Variantenmanagement. Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt. Gabler Edition Wissenschaft.

Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

LITERATURVERZEICHNIS XXV

## HEINHOLD, M. (2010):

Kosten- und Erlösrechnung in Fallbeispielen.

5. Aufl., Stuttgart: Lucius & Lucius Verlag.

# HEINRICH, L. J., (2000):

Bedeutung von Evaluation und Evaluationsforschung für die Wirtschaftsinformatik. In:

Heinrich, L.J., Häntschel, I. (Hrsg.): Evaluation und Evaluationsforschung, in der

Wirtschaftsinformatik.

München: Oldenbourg Verlag.

# HEVNER, A. R., MARCH, S. T., PARK, J., RAM, S. (2004):

Design Science in Information Systems Research.

MIS Quarterly, Vol. 28, No.1, 2004.

# HEVNER, A.R.; MARCH, S. T. (2003):

The Information System Research Cycle.

IEEE Computer 36, 2003.

# HILDISCH, A.; STEURER, J.; STOLLE, R. (2007):

HMI generation for plug-in services from semantic descriptions, Software Engineering for Automotive Systems.

Minneapolis: ICSE Workshops SEAS '07. Fourth International Workshop.

### HILLENBRAND, M. (2012):

Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

## HOFFMANN, H.; LEIMEISTER, J.; KRCMAR, H. (2010):

Kundenintegration bei der Erstellung bedarfsgerechter automotive Software. In: Heilmann,

H. (Hrsg.): Humane Nutzung der Informationstechnologie.

Heidelberg, Akademische Verlagsgesellschaft AKA GmbH.

#### HOITSCH, H.-J.; LINGNAU, V. (2007):

Kosten- und Erlösrechnung, Eine controllingorientierte Einführung.

6. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## HOUDEK, F.; PAECH, B. (2002):

Das Türsteuergerät – eine Beispielspezifikation, QUASAR.

Kaiserslautern: IESE-Report Nr. 002.02/D, Version 1.0; Fraunhofer IESE.

# ITWISSEN (2014):

COTS (commercial off-the-shelf).

Online verfügbar unter: http://www.itwissen.info/definition/lexikon/commercial-off-the-shelf-COTS.html, abgerufen am 16.09.2014.

# JAENSCH, M.(2012):

Modulorientiertes Produktlinien Engineering für den modellbasierten Elektrik/Elektronik-Architekturentwurf.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (8).

# JARRE, F.; STOER, J. (2004):

Optimierung, Berlin u.a. Springer Verlag

LITERATURVERZEICHNIS XXVI

# JARUZELSKI, B.; STAACK, V.; GOEHLE, B. (2014):

The Global Innovation 1000: Proven Paths to Innovation Success – Ten years of research reveal the best R&D strategies for the decade ahead.

Strategy&, PwC.

# JESCHKE, A. (1997):

Beitrag zur wissenschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion. Braunschweig: Institut für Konstruktionstechnik.

# JOHNSON, D.; McGEOCH, L. (2002):

Experimental analysis of heuristics for the STSP. In: Gutin, G.; Punnen, A.P. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem and Its Variations.

**Boston Kluwer Academic** 

### JONES, M. (2009):

Fast Ethernet für unterwegs.

In: Automobil elektronik 6. (3), S. 50.

# JUNGINGER, M. (2005):

Wertorientierte Steuerung von Risiken im Informationsmanagement.

Wiesbaden: DUV.

### KAISER, A. (1995):

Integriertes Variantenmanagement mit Hilfe der Prozesskostenrechnung, St. Gallen.

# KALMBACH, R.; BERNHART, W.; GROSSE KLEINMANN, P.; HOFFMANN, M. (2011):

Automotive landscape 2025: Opportunities and challenges ahead Study.

München: Roland Berger Strategy Consultants GmbH.

## KAMPKER, A.; GULDEN, A.; DEUTSKENS, C. (2010):

Kostenpotentiale in der Montage modular aufgebauter Elektrofahrzeuge,

Automobiltechnische Zeitschrift.

## KANT, I.; SCHMITDT, R. (1997):

Kritik der reinen Vernunft.

Hamburg: Felix Meiner Verlag.

# KARACHALIOS, K. (2014):

Experteninterview: Die Bedeutung von Industriestandards, http://www.epo.org/newsissues/issues/standards de.html, abgerufen am 12.02.2015

#### KEILUS, M.; MALTRY, H. (2006):

Managementorientierte Kosten- und Leistungsrechnung, Grundlagen der operativen Kalkulation.

2. Aufl., Stuttgart: Teubner Verlag.

## KERSTEN, W. (2002):

Vielfaltsmanagement. Integrative Lösungsansätze zur Optimierung und Beherrschung der Produkte und Teilevielfalt.

München: TCW Transfer-Centrum (TCW-Report, 31).

#### KISTNER, K.-P. (2003):

Optimierungsmethoden. Einführung in die Unternehmensforschung für

LITERATURVERZEICHNIS XXVII

Wirtschaftswissenschaftler.

3. Aufl., Heidelberg: Physica Verlag.

KLEIN, R.; SCHOLL, A. (2011): Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse.

2. Aufl. München: Vahlen Verlag.

## KOHLHASE, N. (1997):

Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen: Strategien, Methoden, Instrumente. In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe Nr. 275. Düsseldorf: VDI Verlag.

# KOPFER, H. (1989):

Heuristische Suche in Operations Research und Künstlicher Intelligenz. Berlin Habilitationsschrift: Freie Universität

# KPMG (2011):

KPMG's Global Automotive Executive Survey 2011 Creating a future roadmap for the automotive industry, online verfügbar: https://home.kpmg.com/xx/en/home/media.html, zuletzt überprüft am 12.05.2012.

#### KPMG (2012):

KPMG's Global Automotive Executive Survey 2012 Managing growth while navigating uncharted routes, online verfügbar: https://home.kpmg.com/xx/en/home/media.html, zuletzt überprüft am 20.08.2012.

#### KRCMAR, H. (2015):

Einführung in das Informationsmanagement.

2. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## Kreifeldt, R.; Roth, H.; Preissner, O. (2012):

Bediensysteme mit Gestensteuerung. Stand der Technik und Zukunft.

In: ATZ elektronik 7. (04), 2012.

## Kreikebaum, H. (1997):

Strategische Unternehmensplanung,

6. Aufl., Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

#### Krumm, S.; Rennekamp, M. (2011):

Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie. In: Schuh, G. (Hrsg.): Chefsache Komplexitätsmanagement.

Aachen: Schuh & Co. Komplexitätsmanagement.

#### KÜHL, M.; REICHMANN, C. (2007):

Modellbasierte Architekturentwicklung von E/E-Systemen.

In: Automobil Elektronik 10/2007.

### KURBEL, K.; STUNZ, H. (1990):

Handbuch Wirtschaftsinformatik.

Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

### KUREK, R. (2004):

Erfolgsstrategien für Automobilzulieferer – Wirksames Managen in einem dynamischen Umfeld.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

LITERATURVERZEICHNIS XXVIII

# LAMNEK, S. (2005):

Qualitative Sozialforschung.

4. Aufl., Weinheim: Belz Verlag.

#### LANG, K. (1997):

Gestaltung von Geschäftsprozessen mit Referenzprozessbausteinen.

## LECHNER, A.; KLINGBEIN, K. WAGENITZ, A. (2011):

Evaluation of product variant-driven complexity costs and performance impacts in the automotive logistics with Variety-driven Activity-based Costing.

In: International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2011, Vol II IEMCS, 16.-18. März 2011, Honkong.

# LECHNER, A.; WAGENITZ, A. (2011):

Capturing variaty-driven structural complexity in the automotive inbound logistics with a zero-base approach.

In: Hamburg International Conference of Logistics, 8.-9. September 2011, Hamburg.

#### LEMME, M. (2009):

Erfolgsfaktor Einkauf. Durch gezielte Einkaufspolitik Kosten senken und Erträge steigern. 2. Aufl., Berlin: Cornelsen Verlag.

# LINDEMANN, U. (2004):

Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden.

1. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

# LINDEMANN, U. (2008):

Vorlesungsunterlagen: Methoden der Produktentwicklung.

München: Lehrstuhl für Produktentwicklung.

#### LINDEMANN, U. (2009):

Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden.

3. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

# LINDEMANN, U.; MÖRTL, M. (2010):

Skript zur Vorlesung: Kostenmanagement in der Produktentwicklung.

München: Lehrstuhl für Produktentwicklung.

#### LINGAU, V. (1994):

Variantenmanagement: Produktionsplanung im Rahmen einer

Produktdifferenzierungsstrategie.

Berlin: Erich Schmidt Verlag.

## LOOS, P.; SCHEER, A.-W. (1995):

Vom Informationsmodell zum Anwendungssystem – Nutzenpotentiale für den effizienten Einsatz von Informationssystemen.

In: König, W. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik ,95 – Wettbewerbsfähigkeit, Innovation, Wirtschaftlichkeit. Heidelberg.

# LUDWIG, J. (2012):

Elektronischer Horizont. Vorausschauende Systeme und deren Anbindung an die

LITERATURVERZEICHNIS XXIX

Navigation.

In: ATZ elektronik 7. (06), S. 434–439.

### LÜHRIG, T. (2006):

Risikomanagement in der Produktenwicklung der deutschen Automobilindustrie von der Konzeptentwicklung bis zum Produktionsanlauf.

Aachen.

# MARCH, S., T.; SMITH, G. F. (1995):

Design and natural science research on information technology.

In: Journal Decision Support Systems - Special issue on WITS '92 archive Volume 15 Issue 4, Dec. 1995.

# MARENT, C. (1995):

Branchenspezifische Referenzmodelle für betriebswirtschaftliche IV-

Anwendungsbereiche.

Wirtschaftsinformatik, 37.

#### MATHEIS, J. (2010):

Abstraktionsebenenübergreifende Darstellung von Elektrik/Elektronik- Architekturen in Kraftfahrzeugen zur Ableitung von Sicherheitszielen nach ISO 26262.

Karlsruhe: KIT Sientific Publishing.

# MATHWORKS (2015):

Online verfügbar unter: http://de.mathworks.com/products/matlab/, zuletzt überprüft am 10.03.2015.

# MATTES, B.; MEFFERT, H.; LANDWEHR, R.; KOERS, M. (2004):

Trends in der Automobilindustrie: Paradigmenwechsel in der Zusammenarbeit zwischen Zulieferer, Hersteller und Händler. In: Ebel, B.; Hofer, M. B.; Al-Sibai, J. (Hrsg.):

Automotive Management: Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### MAYER, T. (2016):

Optimale, robuste Versuchsplanung (R-DoE) zur Charakterisierung technischer Systeme Kassel University Press

## MAYRING, P. (2002):

Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken.

5. Aufl., Weinheim: Beltz Verlag.

#### MAYRING, P. (2010):

Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken.

11. Aufl., Weinheim: Beltz Verlag.

#### MECKL, R.(2010):

Internationales Management.

2. Aufl., München: Vahlen Verlag.

# MEINIG, W. (1995):

Grundbegriffe der Automobilwirtschaft,

1. Aufl., Bamberg: Forschungsstelle Automobilwirtschaft (FAW).

LITERATURVERZEICHNIS XXX

MEKHAIEL, M.; MÜLLER, A.; MÜLLER, S.; DORSCH, R.; VALLENTIN, A. (2012):

A wie always on.

In: ATZ extra Mercedes-Benz A-Klasse 2012.

MERTENS, P. (1998):

Geschichte und ausgewählte Gegenwartsprobleme der Wirtschaftsinformatik.

In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium (WiSt) 27 (1998), S. 170–175

MISCHO, S; KORNHAAS, R.; KRAUTER, IMMANUEL, KERKEN, U.; SCHÖTTLE, R. (2008):

E/E Architektur auf dem Scheideweg.

In: ATZ elektronik 3. (05), 2008.

MISSEL, J.; MEHREN, D.; REICHMANN, M.; LALLINGER, M.; BERNZEN, W.; WEIKERT, G. (2013):

Intelligent Drive - entspannter und sicherer Fahren.

In: ATZ extra Mercedes-Benz S-Klasse, 2013.

MYERS, M. D. (1997):

Qualitative Research in Information Systems.

In: MIS Quarterly/June 1997. Auckland, New Zealand.

NASVYTIS, A. (1953):

Die Gesetzmäßigkeit der kombinatorischen Technik.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

NEUMANN, K.; MORLOCK, M. (2002):

Operations-Research.

2. Aufl., München u.a.: Hanser Verlag.

NICKEL, S.; STEIN, O. UND WALDMANN, K.-H. (2011):

Operations Research.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

NISSEN, V. (1996):

Einführung in Evolutionäre Algorithmen – Opetimierung nach dem Vorbild der Evolution, Vieweg Verlag

NÖRENBERG, RALF (2012):

Effizienter Regressionstest von E/E-Systemen nach ISO 26262.

Karlsruhe: Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek.

OICA (2015):

Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles.

Online verfügbar: http://www.oica.net/category/economic-contributions/rd/, zuletzt überprüft am 17.09.2014.

OPTIZ, H. (1970):

Moderne Produktionstechnik. Stand und Tendenzen.

Essen: W. Girardet Verlag.

PAHL, G.; BEITZ, W. (2007):

Konstruktionslehre. Methoden und Anwendungen.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

LITERATURVERZEICHNIS XXXI

PALLIERER, ROMAN; WANDLIG, FLORIAN (2012):

Autosar 4.0 - und jetzt? Herausforderungen und Lösungsansätze für den Einsatz. In: ATZ elektronik 7. (03), 2012.

PAPAGEORGIOU, M.; LEIBOLD, M.; BUSS, M. (2015):

Optimierung Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung 4. Korrigierte Auflage, Berlin u.a. Spinger Verlag.

PATIG, S.; , DIBBERN, J. (2008-2014):

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government, Universität Potsdam Koordination: Norbert Gronau, Edzard Weber, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government, Universität Potsdam.

Online abrufbar unter: http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/Requirements-Engineering; zuletzt überprüft am 20.02.2015

Peffers, K.; Tuunane, T.: Gengler, C. E.; Rossi. M.; Hui, W.; Virtanen, V.; Bragge, J. (2006):

The Design Science Research Process: A Model for producing and presenting information systems research. In: DESRIST 2006. February 24-25, 2006, Claremont, CA.

PFOHL, H.-C.; STÖLZLE, W. (1997):

Planung und Kontrolle. Konzeption, Gestaltung, Implementierung.

2. Aufl., München: Vahlen Verlag.

PICOT, A., REICHWALD, R.; WIGAND, R. T. (2003).

Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management.

Wiesbaden: Gabler Verlag.

PILLER, F. T.; WARINGER, D. (1999):

Modularisierung in der Automobilindustrie - neue Formen und Prinzipien. Modular Sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements.

Aachen: Shaker Verlag.

PINDYCK, R.; RUBINFELD, D. (2009):

Mikroökonomie.

7. Aufl., München: Pearson Verlag.

POHL, K. (2010):

Requirements Engineering: Fundamentals, Principles and Techniques.

Berlin: Springer Verlag.

POMBERGER, G.; DOBLER, H. (2008):

Algorithmen und Datenstrukturen: eine systematische Einführung in die Programmierung; Pearson Deutschland GmbH

PONN, J.; LINDEMANN, U. (2011):

Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen.

2. Aufl. Berlin u.a.: Springer Verlag.

LITERATURVERZEICHNIS XXXII

## POPP, A. (2015):

Stochastiasche dynamische Losgrößenplanung mit positiven Bestellvorlaufzeit

PRETSCHNER, A.; BROY, M.; KRUGER, I. H.; STAUNER, T. (2007):

Software Engineering for Automotive Systems: A Roadmap, Proceeding, FOSE '07 2007 Future of Software Engineering.

Washington: IEEE Computer Society.

#### PROFF, H. (2013):

Radikale Innovationen in der Mobilität: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte.

1. Aufl., Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

# PROFF, H.; PROFF, H. (2013):

Dynamisches Automobilmanagement – Strategien für international tätige

Automobilunternehmen im Übergang in die Elektromobilität.

2. Aufl., Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

# PULM, U. (2004):

Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.

München: Dr. Hut Verlag.

## PWC (2013)

Spotlight on Automotive – PwC Semiconductor Report.

# PWC (2014)

Automobilbranche – Das vernetzte Fahrzeug ist das große Thema der Zukunft.

Online verfügbar: http://www.pwc.de/de/automobilindustrie/automobilbranche-dasvernetzte-fahrzeug-ist-das-grosse-thema-der-zukunft.jhtml, zuletzt überprüft am 30.08.2014.

# RADTKE, P., ABELE, E., & ZIELKE, A. E. (2004):

Die smarte Revolution in der Automobilindustrie. Das Auto der Zukunft - Optionen für Hersteller - Chancen für Zulieferer.

Frankfurt a. M.: Redline Wirtschaft bei Ueberreuter.

# RAPP, T. (1999):

Produktstrukturierung. Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und – plattformen.

2. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### RATHNOW, P., J. (1993):

Integriertes Variantenmanagement. Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt.

Göttingen: Vandenhoeck & Rupert (Bd. 20).

#### RAUBOLD, U. (2011):

Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie. Ein Optimierungsansatz auf Basis der auf den Lebenszyklus wirkenden Einflussfaktoren.

1. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag.

#### REEVES, C. (1993):

Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems.

Oxford Blackwell Scientific Publications

LITERATURVERZEICHNIS XXXIII

## REFFLINGHAUS, R. (2000):

Anbahnung von Forschungs- und Entwicklungskooperationen mit Methoden des Qualitätsmanagements.

Dortmund.

#### REICHMANN, C. (2011):

So liegt der Kabelbaum richtig. Gemeinsame Entwicklung von Elektrik/Elektronik und Mechanik im Fahrzeugbau.

In: Automobil Konstruktion (01), 2011.

# REIF, K. (2009):

Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure.

3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

#### REIF, K. (2010):

Batterien, Bordnetze und Vernetzung.

Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

# REIF, K. (2010):

Bosch Autoelektrik & Autoelektronik – Bordnetze, Sensoren & elektronische Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

# REIF, KONRAD (2012):

Fahrerassistenzsysteme.

Wiesbaden Vieweg+Teubner Verlag.

#### REINER, J., KRIEGER, A. (2011):

Digitaler Showdown – Der Wettbewerb um Kontrolle in der Autoelektronik.

In: Wirtschaftsinformatik und Management, Vol.5, No.1, 2011.

## REMENYI, D.; WILLIAMS, B.; MONEY, A. H.; SWARTZ, E. (2003):

Doing research in business and management. An introduction to process and methods. London u.a.: Sage Verlag.

## REMME, M. (1997):

Konstruktion von Geschäftsprozessen – Ein modellgestützter Ansatz durch Montage generischer Prozeßpartikel.

Wiesbaden.

#### RENNER, I. (2007):

Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.

München: Dr. Hut Verlag.

## RENNHAK, C. (2009):

Die Automobilindustrie von morgen. Wie Automobilhersteller und -zulieferer gestärkt aus der Krise hervorgehen können.

Stuttgart: Ibidem-Verlag.

## RIEDMANN, P. (2011):

Kundenakzeptanz von Innovationen im Produktentwicklungsprozess, Berlin.

RIEGER, A.-W. SCHEER, D. SEIBT, P. STAHLKNECHT, H. STRUNZ, R. THOME, H. WEDEKIND (HRSG.) (2001):

LITERATURVERZEICHNIS XXXIV

Lexikon der Wirtschaftsinformatik.

Berlin.

## ROSEMANN, M.; SCHÜTTE, R. (1997):

Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung. In: Becker, J.; Rosemann, M.;

Schütte, R. (Hrsg.): Entwicklungsstand und Entwicklungsperspektiven der

Referenzmodellierung: Proceedings zur Veranstaltung vom 10. März 1997.

Münster: Institut für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

# SAAD, A.; WEINMANN, U. (2004):

Intelligent Automotive System Services: Requirements, Architectures and Implantation Issues.

In Convergence International Congress & Exposition On Transportation Electronics, SAE Technical Papers.

# SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A. L.; DI NATALE, M. (2007):

Embedded system design for automotive applications (Cover Feature).

In: Computer, vol. 40, no. 10, 2007.

# SCHAAF, A. (1999):

Marktorientiertes Entwicklungsmanagement in der Automobilindustrie: Ein kundenorientierter Ansatz zur Steuerung des Entwicklungsprozesses. Wiesbaden.

# SCHÄFER, S. C.; LEHMANN, U.; KRONE, J.; SCHNEIDER, M.; BRENIG, H. (2010):

Entwicklung von Künstlichen Netzen und deren evolutionäre Strukturierung mit einem Computer Cluster. In: Hoffmann.; Hüllmeier (Hrsg.) (2010): Proceedings 20. Workshop Computational Intelligence,

Dortmund Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik /

Automatisierungstechnik Karlsruher Institut für Technologie

# SCHARL, A. (1997):

Referenzmodellierung kommerzieller Masseninformationssysteme – Idealtypische Gestaltung von Informationsangeboten im World Wide Web am Beispiel der Branche Informationstechnik.

Frankfurt a. M..

## SCHARL, A. (1997):

Referenzmodellierung kommerzieller Masseninformationssysteme: Idealtypische Gestaltung von Informationsangeboten im World Wide Web am Beispiel der Branche Informationstechnik.

Frankfurt am Main: Lang (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft; 2222).

## SCHAUER, C.; FRANK, U. (2007):

Wirtschaftsinformatik und Information Systems: ein Vergleich aus wissenschaftstheoretischer Sicht.

In Franz Lehner; Stephan Zelewski (Hrsg.): Wissenschaftstheoretische Fundierung und wissenschaftliche Orientierung der Wirtschaftsinformatik, GITO, Berlin, 2007.

## SCHÄUFFELE, J.; ZURAWKA, T. (2013):

Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge

LITERATURVERZEICHNIS XXXV

effizient einsetzen.

5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.

## SCHEER, AUGUST-WILHELM (2011):

Wirtschaftsinformatik – Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse.

7. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## SCHILDBACH, T.; HOMBURG, C. (2008):

Kosten- und Leistungsrechnung.

10. Aufl., Stuttgart: Lucius & Lucius Verlag.

# SCHLOTT, S. (2005):

Wahnsinn mit Methode.

In: Automobil Produktion 01/2005.

# SCHMERLER, S.; RIMKUS, R. (2013):

Autosar - Weichenstellung in die Zukunft.

In: ATZ elektronik 8. (01), 2013.

### SCHMIDT, A. (2008):

Kostenrechnung – Grundlagen der Vollkosten-, Deckungsbeitrags-, und

Plankostenrechnung sowie des Kostenmanagements.

5. Aufl., Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

## SCHMIDT, K. (2010):

Die Erwartung der Wirtschaft 2010.

In: Wirtschaftsdienst; Vol 90, No. 1, 2010.

# SCHMOLKE, S.; DEITERMANN, M. (2000):

Industrielles Rechnungswesen IKR.

Darmstadt: Winklers Grimm Verlag.

#### SCHOLL, A. (2001):

Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen – Konzepte und Methoden –

Experimentelle Untersuchungen.

Heidelberg: Physica Verlag.

#### SCHÖNMANN, S. O. (2012):

Produktentwicklung in der Automobilindustrie. Managementkonzepte vor dem

Hintergrund gewandelter Herausforderungen.

1. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag..

#### SCHUH, G. (1989):

Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten. Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten.

In: Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2.

Düsseldorf: VDI-Verlag.

#### SCHUH, G. (2005):

Produktkomplexität managen. Strategien - Methoden - Tools.

2. Aufl., München, Wien: Hanser.

### SCHUH, G.; ARNOSCHT, J. ALEKSIC, S. (2012):

Systematische Gestaltung von Kommunalitäten in Produkten und Prozessen.

LITERATURVERZEICHNIS XXXVI

In: ZWF, Jahrg. 107 (2012).

München: Carl Hanser Verlag.

# SCHUH, G.; SCHWENK, U. (2001):

Produktkomplexität managen. Strategie, Methoden, Tools.

München: Carl Hanser Verlag.

## SCHÜTTE, R. (1998):

Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung – Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle.

Wiesbaden.

# SCHWEGMANN, A. (1999):

Objektorientierte Referenzmodellierung – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung.

Wiesbaden 1999.

## SCHWEITZER, M. (2001):

Gegenstand und Methode der Betriebswirtschaftslehre. In: Bea, F. X.; Dichtl, E.;

Schweitzer, M. (Hrsg.): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Bd. 1: Grundfragen.

8. Aufl., Stuttgart: Lucius & Lucius Verlag.

# SCHWEITZER, M. (2005):

Planung und Steuerung. In: Bea, F.X.; Friedl, B. und Schweitzer, M. (Hrsg.): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Band: Führung.

9. Aufl., Stuttgart: Lucius & Lucius Verlag.

#### SCHWEITZER, M.; KÜPPER, H.-U. (2011):

Systeme der Kostenrechnung.

10. Aufl., München: Vahlen Verlag.

#### SEIBERT, S. (1998).

Technisches Management.

Stuttgart: Teubner Verlag.

# SEIFERT, U. (1996):

The Automobile in the Next Century.

In: FISITA Kongress Prag, Paper K0011, Prag.

#### SIMON, H. A. (1996):

The Sciences of the Artificial – MIT Press Cambridge, Massachusetts.

3. Aufl., Cambridge, Mass: MIT Press USA.

### SOMMERVILLE, I. (2011):

Software Engineering. 9th edition,

Harlow u.a.: Addison-Wesley Verlag.

#### STEGER, J. (2012):

Kosten- und Leistungsrechnung. Einführung in das betriebliche Rechnungswesen, Grundlagen der Vollkosten-, Teilkosten-, Plankosten- und Prozesskostenrechnung. 5. Aufl., München: Oldenbourg Verlag.

#### STEGER, T. M. (2003):

Der Skaleneffekt im Rahmen F&E-basierter Wachstumsmodelle. In: WiSt -

LITERATURVERZEICHNIS XXXVII

Wirtschaftswissenschaftliches Studium (2), S. 104–106.

Online verfügbar unter: www.wif.ethz.ch/resec/people/tsteger/skaleneffekt.pdf, zuletzt überprüft am 13.08.2013.

#### STEGLICH, S.; FUHRHOP, C. (2013):

Von der Straße ins Internet.

In: ATZ elektronik 8. (01), 2013.

# STEININGER, G.; WENDENBURG, M. (2011):

Die Funktion steht im Mittelpunkt.

In: Mechatronik F&E (11), 2011.

#### STREBEL, H. (2007):

Innovations- und Technologiemanagement.

2. Aufl., Stuttgart: UTB.

#### STREICHERT, T.; TRAUB, M. (2012):

Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug. Modellierung und Bewertung von Echtzeitsystemen.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### SUHL, L.; MELLOULI, T. (2009):

Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 2. Aufl.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

#### TANNEBERGER, V.; PAETZ, M. (2012):

Modularisierung ermöglicht Individualisierung.

In: ATZ extra Der neue Golf, 2012.

## TERPORTEN, M.; BIALDYGA, D.; PLANING, P. (2012):

Veränderte Kundenwünsche als Chance zur Differenzierung. In: Proff, H.: Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und Technische Aspekte.

1. Aufl., Berlin u.a.: Springer Gabler Verlag.

## TIETZE, U.; GAMM, E.; SCHENK, C. (1999):

Halbleiter-Schaltungstechnik.

11. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

### TÖPFER, A. (2010):

Erfolgreich Forschen. Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden.

2. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## TRAUB, M. (2010):

Durchgängige Timing-Bewertung von Vernetzungsarchitekturen und Gateway-Systemen im Kraftfahrzeug.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

#### TSCHAMLER, H. (1996):

Wissenschaftstheorie: Eine Einführung für Pädagogen.

3. Aufl., Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt Verlag.

#### TUROWSKI, K.; POUSTTCHI, K. (2004):.

Mobile Economy - Transaktionen, Prozesse, Anwendungen und Dienste. In: Proceedings

LITERATURVERZEICHNIS XXXVIII

zum 4. Workshop Mobile Commerce, Universität Augsburg 2.-3. Februar 2004.

Bonn: Gesellschaft für Informatik, Köllen Druck+Verlag GmbH.

### ULRICH (1981):

Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Die Führung des Betriebes. FESTSCHRIFT für Curt Sandig.

Stuttgart: Poeschel Verlag.

# VAISHNAVI, V.; KUECHLER, B. (2004):

Design Research in Information Systems.

Online verfügbar unter http://desrist.org/desrist/content/design-science-research-in-information-systems.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2014.

## VDA (2000):

Kraftverkehrswirtschaft 2000. Tatsachen und Zahlen aus der Kraftverkehrswirtschaft. Frankfurt a. M.: VDA.

## VDA (2003):

HAWK 2015 – Herausforderungen automobile Wertschöpfungskette – Wissensbasierte Veränderung der automobilen Wertschöpfungskette.

Frankfurt a. M.: VDA.

#### VDA (2014):

Auto Jahresbericht 2014.

Online verfügbar unter: https://www.vda.de/de/services/Publikationen/Jahresbericht+2014.html, zuletzt überprüft am 31.10.2014.

## VDA (2015)

Auto Jahresbericht 2015

Online verfügbar unter: https://www.vda.de/de/services/Publikationen/jahresbericht-2015.html, zuletzt überprüft am 30.06.2015.

VOGEL, O.; ARNOLD, I.; CHUGHTAI, A.; IHLER, E.; KEHRER, T.; MEHLIG, U.; ZDUN, U. (2009): Software-Architektur. Grundlagen – Konzepte – Praxis.

2. Aufl., Berlin u.a.: Springer Verlag.

## VOGET, S. (2003):

Future Trends in Software Architectures for Automotive Systems. In: Valldorf, J; Gessner, W. (Hrsg.): Advanced Microsystems for Automotive Applications.

Berlin u.a.: Springer Verlag.

## VOLLMER, A. (2009):

Software von der Stange.

In: Automobil Elektronik 6. (2), 2009.

#### WALLENTOWITZ, H.; FREIALDENHOVEN, A.; OLSCHEWSKI, I. (2009):

Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen.

Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.

# WALLENTOWITZ., H.; REIF, K. (2010):

Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Grundlagen - Komponenten - Systeme – Anwendungen.

Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

LITERATURVERZEICHNIS XXXIX

# WARKENTIN, A.; GAUSEMEIER, J.; HERBST, J. (2009):

Function Orientation beyond Development – Use Cases in the Late Phases of the Product Life Cycle, Proceedings of the 19th CIRP Design Conference – Competitive Design, Cranfield University.

# WEICKER, K. (2015):

Evolutionäre Algorithmen

3. Überarbeitete und Erweiterte Auflage, Berlin u.a. Springer Verlag

#### WEINMANN, U. (2002):

Anforderungen und Chancen automobilgerechter Softwareentwicklung.

Stuttgart: 3. EUROFORUM-Fachkonferenz.

# WESTPHALEN, W. (2004):

Anwendung der stochastischen Optimierung im Stromhandel und Gastransport.

1. Aufl.

Cuvillier, Göttingen.

#### WILDEMANN, H. (2004):

Produktionssysteme - Leitfaden zur Standardisierung und Individualisierung des Produktprogramms durch intelligente Plattformstrategien.

München: TCW Verlag.

# WILDEMANN, H. (2005):

Wie Komplexitätsmanagement auch Qualitätskosten reduziert: Teure Vielfalt, Qualität und Zuverlässigkeit,

(QZ). Ausgabe 11/2005.

#### WILDEMANN, H. (2008):

Variantenmanagement. Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und - vermeidung in Produkt und Prozess.

München: TCW Verlag.

#### WILHELM, B. (2001):

Konzeption und Bewertung einer modularen Fahrzeugfamilie.

Aachen: RWTH.

## WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. (2012):

Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten, Systeme für aktive Sicherheit und Komfort.

2. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

#### WOLF, S. (2001):

Wissenschaftstheoretische und fachmethodische Grundlagen der Konstruktion von generischen Referenzmodellen betrieblicher Systeme, Aachen.

## ZENNER, C. (2006):

Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung.

Saarbrücken: Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM.

In Bley, H.; Weber, C. (Hrsg.): Universität des Saarlandes Schriftenreihe

Produktionstechnik, Band 37, Saarbrücken.

#### ZIEGENBALG, J.; ZIEGENBALG, O.; ZIEGENBALG, B. (2015):

Algorithmen von Hammurapi bis Gödel Mit Beispielen aus den Computeralgebrasystemen

LITERATURVERZEICHNIS XL

Mathematica und Maxima

4. Auflage, Berlin u.a. Springer Verlag

ZIEGENBEIN, D.; BRAUN, P.; FREUND, U.; BAUER, A.; ROMBERG, J.; SCHATZ, B. (2005): AutoMoDe - model-based development of automotive software, Design, Automation and Test. In: Europe, 2005. Proceedings, Vol. 3.

ZIMMERMANN, W.; SCHMIDGALL, R. (2006):

Busssysteme in der Fahrzeugtechnik – Protokolle und Standards.

1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.