

Ein Beitrag zur optimierten Konzeptauslegung von Fahrzeugen im Bereich der Elektromobilität

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ingo Busche

geb. am 24. Mai 1985 in Hildesheim

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Sándor Vajna

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Promotionskolloquium am 16. Dezember 2014

Ingo Busche

Ein Beitrag zur optimierten Konzeptauslegung von Fahrzeugen im Bereich der Elektromobilität

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Integrierte Produktentwicklung, Band 19

© Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Sándor Vajna
Postfach 4120
D-39016 Magdeburg

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdrucks, der Wiedergabe (Fotokopie etc.), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Printed in Germany

ISBN 978-3-941016-08-8

In Erinnerung an meine Großväter

Fritz Neumann & Heinz Busche

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist als Industriepromotion während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Konzeptauslegung bei der Volkswagen AG in Wolfsburg entstanden.

Mein besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Sándor Vajna für die wissenschaftliche Betreuung, das Interesse sowie die wertvollen Gespräche und Diskussionen rund um die Erstellung dieser Arbeit, jedoch auch für die Hilfestellungen bei der ganz persönlichen Weiterentwicklung in dieser Zeit.

In besonderer Weise möchte ich mich bei meinem Abteilungsleiter und Betreuer bei Volkswagen, Herrn Dipl.-Ing. Rainer Brüggemann-Heuter für die außerordentliche Unterstützung, die Diskussionen und die Möglichkeit zur Umsetzung der Ergebnisse in der innerbetrieblichen Praxis bedanken.

Für die Übernahme des Koreferats, die kritische Durchsicht der Arbeit und den fachlichen Austausch über die Inhalte der Dissertation möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack bedanken.

Mein Dank geht auch an die Doktoranden der Austauschrunde Elektromobilität sowie an die Kollegen und Führungskräfte der Konzeptentwicklung der Volkswagen AG, die den Entstehungsprozess dieser Arbeit inhaltlich kritisch und dennoch wohlwollend begleitet haben. Erwähnt sei mein Tischnachbar Daniel Preissner, für Gespräche und die nötige Ablenkung bei dem ein oder anderen „TROG“.

Da man sich aufgrund des Pensums während einer Dissertation gelegentlich etwas rarmachen muss, gilt ein großer Dank meinen Freunden für ihr Verständnis und ihre Unterstützung. Ein besonderer Dank geht dabei an Alexander Burghardt für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Kameraden der Feuerwehr Itzum bedanken, die unabhängig von der Entfernung, mir immer das Gefühl geben, ein Teil von ihnen zu sein und jeden meiner Höhenflüge schnellstmöglich auf den Boden der Tatsachen bringen.

Ein außerordentlicher und herzlicher Dank geht an meine Familie. An meinen Patenonkel Ulrich Neumann für seinen Rat und das große Interesse an meiner Entwicklung. Er hat einen wesentlichen Einfluss auf meine Ausbildung und damit auf diese Arbeit gehabt. Auch bei meiner Schwester Franziska möchte ich mich für ihre Unterstützung und ihre immer aufrichtigen Worte bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre uneingeschränkte Unterstützung und das Vertrauen, das sie mir schenken. Meinem Vater Rainer Busche danke ich im Kontext dieser Arbeit für seine konstruktive und interessierte Begleitung sowie der gründlichen Durchsicht aller meiner bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten. Schlussendlich gehört meine größte Dankbarkeit meiner Verlobten Annika. Diese bezieht sich zum einen auf inhaltliche sowie didaktische Anregungen beim Erstellen dieser Arbeit, viel mehr jedoch auf die stetige Motivation und dafür, dass sie mir in jeder Hinsicht den Rücken freigehalten hat. Ich freue mich auf die gemeinsame Zukunft mit dir...

Ingo Busche

Braunschweig, im Januar 2015

Ehrenerklärung

„Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.“

Braunschweig, 01. Juli 2014,

(Ingo Busche)

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur nach vorheriger Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Kurzreferat

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Industriepromotion der Automobilindustrie. Der Schwerpunkt liegt zum einen in der Produktstrategie in der Automobilindustrie, zum anderen in der Elektrifizierung des Antriebsstranges von Fahrzeugen. Daraus folgend werden Möglichkeiten für die Integration neuer Technologien, wie die Elektromobilität bei einem Volumenhersteller, außerhalb der Premiummodelle, dargestellt.

Es werden grundsätzliche Rahmendbedingungen der Automobilindustrie in Bezug auf das Marktumfeld, den Produktlebenszyklus und das Produktgefüge erläutert. Des Weiteren wird auf den Entwicklungsprozess und verschiedene Entwicklungsmethoden eingegangen. Für ein grundsätzliches Verständnis der konzeptionellen Auslegung von Fahrzeugen im Bereich der Elektromobilität werden wesentliche technische Zusammenhänge der Konzeptentwicklung aufgezeigt.

Vom Produktlebenszyklus ausgehend werden der Entwicklungsprozess und dort im Wesentlichen die Phase der Konzeptentwicklung betrachtet. Mit Hilfe der Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften wird ein Vorgehensmodell für die Konzeptentwicklung erarbeitet, welches eine Optimierung der Entwicklung innerhalb einer Baukastenstrategie ermöglicht.

Um eine Umsetzung im Bereich der alternativen Antriebe zu ermöglichen, wird ein technisches Modell aufgebaut. Dazu wird das Fahrzeug in wesentliche Segmente und Segmentgruppen aufgeteilt. Mit diesem Modell werden aus konzeptioneller Sicht die Batteriezelle energetisch und das Batteriemodul bauraumseitig optimiert. Die Anforderungen der verschiedenen Produkte eines Baukastens werden für die Verwendung einer Batteriezelle in den elektrifizierten Antriebsträngen in einer Synthese zusammengeführt. Aus dem technischen Modell werden weiter die wesentlichen Zieleigenschaften für die Konzeptentwicklung abgeleitet, die zu Beginn der Entwicklung bereitgestellt werden sollten.

Abstract

The present work analyses an industry-sponsored doctorate that examines the automotive sector. It focusses on the product strategy of the automotive industry and the electrification of vehicle drive trains. Possible measures for integrating new technologies are then examined, e.g. electric mobility from a high-volume manufacturer (premium models excepted).

The paper explains the basic market conditions facing the automotive industry, product life cycles and product interdependencies. The development process and its various methodologies are also examined. To ensure a sound understanding of the conceptual design of vehicles in the field of electric mobility, fundamental technical interdependencies in concept development are presented.

Taking product life cycles as a starting point, the paper looks at the development process and the key points of its concept phase. Product and process modelling based on product features and properties is then used to develop a procedural model for concept development that enables the optimisation of development as part of a modular strategy.

A technical model is constructed for enabling implementation with alternative drives. To this end, the vehicle is divided into its essential segments and segment groups. The paper uses this model to conceptually optimise both the energy efficiency of battery cells and the constructed size of the battery module. The requirements of a module's various products are combined in a synthesis for using battery cells in the electrified drive train. The core target properties for concept development to be supplied before development begins are then derived from the technical model.

Inhaltsverzeichnis

EHRENERKLÄRUNG	I
KURZREFERAT	II
ABSTRACT	III
INHALTSVERZEICHNIS.....	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	4
1.2 STRUKTUR DER ARBEIT	5
2 VORGEHENSMODELLE IM ENTWICKLUNGSPROZESS	7
2.1 BEGRIFFSKLÄRUNG	7
2.2 PRODUKTLEBENSZYKLUS.....	14
2.2.1 Betriebswirtschaftlich Produktlebenszyklus	15
2.2.2 Technischer Produktlebenszyklus	20
2.3 DAS PRODUKTGEFÜGE	24
2.4 DAS PRODUKT IM ENTWICKLUNGSPROZESS	27
2.4.1 Konstruktionsarten	28
2.4.2 Produktentwicklungsprozess	29
2.4.3 Produktentwicklungsmethoden und –verfahren	32
2.4.3.1 Axiomatic Design	33
2.4.3.2 Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften	34
2.4.3.3 Autogenetische Konstruktionstheorie	35
2.4.4 Werkzeuge und Hilfsmittel in der Produktentwicklung	37
3 GRUNDLEGENDE AUSLEGUNGSMAßNAHMEN VON ELEKTRIFIZIERTEN FAHRZEUGEN.....	40
3.1 AUSLEGUNG HINSICHTLICH DES MAßKONZEPTE UND DER BAUTEILINTEGRATION	40
3.1.1 Maßkonzept	41
3.1.2 Bauteilintegration	44
3.2 AUSLEGUNG HINSICHTLICH FAHRTECHNISCHER EIGENSCHAFTEN	47
3.2.1 Luftwiderstand	48
3.2.2 Rollwiderstand.....	49
3.2.3 Steigungswiderstand	50
3.2.4 Beschleunigungswiderstand.....	51
3.2.5 Gesamtfahrwiderstand	52

3.3	AUSLEGUNG AUS VERBRAUCHS- UND CO ₂ - REDUKTIONSGRÜNDEN	55
3.4	AUSLEGUNG HINSICHTLICH DER FAHRZEUGSICHERHEIT	57
3.4.1	<i>Gesetzgebung und Testverfahren</i>	58
3.4.2	<i>Zusammenspiel Fahrzeugsicherheit und Karosserie</i>	59
3.5	AUSLEGUNG AUS SICHT DES DESIGNS.....	61
3.6	AUSLEGUNG AUS ELEKTROTECHNISCHEN GESICHTSPUNKTEN.....	63
3.6.1	<i>Elektrischer Energiespeicher</i>	63
3.6.2	<i>Elektrische Verschaltung</i>	66
3.6.3	<i>Elektrischer Antrieb</i>	70
3.6.4	<i>Elektrisches Laden</i>	79
3.6.4.1	Elektrische Verfahren zum Laden	79
3.6.4.2	Art der Verbindung zwischen Fahrzeug und Energiespeicher/Stromnetz	80
3.6.4.3	Position der Ladeeinrichtung.....	81
4	ENTWICKLUNGSPROZESS FÜR AUTOMOBILE, INSBESONDERE FÜR ELEKTRIFIZIERTE ANTRIEBE	83
4.1	PRODUKTSTRATEGIE IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE	84
4.2	DER ENTWICKLUNGSPROZESS KOMPLEXER PRODUKTE IN GROßEN UNTERNEHMEN	88
4.2.1	<i>Entwicklungsphasen und Rahmenbedingungen</i>	89
4.2.2	<i>Bedeutung von Innovationen im Entwicklungsprozess</i>	90
4.2.3	<i>Bewertung von Ergebnissen in den Entwicklungsphasen</i>	91
4.2.4	<i>Entwicklungsteams im Produktentstehungsprozess</i>	92
4.3	KONZEPTENTWICKLUNG	95
4.3.1	<i>Konzeptentwicklungsphasen</i>	97
4.3.2	<i>Ende der Konzeptentwicklung</i>	99
4.4	VORGEHEN IN DER KONZEPTENTWICKLUNG.....	101
4.4.1	<i>Strukturierung eines Konzeptes bei einer Baukastenstrategie</i>	103
4.4.1.1	Architektur.....	106
4.4.1.2	Topologie	109
4.4.1.3	Package.....	110
4.4.2	<i>Anforderungen und Randbedingungen in der Konzeptentwicklung</i>	111
4.5	FAHRZEUGMODELLE IN DER KONZEPTENTWICKLUNG	114
4.5.1	<i>Bedeutung von technischen Modellen in der Entwicklung</i>	114
4.5.2	<i>Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung</i>	117
4.5.3	<i>Produktvarianz</i>	123
5	ABHÄNGIGKEITEN IN DER ELEKTRIFIZIERTEN FAHRZEUGAUSLEGUNG.....	128
5.1	VERNETZUNGSDIAGRAMME DER SEGMENTE FÜR ELEKTRIFIZIERTE FAHRZEUGE	128
5.1.1	<i>Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Antrieb und Energiespeicher</i>	130
5.1.1.1	Segmentgruppe Motor	130
5.1.1.2	Segmentgruppe Antriebssteuerung.....	134

5.1.1.3	Segmentgruppe Getriebe	135
5.1.1.4	Segmentgruppe Thermomanagement/ Kühlungssystem	135
5.1.1.5	Segmentgruppe Energiespeicher	137
5.1.1.6	Segmentgruppe Ladetechnologie	138
5.1.2	<i>Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Fahrwerk</i>	<i>139</i>
5.1.3	<i>Produktelemente und deren Vernetzung im Segment elektronische und mechatronische Systeme der Bodengruppe</i>	<i>140</i>
5.1.4	<i>Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Fahrzeugkarosserie</i>	<i>141</i>
5.1.5	<i>Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Maßkonzept und Ergonomie</i>	<i>142</i>
5.1.5.1	Bauräume des Fahrzeugkonzeptes	143
5.1.5.2	Ergonomie-Maße im Fahrzeugkonzept	144
5.2	EIGENSCHAFTSNETZWERK FÜR ELEKTRIFIZIERTE FAHRZEUGE	145
5.2.1	<i>Fahrzeugeigenschaften aus Sicht der Interessensgruppen</i>	<i>145</i>
5.2.1.1	Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf spezifische Entwickler und Wissenschaft	146
5.2.1.2	Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Kunde, Politik, Vertrieb und Dienstleister	147
5.2.1.3	Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Produktion, Service und Wettbewerb	148
5.2.1.4	Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Recycling, Entsorgung, Beschaffung und globalen Entwickler	148
5.2.2	<i>Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften auf Basis von Anforderungen und Randbedingungen</i>	<i>149</i>
6	ANWENDUNG UND UMSETZUNG DES EIGENSCHAFTSNETZWERKES	152
6.1	ANALYSE DER EIGENSCHAFTEN	152
6.2	BETRACHTUNG DER TRAKTIONSBATTERIE IM PRODUKTÜBERGREIFENDEN KONTEXT	157
6.2.1	<i>Synthese hinsichtlich einer Energiezelle für mehrere Produkte</i>	<i>161</i>
6.2.2	<i>Auswirkungen der technologischen Entwicklung</i>	<i>163</i>
6.2.3	<i>Ableitung einer optimalen Zellgeometrie</i>	<i>164</i>
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	166
7.1	ZUSAMMENFASSUNG	166
7.2	AUSBLICK	167
	LITERATURVERZEICHNIS	171
	GLOSSAR	188
	ANHANG	193
A	VORGEHENSMODELLE IM ENTWICKLUNGSPROZESS	193
A1	<i>Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren</i>	<i>193</i>
A2	<i>Beschreibung der Analyse und Synthese in der Produktentwicklung nach WEBER</i>	<i>193</i>
B	GRUNDLEGENDE AUSLEGUNGSMAßNAHMEN VON ELEKTRIFIZIERTEN FAHRZEUGEN	194

<i>B1 Definition der Maße des Maßkonzeptes für Fahrzeuge</i>	194
<i>B2 Aufbauarten von E-Maschinen</i>	198
C ENTWICKLUNGSPROZESS FÜR AUTOMOBILE, INSBESONDERE FÜR ELEKTRIFIZIERTE ANTRIEBE	199
<i>C1 Produktlebenszyklus Automobilindustrie</i>	199
<i>C2 Unterschiede zwischen Modul, Komponente und System</i>	200
<i>C3 Ansprüche an ein Produkt</i>	200
D ABHÄNGIGKEITEN IN DER ELEKTRIFIZIERTEN FAHRZEUGAUSLEGUNG	201
<i>D1 Segmente des Konzeptfahrzeugs</i>	201
<i>D2 Verwendete Produktelemente des Modell KEIBPro 11-14</i>	204
<i>D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie</i>	207
Betriebsstrategie elektrifizierter Antriebsstränge	208
Architektur eines Elektrofahrzeugs	208
Architektur eines Full- Hybriden	209
Architektur eines Plug-In Hybriden.....	210
Architektur eines Brennstoffzellenfahrzeuges	211
Differenzierung von Hybriden	211
<i>D4 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe E-Maschine</i>	214
<i>D5 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe Brennstoffzelle</i>	214
<i>D6 Segment 1 – Segmentgruppe Antriebssteuerung</i>	215
<i>D7 Segment 1 – Segmentgruppe Getriebe</i>	215
<i>D8 Segment 1 – Segmentgruppe Thermomanagement/ Kühlungssystem</i>	216
<i>D9 Segment 1 – Segmentgruppe Energiespeicher</i>	216
<i>D10 Segment 1 – Segmentgruppe Ladetechnologie</i>	217
<i>D11 Segment 2 – Fahrwerk</i>	217
<i>D12 Segment 3 – Elektronische und mechatronische Systeme für Sensorik und Kundenkomfort</i>	218
<i>D13 Segment 4 – Fahrzeugkarosserie</i>	218
<i>D14 Segment 5 – Maßkonzept und Ergonomie</i>	219
<i>D15 Deformationszonen im Fahrzeug</i>	219
<i>D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung</i>	220
<i>D17 Auswirkung des Maßkonzepts</i>	223
<i>D18 Fahrzeugeigenschaften die aus den Merkmalen der Produktelemente resultieren</i>	224
<i>D19 Kombiniertes Kraftstoffverbrauch aus Kundensicht</i>	225
E ANWENDUNG UND UMSETZUNG DES EIGENSCHAFTSNETZWERKES.....	226
<i>E1 Eigenschaften der Batteriezelle für eine prismatische Zelle</i>	226
<i>E2 Funktionen bezogen auf das Gehäuse des Hochvoltbatteriesystem und umliegende Merkmale</i>	227
<i>E3 Kosten der Traktionsbatterie je kWh mit und ohne Nachnutzung</i>	227
<i>E4 Technische Überschneidung der Fahrzeugkonzepte in Bezug auf die Traktionsbatterie</i>	228
<i>E5 Lösungsraum für elektrische Reichweiten in Abhängigkeit von Fahrzeugverbrauch und fahrzeugseitig mitgeführter Energie</i>	228

<i>E6 Lösungsraum unter Berücksichtigung der Spannungslage des AC-DC-Inverter und einer spezifischen Zelle</i>	<i>229</i>
<i>E7 Unterschiedliche elektrische Reichweiten durch Verschaltung der Traktionsbatterien</i>	<i>229</i>
<i>E8 Lösungsraum bei der Verschaltung von Batteriezellen in 10er Modulen.....</i>	<i>230</i>
<i>E9 Erhöhung der Spannung der LE.....</i>	<i>230</i>
<i>E10 Mehrkosten für 14 Ah- bis 16 Ah-Batteriezelle in 10er Batteriemodulen</i>	<i>231</i>
<i>E11 Technologieentwicklung der Prozessoren Leistung als mögliches Pendant für die Batterietechnologie</i>	<i>231</i>
<i>E12 Lösungsraum mit einer 40 Ah Batteriezelle</i>	<i>232</i>
<i>E13 Durchschnittliche Mehrkosten je Fahrzeug bzgl. der Zellkapazität für Fahrzeuge > 1.100 kg.....</i>	<i>232</i>
<i>E14 Mehrkosten nach Fahrzeugverbrauch für 4 Ah bis 20Ah, 40 Ah und 60 Ah Traktionsbatterien.....</i>	<i>233</i>
<i>E15 Herleitung der Abmaße für 10er Batteriemodule</i>	<i>233</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Marktpräsenz der Golf-Generationen bis zur Ablösung durch den Nachfolger	1
Abbildung 1-2 Modulare Baukastenstrategie von Volkswagen [VWK-2014]	3
Abbildung 2-1 Schichtmodell eines Produktes [MaE-2011].....	9
Abbildung 2-2 Bedürfnispyramide nach Maslow [MAH-1981]	9
Abbildung 2-3 Produktziele im magischen Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität nach [CIS-2006] ..	10
Abbildung 2-4 Betrachtungsweisen zu Innovationen.....	13
Abbildung 2-5 Nutzungsdauer von Produkten aus [BSW-2009]	14
Abbildung 2-6 Kostenfestlegung und Kostenverursachung nach Bronner/Holste aus [BSW-2009]....	15
Abbildung 2-7 Betriebswirtschaftlicher Produktlebenszyklus in Anlehnung an [PeM-2004] [OpR-2012].....	16
Abbildung 2-8 S-Kurve der Leistungsfähigkeit einer Technologie in Anlehnung an [BrK-1998] [PWV-1997] [SGK-2010]	18
Abbildung 2-9 Technologielebenszyklus-Modell nach ANSOFF aus [ScK-2011]	20
Abbildung 2-10 Produktlebenszyklen in Anlehnung an [EiS-2009] [ReB-2006] [VDI 2221] [WaG-2010] [VaS-2014].....	21
Abbildung 2-11 Zehnerregel der Fehlerkosten aus [HTB-2003]	22
Abbildung 2-12 Lebensphasen technischer Produkte aus [VWB-2009].....	22
Abbildung 2-13 Produktgefüge mit Klassen von Merkmalen und Eigenschaften sowie deren wesentliche Beziehung aus [VWB-2009]	25
Abbildung 2-14 Merkmalparameter nach WEBER [VWB-2009]	25
Abbildung 2-15 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Produktlebenszyklus in Anlehnung an [EiS-2009] [VaS-2014] [VWB-2009] [WeE-2006]	30
Abbildung 2-16 Allgemeiner Entwicklungsprozess aus [WeB-1999]	31
Abbildung 2-17 TOTE-Schema nach [MGP-1960]	32
Abbildung 2-18 Modell der Analyse und Synthese in der Produktentwicklung [WeW-2001].....	34
Abbildung 2-19 Lösungsraum in der Autogenetischen Entwicklungstheorie [KKV-2009]	36
Abbildung 3-1 Dreidimensionales Fahrzeugbezugssystem [DIN-4130].....	41
Abbildung 3-2 Maße Person im Fahrzeug und X-Ebene Fzg. nach [AsM-2007]	42
Abbildung 3-3 Maße Y-Ebene	43
Abbildung 3-4 Maße Z-Ebene.....	44
Abbildung 3-5 Maße zur Bestimmung der Geländegängigkeit (nach [DIN-70 020]).....	44
Abbildung 3-6 Einflussfaktoren auf das Bauteilintegration	45
Abbildung 3-7 Rollwiderstandsbeiwert für PKW-Reifen [MiW-2004].....	49
Abbildung 3-8 Massenfaktor in Abhängigkeit der Gesamtübersetzung [HEG-2011]	51
Abbildung 3-9 Rekuperation der Bremsenergie [GiS-2008].....	52
Abbildung 3-10 Gesamtfahrwiderstände über der Fzg.-Geschwindigkeit nach [WaH-2005]	53

Abbildung 3-11 Fahrzeugwiderstände nach Fahrsituation nach [BuI-2011]	54
Abbildung 3-12 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) [EUG-1970]	57
Abbildung 3-13 EuroNCAP Testverfahren [KrF-2009].....	59
Abbildung 3-14 Beispiel für Karosserieträgerstruktur (schematische Darstellung).....	60
Abbildung 3-15 Axiales Widerstandmoment beim Rechteck	61
Abbildung 3-16 Einbaulagen für den Energiespeicher in Anlehnung an [KrF-2009].....	61
Abbildung 3-17 Fahrzeugaufbauausprägung	62
Abbildung 3-18 Toyota Prius III [TPr-2012]	62
Abbildung 3-19 Energiequellen / elektrische Speichermedien [HaR-2001]	64
Abbildung 3-20 Gegenüberstellung von Akkumulatoren nach Leistungs- und Energiedichte [KoH-2012].....	64
Abbildung 3-21 Unterschiedliche Hochvolt-Batterietypen [BuIn-2013]	65
Abbildung 3-22 Differenzierung Supercaps und elektrochemischer Speicher [JaM-2010].....	66
Abbildung 3-23 Spannungslage und Kapazität bei Li-Ionen Zellen (nach [BaS-2011])	68
Abbildung 3-24 Spannungsverlauf Li-Ionen Zellen (nach [KrM-2011]).....	69
Abbildung 3-25 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Motoren (nach [NaD-2006])	71
Abbildung 3-26 Drehmoment- Drehzahl- Diagramm eines Elektromotors [WaF-2011].....	71
Abbildung 3-27 Leistungscharakteristika von Elektromotoren nach [WaF-2011]	73
Abbildung 3-28 Auswahl elektr. Maschinen mit Einsatzmöglichkeit im Automobil (nach [HoP-2010])	74
Abbildung 3-29 Prinzip einer Asynchronmaschine [StC-2012]	76
Abbildung 3-30 Prinzip einer permanentenerregten Synchronmaschine nach [ZeD-2012]	77
Abbildung 3-31 Preisentwicklung der seltenen Erden Neodym und Dysprosium [ZeD-2012].....	77
Abbildung 3-32 Prinzip einer fremderregten Synchronmaschine nach [ZeD-2012].....	78
Abbildung 3-33 Reluktanzmaschine [StC-2012]	78
Abbildung 3-34 Fahrzeugklassenunabhängige Ladedosen und Tankeinfüllstutzen Positionen.....	82
Abbildung 4-1 Entwicklungsphase im Produktlebenszyklus eines Kraftfahrzeuges	83
Abbildung 4-2 Produktstrategie in der Automobilindustrie (in Anlehnung an [BeK-2013] [BrS-2013] [EFR-2013] [GaS-2013] [LeH-2013])	84
Abbildung 4-3 Baukastensystem - Volkswagen Modularer-Quer-Baukasten	85
Abbildung 4-4 Produktgefüge in der Automobilindustrie.....	86
Abbildung 4-5 Sequenzen in der Entwicklung innerhalb der Produktentstehung.....	88
Abbildung 4-6 Inhaltliche Orientierung der Entwicklungsphase	89
Abbildung 4-7 Unterschied Kompromiss und Synthese	91
Abbildung 4-8 Barrieren und Problemtypen nach DÖRNER und FRICKE aus [BSF-2004]	93
Abbildung 4-9 Unterschied zwischen globalem und spezifischem Entwickler	94

Abbildung 4-10 Arten von Konzepten (aus [BiW-2011], [BrS-2013], [JoB-2011], [KEM-2004] und erweitert)	96
Abbildung 4-11 Die Black-Box der Produktkonzeptionierung	96
Abbildung 4-12 Arbeitsschritte der Lösungsgenerierung	99
Abbildung 4-13 Entwicklungsprozess eines Kraftfahrzeuges [BuIn-2013]	100
Abbildung 4-14 Aufgaben, Methoden und Tools im Produktentstehungsprozess des Automobils	101
Abbildung 4-15 Die Fahrzeugsystematik in Bezug auf die Konzeptphase	104
Abbildung 4-16 Differenzierung von Produktgruppen im Baukasten (bezogen auf Quermotorisierung)	105
Abbildung 4-17 Tragsysteme eines Skelettbaus [FDF-2002]	107
Abbildung 4-18 Architektur von Produktelementen im Fahrzeugkonzept.....	107
Abbildung 4-19 Stellschrauben für den Konzeptentwickler	108
Abbildung 4-20 System Engineering in Anlehnung an [BrS-2013].....	109
Abbildung 4-21 Schematischer Aufbau der Architektur eines Plug-In Hybriden mit wesentlichen Produktelementen für die Fahrzeug-Topologie.....	110
Abbildung 4-22 Package von Bauteilen im Fahrzeug	111
Abbildung 4-23 Interessensgruppen eines elektrifizierten Fahrzeuges in Anlehnung an [BuI-2013]	112
Abbildung 4-24 Zusammenhang von Produktmerkmalen und -Eigenschaften.....	113
Abbildung 4-25 Herausforderung der Integration der Kundenanforderungen [BuIn-2013]	113
Abbildung 4-26 Kenntnis und Herkunft der Produkteigenschaften im Entwicklungsprozess	115
Abbildung 4-27 Darstellung der Fahrzeugarchitektur durch Segmente	117
Abbildung 4-28 Betrachtung mehrerer Produkte als Baukastenarchitektur	118
Abbildung 4-29 Baugruppen der Segmentgruppe Energiespeicher	119
Abbildung 4-30 Aufbau eines Fahrzeugübersichtsmodells in der Konzeptentwicklung	120
Abbildung 4-31 Systematik von Baugruppe bis Bauteil in Anlehnung an [PBF-2007].....	121
Abbildung 4-32 Auf das Produkt bezogene Material- und Gemeinkosten	122
Abbildung 4-33 Erträge entsprechend der Fahrzeugeigenschaften	123
Abbildung 4-34 Unterschiedliche Tiefe des Vergleiches innerhalb eines Produktes.....	124
Abbildung 4-35 Ähnlichkeitsanalyse in Anlehnung an MEPORT ® [GfU-2013]	125
Abbildung 4-36 Aufbau einer Dreiecksmatrix in Anlehnung an MEPORT ® [GfU-2013]	126
Abbildung 5-1 Aufbau der Vernetzungsdiagramme in Abhängigkeit von Segment, Segmentgruppen, Produktelementen und Eigenschaften	128
Abbildung 5-2 Vernetzungsdiagramm der Baugruppe Verbrennungskraftmaschine	131
Abbildung 5-3 Klassifizierung von Fahrzeugeigenschaften bezogen auf die Interessensgruppen	146
Abbildung 5-4 Anforderungen in Bezug auf die Eigenschaft Geschwindigkeit	150
Abbildung 6-1 Black-Box Batteriezelle (bezogen auf Lithium-Ionen-Zellen)	155
Abbildung 6-2 Batteriekasten ohne Deckel mit Berührungsschutzfolie [BuI-2011] [BGJ-2012].....	156

Abbildung 6-3 Elektrischen Reichweite mit Rand- und Zwangsbedingungen [BuVa-2013]	159
Abbildung 6-4 Lösungsraum mit einer 25-Ah-Zelle.....	160
Abbildung 6-5 Lösungsraum mit einer 15 Ah-Zelle	162
Anhang 1 Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren aus [VDI 2221].....	193
Anhang 2 Gleichstrommotor [StC-2012]	198
Anhang 3 Asynchronmaschine nach [ZeD-2012]	198
Anhang 4 Produktlebenszyklus Automobilindustrie.....	199
Anhang 5 Die Entwicklungsphase im Produktlebenszyklus	199
Anhang 6 Segment 1 Antrieb und Energiespeicher	201
Anhang 7 Segment 2 Fahrwerk	202
Anhang 8 Segment 3 Elektronische und mechatronische Systeme primär der Bodengruppe.....	202
Anhang 9 Segment 4 Fahrzeug Karosserie mit elektronischen und mechatronischen Systemen	203
Anhang 10 Segment 5 Maßkonzept und Ergonomie.....	203
Anhang 11 Modell KEIBPro Abschnitt 1	204
Anhang 12 Modell KEIBPro Abschnitt 2	205
Anhang 13 Modell KEIBPro Abschnitt 3	206
Anhang 14 Modell KEIBPro Abschnitt 4	207
Anhang 15 Beispiele für Elemente eines Elektrofahrzeuges (BEV).....	209
Anhang 16 Beispiele für Elemente eines Full-Hybriden (HEV) mit zwei topologisch bedingten Antriebsaufbauten	210
Anhang 17 Beispiele für Elemente eines Plug-In-Hybriden (PHEV) mit zwei topologisch bedingten Antriebsaufbauten	210
Anhang 18 Beispiele für Elemente eines Brennstoffzellenfahrzeuges (F-Cell).....	211
Anhang 19 Topologische Antriebskonfiguration von Hybriden	213
Abbildung 20 Vernetzungsdiagramm der Baugruppe E-Maschine.....	214
Anhang 21 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Motor – Baugruppe Brennstoffzelle.....	214
Anhang 22 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Antriebssteuerung.....	215
Anhang 23 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Getriebe	215
Anhang 24 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Thermomanagement/ Kühlungssystem	216
Anhang 25 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Energiespeicher	216
Anhang 26 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Ladetechnologie	217
Anhang 27 Vernetzungsdiagramm des Segment Fahrwerk	217
Anhang 28 Vernetzungsdiagramm des Segment Elektronische und mechatronische Systeme	218
Anhang 29 Vernetzungsdiagramm des Segment Fahrzeugkarosserie mit elektronischen und mechatronischen Systemen	218
Anhang 30 Vernetzungsdiagramm des Segment Maßkonzept und Ergonomie	219
Anhang 31 Deformationsbereiche im Fahrzeug aus [BuI-2013].....	219

Anhang 32 Bauraum Kofferraum aus [BuI-2013].....	220
Anhang 33 Bauraum Tunnel aus [BuI-2013].....	220
Anhang 34 Bauraum Motorraum aus [BuI-2013].....	221
Anhang 35 Bauraum 1. Sitzreihe aus [BuI-2013].....	221
Anhang 36 Bauraum 2. Sitzreihe aus [BuI-2013].....	222
Anhang 37 Bauraum „Sandwich“- Boden aus [BuI-2013].....	222
Anhang 38 Veränderungen im Fahrzeugaufbau durch Anpassung der Orientierung der Sitze	223
Anhang 39 Übersicht der aus den Produktelementen und deren Merkmalen entstehenden Eigenschaften	224
Anhang 40 Kombiniertes Kraftstoffverbrauch aus Kundensicht aus [BuI-2013]	225
Anhang 41 Eigenschaften der prismatischen Traktionsbatterie	226
Anhang 42 Funktionsintegration HV- Batteriegehäuse mit umliegenden Komponenten [BuIn-2013]	227
Anhang 43 Kosten je kWh mit und ohne Nachnutzung in Anlehnung an [BuI-2013] [BuIn-2013]...	227
Anhang 44 Betrachtung der Traktionsbatterieart hinsichtlich der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte [BuVa-2013].....	228
Anhang 45 Lösungsraum für elektrische Reichweiten in Abhängigkeit von elektrischen Verbrauch	228
Anhang 46 Lücken im Lösungsraum nach Verschaltung in der Traktionsbatterie [BuVa-2013].....	229
Anhang 47 Herausforderung von Mindest- und gleichen Reichweiten bei Fahrzeugarten [BuVa-2013]	229
Anhang 48 Lösungsraum mit einer 25 Ah Batteriezelle in 10er Modulen.....	230
Anhang 49 Lösungsraum mit einer 25 Ah Batteriezelle bei 500 V max. Spannung des AC-DC- Inverters.....	230
Anhang 50 Mehrkosten je nach elektrischen Verbrauch für Fahrzeuge mit 10er HV- Batteriemodulen	231
Anhang 51 Entwicklung der Prozessorleistung hinsichtlich der Tendenz bei der Batterietechnologie in Anlehnung an [BuVa-2013]	231
Anhang 52 Lösungsraum mit einer 40 Ah Batteriezelle	232
Anhang 53 Durchschnittliche Mehrkosten je Fahrzeug bei 10er Batteriemodulen und einer Elektri- fizierung von Fahrzeugen mit 110 Wh/km bis 250 Wh/km Verbrauch	232
Anhang 54 Mehrkosten je nach elektrischen Verbrauch für Fahrzeuge mit 10er HV- Batteriemodulen in Bezug auf differenzierte Zellkapazitäten	233
Anhang 55 Abmaße bezogen auf heutige volumetrische Energiedichten von Lithium Ionen Zellen.	233

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Erläuterung der Phasen des normalverteilten Produktlebenszyklus in Anlehnung an [FiM-2001] [REM-2003] [PeM-2004] [MaE-2011].....	17
Tabelle 3-1 Straßensteigungen in Deutschland nach [WaH-2005]	50
Tabelle 3-2 Leistungsanforderungen von Nebenaggregaten [EsM-2009]	54
Tabelle 3-3 CO ₂ Ziele der Politik in Europa [StC-2012]	55
Tabelle 3-4 Aktuelle Abgasnormung der EU (nach [EUG-1970] und [StC-2012]).....	55
Tabelle 3-5 Übersicht der technischen Eigenschaften geeigneter Elektromotoren (nach [GrR-2001])	75
Tabelle 3-6 Ladeleistung Niederspannungsnetz.....	80
Tabelle 6-1 Vernetzte Eigenschaften zur Beschreibung des Produktes	153
Tabelle 6-2 Maße für Modulbauraum aus Polo, Golf und Passat	165
Anhang Tabelle B1 Definition der Maße des Maßkonzeptes aus [DIN-70 020] und [AsM-2007]	194
Anhang Tabelle C2 Unterschiede zwischen Komponente, Modul und System in betriebswirtschaftlicher und technischer Literatur.....	200

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
AC	alternating current (Wechselspannung)
ACC	Adaptive Cruise Control (Abstandsregeltempomat)
AG	Aktiengesellschaft
AKT	Autogenetische Konstruktionstheorie
ATO	Assemble-to-Order
ASR	Antriebsschlupfregelung
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
B2A	Business-to-Administration
BEV	Batterie- elektrisches- Fahrzeug
CAFE	Corporate Average Fuel Economy – Standards (Gesetzgebung in den USA)
CAx	Computer Aided x
CBU	Completely Built Up
CCS	Combined Charging System (Ladestecker nach IEC 62196)
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment
CHAdeMo	CHARge de Move (Handelsname eines elektrischen Ladesteckers)
C-K	concept- knowledge
CKD	Completely Knocked Down
CVT	Continuously Variable Transmission
DB	Deutsche Bahn
DC	direct current (Gleichspannung)
DIN	Deutsche Industrie Norm
DMU	Digital Mock-Up
dt.	deutsch bzw. in deutscher Sprache
EG	elektrischer Generator
elektr.	elektrisch
EM	E-Maschine bzw. elektrische Maschine
EPA	Environmental Protection Agency (US-Behörde)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETO	Engineer-to-Order
F-Cell	Brennstoffzelle / Brennstoffzellenfahrzeug
ff.	die folgenden
FTP	Federal Test Procedure (der EPA)
HEV	Full Hybrid
HV	Hochvolt

IDE	Integrated Design Engineering
IGBT	insulated gate bipolar transistor
i.H.v.	in Höhe von
IPE	Integrierten Produktentwicklung
Kombi	Kombinationskraftwagen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LCA	Life Cycle Assessment
LDT	light duty truck
LE	Leistungselektronik
Lkw	Lastkraftwagen
LLC	Limited Liability Company
MIDC	Modified Indian Driving Cycle
MOSFET	Metal- Oxide- Semiconductor Field-Effect Transistor
MLB	Modularer Längsbaukasten
MQB	Modularer Querbaukasten
MTO	Market-to-Order
MTS	Market-to-Stock
NEFZ	neuer europäischer Fahrzyklus
NV	Niedervolt
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEP	Produktentstehungsprozess
PHEV	Plug-In Hybrid
Pkw	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisch Mathematisches System zur Insassen Simulation
RSC	Roll Stability Control (soll den Fahrzeugüberschlag verhindern)
SAV	Sport Activity Vehicle
SchuKo	Schutz- Kontakt <i>Stecker</i> (Handelsüblicher Stecker nach CEE)
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektive katalytische Reduktion)
SOC	State of Charge
SOP	Start of Production
SUV	Sport Utility Vehicle
tbd.	to be defined (noch zu definieren)
USABC	United States Advanced Battery Consortium LLC
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VW	Volkswagen

1 Einleitung

Eine der wichtigsten Herausforderungen in der Automobilindustrie der Gegenwart ist die Entwicklung nachhaltiger Mobilitätskonzepte (vgl. [WiM-2013]). Dazu gehört neben neuen Energieformen und Werkstoffen sowie deren technische Integration in innovative Fahrzeugkonzepte auch die Betrachtung der Auswirkungen auf den gesamten Produktlebenszyklus mit den damit zusammenhängenden Konsequenzen für die Umwelt z.B. bei der Entsorgung. Darüber hinaus sind die Bedürfnisse und Erwartungen der Kunden, aber auch der Mitarbeiter und der Gesellschaft zu berücksichtigen, was mit der zunehmenden Globalisierung an Bedeutung gewinnt. Im Zentrum der Automobilentwicklung steht dabei (vgl. u.a. [WiM-2013], [SUR-2008], [WaF-2011]):

- eine schnelle zielgerichtete Entwicklung
- verbrauchs- und damit emissionsarmer Fahrzeuge,
- die mit regenerativer Energie betrieben werden können,
- dabei individuell auf die Bedürfnisse und Wünsche der Kunden abgestimmt sind und
- wirtschaftlich angeboten werden können.

Die aufgezeigten Entwicklungsziele stehen dabei in einem Zielkonflikt zueinander. Zur Umsetzung bedarf es daher neuer und angepasster Prozesse und Methoden in der Entwicklung.

Die Verweildauer der Produktgenerationen wird, wie in Abbildung 1-1 am Beispiel des Golfs von Volkswagen zu sehen ist, kontinuierlich kürzer. Das bedeutet, dass die Entwicklung der Nachfolgegenerationen zügiger umgesetzt werden muss, obwohl die technische Komplexität von Kraftfahrzeugen weiter zunimmt.

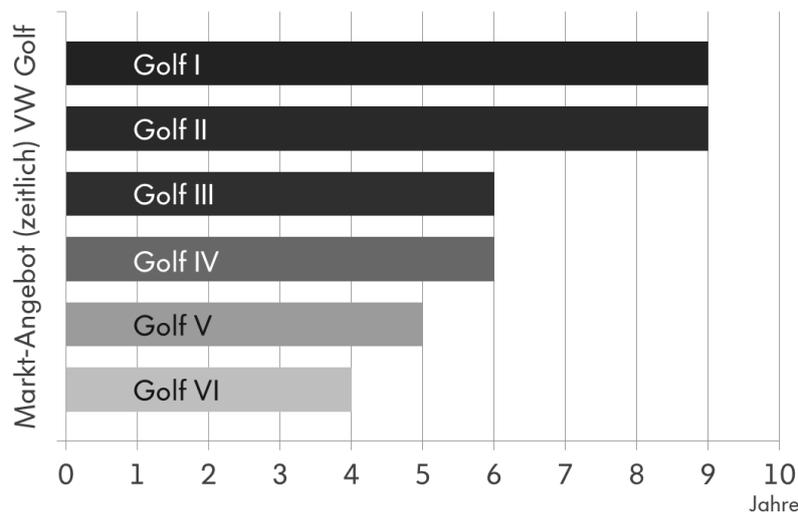


Abbildung 1-1 Marktpräsenz der Golf-Generationen bis zur Ablösung durch den Nachfolger

Eine Konsequenz ist, dass der Produktlebenszyklus bis zur Nutzung kompakter gestaltet werden muss. Ermöglicht wird dies durch den verstärkten Einsatz von Softwareengineering in der Entwicklung und einer daraus folgenden, auf Simulationen basierenden Produktgestaltung.

Mit den verkürzten Entwicklungszeiten steigt auch der Druck, Neuerungen in die Fahrzeuge einzubringen bzw. erst einmal mögliche Ideen zu generieren und diese im Produktkontext zu bewerten.

Neben fortschrittlicher Software muss das Produkt auch die nötige Hardware haben, um neue Technologien darstellen zu können. Dabei müssen weitere Trends wie die zunehmende Urbanisierung mit entsprechend geänderten Mobilitätsansprüchen Berücksichtigung finden (vgl. [HPS-2010]).

Ein Grund für die Emissionsreduktion und damit einhergehende geringere Verbräuche über die gesamte Fahrzeugflotte eines Automobilherstellers liegt in politisch initiierten Klimaschutzprogrammen. Aber auch eine höhere Nachfrage und damit steigende Rohölpreise oder ein Überschreiten des „Peak Oil“ werden diskutiert. Vor allem wird in Bezug zum anthropogenen Treibhauseffekt CO₂ als negatives Treibhausgas benannt. Aufgrund von Strafzahlungen oder möglicher Verkaufsverbote stellt eine hohe CO₂-Flottenemission für Automobilhersteller ein Risiko dar. Auch für Kunden kann der CO₂-Ausstoß von Fahrzeugen eine Restriktion darstellen, z.B. aufgrund von Fahrverboten in Innenstädten oder der Erhebung einer City-Maut für konventionell betriebene Fahrzeuge (vgl. [WaF-2011]).

In diesem Spannungsfeld liegt der Fokus dieser Arbeit auf neuen ins Fahrzeug zu integrierenden Energieformen. Expliziter handelt es sich um die Elektrifizierung des Antriebstrangs als ergänzende bzw. ersetzende Strategie im Gesamtfahrzeugkonzept. Dabei wird die Elektrifizierung des Antriebes kontrovers diskutiert. Die Technologie muss am Markt bestehen und durch Funktionalität, Wirtschaftlichkeit sowie Qualität überzeugen. Jedoch bietet die Elektromobilität die Chance, regenerativen Energien und auch neue Ansätze für individuelle Mobilität in zukünftigen Fahrzeugkonzepten umzusetzen.

Kernthematiken der Elektromobilität sind die elektrische Reichweite der Fahrzeuge und der Batteriepreis [WiM-2013]. Eine zusätzliche Herausforderung ist, diese innerhalb einer Baukastenstrategie zu verbessern. Das heißt, Kosten zu senken und die elektrische Reichweite elektrifizierter Fahrzeuge zu erhöhen.

Für die Automobilindustrie und insbesondere für Volumenhersteller sind die potentiellen Stückzahlen von elektrifizierten Fahrzeugen eine weitere Herausforderung. In Deutschland wurde das politische Ziel ausgegeben, Leitmarkt für Elektromobilität zu werden. Ein Bestandteil des Vorhabens ist es, dass im Jahr 2020 eine Million elektrifizierte Bestandsfahrzeuge auf deutschen Straßen fahren (vgl. [NPE-2011]). Dies würde für Volkswagen, bezogen auf die Absatzahlen in 2012 und 2013, einen Absatz von 214.000 elektrifizierten Fahrzeugen bedeuten. Bei Annahme einer Linearverteilung sind dies für 2014 bis 2020 per annum etwa 30.500 Fahrzeuge. Bei einer Produktionskapazität von 3.800 Fahrzeugen pro Tag im VW Werk Wolfsburg würde dies eine Auslastung von acht Tagen bedeuten (vgl. [BuI-2013]). In dieser Rechnung ist die Produktdiversifikation hinsichtlich der Fahrzeugklassen und der alternativen Antriebsarten noch nicht berücksichtigt. Bei Einbeziehung politischer Absatzziele weltweit (Nordamerika, Japan, China und einzelne Staaten in Europa) und unter Berücksichtigung der jeweiligen regionalen Marktanteile von Volkswagen, wäre das Werk Wolfsburg 81 Tage ausgelastet (vgl. [BuI-2013]). Dieses Beispiel macht die Herausforderung für einen Volumenhersteller deutlich, der den größten Teil des Absatzes unterhalb des Premium-Marktsegments generiert.

Mittelfristig ist für einen Automobilhersteller mit geringen Absatzmengen im Bereich der Elektromobilität zu rechnen. Gleichzeitig müssen hohe Investitionen in die Elektrifizierungstechnologie getätigt werden und es entfallen z.B. aufgrund der geringen Stückzahl Mengenrabatte beim Einkauf. Daher wird in dieser Arbeit ein Conversion-Design für elektrifizierte Fahrzeuge (vgl. [WaF-2011]) verfolgt, um eine hohe Bauteilübernahme aus konventionellen Fahrzeugen und die Nutzung bestehender Produktionslinien zu ermöglichen.

Dieses Vorgehen entspricht dem Ziel, dem Kunden individuelle Mobilität anzubieten. Dies hat Auswirkung auf die Produktstrategie eines Volumenherstellers und das weitere Ziel, kostengünstige Mobilität für den Kunden herzustellen. Beispielsweise setzt Volkswagen auf eine Baukastenstrategie (vgl. Abbildung 1-2), die weitere Herausforderungen an die Entwicklung in sich birgt. Jedoch bietet ein Baukasten das Potential hoher Stückzahlen und daraus resultierende Effekte auf die Gemeinkosten, auch im Bereich der Elektromobilität darstellen zu können.

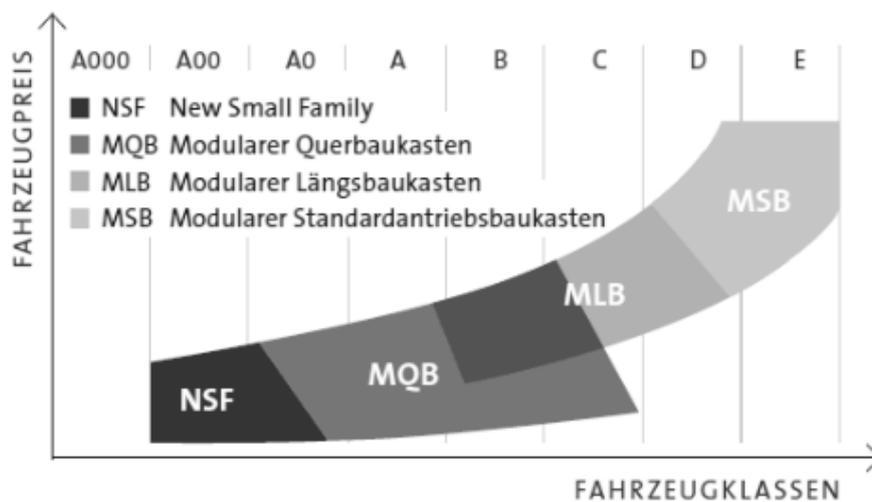


Abbildung 1-2 Modulare Baukastenstrategie von Volkswagen [VWK-2014]

Der Vorteil einer Baukastenstrategie liegt insbesondere in einem Mehrmarkenkonzern u.a. darin, Synergien zwischen den einzelnen Bereichen wie Entwicklung, Einkauf, Produktion, Finanz und Vertrieb zu generieren (vgl. [WiM-2014]). Die Ursache struktureller Kostenunterschiede liegt in Skalen-, Verbund- und Erfahrungseffekten. Skaleneffekte zu erzielen ist das primäre Ziel einer Baukastenstrategie [WiM-2013]. Diese entstehen, wenn die Stückkosten durch zunehmende Produktions- bzw. Absatzmenge sinken. Verbundeffekte sollen in einer Baukastenstrategie insbesondere im Bereich der Forschung und Entwicklung erlangt werden. So wird z.B. der MQB (vgl. Abbildung 1-2) von der Marke Volkswagen, der MLB (vgl. Abbildung 1-2) von der Marke Audi entwickelt. Erfahrungseffekte beruhen auf mit der Zeit gewonnenen Erfahrungen der Mitarbeiter in Bezug auf die verwendete Technologie bzw. auf der wiederholten Ausübung der Tätigkeit und beziehen sich demnach vor allem auf die Bereiche Forschung, Entwicklung und Produktion [HuW-2006]. Die Herausforderung eines Baukastens liegt in der hohen Anzahl an Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen, die in der Entwicklung hinsichtlich ihrer Zieleigenschaften parallel berücksichtigt werden müssen, wie auch die

damit einhergehenden verschiedenen Kundengruppen mit entsprechend differenzierten Anforderungen.

1.1 Motivation und Zielsetzung

HENRY FORD hat gesagt: „*Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist*“ (aus [HaI-2013]). Diese Aussage trifft auch heute noch zu und kann auf die Erweiterung der Antriebsarten durch die Elektromobilität übertragen werden. Das Risiko der Elektromobilität liegt im vergleichsweise geringen Marktpotential. Streng betriebswirtschaftlich betrachtet, würde diese Technologie nicht umgesetzt werden. Jedoch muss ein Hersteller von der Politik vorgegebene Emissionsziele erreichen. Das bedeutet, dass es entweder eine in Abhängigkeit der Verkaufszahlen kurzfristig gesteuerte Produktentwicklung geben wird oder von vornherein unterschiedliche Antriebsarten im Produkt vorgehalten werden. Für eine Baukastenstrategie ist die zweite Variante eine geeignete Möglichkeit. Dafür ist eine ganzheitliche Betrachtung der Produktpalette nötig, um das optimale Konzept für die CO₂-Reduktion zu finden. Beispielsweise hat ein Full-Hybrid in großer Stückzahl einen größeren CO₂-Hebel als ein Plug-In-Hybrid in kleiner Stückzahl. A priori ist eine Richtungsentscheidung in der frühen Entwicklungsphase, hinsichtlich eines bestimmten Fahrzeugkonzeptes oder auch nur in Bezug auf bestimmte, in verschiedenen Fahrzeugen wiederzuverwendende Bauteile wie z.B. die Batteriezelle nicht möglich.

Hinzu kommen technische Herausforderungen, z.B. die Energiedichte der neuen Speichermedien im Vergleich zu den bisher verwendeten Kraftstoffen und damit verbundene Auswirkungen auf die Fahrzeugbaukäufe. Durch die Einbindung dieser neuen Technologien erhöht sich die Komplexität über den gesamten Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs und damit auch in Bezug auf das Entwicklungsvorhaben. Ein Grund dafür ist, dass nicht auf erworbene Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann, was insbesondere in der an Alternativen reichen Konzeptentwicklung eine Herausforderung darstellt.

Auch SEIFFERT und RAINER (vgl. [SUR-2008]) stellen fest, dass die Eigenschaftsverfolgung in Bezug auf ein zielgerichtetes Entwickeln und objektiv begründbare Entscheidungen besondere Bedeutung in der Konzeptentwicklungsphase hat. Vor allem, weil in dieser Phase der Produktentstehung aus einer Vielzahl von Optionen richtige Entwicklungsentscheidungen getroffen werden müssen. WARTZACK (vgl. [WaS-2001]) stellt darüber hinaus fest, dass bei hohen Stückzahlen und Kosten des Produktes die Produkteigenschaften und Prozesse frühzeitig in Bezug auf das bestgeeignete Produktkonzept vorherzusehen sind. Nur so sind kostenintensive Fehlentwicklungen, die darüber hinaus Personal binden, zu vermeiden.

Die Kenntnis der Produkteigenschaften in der Konzeptentwicklung ist wesentlich für eine zielgerichtete Entwicklung. Ein Fahrzeugkonzept hat jedoch eine Vielzahl von möglichen Eigenschaften.

-
- Es ist daher zu klären, welches Vorgehen in der Konzeptentwicklung in Bezug auf die Baukastenstrategie eine zielgerichtete Entwicklung unterstützt und wie eine Strukturierung technisch komplexer Produkte bzw. eines Baukastens in einem technischen Modell umgesetzt werden kann.
 - Es ist weiter zu ermitteln, welche Eigenschaften für den Konzeptentwickler in der frühen Phase von besonderer Bedeutung sind und welche Zieleigenschaften (Anforderungen) zu Beginn des Entwicklungsprozesses definiert sein müssen, um eine zielgerichtete Entwicklung durchführen zu können.
 - In Bezug auf eine systematisierte Lösungsfindung und dem Ziel, innerhalb eines Baukastens Varianten zu minimieren sowie Kosten zu reduzieren, ist in Bezug auf die Elektromobilität die geometrische und energetische Ausprägung von Lithium-Ionen-Batteriezelle konzeptionell zu optimieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Lösung für die beschriebenen Herausforderungen der Konzeptentwicklung im Bereich der Elektromobilität und bei der Umsetzung einer Baukastenstrategie aufzuzeigen. Hierfür wird zunächst ein Vorgehen für eine zielgerichtete Entwicklung innerhalb einer Baukastenstrategie aufgezeigt. In einem weiteren Schritt werden die Fahrzeugeigenschaften im Bereich der Elektromobilität beschrieben und wesentliche Zieleigenschaften analysiert. Auf Basis der vorangegangenen Schritte und dem beschriebenen Vorgehen wird, in Bezug auf die Optimierung der (Energie-) Batteriezelle, für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte die erarbeitete Lösungsfindung überprüft.

1.2 Struktur der Arbeit

Aufbauend auf den in Kapitel 1 dargestellten Gegebenheiten und Herausforderungen für die Elektromobilität innerhalb einer Baukastenstrategie werden in Kapitel 2 elementare Einflussfaktoren auf die Fahrzeugentwicklung erläutert. Dabei wird sowohl auf den Produktlebenszyklus eines Kraftfahrzeuges in technischer und betriebswirtschaftlicher Form als auch auf den grundsätzlichen Produktaufbau eingegangen. Darüber hinaus werden Entwicklungsarten, der Entwicklungsprozess und -methoden sowie mögliche Hilfsmittel vorgestellt.

In Kapitel 3 werden wesentliche technische Zusammenhänge für die konzeptionelle Auslegung eines elektrifizierten Kraftfahrzeuges aufgezeigt. Neben Maßkonzept und physikalischen Eigenschaften der Fahrzeuglängsdynamik, die Verbrauchsermittlung und Aspekte der Fahrzeugsicherheit gehört dazu auch die Auswirkung des Designs. Außerdem wird die Auslegung elektrifizierter Bauteile des Antriebsstranges näher erläutert.

Basierend auf den in Kapitel 2 aufgezeigten Prozesse und Methoden werden in Kapitel 4 Randbedingungen der Konzeptentwicklung und ein Vorgehensmodell für eine zielgerichtete Entwicklung innerhalb einer Baukastenstrategie ausgeführt. Zusätzlich werden grundsätzliche Produktstrategien in der Automobilindustrie sowie der Bezug zur Kraftfahrzeugentwicklung aufgenommen und zu konzeptio-

nellen Auslegung von elektrifizierten Fahrzeugen angewendet. Dazu werden zunächst der Entwicklungsprozess von Kraftfahrzeugen und der Einfluss von Innovationen, die Arbeit von Entwicklern sowie die Bedeutung von Entscheidungen beleuchtet. Dann wird die Konzeptentwicklung eines Kraftfahrzeuges als Teil des Entwicklungsprozesses vorgestellt und das Vorgehen in der Konzeptentwicklung strukturiert.

In Kapitel 5 werden Vernetzungsdiagramme aufgebaut, die auf dem in Kapitel 4 aufgezeigten Vorgehen in der Konzeptentwicklung und der in Kapitel 3 dargelegten technischen Grundlage für elektrifizierte Fahrzeuge basieren. Aus den Vernetzungsdiagrammen wird dann ein Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge hergeleitet.

Aus dem Eigenschaftsnetzwerk werden in Kapitel 6 elementare Zieleigenschaften für die Konzeptentwicklung abgeleitet. Des Weiteren wird am Beispiel der Batteriezelle elektrifizierter Fahrzeuge die Optimierung eines Bauteils innerhalb einer Baukastensystematik durchgeführt und die Ergebnisse im Konzeptkontext diskutiert.

2 Vorgehensmodelle im Entwicklungsprozess

Das folgende Kapitel stellt die Produktentstehung insbesondere von technischen Produkten vor. Zunächst werden in einer Begriffsklärung das Produkt, die Produktziele sowie das Verständnis von Qualität und Innovation erläutert. Anschließend werden in den folgenden Abschnitten auf den Produktlebenszyklus, das Produktgefüge, mit Produkteigenschaften und Merkmalen, sowie der Entwicklungsprozess und die Konstruktionsmethoden dargestellt. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden Werkzeuge und Hilfsmittel der technischen Entwicklung aufgezeigt.

2.1 Begriffsklärung

Um ein Produkt zu erhalten, muss ein Transformationsprozess initiiert werden. Bei technischen Produkten wird eine Menge an materiellen und immateriellen Elementen als Input eingesetzt, um einen Output als Produkt zu generieren. Zum Input eines Produktes gehören sogenannte Produktionsfaktoren, die in drei Teile separiert werden. Es handelt sich um Arbeitskraft, Betriebsmittel und Werkstoffe. Die Transformation bei einem technischen Produkt ist die Produktion [DaW-2009]. Nach WAHRIG definiert sich ein Produkt daher als „*Ergebnis menschlicher Arbeit*“ [WWB-2011]. Das betriebswirtschaftliche Produkt wird volkswirtschaftlich als Gut umschrieben. Neben Sachgütern gibt es Dienstleistungen, die hier nicht weiter verfolgt werden. Dabei werden zwei Güter-Arten differenziert, zum einen Investitionsgüter (in der Literatur auch Kapitalgüter bzw. Produktions- oder Industriegüter i.S.v. Vorleistungen für ein Produkt vgl. [KAW-2011]) zum anderen Konsumgüter. Investitionsgüter werden nach ihrer Zweckbestimmung verwendet. Außerdem bilden diese den Realkapitalbestand von Betrieben (Maschinen, Anlagen und Gebäude). Konsumgüter stehen Haushalten in einer Volkswirtschaft zum unmittelbaren oder langfristigen Verbrauch zur Verfügung [HaUh-2007].

Produkte, die in großen Mengen für einen anonymen Kunden produziert werden, sind Konsumgüter. Produkte, die, individuell auf Kundenanforderung angepasst, bis zu einer minimalen Stückzahl von 1 produziert werden und zur Weiterverarbeitung vorgesehen sind, werden Industriegüter genannt. Nicht alle Güter lassen sich klar abgrenzen. Kraftfahrzeuge können aus physischer Sicht beiden Kategorien zugeordnet werden, da durch die in der Entwicklung berücksichtigte Variantenvielfalt individuelle Produkte für den einzelnen Kunden entstehen [VWB-2009].

Aus technischer Sicht können Produkte aus einer beliebigen Kombination von unterschiedlichen Artefakten¹ bestehen. Das Produkt muss mit einer vom Kunden gewünschten Leistungsfähigkeit und entsprechenden Eigenschaften auf den Markt gebracht werden, damit das Unternehmen gesellschaftlich akzeptiert wird und eine kontinuierliche hohe Rentabilität sowie finanzielle Stabilität erfährt. Produkte können dabei dinglich (physisch verfügbar) oder nicht-dinglich (immateriell) sein. Dingliche Artefakte können weiter in diskrete (stückweise z.B. Schrauben) und kontinuierliche (stetig z.B. fossile Brennstoffe) unterteilt werden [VaS-2014].

¹ Das Artefakt ist ein Gegenstand, der seine Form durch menschliche Einwirkung erhielt [Duden-2014].

Im Integrated Design Engineering (IDE) wird die Rolle des Menschen in Relation zum Produkt beschrieben. So gibt es Hersteller, Nutzer, Käufer und Betroffene eines Produkts. Bei Investitionsgütern ist der Kunde immer Käufer und Nutzer zugleich (Direktvertrieb), während bei einem Konsumprodukt der Käufer nicht immer der Nutzer ist (Händlervertrieb, insbesondere bei Konsumgütern). Beispielsweise ist jemand von der Akustik eines Fahrzeugs und damit vom Produkt betroffen. Ein Käufer will grundsätzlich möglichst wenig in das Produkt selbst und über den Lebenszyklus investieren. Der Nutzer erhofft dagegen einen Mehrwert und eine (Über-) Erfüllung seiner Erwartungen an das Produkt [VaS-2014].

Bei Kraftfahrzeugen handelt es sich um variantenreiche Produkte. Die Varianten ergeben sich über eine vorgehaltene Bandbreite an Ausstattungsmöglichkeiten und deren Kombinatorik für den Kunden.

Das physische Produkt wird in einem Bestellprozess je nach Vertriebsart initiiert und zur eigentlichen Produktion angestoßen. Eine Differenzierung zwischen der Vertriebsart bzw. den Produkten ist primär über den Verwendungszweck möglich [HaUh-2007] [BeB-2009]. Letztendlich steht hinter jedem Produkt ein potentieller Kunde. Auch in einer Organisation/ Unternehmen, also beim Industriegut, entscheiden Menschen mit Präferenzen über den Erwerb des Produktes [MaE-2011].

Im Sinn der Integrierten Produktentwicklung (IPE) bzw. deren Weiterentwicklung zum IDE entsteht das Produkt im Spannungsfeld von Organisation und Prozess, Methoden und Technologie. In diesem Spannungsfeld kann ein Produkt und sein Verhalten nach VAJNA (vgl. [VaS-2014]) über elf Attribute beschrieben werden:

1. Design,
2. Funktionalität,
3. Handhabbarkeit,
4. Produzierbarkeit (Hersteller) bzw. Verfügbarkeit (Kunde),
5. Instandhaltbarkeit,
6. Nachhaltigkeit,
7. Sicherheit,
8. Zuverlässigkeit,
9. Qualität,
10. Mehrwert und
11. Rentabilität.

Die Attribute 1. bis 6. beschreiben das Produkt auf Basis von Anforderungen des Kunden oder des Herstellers bei Konsumgütern und werden daher auch Produktattribute genannt. Die folgenden Attribute 7. bis 9. beschreiben den Erfüllungsgrad der Produktattribute gegenüber den Anforderungen z.B. durch die Beschaffenheit, Brauchbarkeit oder Wertigkeit der aktuellen Kombination. Die letzten beiden Attribute 10. und 11. stellen die Wirtschaftlichkeit des Produktes dar. In der IDE haben dabei alle Attribute den gleichen Stellenwert bei der Produktentwicklung [VaS-2014].

Das Produkt kann im betriebswirtschaftlichen Sinn z.B. durch ein Schichtenmodell (vgl. [MaE-2011], [WJP-2011]) aufgeschlüsselt werden (Abbildung 2-1).

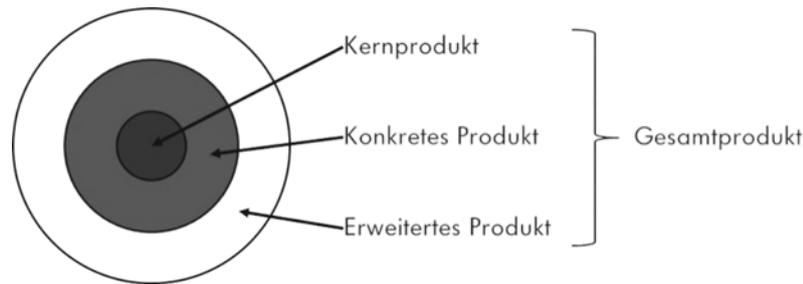


Abbildung 2-1 Schichtmodell eines Produktes [MaE-2011]

Der Kern eines Produktes sagt etwas darüber aus, was es leisten kann. Zum Beispiel bringt eine Textverarbeitung dem Nutzer eine Arbeitserleichterung, ein Kraftfahrzeug flexible Mobilität oder Prestige. Der Kern eines Produktes liegt im persönlichen Mehrwert, den der Kunden erfährt und woraus dieser seinen primären Nutzen zieht [MaE-2011]. Der konkrete Teil umfasst die Leistung des Produktes. Die Attribute, die diesen Teil des Produktes beschreiben, können aus harten quantitativen und weichen Faktoren bestehen. Dazu gehören z.B.

- die Funktionalität, wie das Produkt seine Aufgabe übernimmt,
- die Eigenschaften des Produktes, wie z.B. verschiedene Facetten der Qualität,
- das Design und dessen Anmutung für den Kunden bzw. Dritte sowie
- das Zubehör, das für den Betrieb des Produktes notwendig ist.

Zum erweiterten Produkt gehören die Garantie und Serviceleistungen wie Finanzierung, Kundenservice oder Schulungen [MaE-2011].

Im Zusammenhang mit den Anforderungen des Kunden an das Produkt sind dessen elementaren Bedürfnisse, z.B. in der Bedürfnispyramide nach MASLOW (Abbildung 2-2) dargestellt.

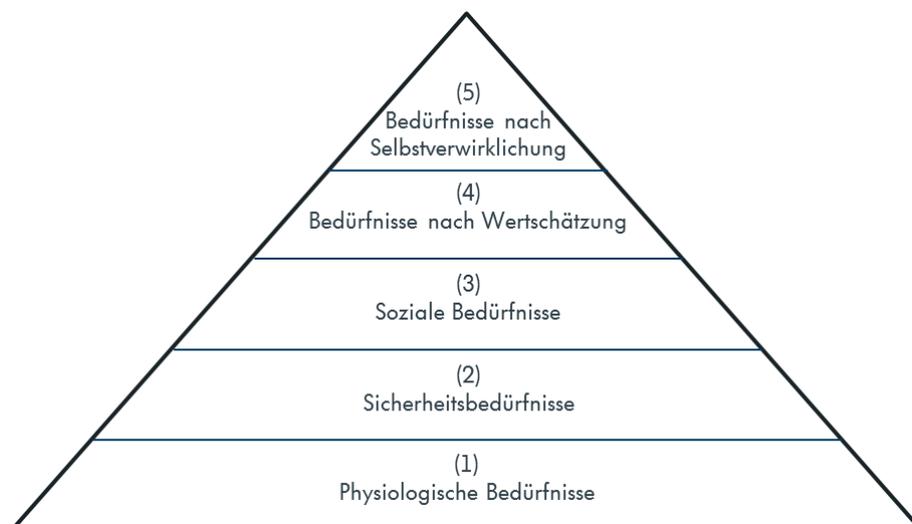


Abbildung 2-2 Bedürfnispyramide nach Maslow [MAH-1981]

DIEZ überführte diese Bedürfnisse in den Bereich der Automobilwirtschaft und sieht darin die Motivstruktur beim Autokauf [DiW-2006]. Die primären Eigenschaften in den drei genannten Bereichen des

Schichtenmodells werden von jedem Kunden individuell bestimmt. Insbesondere bei Konsumprodukten wird versucht, die Anforderungen des Kunden zu bündeln. Entsprechend der Produktgruppe lassen sich Produkteigenschaften für eine jeweilige Kundenfraktion z.B. mit Hilfe von Sinus Milieus² ableiten [JSW-2011] [KAW-2011]. Die Optimierung eines Produktes orientiert sich dabei am magischen Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität (Abbildung 2-3) [CIS-2006]. Es ist abgeleitet aus dem QTK-Kreis (Qualität- Termin- Kosten- Kreis) von GEIGER und KOTTE [GeK-2008].

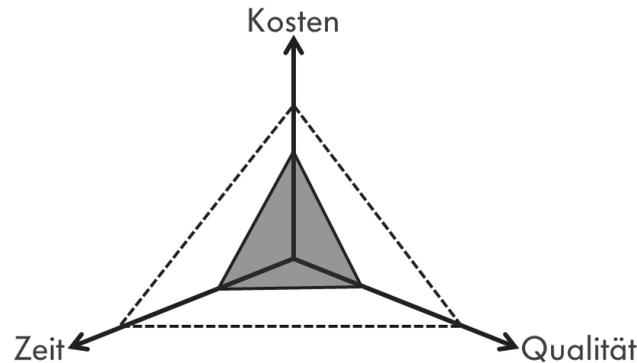


Abbildung 2-3 Produktziele im magischen Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität nach [CIS-2006]

Das magische Dreieck beinhaltet die Produktziele und zeigt deren Abhängigkeit voneinander auf. Eine hohe Qualität erfordert auch einen höheren Einsatz von Zeit und Geld. Das Qualitätsniveau und die Kosten/Gewinn-Situation orientiert sich ferner an der zukünftigen Käuferschicht, während sich die Zeitkomponente primär nach unternehmerischen Ansprüchen richtet [MaE-2011]. Der Preis eines Produktes hat maßgeblichen Einfluss auf dessen Diffusionsverlauf. Der Preis ist auch die Gegenleistung des Käufers für den Erwerb eines Produktes mit bestimmter Qualität, die sich wiederum aus dem Nutzen für den Käufer ableiten lässt [HKN-2009]. Nach VAJNA ist das magische Dreieck (Abbildung 2-3) um die Leistungsfähigkeit des Produktes zu erweitern. Diese setzt sich aus einer Mindest Erfüllung an Sicherheit und Zuverlässigkeit zusammen und ergibt sich darüber hinaus im Zusammenwirken mit der Qualität über die Nutzungszeit [VaS-2014].

Qualität ist in der DIN EN ISO 9000:2005 als erfüllender Grad einer Gesamtheit aus inhärenten (ständigen) Merkmalen³ und Anforderungen bezogen auf ein Produkt oder eine Dienstleistung beschrieben. Die hier benannten Anforderungen sind Erfordernisse oder Erwartungen die festgelegt, vorausgesetzt oder verpflichtend sind. Dabei können die Anforderungen von unterschiedlichen an dem Produkt interessierten Parteien aufgestellt werden [DIN 9000].

Nach GEIGER und KOTTE gibt es demnach auch nur eine Art von Qualität, die sich auf alle Arten von Einheiten bezieht [GeK-2008]. In der Literatur (z.B. [GeH-2008] [HeL-2005] [SchM-2001]) wird die

² Sinus-Milieus vereinen demografische Eigenschaften wie Bildung, Beruf oder Einkommen mit einem bestimmten Weltbild bzw. einer Lebensauffassung und gliedern die Gesellschaft in gleichgesinnte Obergruppen auf (z.B. Konservativ-etabliertes- oder Hedonistisches Milieu) [Sinus-2013].

³ Ein Merkmal wird hier nach der DIN EN ISO 9000:2005 als kennzeichnende Eigenschaft definiert, welches qualitativer oder quantitativer Natur sein kann. Diese Beschreibung weicht von der in dieser Arbeit verwendeten Bedeutung des Merkmales eines Produktes ab, da auch Eigenschaften eines Produktes aus der Norm heraus als Merkmal verstanden werden können.

Qualität im Qualitätsmanagement nach den verschiedenen Bereichen im Unternehmen differenziert. Es werden danach drei Qualitätsbegriffe bzw. Sichtweisen benannt:

1. Produktqualität & Servicequalität
2. Prozessqualität
3. Systemqualität.

Die Produkt- und die Servicequalität beziehen sich direkt auf Produkte und Dienstleistungen und wirken unmittelbar auf die Kundenzufriedenheit (produktorientierte Sicht). Die Prozessqualität ist in Verbindung mit den Arbeitsabläufen im Unternehmen zu sehen. Nur eine gute Prozessqualität kann auch eine gute Produkt- und Servicequalität zur Folge haben (prozessorientierte Sicht). Die Systemqualität bezieht sich auf das gesamte Unternehmen und bündelt die drei schon genannten Qualitätsbegriffe (ganzheitliche Sicht) [GeH-2008] [HeL-2005].

Die Produktqualität ist im Kontext verschiedener Attribute des Produkts, u.a. Design, Funktionalität, Handhabbarkeit, Produzierbarkeit und Nachhaltigkeit zu sehen. Die Qualität ist in einer Gruppe mit Sicherheit und Zuverlässigkeit zu sehen, da diese Produktattribute die Erfüllung von Anforderungen an das Produkt nach Art, Grad und Güte aufzeigen. Die Qualität eines Produktes beschreibt dabei die aktuelle Güte, im Sinne von Beschaffenheit und Brauchbarkeit eines Produktes [VaS-2014]. Die Produktqualität kann über den Nutzungszeitraum abnehmen (Verschleiß). Die Attribute eines Produktes liegen in der subjektiven Wahrnehmung des Nutzers.

Im Bereich des Kraftfahrzeugmarktes entscheidet über den Erfolg des Produktes neben dem Preis, Zeit und der Qualität auch die Innovationen in dem Produkt [BrS-2013]. So verzeichnet die Automobilindustrie in den letzten Jahren eine Erhöhung von Anzahl und Geschwindigkeit der Innovationen [VWB-2009]. Diese Sichtweise aus dem Blickwinkel der Kundenorientierung ist ebenfalls abhängig vom Kaufgrund, z.B. einer Ersatzbeschaffung oder einer Neuanschaffung.

Der Begriff Innovation stammt aus dem Lateinischen und ist mit „Neuerung“ zu übersetzen sowie nach SCHUMPETER (aus [KeM-2003]) eine neuartige Kombination von Produktionsfaktoren, deren Umsetzung im Produktionsprozess und die wirtschaftliche Durchsetzung des neuen Produktes im Markt. Innovationen können für ein Unternehmen Wettbewerbsvorteile erbringen und zum Markterfolg beitragen [MaO-2009]. Dabei muss zwischen Innovation und Invention (lat. Erfindung) unterschieden werden. Eine Erfindung wird erst mit Erreichen der Marktreife, der Akzeptanz des Kunden oder Nutzers zur Innovation [HKN-2009]. Im Gegensatz zur Qualität ist die Innovation, basierend auf Kreativität, nicht in einem strikten Prozess zu erzielen, kann aber, insbesondere durch methodische Hilfsmittel, unterstützt werden [VWB-2009]. Die technische Invention zur Marktreife zu bringen ist eine Entscheidung unter Unsicherheit, da es weder eine Erfolgsgarantie noch zum möglichen Entscheidungszeitpunkt eine fertige Lösung gibt [GrA-2000]. Die mögliche Ausprägung als Innovation kann erst im Nachhinein, wenn das Produkt erfolgreich ist, festgestellt werden.

Die Innovation als solche wird von UTTERBACK [UJM-1994] in drei verschiedene Kategorien unterteilt:

1. Produktinnovation
2. Prozessinnovation
3. Organisationsinnovation

Die Produktinnovation ist eine offensichtliche Verbesserung des Produktes, während die Prozessinnovation eine Veränderung der Produktionsfaktoren in der Herstellung eines Produktes ist. Die Organisationsinnovation betrifft alle weiteren Veränderungen rund um die Beschaffung, den Vertrieb oder anderweitiger Faktoren, die ein Produkt betreffen [UJM-1994].

Die Problematik der Innovation liegt darin, dass ein Teil der Zielgruppe die Erneuerung schon kennt und nur eine Leistungsverbesserung des Produktes wahrnimmt. Was letztendlich eine Innovation in einem Produkt ist, so lange es sich nicht um eine erstmalige Markteinführung oder die grundneue Erweiterung bestehender Produktlinien handelt, hängt von der subjektiven Wahrnehmung des Kunden ab. Eine Innovation muss sich merklich, also für den Kunden erkennbar, vom vorangegangenen Zustand abheben [HKN-2009] [HJL-2012] [HaS-2010]. Obendrein muss eine Innovation auch zur Qualität eines Produktes beitragen. In diesem Zusammenhang ist auch der Weg in den Markt zu betrachten. Hierfür gibt es nach der Push-Pull-Theorie nach ZMUD zwei Möglichkeiten, wie die Innovation den Markt erreicht [ZRW-1984]. Nach der Push-Strategie muss das Unternehmen eine Innovation in den Markt bringen bzw. dafür erst einen geeigneten Markt schaffen. Auslöser für diese Art des Markteintritts sind primär neue Technologien. Bei der Pull-Strategie stößt der Kunde bzw. Nutzer die Innovation an. Bei dieser Strategie geht das Unternehmen davon aus, bestehende Bedürfnisse im Markt zu befriedigen (marktinduzierte Neuerung) [MaW-2010] [BuV-2005]. Dabei unterliegt die Innovation einer temporalen Komponente. Eine Innovation verliert mit der Zeit, bei entsprechend hoher Marktdurchdringung, die Auszeichnung des Neuen, eine Innovation wird somit durch Bekanntheit zur Information [HJL-2012]. Außerdem nimmt bei Industrieprodukten die Verweildauer (Lebenszeit) im Markt ab. Gleichzeitig ist das immer schnellere Einbringen von Innovationen und damit verbundene kürzere Entwicklungszeiten zu beobachten [AnHe-1987].

Der Erfolg einer Innovation unterliegt aus evolutionsökonomischer Sicht dem Einfluss von inhomogenen Prozessen auf das Produkt. Die in der Literatur primär genannten sind technisch-ökonomische, ökologische, soziale und politische Prozesse [AWB-1994].

In dieser gesamtwirtschaftlichen Sicht der Innovation hat KONDRATIEFF eine Theorie der langen Wellen aufgestellt (Kondratieff-Zyklen), die langfristige Konjunkturzyklen auf Basis von ausschlaggebenden Innovationen zugrunde legt [KoN-2010]. Der erste Kondratieff-Zyklus kennzeichnet zum Beispiel den Übergang von der Agrar- in die Industriegesellschaft durch die Erfindung der Dampfmaschine und die dadurch folgenden Produktivitätsfortschritte [BuS-2006]. Auf den Kondratieff-Zyklen aufsetzend hat MENSCH eine weitere übergreifende Unterteilung in drei verschiedene Innovationstypen vorgenommen [MeG-1982]:

1. Basisinnovation
2. Verbesserungsinnovation
3. Scheininnovation

Eine Basisinnovation ist demnach eine allumfassende Neuentwicklung mit grundlegenden Änderungen in verschiedensten Bereichen. Sie ist Auslöser eines Kondratieff-Zyklus, der mehrere Jahrzehnte anhält (50-70 Jahre). FREEMAN (vgl. [FrC-1986]) nennt dazu fünf Merkmale zum Erkennen einer Basisinnovation [GWD-2001]:

1. Dramatische Kostensenkung für den Nutzer durch die Innovation
2. Dramatische Verbesserung der technischen Attribute von Produkten und Diensten
3. Akzeptanz in der Gesellschaft (sozial und politisch)
4. Akzeptanz aus umweltpolitischen Gesichtspunkten
5. Durchdringung des gesamtwirtschaftlichen Systems

Verbesserungsinnovationen sind die Folge von Basisinnovation, die dabei weiterentwickelt werden. Außerdem fehlt der Verbesserungsinnovation die radikale Neuerung, vielmehr stellt sie eine Optimierung des bestehenden Produktes oder Verfahrens dar [MaW-2010]. Wenn bestehende Produkte nur noch geringfügig geändert werden, Unternehmen geringer werdende Grenzerträge bei einem Produkt ausmachen, können diese eine technische Weiterentwicklung vortäuschen, die als Scheininnovation bezeichnet wird [MeG-1982]. Um die drei Innovationstypen zu differenzieren kann auch der Neuheitsgrad der jeweiligen Innovation zugrunde gelegt werden [BoS-2001].

Eine Verbindung der genannten Betrachtungsweisen zu Innovationen zeigt Abbildung 2-4.

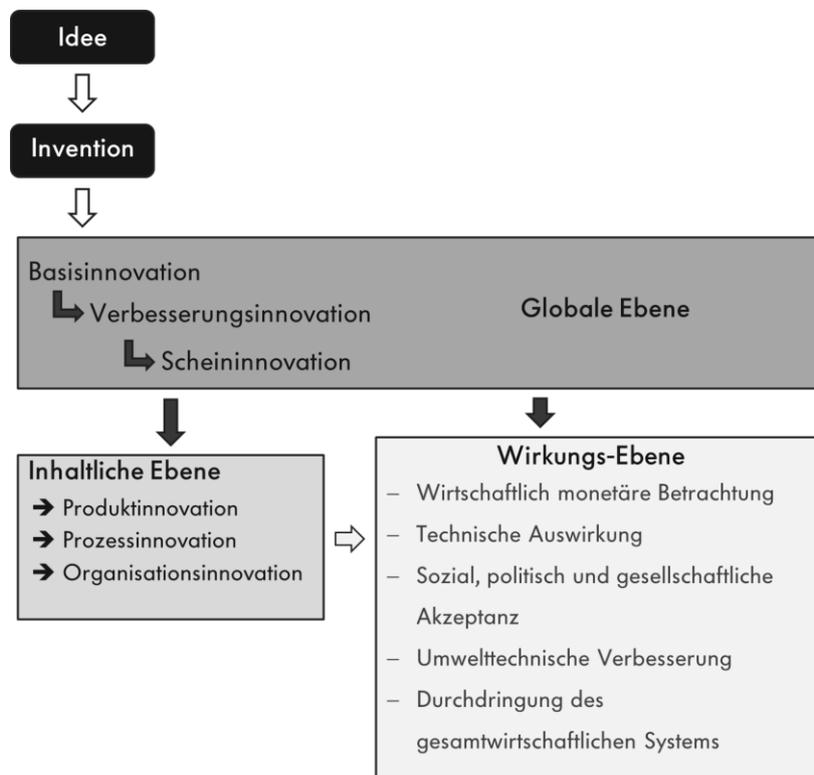


Abbildung 2-4 Betrachtungsweisen zu Innovationen

2.2 Produktlebenszyklus

Jedes (technische) Produkt hat einen Produktlebenszyklus. Zu Beginn eines Produktlebenszyklus steht zumeist ein Kundenwunsch, eine Marktlücke oder ein innovatives Bedürfnis [BeV-1994]. Die Verweildauer am Markt bzw. die Zeit, die das Produkt bis zur Marktreife braucht, ist für einige ausgewählte Produkte in Abbildung 2-5 dargestellt.

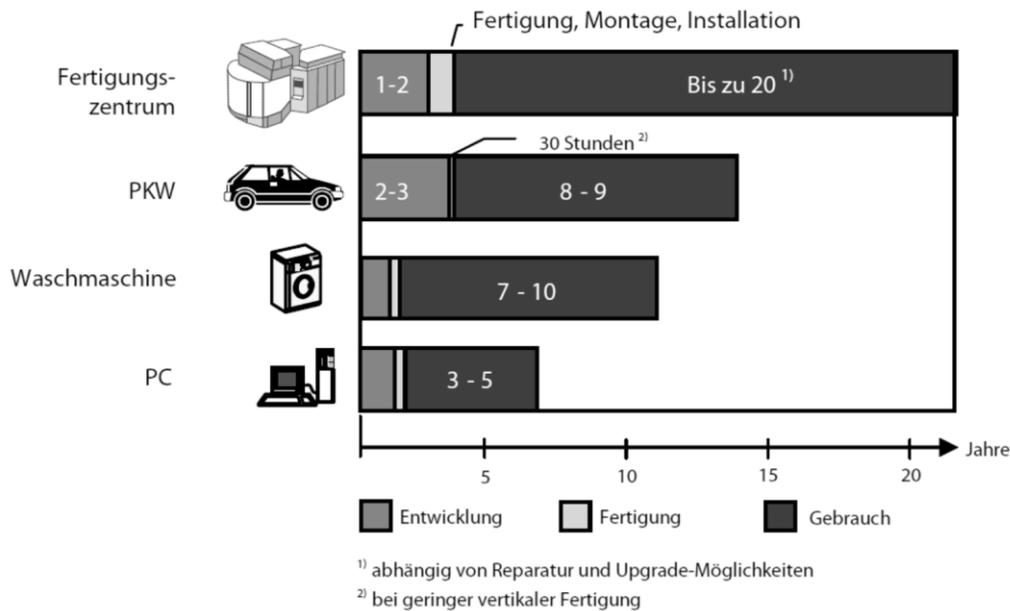


Abbildung 2-5 Nutzungsdauer von Produkten aus [BSW-2009]

Die Verhältnisse der Zeiträume für Entwicklung, Fertigung und Gebrauch verdeutlichen die Herausforderungen einer in die Zukunft gerichteten Entwicklung. Ein Entwickler hat in der ersten Phase des Produktentstehens den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu betrachten und damit mannigfaltige Aufgaben zu lösen. Es müssen die relevanten Produkteigenschaften in das Produkt eingebracht und durch digitale Absicherungsmethoden geprüft und im späteren Entwicklungsverlauf durch physische Tests abgesichert werden [VWB-2009]. Um immer kürzer werdenden Entwicklungsphasen zu ermöglichen, sind die hier genannten Einflüsse auf das Gesamtprodukt technisch zu definieren und in den Aufbau von dreidimensionalen Produktmodellen umzusetzen. Es bedarf dazu Konstruktionsmethoden zur Produktentwicklung, um die Fülle von Einflüssen sinnvoll umzusetzen. Dass ein hoher Aufwand in der frühen Lebensphase des Produktes gerechtfertigt ist, zeigt Abbildung 2-6. Es werden in der Produktplanungs-/ Entwicklungsphase 70% - 80% der zukünftigen Kosten des Produktes determiniert, im selben Zeitraum werden jedoch nur 10% der Produktkosten verursacht. Dies zeigt, dass die Produktentwicklung zusammen mit der Produktplanung einen entscheidenden richtungsgebenden Standpunkt für das Produkt einnimmt [EvW-1998] [BSW-2009].

Lebenszykluskonzepte werden dabei auf unterschiedlichste technische und biologische Systeme oder Produkte gespiegelt [HCh-2010]. Im Weiteren wird der modellhafte Lebenszyklus eines Produktes aus technischer und betriebswirtschaftlicher Sicht interpretiert.

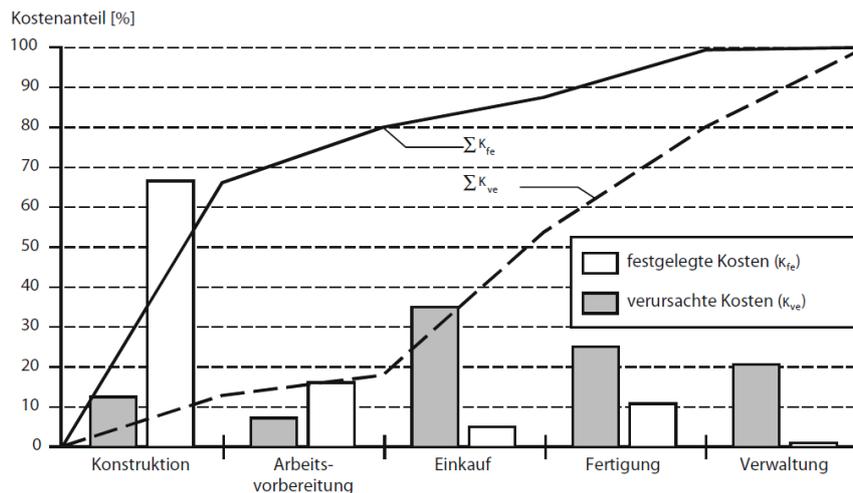


Abbildung 2-6 Kostenfestlegung und Kostenverursachung nach Bronner/Holste aus [BSW-2009]

2.2.1 Betriebswirtschaftlich Produktlebenszyklus

Für den betriebswirtschaftlichen Produktlebenszyklus gibt es in der Literatur keine einheitliche Definition. Je nach Sichtweise wird der Lebenszyklus in vier bis sechs Phasen unterteilt. Die Idee des Produktlebenszyklus geht auf PATTON zurück, der in seinem vierphasigen Modell ein Planungsinstrument im Management sah [PaA-1959]. Erst später ging das Konzept in die Marketinglehre ein, in dem versucht wurde, die Markteinführung und den Marktverlauf mit Hilfe des idealtypischen Modells zu steuern [CWE-1967]. Der Verlauf des Produktlebenszyklus wird idealisiert als Normalverteilung (Glockenkurve) über der Zeit angenommen und gibt eine zeitliche Verteilung der Absatzzahlen an. Dies gilt primär für Konsumgüter wie auch für Industriegüter⁴, die in einer größeren Stückzahl produziert werden ($n \neq 1$). Die weiter vorne genannten Güterarten werden im Rahmen dieser Ausarbeitung betrachtet.

In anderen Betrachtungsweisen des Produktlebenszyklus wird die Entwicklung von Umsatz, Gewinn und Deckungsbeitrag für das jeweilige Produkt über der Zeit aufgezeigt. Dabei steht nicht das einzelne Produkt, sondern die erwartete Summe der verkauften Einheiten im Fokus. Der reale Verlauf des Absatzes eines Produktes bzw. dessen Diffusion im Markt kann spürbar von dem hier angenommenen theoretischen Modell abweichen. In diesem Abschnitt wird die typische Normalverteilung des Produktlebenszyklus betrachtet (Abbildung 2-7) [HoU-1992] [MaE-2011]. Andere Formen, wie der Verlauf eines Flops, eines Shooting-Stars oder eines erfolgreichen Relaunch bzw. weiterer Verlaufsformen (z.B. nach [ECJ-1988]), werden nicht weiter berücksichtigt. Die Annahme eines vereinfachten bzw. idealisierten Produktverlaufes im Markt ermöglicht es dem Unternehmen, eine marktgerechte Steuerung des Produktes (Marketing) sowie eine Kapazitätsplanung für das Personal-, Bestell- und Rechnungswesen aufzulegen [VWB-2009].

⁴ Bei Industriegütern besteht die schon genannte Möglichkeit der Vermischung zwischen Industrie- und Konsumgut (Abschnitt 2.1 Begriffsklärung). Industriegüter, die über eine Bestellung in kleinen Stückzahlen geordert werden, haben keine Markteinführungsphase in dem hier aufgezeigten Sinne. Nichtsdestotrotz können Industriegüter, die in höherer Stückzahl produziert werden, entsprechend ihrer Marktdiffusion einen der hier aufgezeigten Marktverläufe nehmen.

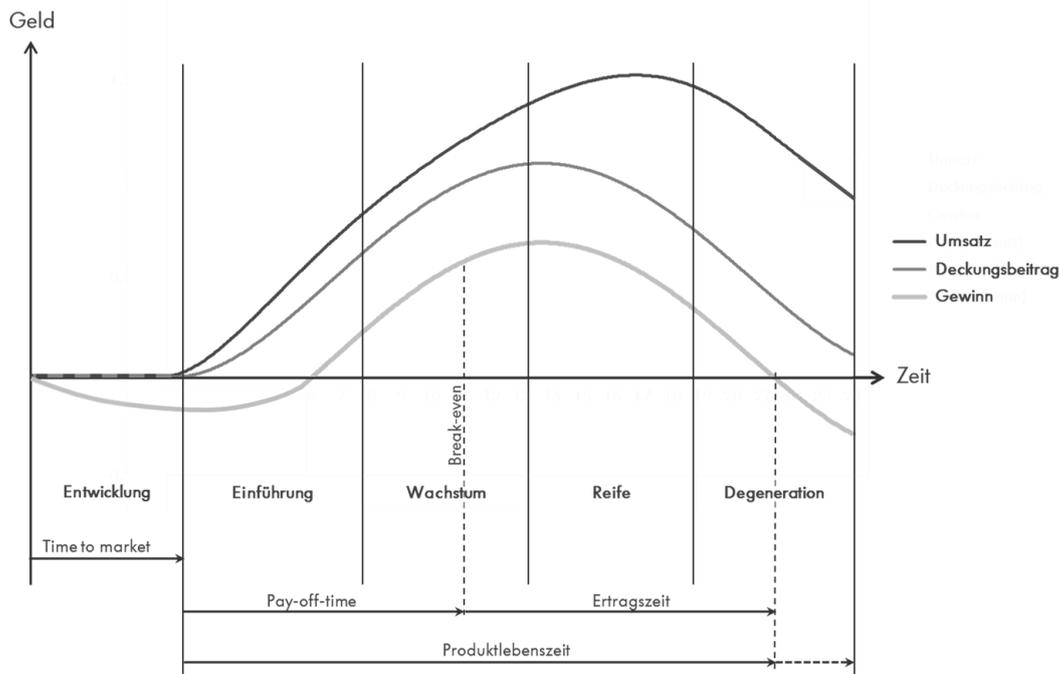


Abbildung 2-7 Betriebswirtschaftlicher Produktlebenszyklus in Anlehnung an [PeM-2004] [OpR-2012]

In einem Produktlebenszyklus können die Produkte, die über einen längeren Zeitraum in einer Baureihe auf dem Markt sind, in Summe, also nach der Produktart zusammengefasst, berücksichtigt werden [EKM-2013].

Die Nachfrage nach dem Produkt bzw. dessen Absatzerfolg ist abhängig von der Diffusion, welche die Ausbreitung von Neuerungen im Markt beschreibt und in der Literatur weitgehend als Adoptions- und Diffusionsforschung beschrieben wird. Dabei ist die Diffusion abhängig von sozialen Interaktionen der Akteure im Markt sowie der angewendeten Marketinginstrumente des Anbieters [KKP-1999]. Bei der Markteinführung einer Innovation ist diese nicht allen Marktteilnehmern direkt bekannt, wodurch sich eine zeitliche Verteilung der Marktdurchdringung ergibt. ROGERS hat die Kunden anhand des normalverteilten Produktlebenszyklus in Innovatoren, frühe Übernehmer (Adaptoren), frühe und späte Mehrheit sowie Nachzügler unterteilt [REM-2003].

Die Entwicklungsphase kennzeichnet den Zeitraum, in dem das Produkt zur Marktreife gebracht wird und nach der die Serienproduktion des Produktes erfolgen kann. In der dann folgenden Einführungsphase wird das Produkt im Markt platziert. Es folgt eine Wachstumsphase, in der sich das Produkt am Markt etabliert. Bei Konsumprodukten würden in dieser Phase Kunden Wiederkäufe tätigen oder Probierkäufer hinzukommen. Bei Kraftfahrzeugen kauft hier die „frühe Mehrheit“, da erwartet wird, dass „Kinderkrankheiten“ des Produktes nicht mehr auftreten. In der Reifephase wird mit dem Produkt der maximale Umsatz erzielt. Es wird eine Sättigung am Markt erreicht. Anschließend entwickelt sich der Absatz des Produktes zurück. Damit bleiben Gewinne aus, das Produkt gerät in die Verlustzone und wird daraufhin vom Markt genommen.

Der Zeitpunkt „Time to market“ kennzeichnet, wann das Produkt spätestens auf dem Markt sein muss, um erfolgreich zu sein. Dieser Zeitpunkt determiniert, wann der Entwicklungsprozess des Produktes

abgeschlossen und die Serienproduktion begonnen werden muss. Die bis zu diesem Zeitpunkt verursachten Kosten und Investitionen in das Produkt müssen in der „Pay-off-Time“ erst wieder durch die Erträge ausgeglichen werden. Dieser Break-Even Point liegt in der Wachstumsphase des Produktes. Der restliche Zeitraum der Produktlebenszeit, in dem das Produkt Gewinn abwirft, ist die sogenannte Ertragszeit. Diesen Zeitraum zu maximieren ist das wirtschaftliche Ziel im Produktmanagement. Es ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht darauf zu achten, dass die Zeit bis zur Markteinführung so kurz wie möglich gehalten wird. Ein erhöhter Entwicklungsaufwand verschiebt den Break-Even Point des Produktes in Richtung des „Produktlebenszeitendes“ und verkürzt damit die Ertragszeit [MaE-2011]. In Tabelle 2-1 sind die einzelnen Lebenszyklusphasen mit den entsprechenden Eigenschaften zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 2-1 Erläuterung der Phasen des normalverteilten Produktlebenszyklus in Anlehnung an [FiM-2001] [REM-2003] [PeM-2004] [MaE-2011]

	Entwicklungsphase	Einführungsphase	Wachstumsphase	Reifephase	Degeneration
Umsatz	kein	niedrig	maximaler Anstieg	Maximum	rückläufig
Deckungsbeitrag	-	hoch	maximal	rückläufig	stark rückläufig
Gewinn/Verlust	Investition in die Entwicklung	Verluste oder schwacher Gewinn	wachsender Gewinn	maximaler Gewinn	rückläufiger Gewinn bis zu Verlusten
Kundentyp	-	Innovator	frühe Übernehmer	frühe und späte Mehrheit	Nachzügler
Produktpolitik	-	Neuproduktgestaltung	Qualitätsverbesserung	Differenzierung der Produktlinie	Eliminierung oder Relaunch
Distributionspolitik	-	Exklusiver oder selektiver Vertrieb	Ausbau des Vertriebsnetzes	Erschließung neuer Vertriebskanäle	Bereinigung des Händlernetzes
Schlüsselfunktion für den Erfolg	Entwicklungseffizienz	Produktqualität	Produktionskapazität	Verteidigung ggü. dem Wettbewerb	Effizienter Ressourcenverbrauch
Schlüsselbereich (Unternehmen)	Produktmanagement, Forschung & Entwicklung	Produktion		Marketing & Vertrieb	Finanzen & Controlling

Eine weitere Möglichkeit, den Lebenszyklus eines Produktes zu beschreiben, ist die sogenannte S-Kurve, die von der Beratungsfirma McKinsey eingeführt wurde. Die S-Kurve zeigt eine stilisierte Entwicklung einer Technologie von Produkten auf und dient z.B. als Instrument des strategischen Innovationsmanagements. Ein Produkt kann dabei aus einer oder mehreren Technologien bestehen. Bei dieser Darstellung wird das Leistungspotential einer Technologie in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeigt. Der Verlauf der S-Kurve lässt sich wie folgt erklären. Am Anfang stehen nur wenige bedarfsgerechte Lösungen zur Verfügung, mit der Zeit werden aber immer neue technologische Ergebnisse erzielt. Folglich intensiviert sich der Technologieentwicklungsprozess und damit steigt die Leistungsfähigkeit an. Dieses wird verstärkt, wenn sich die Technologie am Markt durchsetzt und auch andere Anbieter in diesem Bereich Entwicklungsfortschritte einbringen. Die technologische Leistungsgrenze ist als physikalische Grenze des Systems bzw. Produktes zu sehen. An dieser Stelle flacht

die Entwicklungskurve ab, eine Weiterentwicklung ist weniger erfolgsversprechend als das Umschwenken auf eine neue Technologie mit höheren Leistungspotenzialen [BrK-1998] [StH-2007] [SGK-2010].

Die Zeit in Abbildung 2-8 bezieht sich auf die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der Technologie, somit ist damit auch der monetäre Aufwand für diese Tätigkeiten verknüpft. Grundgedanke ist, dass eine Technologie durch eine andere ersetzt wird, da die ältere von beiden mit der Zeit zwangsläufig an ihre technische Leistungsgrenze stößt (Abbildung 2-8). Um mit einer Technologie eine höhere Leistungsfähigkeit zu erzielen, sind Aufwendungen für deren Entwicklung nötig. Ab einem gewissen Zeitpunkt, wenn die Technologie an die Leistungsgrenze kommt, ist dann eine Investition in ein Substitutionsgut, entweder als kostengünstigeres Produkt oder mit einer höheren technologischen Leistungsgrenze, angebracht. Dabei müssen die S-Kurven der Technologien im Kontext miteinander betrachtet werden [BrK-1998] [PBF-2007] [PWV-1997].

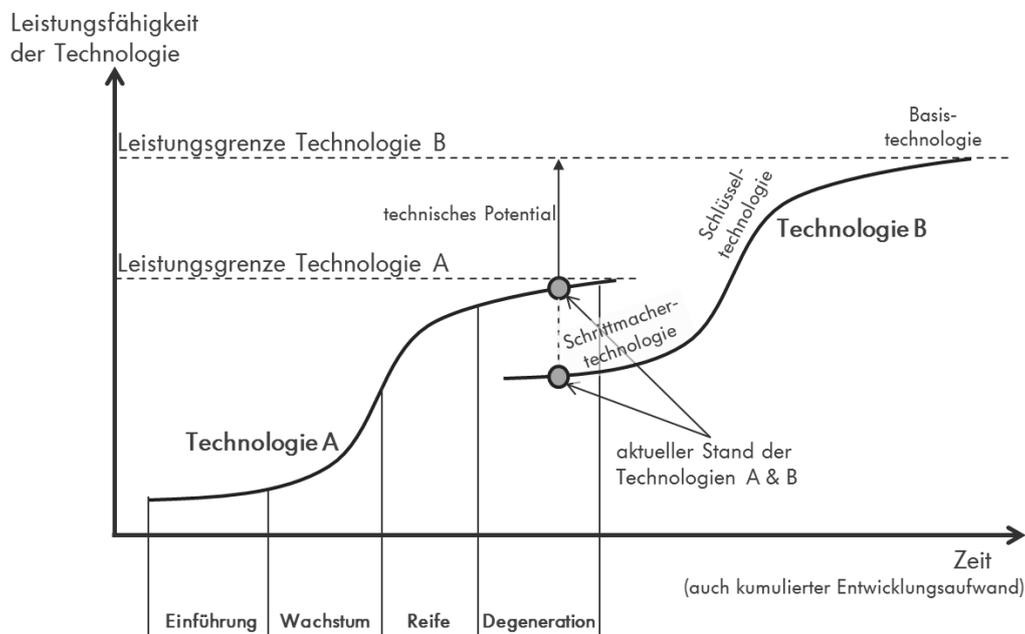


Abbildung 2-8 S-Kurve der Leistungsfähigkeit einer Technologie in Anlehnung an [BrK-1998] [PWV-1997] [SGK-2010]

Die S-Kurve ermöglicht neben der ökonomischen auch eine technische Interpretationsmöglichkeit des Produktlebenszyklus. Die ökonomische Sichtweise berücksichtigt mit dem Verlauf der Kurve die Aufwendungen als Investition in eine Technologie, mit denen das Leistungspotential des Produktes ansteigt. Wenn die Investitionen verringert werden, flacht die Kurve wieder ab. Das Investitionsverhalten des Unternehmens hängt wiederum primär mit der Marktnachfrage zusammen. Im Zeitverlauf der Technologiezyklen ergibt sich ein Verhältnis vom kumulierten Aufwand in Forschung und Entwicklung zur Leistungssteigerung der Technologien, in die investiert wurde.

Das Unternehmen kann über die drei Phasen (Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologie oder auch Start-, Boom- und Reifephase) Ableitungen für die Strategie am Markt entwickeln. Zuerst stellt das Unternehmen eine Strategie für den Markteintritt auf, mit dem Hintergrund, welche Technologie

den größten Wettbewerbsvorteil eröffnet. Dem folgt, um die gewonnene Stellung im Markt zu verteidigen, z.B. das gezielte Einbringen von Innovationen. Die letzte Phase ist dann von der Konsolidierung der alten und der neuen Investition in eine andere Technologie geprägt. Der Zeitraum des Umstieges von der einen zur anderen Technologie ist aus Effizienzgründen gegenüber den verfügbaren Etats anhand dieses Modells abzuwägen. Eine zu frühe Investition in eine neue Technologie kann das Erreichen der Reifephase der alten Technologie unterbinden. Denn mit dem Aufkommen der neuen Technologie wird der Absatz der alten zurückgehen [StH-2007] [SGK-2010] [ScK-2011].

Im Zusammenhang mit der S-Kurve einer Technologie sind zusätzlich Lock-In- und Lock-Out-Effekte zu berücksichtigen. Diese können den Wechsel von einer aktuellen zu einer neuen Technologie verhindern. Bei Lock-In Effekten verhindern z.B. Skaleneffekt oder rechtliche und technische Anforderungen den Wechsel zu einer anderen Technologie. Beim Lock-Out-Effekt wird die langfristig bessere Technologie nicht verwendet, sondern wegen kurzfristiger Vorteile eine andere Technologie präferiert. Das Einführen der noch nicht berücksichtigten Technologie ist dann erst bei einem viel höheren Potential möglich. Entgegen dieser Effekte können z.B. politische Maßnahmen wirken [AWB-1989] [AWB-1994]. Zur Verdeutlichung ein Beispiel aus der Automobilindustrie. Die Einführung von Aluminium als Leichtbauelement im Karosseriebau hatte Lock-In-Effekte in Form von Weiterentwicklungen herkömmlicher Stahlbauelemente (Tailored Blanks) zur Folge, was zu Gewichtseinsparungen und Leistungsverbesserungen führte. Lock-Out-Effekte der Aluminium-Technologie war der höhere Materialbedarf von Aluminium bei gleicher Steifigkeit gegenüber Stahl, bedingt durch die unterschiedlichen Elastizitätsmodule der Werkstoffe. Außerdem trägt das aufwendigere bzw. neue Fertigungsverfahren (z.B. Schweißtechnologie) zu einem Lock-Out bei [ScK-2011].

Ein drittes Modell mit übergeordneter Sichtweise auf die Technologie ist das Technologielebenszyklus-Modell von ANSOFF (Abbildung 2-9). In diesem Technologielebenszyklus-Modell werden die Entwicklung des Marktes, der Technologie und des Produktes über der Zeit zusammengeführt. Zur Differenzierung werden die Märkte in solche mit stabiler, dynamischer und turbulenter Technologieentwicklung gegliedert. Märkte mit einer stabilen Technologieentwicklung sind durch geringe technologische Veränderungen gekennzeichnet. In diesen Märkten ist ein Wettbewerbsvorteil primär über die Qualität oder den Preis zu erzielen. Märkte mit einer dynamischen Technologieentwicklung haben eine hohe Geschwindigkeit der Weiterentwicklung der bestehenden Technologie. Unternehmen müssen, um am Markt zu bestehen, unter dem Innovationsdruck der Konkurrenz zügig neue Produkte in den Markt einbringen. Das hat kurze Produktlebenszyklen und damit auch kurze Entwicklungszeiten zur Folge. Die dritte Marktform mit turbulenten Technologieentwicklungen ist durch Technologiesprünge gekennzeichnet. Das bedeutet, dass es eine eingeführte Technologie kurzfristig durch eine noch neuere substituiert werden kann. Damit steigt das unternehmerische Risiko, in technologischer Hinsicht falsche Entscheidungen zu treffen. Dies kann nur durch frühe Erkennung und Bewertung möglicher Technologien minimiert werden. Soll dies nicht geschehen, besteht die Möglichkeit, dass auf diese Technologie seitens des Unternehmens verzichtet wird [ScK-2011].

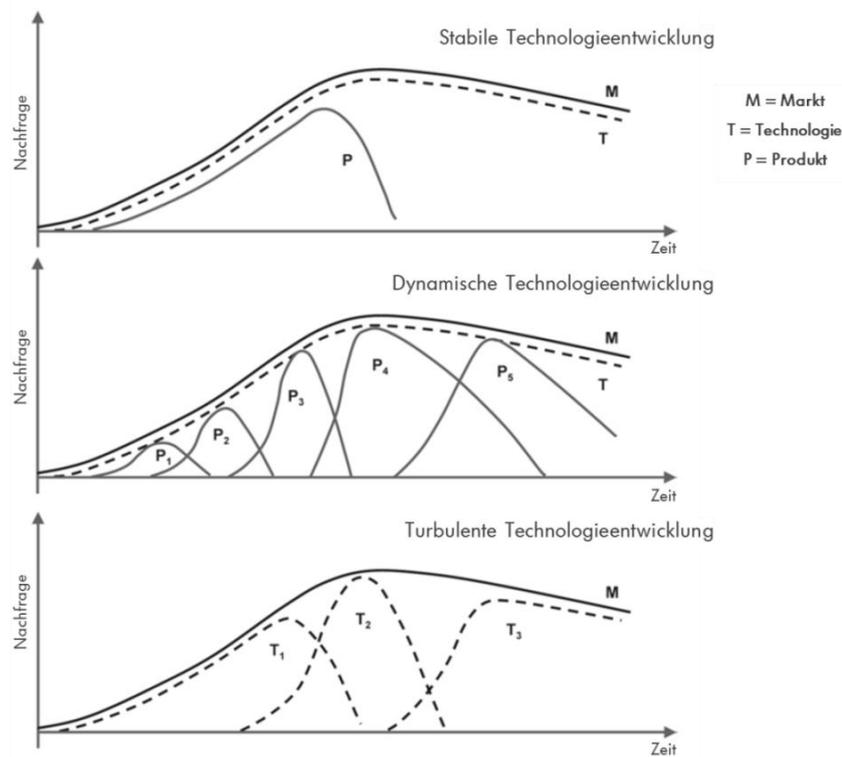


Abbildung 2-9 Technologielebenszyklus-Modell nach ANSOFF aus [ScK-2011]

2.2.2 Technischer Produktlebenszyklus

Jedes zur Marktreife gebrachte System durchläuft einen Produktlebenszyklus, ungeachtet der technischen Spezifikation des Produktes bzw. der zugeordneten Branche. Der Beginn des Lebenszyklus ist die Produktplanung. In diesen werden die Phasen der Forschung, das Erstellen eines Produktportfolio und das Marketing durchlaufen [VaS-2014]. Der Anstoß zu einem Produkt kann somit unternehmensextern (Kunde/ Markt) oder –intern (Anforderungen/ Forschungsergebnisse) initiiert sein. Die Produktidee wird in der Produktplanungsphase so ausgearbeitet, dass in der folgenden Entwicklungsphase das Produkt konkretisiert und realisiert werden kann. Nach der Fertigungsphase (Realisierung) wird das Produkt veräußert. Dieser Punkt entspricht der Einführungsphase des betriebswirtschaftlichen Produktlebenszyklus in Abbildung 2-8. Die folgende Produktnutzungsdauer ist begrenzt, auch wenn zwischenzeitliche Instandhaltungen diese Phase verlängern können. Nach der Nutzung folgt die Entsorgung, die bei heutigen Produkten, unabhängig ob Konsum- oder Industriegut, an Bedeutung gewinnt. Die Verwertung des Altproduktes (Recycling) auf umweltschonende Weise ist einer Entsorgung auf einer Deponie vorzuziehen. Ziel ist es, einen möglichst hohen Anteil der Wertstoffe des Produktes wieder in den Produktlebenszyklus einzubringen [VDI 2221].

Produkte können mehrmals die aufgezeigten Phasen durchlaufen, was die Bezeichnung Zyklus hervorhebt. Die Lebensphasen des Produktlebenszyklus werden insbesondere durch die Integration von CAx-Anwendungen in den Entwicklungsprozess mit dem Product Lifecycle Management (PLM) in Verbindung gebracht. Beim PLM soll, bezogen auf den Produktentstehungsprozess, durch Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette effektiv und effizient ein übergreifender Lösungsansatz ge-

staltet werden. Dieser ganzheitliche Ansatz bezieht sich auf eine einheitliche Daten- und Informationsbasis, Ergebnis- bzw. Produktsicht sowie Ablauf- bzw. Prozess- und Organisationsicht. Ziel ist es vor allem, Entscheidungen frühestmöglich im Entwicklungsprozess treffen zu können (Predictive Engineering), was nur möglich ist, wenn zu diesem frühen Zeitpunkt Informationen aus den späteren Phasen des Produktlebenszyklus rechtzeitig zur Verfügung stehen (Reverse Engineering) [VWB-2009] [ScG-2012]. Durch die globalere Betrachtung auf den gesamten Produktlebenszyklus werden verschiedene Anwendungen, beginnend mit CAD-Tools über Anforderungs-, Funktions- und Service-systemen bis hin zur Einbeziehung von Kunden oder Zulieferern, in Engineering Collaboration Plattformen genutzt [EiS-2009]. Bei diesem Prozess stehen das Projekt-, Qualitäts- und Produktmanagement über das gesamte Produktleben sowie die technische Umsetzung in den einzelnen Phasen im Vordergrund [WanH-2005].

Die Betrachtung nach dem Produktlebenszyklus birgt den Vorteil, dass ein Produkt durch Strukturierung planbar wird. Anforderungen, Eigenschaften, Nutzen und Herausforderungen für das Produkt in den einzelnen Lebensphasen zeigen die Komplexität des Gesamtaufwandes auf [EKM-2013].

Je nach Prozessfokus kann es eine unterschiedlich detaillierte Betrachtung des Produktlebenszyklus geben (Abbildung 2-10). Die Darstellung ist als zeitliche Abfolge zu verstehen. Die Dauer der einzelnen Phasen, die das Produkt durchlebt, weicht stark voneinander ab. Darüber hinaus ist der Durchlauf nicht zwingend sequentiell, sondern, bedingt durch eine angespannte terminliche Situation in den Projekten, oft parallel [VaS-2014].

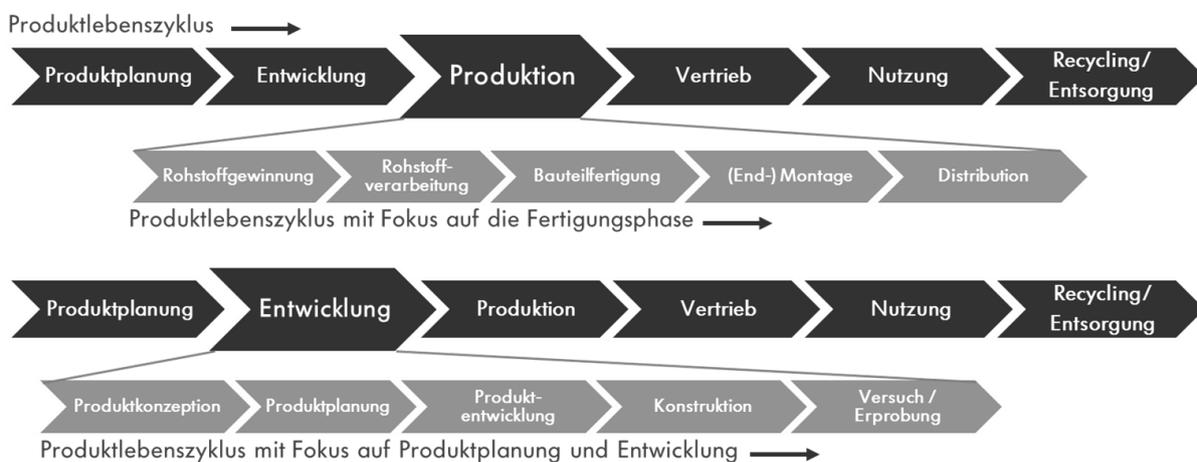


Abbildung 2-10 Produktlebenszyklen in Anlehnung an [EiS-2009] [ReB-2006] [VDI 2221] [WaG-2010] [VaS-2014]

Die Bedeutung der Entwicklungsphase für den gesamten Prozess des Produktlebenszyklus liegt nicht nur in dem Festlegen von Produktattributen, woraus sich ein späterer Markterfolg oder Fehlschlag ergibt. In dieser Phase werden auch Erfahrungen aus vor- und nachgelagerten Perioden anderer entwickelter Produkte umgesetzt, wodurch es einen stetigen Informationsfluss über den Produktlebenszyklus bedarf [VDI 2221] [AnHe-1987]. Außerdem muss in der Entwicklungsphase die mögliche Wiederverwendung oder Entsorgung im Sinne eines nachhaltigen Handelns Berücksichtigung finden. Aus

Kostensicht ist diese Phase von besonderer Bedeutung, da die Fehlerbehebungskosten mit jeder weiteren Phase um das zehnfache steigen (Abbildung 2-11) [GeH-2008] [HTB-2003].

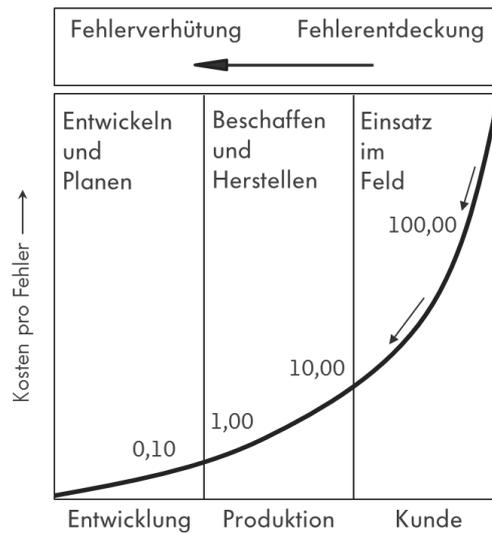


Abbildung 2-11 Zehnerregel der Fehlerkosten aus [HTB-2003]

Im technischen Produktlebenszyklus gibt es bei der Vertriebsphase eine Differenzierung (Abbildung 2-12).

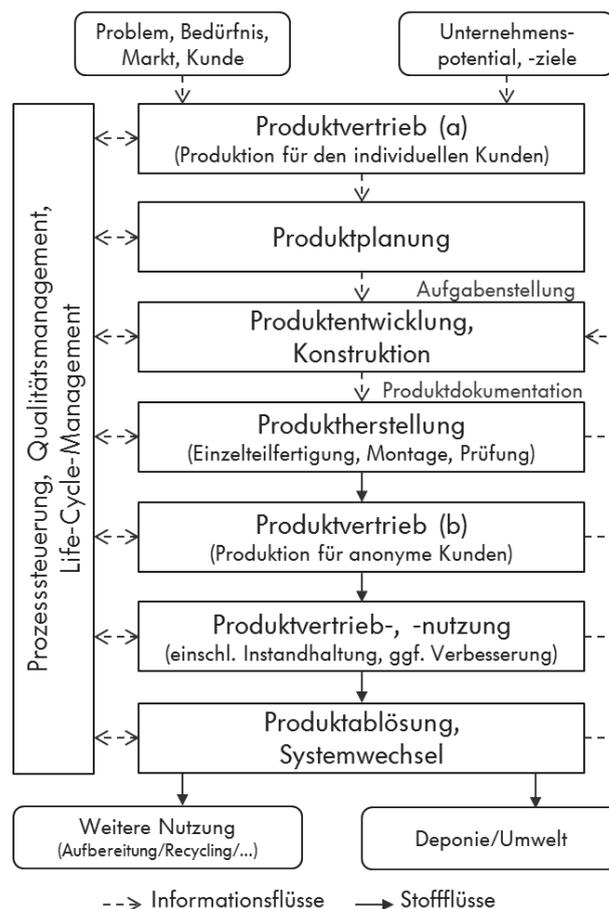


Abbildung 2-12 Lebensphasen technischer Produkte aus [VWB-2009]

Bei Produkten, die für eine große Anzahl von Kunden produziert werden, erfolgt der Produktvertrieb erst in der Vertriebsphase (b) (Abbildung 2-12). Produkte, die vor der Produktion veräußert werden

(Produktvertrieb (a) Abbildung 2-12), sind häufig individuell gestaltet und werden im Extremfall in der Stückzahl 1 produziert (beispielhaft die Bestellung eines Abendkleides bei einer Schneiderin). Bei Kraftfahrzeugen liegt zumeist ein Kaufinteresse vor (z.B. Europa), da der Kunde sein Neufahrzeug individuell gestalten möchte. Dieser Gestaltungsraum ist aber im Vorhinein geplant und entwickelt worden (Module). Folglich ist bei Kraftfahrzeugen, die für den Massenmarkt bestimmt sind, eine Vertriebsphase (b) anzunehmen. Der Produktionszeitraum (Abbildung 2-5) mit wenigen Stunden bietet dem Fahrzeughersteller diese Möglichkeit der Produktion auf Bestellung. Eine längere Produktionszeit und damit kostenintensivere Produktion würde das Produkt verteuern und im Extremfall eine individuelle Fahrzeuggestaltung für den Massenmarkt nicht möglich machen. Außerdem kann durch den Aufbau eines Produktes in Modulen im Entwicklungsprozess eine Kombinations- und Variantenvielfalt für den späteren Kunden gestaltet werden [VWB-2009].

Beginn eines Produktlebenszyklus ist ein Marktbedürfnis, das Erschließen eines neuen Marktes über eine Innovation oder das Erweitern des Produktportfolios durch ein Unternehmen. Auch rechtliche Rahmenbedingungen können zur Entwicklung eines Produktes führen, insbesondere wenn die Politik über ihre Gestaltungsmöglichkeiten Marktanpassungen vornimmt. Auf Basis der aufgezeigten Initiierungsereignisse wird in der ersten Phase das Produkt geplant. Es werden Anforderungen an das Produkt definiert, die die Eingangsinformationen der Produktentwicklung darstellen [VWB-2009]. Zur Produktplanung gehört auch die Definition des primären Absatzmarktes bzw. der anvisierten Kundengruppe. Das betrifft aus Sicht eines Produzenten bzw. der Industrie das Business-to-Business (B2B), Business-to-Consumer (B2C) und das Business-to-Administration (B2A- Geschäft). Aus Sicht des Marketings hat dies vor allem etwas mit Kommunikationsstrategien in den jeweiligen Absatzmärkten zu tun [BIZ-2005] [MaC-2008]. Da jedoch im B2B- Geschäft von einer Kundenorientierung hin zu einer Kundenintegration gearbeitet wird, ist in diesem Modell eine frühe Zusammenarbeit mit dem Industriekunden im Entwicklungsprozess erforderlich [KIP-2002].

Der Bereich des B2A- Geschäftsfeldes wird primär im Bereich des E-Commerce (elektronische Handel) berücksichtigt, soll an dieser Stelle aber zur Vervollständigung aufgeführt werden [RuA-2003]. In der Produktplanungsphase sind auch die Anforderungen zu schärfen. Es ist festzulegen, welche Forderungen das Produkt erfüllen muss und welche Eigenschaften Wünsche sind und erfüllt werden können [GrF-2011]. Dafür können die Forderungen des Kunden an das Produkt auch in Mindestanforderungen und Wünsche unterteilt werden [HTB-2003].

In der zweiten Phase (Produktentwicklung, Konstruktion) werden Lösungen erarbeitet, die die Anforderungen in Eigenschaften und Merkmale des Produktes umsetzen. Den Entwicklern stehen bei Neukonstruktionen bestenfalls Informationen aus vorangegangenen Projekten zur Verfügung, bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen kann auf eine bessere Erfahrungs- und Informationsbasis zurückgegriffen werden. Jede Lösung, die hieraus entwickelt wird, muss mindestens virtuell oder aber real abgesichert und hinsichtlich des Erfüllungsgrades der Anforderungen geprüft werden. Das Ergebnis dieser ersten beiden Phasen ist eine Produktdokumentation, auf Basis derer eine Fertigung des Produk-

tes angestoßen werden kann. Die Produktdokumentation basiert zum einen auf rechnerunterstützten Konstruktionsdaten, zum anderen auf Angaben zur Absicherung der Fertigung, der Qualität und der Produktsteuerung. Bezogen auf die genannten ersten Lebensphasen eines Produktes wird von der Produktplanung über die Produktentwicklung/ Konstruktion die Stückzahl eins angenommen. Erst mit der Produktherstellung und den dann folgenden Phasen wird von einer Anzahl n ($n \gg 1$) des Produktes ausgegangen [VWB-2009]. Auf diese Phase Produktentwicklung/ Konstruktion wird im Abschnitt 2.4 *Das Produkt im Entwicklungsprozess* noch näher eingegangen. Die Bedeutung dieser Phase nimmt zu, insbesondere, da die Determinierung von Produkteigenschaften über den gesamten Lebenslauf des Produktes gesehen werden soll und hier der Faktor Umwelt bzw. Nachhaltigkeit Berücksichtigung finden muss.

Die Phase der Produktherstellung umfasst, auf Basis der vorhandenen Informationen aus der Entwicklung, die Verarbeitung vorhandener Rohstoffe zur Fertigung von Einzelteilen sowie deren Montage in Verbindung mit möglichen Kaufteilen und die Prüfung des sich ergebenden Produktes. Dafür müssen die Informationen aus der Entwicklungsphase anwenderspezifisch weiterverarbeitet und ergänzt werden. Aus logistischer Sicht endet die Produktionsphase mit der Vorbereitung für bzw. die Überführung des Produktes in den Versand. Ab diesem Zeitpunkt werden nicht länger Informationen, sondern Stoffe umgesetzt.

Der Vertriebsweg zum Kunden kann je nach Produkt auf den zwei genannten Wegen erfolgen. In der Automobilindustrie folgt auf die Herstellungsphase die Vertriebsphase mit der Übergabe an den Kunden. Der Kunde geht mit dem Produkt in die Nutzungsphase über, die bei technischen Produkten Service- und Instandhaltungsmaßnahmen beinhaltet [VWB-2009]. Bedingt durch eine wachsende Erdbevölkerung und knapper werdende Ressourcen ist es Ziel, die Umweltbelastung in allen Bereichen der Produktnutzung zu reduzieren.

Im Anschluss an die Nutzung kommt die letzte Phase für das Produkt, die Produktablösung bzw. der Systemwechsel. In dieser letzten Phase wird das Produkt verwertet, wobei ein möglichst großer Stoffanteil in den Wirtschaftskreislauf zurück fließen (Wiederverwendung nach dem ursprünglichen Zweck, stoffliches Recycling zu einem gleichen oder ähnlichen Zweck, „Down-Cycling“ zu einem geringer wertigen Zweck) und nur ein sehr geringer Anteil deponiert werden soll [VWB-2009].

2.3 Das Produktgefüge

Ein Produkt kann in Baugruppen, Unterbaugruppen und in der untersten Ebene in Bauteile differenziert werden. Dabei kann es sich um einen physischen wie auch virtuellen Aufbau (CAx) handeln. Die Produkt- und Prozesserstellung erfolgt auf der Basis von Eigenschaften, die ein Produkt gemäß der entsprechenden Anforderungsliste erfüllen soll (Abbildung 2-13) [VWB-2009]. Ein Industrieprodukt, z.B. ein Kraftfahrzeug, verfügt über eine Vielzahl von Bauteilen und sich daraus ergebenden Eigenschaften, die sich insbesondere über den jeweiligen Verwendungszweck weiter untergliedern [VWB-2009].

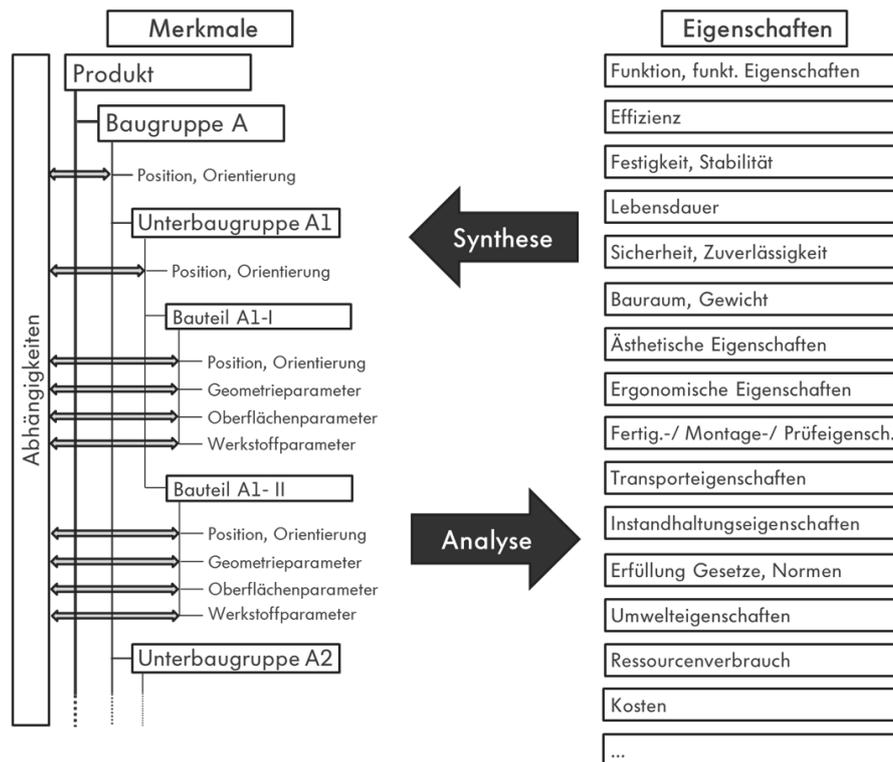


Abbildung 2-13 Produktgefüge mit Klassen von Merkmalen und Eigenschaften sowie deren wesentliche Beziehung aus [VWB-2009]

Das Produkt und dessen Elemente⁵ können in sich weiter differenziert werden. Zum einen in der Produktstruktur mit Form, Material, Dimension, Oberfläche und Toleranzen, zum anderen als erläuternde Eigenschaften wie Funktion, Preis, Lebenszeit, Design, Gewicht, Zuverlässigkeit und Stabilität [An-He-1987].

Merkmale und Eigenschaften werden im Weiteren entsprechend dem Vorgehen von WEBER differenziert (Abbildung 2-13). Die dort aufgeführte Reihenfolge von Eigenschaften entspricht keiner hierarchischen Wertung [VWB-2009]. Merkmale dienen dazu, die Gestalt eines Produktes durch die Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten, die Geometrie, die Abmessungen, den Werkstoffes und die Oberflächenparameter zu definieren (Abbildung 2-14).

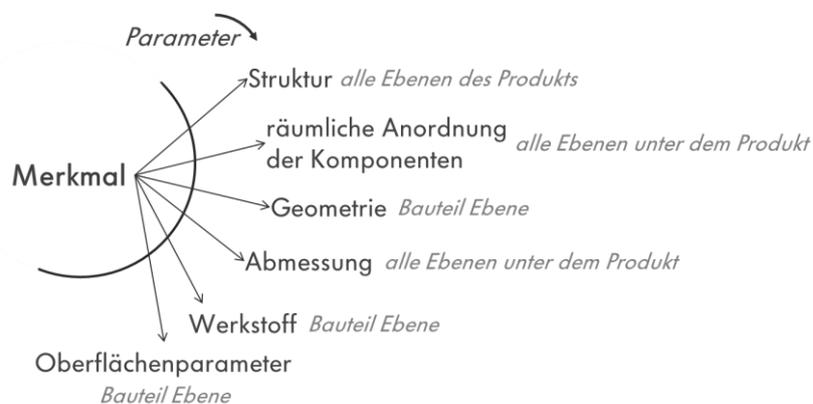


Abbildung 2-14 Merkmalparameter nach WEBER [VWB-2009]

⁵ Produktelemente wird im Folgenden als Sammelbegriff für Baugruppen, Unterbaugruppen, Bauteile verwendet

Nur diese in Abbildung 2-14 gezeigten Merkmale können direkt vom Entwickler beeinflusst werden. Der Entwickler muss zudem die gegenseitigen Abhängigkeiten der Merkmale des Produkts berücksichtigen [VWB-2009]. Für die Entwicklung bedeutet dies die Annahme eines Kausalitätsprinzips (Ursache-Wirkungs-Prinzip), bei der eine Ursache unter gleichen Bedingungen stets die identische Wirkung zeigt. Es wird somit eine deterministische Annahme getroffen [RiA-2008].

Im Gegensatz dazu beschreiben Eigenschaften das Verhalten eines Produktes und sind vornehmlich physikalischer oder chemischer Natur. Sie beziehen sich unter anderem auf die Sicherheit, Zuverlässigkeit, Fertigbarkeit und Montagefähigkeit sowie die Umweltverträglichkeit eines Produktes (Abbildung 2-13). Eigenschaften können vom Entwickler nicht direkt beeinflusst werden, dies kann nur indirekt über die Änderung von Merkmalen des Produktes erfolgen. Die Eigenschaften lassen sich somit als Funktion aus einer Menge von Merkmale bestimmen. Dies verdeutlicht das Risiko, dass weitere Eigenschaften durch das Festlegen eines bestimmten Merkmales unbewusst verändert werden [VWB-2009].

Eigenschaften sind objektiv (z.B. physikalische Parameter) und subjektiv (z.B. Kundenwahrnehmung) messbar. Sie beschreiben vor allem das Verhalten (aktiv) und die Wirkung (passiv) des Produktes auf den Nutzer bzw. auf das (Produkt-)Umfeld. Für den Nutzer sind das Verhalten und damit die Leistung des Produktes von Bedeutung, da er seine Anforderungen mit dem Leistungsversprechen des Produktes abgleicht [VaS-2014].

Die Erwartungen des Kunden an das Produkt können in Forderungen und Wünsche unterschieden werden. Die Forderungen müssen vom Entwickler, über die jeweilige Ausprägung der Bauteile bzw. deren Merkmalen, in den Eigenschaften des Produktes widerspiegelt werden. Die Wünsche können indes unter der Abwägung von Kosten und Zeit erreicht werden. Die Anforderungen der Zielgruppe stimmen dabei idealerweise mit der Charakteristik des Markenkerns⁶ bzw. der Produkte überein.

Eine weitere Unterteilung der Eigenschaften ist nur mit dem Bezug zur Produktgruppe oder rein unternehmensspezifisch möglich. Zum Beispiel haben Kraftfahrzeuge andere Anforderungen als Haushaltsgeräte. Unternehmen möchten die beim Kunden positiv bekannten markenspezifischen Charakteristika (Markenkern bzw. Markenidentität in der Literatur auch Markenmerkmale z.B. [KJN-2008] [ScM-2012]) wieder abbilden [VWB-2009].

Die im Abschnitt 2.1 aufgezeigten Hauptmerkmale der Qualität [DIN 9000] sind in dem hier dargestellten Verständnis von Eigenschaften und Merkmalen als Klassifizierung der Eigenschaften zu sehen. Weitere Differenzierungen von Merkmalen und Eigenschaften auch hinsichtlich der Anforderungen an das Produkt, wie z.B. Hauptmerkmale zum Aufstellen einer Anforderungsliste von PAHL und BEITZ [PBF-2007], innere und äußere Eigenschaften von HUBKA und EDER [HuEd-1992] oder Basis-

⁶ Z.B. sind die Kennzeichen des Markenkerns der Firma Porsche Sportlichkeit (Leichtbau, Aerodynamik, außergewöhnlichen Fahrleistungen), zuverlässige Technik und ein charakteristisches Design [PAG-2014].

eigenschaften von ANDREASEN und HEIN [AnHe-1987] werden an dieser Stelle nicht weitergehend betrachtet.

Nach RODENACKER [RWG-1991] besteht die Möglichkeit, Funktionen eines Produktes in der frühen Phase der Entwicklung zu gestalten. Der Entwickler stellt die Forderungen an das Produkt als Wirkzusammenhang (WZH) zwischen Eigenschaften und den Grundelementen auf. Dies kann z.B. über eine Black-Box und das Formulieren der jeweiligen logischen Ein- und Ausgangsgrößen erfolgen. Der WZH bezieht sich auf logische, konstruktive und physikalische Forderungen an die Funktionen sowie die drei Ein- und Ausgangsgrößen der Black-Box, den Stoff-, Energie- und Signalumsatz [RWG-1991]. Welche Elemente des Produktes im Detail, also grundlegend, aufgebaut bzw. konstruiert werden müssen oder ob es ausreicht, die Baugruppe und die Unterbaugruppe als Black-Box zu betrachten, wird von der Produktgruppe determiniert. Von der Tiefe der Betrachtung der Produktgruppe ist wiederum die Detaillierung der Eigenschaften abhängig. Ziel ist es, dass die Elemente eines Produktes (Baugruppen, Unterbaugruppen und Bauteile) im Zusammenspiel den größtmöglichen Nutzen stiften [VWB-2009].

Die Sichtweise in dieser Arbeit besteht für den Entwicklungsprozess darin, dass Eigenschaft und Merkmale eines Produktes in der Form interagieren, dass sich Eigenschaften aus Merkmalen ergeben. Eigenschaften beschreiben den potentiellen Lösungsraum, in dem das Produkt entsteht, auf zwei Wegen. Zum einen durch die qualitative Festlegung von Merkmalen, zum anderen über die Dimensionierung, also das explizite Zuweisen einer Bandbreite von Werten für Merkmale. Der Lösungsraum wird weiter durch Randbedingungen, z.B. das Fertigungssystem, begrenzt. Um eine geeignete Lösung zu finden, sind in der Anforderungsliste Produkteigenschaften beschrieben. In dieser können auch explizite Produktmerkmale enthalten sein. Dies ist der Fall, wenn bestimmte Teillösungen für das Produkt vorausgesetzt werden.

2.4 Das Produkt im Entwicklungsprozess

Das Entwerfen eines Produktes besteht aus einer Vielzahl von Schritten organisatorischer und inhaltlicher Natur. Darüber hinaus ist bei vielen Produkten eine zunehmende Komplexität der Technologie zu erkennen, welche sich u.a. durch die Verknüpfung von mechatronischen Systemen und Ansprüchen an die Informationsverarbeitung ergeben. Insofern die Technologie zur Kernkompetenz des Unternehmens bzw. des Produktes gehört, wird dies nach Möglichkeit im Unternehmen entwickelt. Die strategischen Kernkompetenzen in der Automobilindustrie sind nach LISKE und BERNHART (aus [SchK-2011]):

1. Markenmanagement,
2. Leichtbau, neue Werkstoffe und Strukturen,
3. Alternative Antriebstechnologien,
4. Fahrsicherheit und Fahrverhalten,
5. Design und Packaging,

6. Funktionsentwicklung und Gesamtfahrzeugintegration,
7. Elektronik, Systementwicklung und –Integration,
8. Anforderungsmanagement und zukunftsichere Funktionsspezifikation und
9. Sourcing & Management temporärer Wertschöpfungsnetzwerke.

Die Breite des Entwicklungsfeldes erhöht wiederum die Vielschichtigkeit der Zusammenarbeit in der Entwicklung eines Produktes. Hinzu kommen die in Abschnitt 2.2.2 genannten und im Entwicklungsprozess zu berücksichtigenden Einflüsse über den gesamten Produktlebenszeitraum. Bei komplexen Produkten kann ein Entwickler nicht mehr den Überblick über ein Produkt behalten. Er braucht Unterstützung, um das technische und betriebswirtschaftliche Optimum einer Produktlösung zu erzielen. Hierfür gibt es wissensbasierte Vorgehensmodelle, die eine Verknüpfung von Prozesselementen, Methoden und Verfahren sowie jeweiligen Werkzeugen und Hilfsmitteln ermöglichen (vgl. z.B. [FrD-2001]). Im Folgenden werden die Konstruktionsarten, der Konstruktionsprozess sowie eine Auswahl von Konstruktionsmethoden und -verfahren genauer erläutert.

2.4.1 Konstruktionsarten

Jedes zu entwickelnde Produkt wird zu Beginn über eine Aufgabenstellung (in der Literatur auch Anforderungsliste, Lasten- oder Pflichtenhefte) definiert. Die Aufgabe ist es, die Anforderungen in einem Konstruktionsprozess umzusetzen. Konstruktionen können wiederum nach ihrer Art und dem Anlass differenziert werden [PBF-2007] [VaS-1982] [VDI 2222]. Es gibt grundsätzlich drei Konstruktionsarten:

1. Neukonstruktion
2. Anpassungskonstruktion
3. Variantenkonstruktion.

Bei einer Neukonstruktion beginnt die Umsetzung der Anforderungen auf einem leeren Blatt Papier. Das bedeutet, dass es kein Vorbildprodukt gibt, auf dessen Basis man das neue konstruieren oder auf welches man sich beziehen kann. Es wird somit ein völlig neues Konzept aufgebaut. Daher durchlaufen Neukonstruktionen den kompletten Konstruktionsprozess, um Lösungsprinzipien neu zu entwickeln oder bestehende in neuer Weise kombinieren zu können. Aus dem aufgezeigten Zusammenhang folgt auch, dass bisherige Aufgabenstellungen mit neuen Lösungsprinzipien zu Neukonstruktionen führen können [VDI 2222] [VWB-2009].

Eine Anpassungskonstruktion baut auf einem bestehenden Produkt auf bzw. es gibt ein Produktvorbild, auf das der Entwickler sich bezieht. Es werden die Anforderungen in dem Produkt so verändert bzw. erweitert, dass in Teilbereichen des Produktes (Baugruppen) neue Lösungen gefunden werden müssen (partielle Neukonstruktion). Diese partielle Neukonstruktion unterscheidet die Anpassungskonstruktion von der Variantenkonstruktion [VWB-2009] [VaS-1982]. Das Funktionsprinzip des bestehenden Produktes bzw. Vorbildes ändert sich indes nicht. Komponenten des Produktes können aus Effizienzgründen hinsichtlich der Funktion oder Gestalt geändert werden [VDI 2217]. Die Anpas-

sungskonstruktion ist typisch für Investitionsgüter und wird vorwiegend auf spezielle Anforderungen eines bestimmten Kunden oder geänderte Marktbedingungen ausgelegt [VDI 2222]. Bei dieser Konstruktionsart wird das Produktkonzept an die neuen Bedingungen angepasst.

Bei der Variantenkonstruktion wird ein bestehendes Produkt um Varianten erweitert. Bei dieser Konstruktionsart stehen die Lösungsprinzipien fest, eine Variation ist über Variationsregeln möglich (vgl. z.B. [RWG-1991]), bzw. sind sie im Ausgangsprodukt bereits vorgesehen [VWB-2009]. Es ist somit eine neue Kombination von Modulen möglich, die wiederum entsprechend der Aufgabe parametrierbar werden können [VDI 2222]. Jedoch kann nach DÖRNER (aus [BSF-2004]) die Variantenkonstruktion einem Interpolationsproblem unterliegen, da die Parametrierung vom Ausgangs- zum Zielzustand behindert wird. Die Änderung von geometrischen Abmessungen in einem bekannten Bauteil kann indirekt auch zur Änderung weiterer Größen führen und die Produktgestaltung komplexer werden lassen als in der Variantenkonstruktion angedacht [BSF-2004]. Bei der Variantenkonstruktion bleibt das Grundkonzept des Produktes unangetastet.

Bei der Konstruktion von Produkten bzw. dem Aufstellen neuer Anforderungen an diese ist der Einfluss von Innovationen zu berücksichtigen. Die Einbindung von Innovationen kann bei einem bestehenden Produkt dazu führen, dass aus einer Anpassungskonstruktion eine Neukonstruktion wird. Die technischen Auswirkungen einer Innovation machen eine grundlegend neue Betrachtung des Produktes erforderlich [VWB-2009].

Diese drei Konstruktionsarten lassen sich weiter nach dem jeweiligen Anlass differenzieren. Ein Konstruktionsanstoß aus der Entwicklung heraus ist auftragsunabhängig. Bei diesem wird zumeist das gesamte Produkt überarbeitet. Auftragskonstruktionen werden durch einen Kunden initiiert und basieren auf der Anpassung bekannter Produktlösungen. Die Angebotskonstruktion ist meist vergleichbar mit einer Machbarkeitsstudie und dient als Basis einer Angebotskalkulation für einen Kunden. Der letzte Konstruktionsanlass ist die Betriebsmittelkonstruktion, bei der für die Umsetzung eines bestimmten Produkts Werkzeuge und Vorrichtungen in Auftrag gegeben werden [VDI 2222].

2.4.2 Produktentwicklungsprozess

Der Produktentstehungsprozess (PEP) beinhaltet die Produktplanung und die Produktentwicklung (Abbildung 2-15). An dessen Ende soll eine vollständige Beschreibung des Produkts mit Produktdaten, Fertigungs- und Montageplanung, Simulation des Produktverhaltens etc. zur Verfügung stehen [WeE-2006] [EiS-2009]. Die dem PEP folgenden Abschnitte des Produktlebenszyklus müssen hinsichtlich ihres planbaren Anteils bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, da in diesem alle relevanten Eigenschaften und Daten des Produktes festgelegt werden (Abbildung 2-15) [VaS-2014] [VWB-2009]. Dies ist insbesondere bei der Berücksichtigung des Life Cycle Assessment (LCA) nötig (vgl. [DIN 14040]).

Der Entwicklungsprozess kann mittels einer Methodik (eine planmäßige wissenschaftliche Vorgehensweise [Duden-2014]), welche auf einer Reihe von Methoden (Art und Weise eines Vorgehens [Duden-2014]) besteht, durchgeführt werden (Abbildung 2-15). Dabei wird in der Anfangsphase des Entwicklungsprozesses (Abbildung 2-15) versucht, die maximalen Eigenschaften des Produktes auf Basis minimal bekannter Merkmale (Abbildung 2-14) zu bestimmen [LRS-2006]. In diesem Zusammenhang ist ein Prozess als Verlauf und eine Phase als ein Zeitraum zu verstehen.

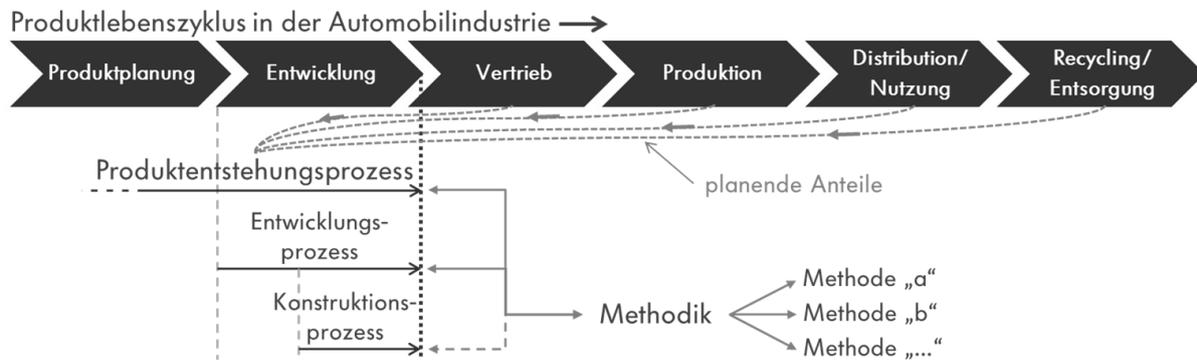


Abbildung 2-15 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Produktlebenszyklus in Anlehnung an [EiS-2009] [VaS-2014] [VWB-2009] [WeE-2006]

Das Gestalten eines Produktes im Entwicklungsprozess kann in mehrere Hauptphasen unterteilt werden. Eine klare Trennung dieser Phasen im realen Prozess ist nicht immer möglich, da aufgrund neuer Erkenntnisse oder sich ändernder Randbedingungen ein Rückgriff auf vorherige Phasen nötig sein kann. Eine Hauptphase umfasst einen bedeutsamen Arbeitsschritt in der Entwicklung des Produktes, der aus einer Vielzahl kleinerer Arbeitsschritte besteht und an dessen Ende ein Prüf- und Entscheidungsschritt nötig ist [PBF-2007]. Eine Hauptphase im Entwicklungsprozess ist z.B. die Konstruktion im Sinne eines Vorgangs [HuEd-1992] [ScG-2012].

Nach PAHL und BEITZ untergliedert sich der Entwicklungsprozess in die vier Hauptphasen des Planens und Klärens der Aufgabe, des Konzipierens, des Entwerfens und des Ausarbeiten. Das Planen und Klären der Aufgabe besteht auf einer normativen Festlegung auf Basis der Aufgabenstellung aus der Produktplanung. Es folgt das Konzipieren, bei dem mittels geeigneter Wirkprinzipien die prinzipielle Festlegung der Lösung erfolgt. Inhalt der Lösung zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess müssen mindestens die Werkstoffe, die Auslegung in Form der Bemessung, Produktbestandteile sowie die technologischen Möglichkeiten sein. In dieser Phase kann es mehrere gleichwertige Lösungsmöglichkeiten geben, die beurteilt werden müssen. Das in dieser Phase entworfene Lösungsprinzip ist von besonderer Bedeutung. Sollte es Mängel aufweisen, ist eine Korrektur in den folgenden Phasen nur erschwert möglich. In der Phase des Entwerfens wird das in der vorangegangenen Phase entwickelte Lösungsprinzip in eine Baustruktur umgesetzt. Es ist die quantitative Festlegung der Lösung, die dann einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung unterworfen werden muss. In der letzten Phase des Entwicklungsprozesses wird die Baustruktur auskonstruiert. Dabei müssen alle Vorschriften und Restriktionen, die Kosten und das Herstellungsverfahren final geprüft und festgelegt werden [PBF-2007].

Auch in der VDI-Richtlinie 2221 wird der Entwicklungsprozess in Anlehnung an PAHL und BEITZ (vgl. [PBF-2007]) in vier Phasen unterteilt. Die erste Phase dient ebenfalls der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung (Phase 1 Planen), in der zweiten werden Funktionsstrukturen ermittelt und Lösungsprinzipien gesucht (Phase 2 Konzipieren). Mit Hilfe der Ergebnisse der zweiten werden in der dritten Phase maßgebliche Module gestaltet (Phase 3 Entwerfen), bevor in der letzten Phase die Gestaltung des Gesamtproduktes erfolgt (Phase 4 Ausarbeiten) [VDI 2221]. Gemäß der VDI-Richtlinie 2221 kann dieser Konstruktionsprozess durch Wissensspeicher verkürzt werden (vgl. [VDI 2222]) oder bei Bedarf durch weitere Arbeitsschritte vertieft werden (vgl. [VDI 2223]).

Zumeist ist der Entwicklungsprozess technischer Produkte in die Phase der Anforderungsermittlung bzw. Klärung, der Festlegung des funktionalen Zusammenhangs, dem Definieren von Lösungsprinzipien zur Funktionsbestimmung und der dann folgenden Auslegung und Gestaltung der Lösungsprinzipien unterteilbar [WeB-1999].

Der Entwicklungsprozess ist nach DÖRNER definiert als ein Wechsel zwischen Konkretisierung und Abstraktion, zwischen Analyse und Synthese sowie der Erweiterung und Eingrenzung des möglichen Such- und Lösungsraumes [DoD-1987].

Eine weitere Aufteilung des Entwicklungsprozesses nach KOLLER sieht in jeder Phase der Produktentwicklung eine Synthese und Analyse vor. Die Entwicklung erfolgt dabei in sechs Konstruktionschritten mit jeweils dazugehörigen Regeln, die zu erfüllen sind [KoK-1998]. Die sechs Arbeitsschritte des Entwicklungsprozesses sind in die vier Phasen Klärung der Aufgabenstellung, Funktionssystemsynthese, qualitative und quantitative Synthese unterteilt [ScG-2012].

Aufbauend auf der Sichtweise, dass es sich bei einem Entwicklungsprozess um ein Problemlösungsverfahren handelt, kann dieser auch als eine Abfolge von Problemlösungszyklen verstanden werden (Abbildung 2-16) [WeB-1999].

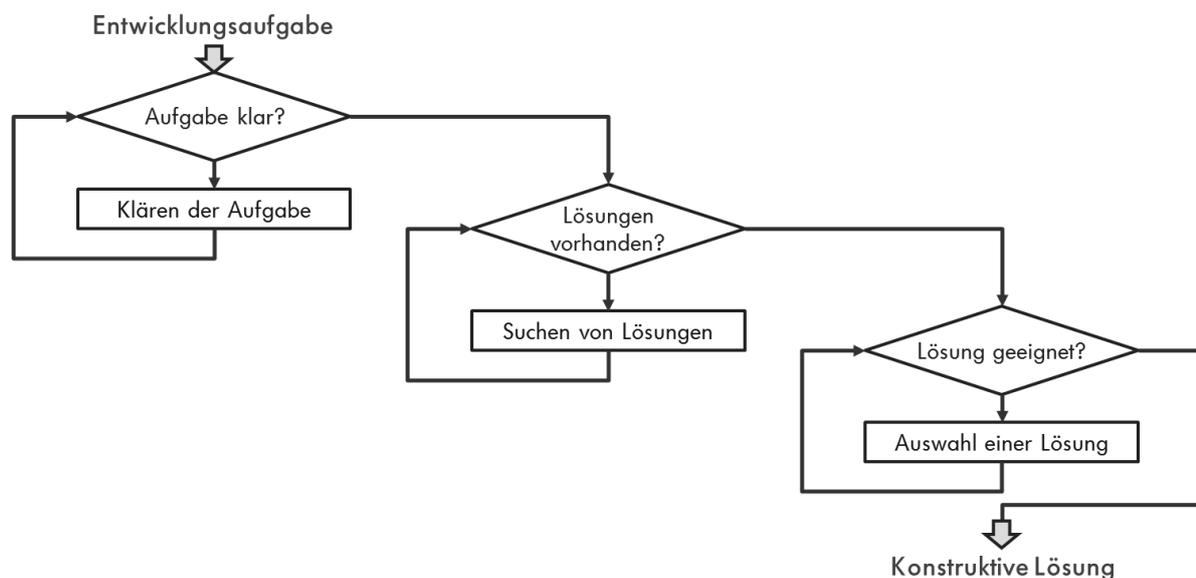


Abbildung 2-16 Allgemeiner Entwicklungsprozess aus [WeB-1999]

Der Kern der Zyklen basiert im Wesentlichen auf dem TOTE-Schema von MILLER, GALANTER, PRIBRAM (vgl. [MGP-1960]), die es in Anlehnung zur Kybernetik aufgestellt haben (Abbildung 2-17).

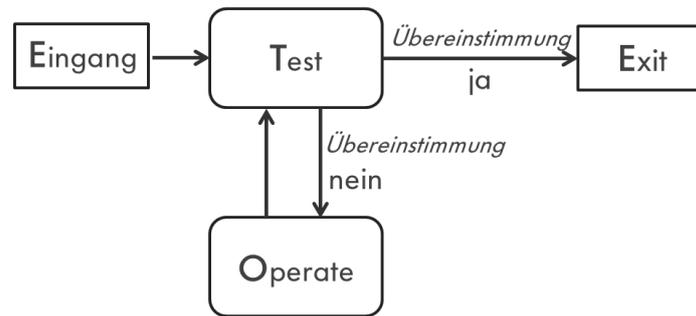


Abbildung 2-17 TOTE-Schema nach [MGP-1960]

Aufbauend auf einem Entwicklungsprozess im Verständnis von Synthese und Analyse sowie der Abfolge von Problemlösungszyklen nach dem TOTE-Schema hat WEBER einen Regelkreis für den Produktentwicklungsprozess aufgestellt (vgl. [VWB-2009]). Dieser besteht aus vier im Prozess wiederkehrenden Schritten:

1. Das Umsetzen einer Anforderungsliste der geforderten Produkteigenschaften in einem Syntheseschritt in die wesentlichen Produktmerkmale.
2. Die Analyse der Produkteigenschaften und das Ergänzen weiterer relevanter Eigenschaften.
3. Der Abgleich von Soll-/Ist-Eigenschaften und die Bestimmung der einzelnen Abweichungen.
4. Das Erkennen der wesentlichen Problempunkte des Entwicklungsstandes (z.B. Eigenschaften mit einer großen Soll/Ist Differenz) und deren weitere Bearbeitung.

Diese beschriebenen Schritte wiederholen sich solange, bis alle Merkmale der Lösungen spezifiziert sind. Alle Eigenschaften der Produktlösung können dann mit einer hinreichenden Sicherheit und Genauigkeit bestimmt bzw. vorhergesagt werden und die erzielten Eigenschaften (Ist) liegen nah an den geforderten Eigenschaften (Soll) [VWB-2009].

Dieser Produktentwicklungsprozess als Regelkreis entspricht der in dieser Arbeit vertretenen Auffassung, da dieser einen für technische Produkte typischen vorwärts gerichteten Arbeitsfluss mit Wiederholungszyklen zur weiteren Produktoptimierung hat. Veränderungen der Anforderungen werden über den Entwicklungszeitraum berücksichtigt, es sind Bewertungs-, Auswahl- und Entscheidungsprozesse in diesem Verfahren integriert.

2.4.3 Produktentwicklungsmethoden und –verfahren

Je nach Produkt, Industriezweig und möglicherweise auch dem Hintergrund der Ausbildung der Entwickler in den einzelnen Unternehmen, werden eine Vielzahl von Konstruktionsmethoden und -verfahren zur Produktentwicklung angewandt. Ziel einer jeden Methode ist es, den Entwickler methodisch bei der Lösungsfindung und dem Erstellen des Produktes zu unterstützen. Im Folgenden wird eine Auswahl von Methoden und Verfahren vorgestellt. Weitere vertiefende Einsichten in Konstruktionsmethoden sind zusammengefasst unter anderem in CLEMENT [CIS-2006], LOSSACK [LRS-2006],

PAHL/ BEITZ/ FELDHUSEN/ GROTE [PBF-2007] oder VAJNA/ WEBER/ BLEY/ ZEMAN [VWB-2009] zu finden.

Das Vorgehen in den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 wurde in Abschnitt 2.4.1 und Abschnitt 2.4.2 schon weitestgehend erläutert. Die iterative Vorgehensweise ist nach der VDI 2221 ein Optimierungsprozess und in Anhang A1 *Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren* dargestellt [VDI 2221]. Der Grundgedanke ist ein generisches Vorgehensmodell [VWB-2009]. In die VDI 2221 und VDI 2222 sind dabei unterschiedliche methodische Ansätze eingeflossen, z.B. von ANDREASEN (vgl. u.a. [AnHe-1987]), EHRENSPIEL (vgl. u.a. [EKL-2005]), HUBKA (vgl. u.a. [HuEd-1992]), RODENACKER (vgl. u.a. [RWG-1991]) und ROTH (vgl. [RoK-2000] und [RoK-2001]). Besondere Berücksichtigung fanden die Ansätze von PAHL und BEITZ und deren Vorgehen von der Funktion über die Wirkprinzipien zu den Gestaltelementen des Produktes (vgl. u.a. [PBF-2007]). Die Bereiche der Lösungsfindung werden in den VDI-Richtlinien 2221/2222 insgesamt vernachlässigt und nur am Rande behandelt [CIS-2006].

2.4.3.1 Axiomatic Design

SUH hat für die Entwicklung von Produkten einen axiomatischen Ansatz entwickelt (Axiomatic Design). Die Rahmenstruktur besteht aus dem Kundenbereich (Customer domain), ordnet sich dann dem Funktionsbereich (functional domain), dem physikalischen Bereich (physical domain) und letztlich dem Prozessbereich (process domain) zu [SNP-2001]. Die Strukturierung in verschiedene Bereiche und damit verbundenen Sichtweisen auf das Produkt soll den Prozess der Produktgestaltung systematisieren.

Das Entwickeln bezieht sich im Wesentlichen auf einen Transformationsprozess. Dieser erfolgt durch das Durchlaufen der genannten Rahmenstruktur, in dem Anforderungen eines Bereiches in den Lösungen des Folgebereiches umgesetzt werden. Es werden dabei gegebene Anforderungen in festgelegte Konstruktionsparameter übersetzt. Am Ende dieses Prozesses soll aus den Lösungen eine Gesamtentwurfsmatrix entstehen [VWB-2009].

Im Mittelpunkt der Theorie stehen zwei Axiome, das Eigenständigkeits-Axiom (Independence Axiom) und das Informations-Axiom (Information Axiom). Das Eigenständigkeits-Axiom legt die Eigenständigkeit der Anforderungen in der bereits genannten Rahmenstruktur fest. Das Informations-Axiom beinhaltet das Vereinfachen des Informationsgehalts im Entwicklungsprozess. Im Konstruktionsprozess ergeben sich durch die Anwendung der Axiome verschiedene Theoreme und durch die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen eine hierarchische Lösungsstruktur [SNP-2001].

Ein neuerer Ansatz auf Basis des Axiomatic Design ist die C-K design theory (C-K für concept-knowledge) von HATCHUEL und WEIL. In dieser geht es um die wechselseitige Erweiterung eines Konzept- (Lösungsraum / Concept) und eines Wissensraumes (Analyse / Knowledge). Die C-K-Theorie wird dabei den anderen Konstruktionstheorien als übergeordnet betrachtet. Im Fokus steht, die unterschiedlichen Arten von Kreativität in einem Modell zu erklären und Lösungen bzw. die Entschei-

dungen, auch unter unvollständigem Wissen zu generieren. Dabei unterstützt ein Konstruktionsquadrat, welches sich aus insgesamt vier Operatoren zusammensetzt. Dieses sind die internen Operatoren $C \rightarrow C$ und $K \rightarrow K$ sowie die externen Operatoren $C \rightarrow K$ und $K \rightarrow C$. Letzterer Operator stellt den Beginn des Konstruktionsprozesses dar [HaWe-2003], [LRS-2006], [VWB-2009].

2.4.3.2 Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften

Die Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften basiert auf der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Sichtweise von Eigenschaften und Merkmalen sowie auf dem in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Konstruktionsprozess als Regelkreis.

Nach WEBER setzen sich Produkte aus Baugruppen, Unterbaugruppen und diese wiederum aus Bauteilen zusammen. Die genannten Bereiche lassen sich nach ihrer Position und Orientierung im Produkt unterscheiden. Es wird deren volumetrische Orientierung im Bauraum definiert. Bauteile können darüber hinaus nach Geometrie-, Oberflächen- und Werkstoffparametern differenziert werden. Zusätzlich können Toleranzen für die Bauteile vergeben werden. Aus diesen aufgezeigten Zusammenhängen ergeben sich die Merkmale und im weiteren Sinne die Gestalt und Funktion eines Produktes. Der Entwickler kann nur die Merkmale in einer gewissen parametrischen Bandbreite bestimmen und damit eine Wirkung auf die Eigenschaften erzielen [VWB-2009].

Aus den Anforderungen an das Produkt bzw. dem jeweilig gewünschten Verhalten des Produktes in den einzelnen Lebensphasen (Soll-Eigenschaften) werden die Merkmale des Produktes im Lösungsraum durch eine geeignete Synthesemethode hergeleitet (Synthese –Abbildung 2-18). Über die Eigenschaften wird das Produktverhalten beschrieben bzw. vorhergesagt, insofern es physisch noch nicht aufgebaut ist. Über Analyseschritte kann, je nach Entwicklungsstand des Produktes, real oder virtuell das Verhalten und damit die jeweiligen Eigenschaften aufgezeigt werden (Analyse -Abbildung 2-18).

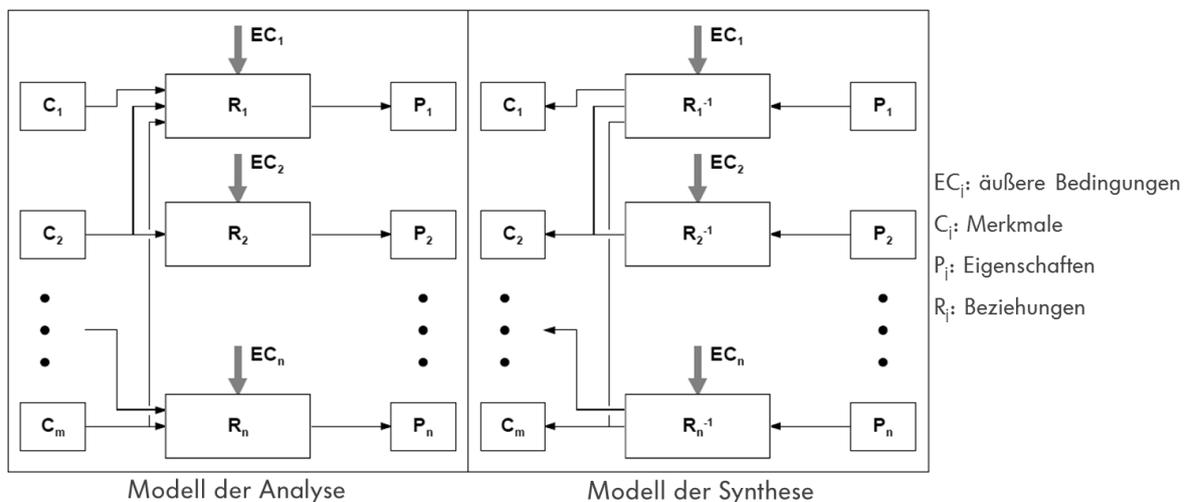


Abbildung 2-18 Modell der Analyse und Synthese in der Produktentwicklung [WeW-2001]

Nach WEBER resultieren somit die Eigenschaften aus den Merkmalen, die vom Entwickler festgelegt werden. Es müssen also die richtigen Merkmale festgelegt werden, um die gewünschten Funktionen und Eigenschaften des Produktes zu erhalten [VWB-2009]. Dies entspricht dem entgegengesetzten Weg von PAHL und BEITZ (vgl. [PBF-2007]). Der Zusammenhang zwischen Merkmalen und Eigenschaften ergibt sich über eine dazwischen liegende Netzwerkstruktur (Abbildung 2-18, eine genauere Vorgehensbeschreibung steht im Anhang A2 *Beschreibung der Analyse und Synthese in der Produktentwicklung nach WEBER* zur Verfügung) [VWB-2009] [WeW-2001].

WEBER versucht in seinem Ansatz der Produkt- und Prozessmodellierung die stark formalisierte frühe Phase der Produktentwicklung mit den Aktivitäten und Ausarbeitung in der Serienkonstruktion ineinander übergehen zu lassen, ohne etwaige Brüche im Prozess entstehen zu lassen. Dies ermöglicht insbesondere in der frühen Entwicklungsphase einfache Regeln, Erfahrungswissen und Intuition sowie in der Serienentwicklung komplexe mathematische Modelle nutzen zu können, ohne einen Bruch im Entwicklungsprozess zu verursachen [VWB-2009] [WeW-2001].

2.4.3.3 Autogenetische Konstruktionstheorie

Die autogenetische Konstruktionstheorie basiert auf der Idee der Evolution in der Natur. Die natürliche Selektion basiert dabei auf der unterschiedlichen Fitness der Einheiten (englisch fitness: Eignung, Tauglichkeit) untereinander. Die an die gegebenen Rand- bzw. Umweltbedingungen am besten angepassten Einheiten (fittesten) vererben die Gene an die Folgegeneration. Dabei ist die Gesamtfitness einer Einheit umso größer, je höher ihr relativer genetischer Anteil in den Folgegenerationen ist [ZSM-2009].

In der Natur unterliegt die Evolution einem Selbstorganisationsprozess, wohingegen in der Technik evolutionäre Entwicklungen nur durch das bewusste Handeln von Menschen möglich sind [WeB-1999]. Der evolutionäre Prozess einer Entwicklung ist auch in den deskriptiven und präskriptiven Konstruktionsprozessen (z.B. KOLLER u.a. [KoK-1998], ROTH u.a. [RoK-2000] und [RoK-2001], HUBKA u.a. [HuEd-1992], PAHL und BEITZ u.a. [PBF-2007]) enthalten. In diesen Theorien ist als Problemlösungsstrategie die kontinuierliche Verbesserung der Lösungsvariante als quasi evolutionärer Lösungsfindungsprozess implementiert. Die Autogenetische Konstruktionstheorie beruht im Folgenden auf den Ansatz von VAJNA und BERCSEY (vgl. [BeV-1994]) bzw. dessen Weiterentwicklung (u. a. [BVK-2011] [KHV-2012] [VaB-1995] [VCJ-2005]). Sie basiert auf der Annahme, dass es einen kontinuierlichen Entwicklungsprozess von Objekten, Techniken und Technologien in Analogie zur biologischen evolutionären Entwicklung gibt. Die evolutionären Methoden sollen in der Produktentwicklung zu Nutze gemacht werden. Dabei werden die Gene eines Bauteils von einer „Entwicklungs-“ Generation zur nächsten weitergegeben. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist immer eine Menge gleichwertiger, aber nicht gleichartiger Lösungen [VWB-2009].

Charakteristisch für die biologische Entwicklung ist dabei die kontinuierliche Entwicklung und permanente Anpassung an die Umwelt. Die Entwicklungsziele können sich mit der Zeit aufgrund von

geänderten Anforderungen, Ressourcen, Startvoraussetzungen, Grenzen oder Randbedingungen verändern und sich auch widersprechen [BeV-1994] [BVK-2011].

Die Evolutionsperspektive in der Produktentwicklung basiert dabei auf folgendem Verständnis (vgl. [BVK-2011]):

- In jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses werden verschiedene, untereinander konkurrierende Alternativen entwickelt und verglichen.
- Der für die Biologische Entwicklung typische Prozess von Suchen, Bewerten, Auswählen und Kombinieren wird umgesetzt.
- Ein vergleichbares Vorgehen zum TOTE-Schema (vgl. Abbildung 2-17) wird umgesetzt, um neue Lösungen zu erzeugen oder bestehende zu verändern.
- Die Entwicklung ist durch die Kreativität des Entwicklers beeinflusst, was dazu führen kann, dass der Produktentwicklungsprozess als chaotischer Prozess wahrgenommen wird.

Die Autogenetische Konstruktionstheorie erfolgt innerhalb des Entwicklungsprozesses in zwei Stufen. In der ersten Stufe werden Zielfunktionen und der Lösungsraum beschrieben. Innerhalb des Lösungsraumes werden mögliche Lösungen gesucht, bewertet, ausgewählt und kombiniert bzw. optimiert und am Ist-Zustand die Fitness gegenüber den Anforderungen bestimmt. In der zweiten Stufe werden Eigenschaften der hervorgegangenen Lösung über die entsprechenden Merkmale geändert. Die Auswahl erfolgt z.B. über die Analyse (fitness) der Parameter der bewerteten Lösung. Die weitere Produktoptimierung erfolgt mit den Schritten Entwickeln (creation), Bewerten (evaluation) und Aktualisieren (updating) und wird als dauernde Anpassung und Optimierung zu einem Gesamtziel verstanden (Abbildung 2-19). Der Entwicklungsschritt (creation) steht dabei in Bezug zu den Evolutionsfaktoren Selektion, Rekombination, Replikation und Mutationen [BeV-1994] [BVK-2011] [VWB-2009].

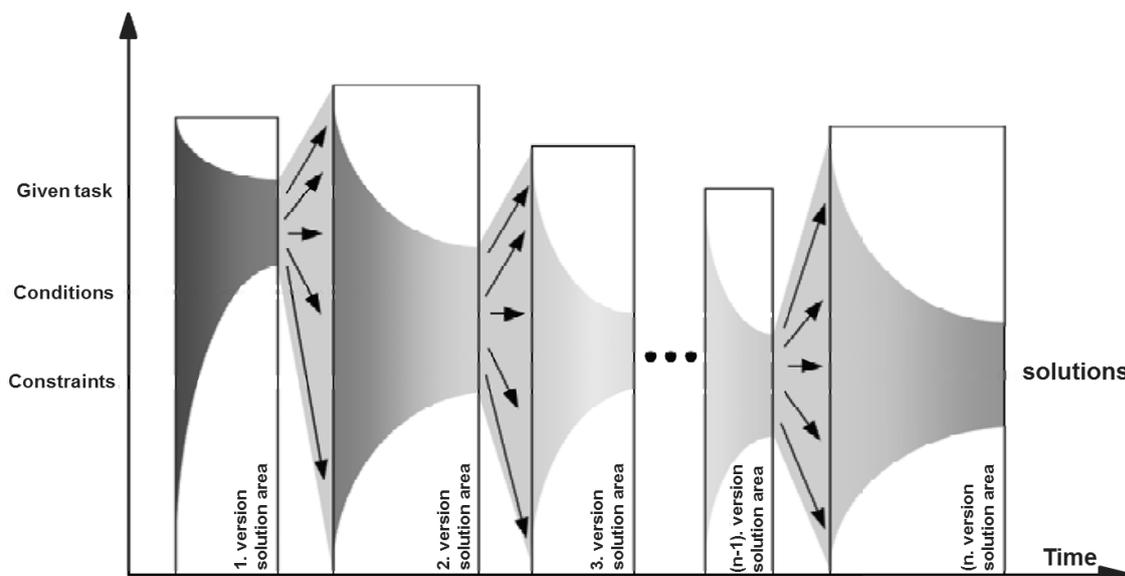


Abbildung 2-19 Lösungsraum in der Autogenetischen Entwicklungstheorie [KKV-2009]

Die Autogenetische Konstruktionstheorie zwingt den Entwickler somit nicht zu einem sequentiellen Vorgehen, sondern überlässt diesem die Vorgehensweise im Konstruktionsprozess entsprechend sei-

nem z.B. selektiven und adaptiven Verhalten und unterstützt den disziplinübergreifenden Wissenserwerb [CIS-2006].

2.4.4 Werkzeuge und Hilfsmittel in der Produktentwicklung

Dem Entwickler stehen verschiedene Werkzeuge und Hilfsmittel (Methoden und individuelle Kompetenzen) für die unterschiedlichen Phasen im Entwicklungsprozess zur Verfügung. Sie können über den gesamten Produktentstehungsprozess angewendet werden. Folgende Stadien in einem Entwicklungsprozess werden im Weiteren betrachtet:

- Ideenfindung,
- Lösungskombination und Auswahlmethoden,
- Bewertung der Ergebnisse.

Im Folgenden werden beispielhafte Werkzeuge und Hilfsmittel zur Erläuterung aufgezeigt. Im Entwicklungsprozess selber kann es dem Anwender überlassen oder durch die gewählte Methodik vorgeschrieben sein, welche Werkzeuge und Hilfsmittel der Anwender verwenden muss oder möchte.

Die Ideenfindung findet z.B. auf Basis von Kreativitätstechniken statt. Dazu zählen das Affinitätsdiagramm, das Brainstorming, die Methode 635 oder das Mind-Mapping (vgl. [LiG-2005]).

- Beim Affinitätsdiagramm werden Ideen zu einem Sachverhalt oder zu einer Frage nach ihrer Beziehung betrachtet und gruppiert. Es soll so eine hohe Anzahl unstrukturierter Ideen, Fakten und Meinungen kanalisiert werden.
- Das Brainstorming ist eine der bekanntesten Kreativitätstechniken. Hier geht es darum die Ideenfindung in einer Gruppe unter dem zeitlichen Aufschub von Kritik, also zuerst dem Prinzip Quantität vor Qualität folgend, durchzuführen.
- Die Methode 635 ist eine schriftliche Form des Brainwriting und dient der schriftlichen Ideenfindung innerhalb einer Gruppe. Die Ideenfindung erfolgt über strukturierte Karten und deren sequentiellen Umlauf innerhalb der Gruppe.
- Das Mind-Mapping ist eine universelle Notiz- und Ideenfindungsmethode, in deren Zentrum eine bestimmte Fragestellung oder ein Thema steht. Ausgehend von der Fragestellung werden Gedanken aus der Gruppe gesammelt und diese Stichworte über Äste visuell dem Hauptthema zugeordnet.

Lösungskombination und Auswahlmethoden sind zumeist nötig, um Problemstellungen im Entwicklungsprozess zur Erreichung des Lösungsziels überwinden zu können. Diese Hindernisse ergeben sich zwischen einem zu überwindenden Anfangszustand und dem erwünschten Endzustand. Hindernisse können Interpolations-, Kombinations- und Auswahlprobleme sein, die sich aus einer Vielzahl von Lösungskombinationen und der Komplexität des technischen Systems ergeben. Es kann auch ein Such- oder Anwendungsproblem bestehen, welches sich aus vagen oder unscharf formulierten Zielen ergibt. Des Weiteren gibt es Synthese- oder Operatorprobleme, bei denen die Mittel zur Transformation nicht bekannt sind.

PAHL und BEITZ [PBF-2007] differenzieren die Lösungsmethoden in konventionelle, intuitive und diskursive. Diese Methoden können nicht einzeln, sondern nur im Kontext des Entwicklungsprozess und je nach der Problemstellung angewendet werden:

- Konventionelle Methoden sind z.B. die Literaturrecherche oder die Adaption bekannter technischer Systeme.
- Intuitive Methoden, zu denen das Brainstorming gehört, basieren auf der individuellen Idee einer Gruppe oder eines Einzelnen.
- Diskursive Methoden der Problemlösung, zu denen z.B. der morphologischer Kasten nach ZWICKY (vgl. [ZwF-1966]) gehört, ermöglichen die Lösungsfindung auf Basis einer bestimmten Vorgehensweise.

Zur Entwicklung der Synthese kann der Entwickler auf seine Fähigkeiten zurückgreifen oder es können ihm verschiedene Methoden und Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden [VWB-2009]. Dazu gehören

- menschliche Genialität,
- Assoziation,
- Erfahrung,
- Kataloge, Anwendung von Standardlösungen,
- Regelwerke, methodisch/systematische Vorgehensmodelle,
- invertierte Berechnungsverfahren und
- rechnerbasierte Methoden und Werkzeuge.

Um Produkteigenschaften vorhersagen zu können, gibt es verschiedene Ansätze von informellen bis formalisierten Charakter [VWB-2009]. Dazu gehören

- Schätzungen,
- Erfahrungen,
- Befragungen (z.B. Delphi-Expertenbefragung [SAK-2005]),
- experimentelle Bestimmungen,
- Tabellen und Diagramme,
- Berechnungen und
- rechnerbasierte Simulationen.

Bewertungsverfahren beziehen sich auf ein Verhältnis von Eigenschaften und Lösungen. Dies bedeutet, dass nicht einzelne Aspekte, sondern ein mögliches passendes Verhältnis zu den Anforderungen im Vordergrund steht.

Ein Hilfsmittel zum Aufstellen von Anforderungen und die Betrachtung von Alternativen ist die Szenarioanalyse bzw. Szenariotechnik [EnW-2006] [GPW-2009] [ZCZ-2006]. Diese versucht, in verschiedenen Formen durch systematische Analyseschritte ganzheitliche Handlungsoptionen abzuleiten. Weitere Möglichkeiten zum Strukturieren von Anforderungen sind die Klassifizierung von Anforder-

rungen nach Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen sowie die Korrelationsmatrix [EnW-2006] [PoL-2011] [ZCZ-2006]. In der technischen Produktentwicklung gibt es verschiedene transparente und reproduzierbare Bewertungsverfahren. Im Folgenden werden die Nutzwertanalyse, die Bewertung nach der VDI 2225 und die binäre Bewertung vorgestellt. Die Kriterien für eine Bewertung leiten sich aus den Anforderungen und Zielen an das technische Produkt ab, welche am Anfang des Entwicklungsprozesses aufgestellt und über den Entwicklungsprozess erweitert oder korrigiert werden können. Ergebnisse der Bewertung stellen immer nur einen Standpunkt zum jeweiligen Zeitpunkt der Erstellung dar und lassen subjektive Einflüsse durch den Bewertenden zu.

- Die Nutzwertanalyse ist ein Punktbewertungsverfahren zur qualitativen Bewertung verschiedener Alternativen. Bei der Nutzwertanalyse wird nach ZANGEMEISTER auf Basis der Systemtechnik nicht nur eine eindimensionale ökonomische Investitionsrechnung, sondern eine mehrdimensionale sozial-ökonomisch-technische Betrachtung zur Entscheidungsfindung herangezogen [ZaC-1976]. Dabei werden die möglichen Alternativen in eine einheitliche quantitative Nutzenskala transformiert.
- Die VDI 2225 stellt eine weitere Variante der Nutzwertanalyse dar, sie beruht auf einer umfangreichen Datenbasis, die Zeit zur Erarbeitung braucht [SLH-2006]. Auch hier sind die Kriterien aus den Anforderungen abzuleiten, die nach technischen und wirtschaftlichen Kategorien gruppiert werden [VDI 2225]. Jedes Kriterium wird mit einer Punktzahl bewertet. Die Summe der Punkte wird mit einer Alternative bzw. mit der Maximalpunktzahl einer idealen Variante ins Verhältnis gesetzt. Das Ziel ist die Auswahl einer Alternative mit einer ausgewogenen Wertigkeit zwischen wirtschaftlichen und technischen Ansprüchen [SAK-2005]
- Die binäre Bewertung stellt eine einfache und insbesondere in der Konzeptphase gut einsetzbare Bewertungsmethode dar. Es handelt sich um einen Grobvergleich bei dem die Alternativen paarweise verglichen und binär entschieden wird (ja/nein). Die Kriterien werden dabei aus den Anforderungen hergeleitet. Das Ergebnis des Vergleichs kann in einer Dominanzmatrix dargestellt werden [PBF-2007].

3 Grundlegende Auslegungsmaßnahmen von elektrifizierten Fahrzeugen

Die Auslegung von elektrifizierten Fahrzeugen unterscheidet sich grundsätzlich nicht von der konventioneller Fahrzeuge. Im Wesentlichen sind fünf technische Hauptpunkte zu nennen, die Berücksichtigung von Kosten wird in diesem Kapitel noch zurückgestellt. Da jede Auslegungsrichtung finanziellen Restriktionen unterworfen ist, werden diese in Relation zueinander in Kapitel 4 behandelt werden. Die technische Auslegung erfolgt nach

1. einem ergonomischem Maßkonzept und Bauraum optimierter Bauteilintegration,
2. fahrtechnischer Eigenschaften,
3. Verbrauchs- und CO₂- Reduktion,
4. der Fahrzeugsicherheit und
5. Design nach technischen Prämissen und stilistischem Anspruch.

Diese grundlegenden Punkte sind dabei nicht singulär zu sehen. Fahrzeuge mit hohen Stückzahlen werden in Abhängigkeit der genannten Punkte entworfen. In Abhängigkeit des Entwicklungszieles kann einer bestimmten Entwicklungs-/ Auslegungsrichtung Vorrang gewährt werden, da sich einzelne Punkte technisch widersprechen können. Beispielsweise ist ein Geländewagen massiv und stabil ausgelegt, um entsprechende fahrtechnische Ansprüche zu erfüllen. Darüber hinaus soll dem Kunden das Gefühl für die nötige Wertigkeit und damit Vertrauen geben werden. Diese Auslegung widerspricht aber einem stromlinienförmigen Aufbau, der größere Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsziele erfüllen könnte.

Zu den oben genannten Punkten kommt bei der Auslegung elektrifizierter Fahrzeuge ein sechster hinzu:

6. Elektrotechnische Auslegung des Antriebes und damit der Fahrzeugbodengruppe.

Bei genauerer Betrachtung hat ein elektrischer Antrieb im wesentlichen Einfluss auf das Fahrzeugkonzept, da neben dem elektrischen Motor fahrzeugseitig ausreichende Batteriekapazität untergebracht werden muss, welche einen erhöhten Raumbedarf hat und zusätzliches Gewicht ins Fahrzeug bringt.

In den folgenden Abschnitten werden die grundlegenden Auslegungsrichtungen erläutert, wobei insbesondere die elektrotechnische Auslegung in den Vordergrund gerückt wird.

3.1 Auslegung hinsichtlich des Maßkonzeptes und der Bauteilintegration

Ein Pfeiler des Fahrzeuggrundkonzeptes ist das Maßkonzept, durch das Aufbauausprägung, Fahrzeuggrundform, Anzahl der Sitzplätze, Raumbedarf der Insassen, Stauraum, Hauptabmessungen sowie die Motorlage definiert werden. Dieses Grundkonzept wird dann durch eine ständige Detaillierung des Package (geometrische Anordnung aller Bauteile in einem Fahrzeug) weiterentwickelt. Dabei muss die technische Umsetzbarkeit des Produkts mit den Modulen und Komponenten ständig hinsichtlich Kundenrelevanz und gesetzlicher sowie technischer Anforderungen geprüft werden. Die dadurch entstehenden Zielkonflikte zwischen Bauraum und technischen Möglichkeiten sind so zu bearbeiten, dass

es eine kompatible geometrisch-technische Lösung gibt. Die Fahrzeuggrundform ist hier dem Design zugeordnet, womit im Wesentlichen folgende geometrische Bauräume zu definieren sind [BrS-2013]:

- Außenabmessung,
- Innenraumabmessung,
- Sitzigkeit⁷ und Gepäckraum,
- Lage des Aggregates bzw. des Antriebsstranges.

3.1.1 Maßkonzept

In diesem Abschnitt sollen dabei nur die für die Elektromobilität wichtigsten Maße aufgezeigt werden. Grundsätzlich wird ein Fahrzeug im dreidimensionalen Raum in die jeweiligen Ebenen geschnitten (Abbildung 3-1) [DIN-4130].

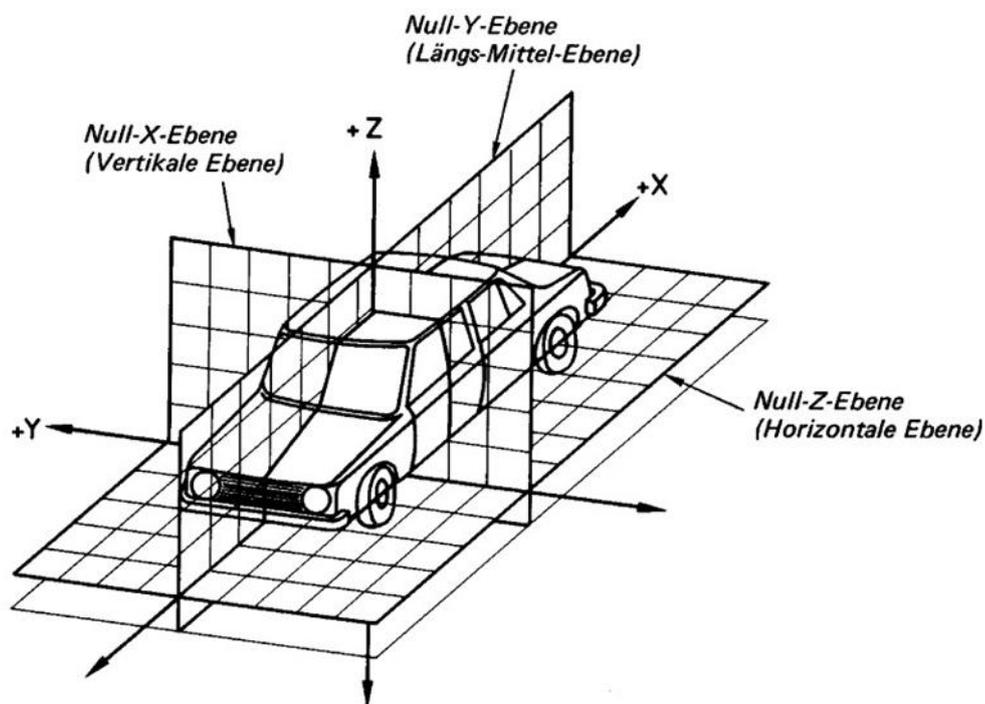


Abbildung 3-1 Dreidimensionales Fahrzeugbezugssystem [DIN-4130]

Darauf aufbauend findet das Maßkonzept seine Anwendung. In diesem wird die technisch-geometrische Form des Fahrzeuges bestimmt und die Position der im Fahrzeug befindlichen Personen definiert. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der ergonomischen Ausrichtung in Abhängigkeit des gewählten ergonomischen Perzentil der Bevölkerung [DIN 33402-2] und z.B. der gewünschten Rundumsicht des Fahrers. Die Maße werden nicht mehr in x , y , z angegeben, sondern in L (Länge für x), W (Breite für y) und H (Höhe für z). Dazu bekommt jedes Maß eine Kennzahl und wird explizit definiert (siehe Anhang *BI Definition der Maße des Maßkonzeptes für Fahrzeuge*). Die Zahlen zwischen 1 bis 99 stehen für Innenmaße, von 100 bis 199 für Außenmaße und von 200 bis 299 für Gepäckraummaße [AsM-2007].

⁷ Mit Sitzigkeit ist in diesem Zusammenhang die Anzahl und Anordnung der Sitze für Fahrer und Mitfahrer gemeint.

Da einige Maße last- bzw. gewichtsabhängig sind, wird zwischen verschiedenen Messlasten differenziert:

- Messlast 1 ist das Leergewicht des Fahrzeuges für den normalen Fahrbetrieb, wie vom Hersteller vorgesehen.
- Messlast 2 ist das Konstruktionsgewicht, welches sich aus der Summe des Leergewichtes und einer nach Fahrzeuggröße definierten Anzahl von Personen zusammensetzt.
- Messlast 3 ist das zulässige Gesamtgewicht, welches mit der Fahrzeugzulassung übereinstimmt.

In der frühen Konstruktionsphase ist das Gesamtgewicht des Fahrzeuges schwer abschätzbar, somit müssen Maße der Messlast 1 herangezogen werden. Zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt ist es ratsam, das Fahrzeug auf Basis der maximalen Belastung, also Messlast 3, auszulegen [DIN-70 020]. Zur Positionsbestimmung der Fahrzeuginsassen werden diese über einen H-Punkt in ihrer Lage definiert. Dieser Punkt liegt in der Mittelebene des Insassen, in der Drehachse zwischen Beinen und Rumpf. Ein besonderer Konstruktions-H-Punkt⁸ ist der R-Punkt⁹. Dieser wird vom Hersteller als Konstruktionsreferenzpunkt angegeben und bezieht sich auf die hinterste normale Konstruktionsfahrposition für jeden Sitzplatz des Fahrzeuges. Der Bezugspunkt ist dabei mit einer 95 Perzentil-Mann-Beinlänge auszulegen, in dieser geometrischen Anordnung befinden sich H- und R-Punkt in ein und demselben Punkt (Abbildung 3-2) [DIN-70020]. Zur Definition der Insassen im Fahrzeug sind die im linken Teil von Abbildung 3-2 gezeigten Maße ausreichend.

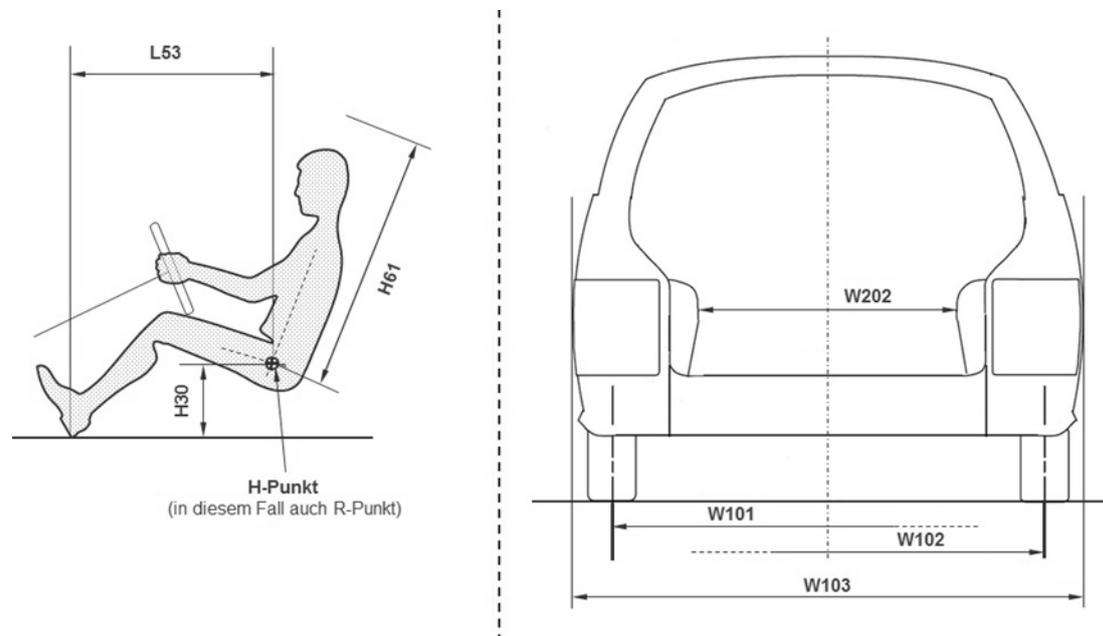


Abbildung 3-2 Maße Person im Fahrzeug und X-Ebene Fzg. nach [AsM-2007]

⁸ Der H-Punkt ist der Hüftpunkt bezogen auf Sitz und Sitzposition (vgl. [GJN-2006]).

⁹ Der R-Punkt steht für SRP (Seat Reference Point) und ist ein gesetzlich definierter Punkt (vgl. [GJN-2006]).

Das Maß H30, die Sitzhöhe des Fahrers, zeigt in Verbindung mit dem Maß H156 (Abbildung 3-3) das Potential des Bauraumes zwischen Sitz und Bodenblech. Über das Maß H5 (Abbildung 3-3) lässt sich die Sitzhöhe und damit zwischen hoch- und tiefaufbauenden Fahrzeugen differenzieren.

Im Y-Schnitt zeigt das Maß L103 die Gesamtlänge des Fahrzeuges auf, die Maße L104/105 die Überhänge vorn und hinten. Letztere sind aus Crashesicht interessant, da der potentielle Deformationsweg aufgezeigt wird. Die Höhe des Fahrzeuges gibt H100 wieder. In Verbindung mit dem Maß W103, der Fahrzeugbreite ohne Außenspiegel, ergibt sich eine grobe Fahrzeugfläche. Zur Berechnung für eine Anströmfläche der c_w -Berechnung wäre dieser Wert sehr ungenau, da die Fahrzeugsilhouette nicht kantig verläuft und zumindest die Bodenfreiheit unter dem Fahrzeug noch Berücksichtigung finden müsste. Im Bereich des Kofferraums wird der mögliche Stauraum im Fahrzeug durch L210 und W202 aufgezeigt. Die Höhe der Ladekante des Kofferraumes bzw. die maximale Höhe des Bodens des Gepäckraumes wird mit H195 angegeben. Die Höhe zwischen der Standfläche und dem tiefsten Punkt des Kofferraumbodens wird mit dem Maß H250 angegeben. Die Höhe des Gepäckraums, bezogen auf den höchsten Punkt der Hintersitzlehne und den tiefsten Punkt des Kofferraums, wird mit dem Maß H252 angegeben.

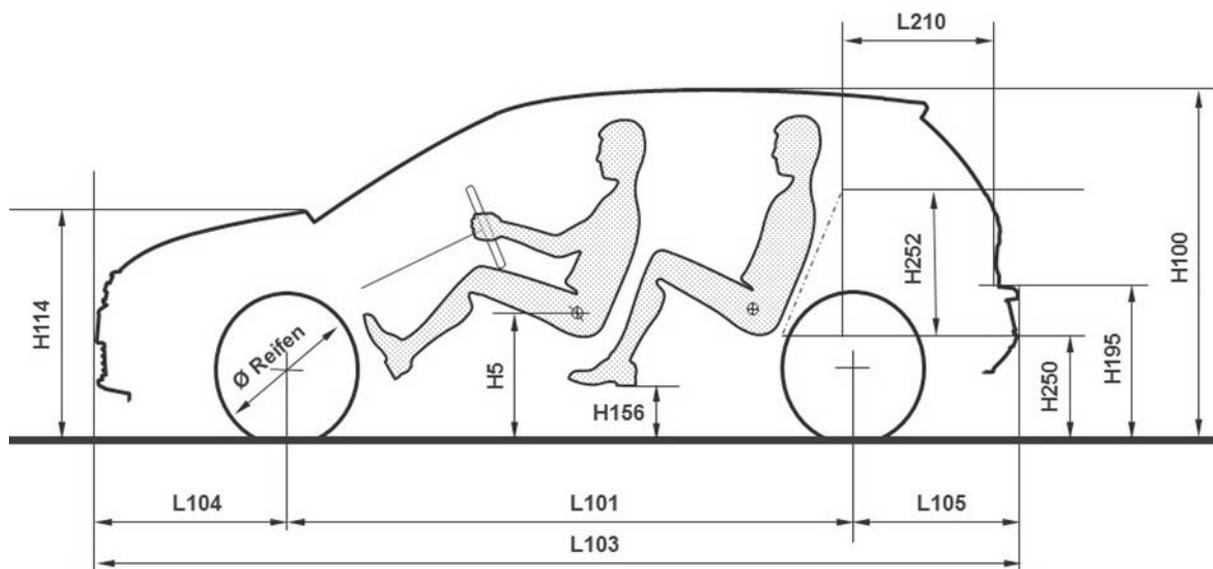


Abbildung 3-3 Maße Y-Ebene

Die Spurbreite der Fahrzeuge wird durch die Maße W101 für die Frontachse bzw. W102 für die Hinterachse aufgezeigt. Im Innenraum wird die Sitztiefe mit L9 und L16 in der ersten und zweiten Sitzreihe bestimmt. Die Sitzpolsterbreite wird mit W16 bemessen. Die Ellenbogenbreite in der ersten und zweiten Sitzreihe wird über W10 sowie W11 bestimmt (Abbildung 3-4).

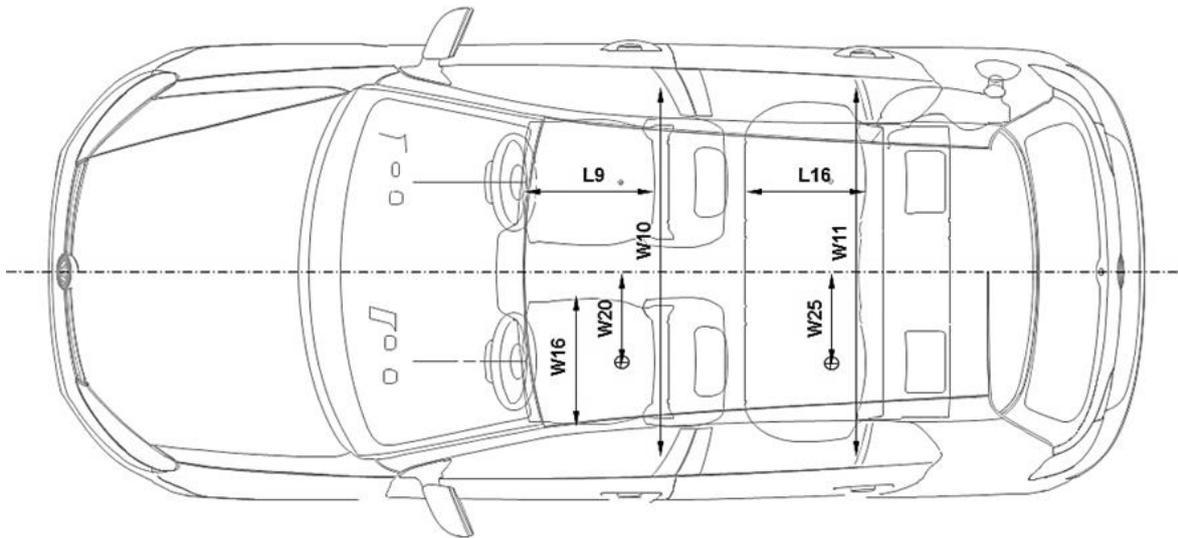


Abbildung 3-4 Maße Z-Ebene

Für die Geländegängigkeit der Fahrzeuge sind die in Abbildung 3-5 gezeigten Maße von Bedeutung. Off-Road-Fahrzeuge müssen bestimmte Kriterien erfüllen, um als solche zugelassen werden zu können. Dazu gehören beispielsweise nach der Gesetzgebung in den USA [CFR 86-2004]:

- Böschungswinkel vorn (H106/H117) $\geq 28^\circ$
- Böschungswinkel hinten (H107/H118) $\geq 20^\circ$
- Bodenfreiheit (Fahrzeug / H156) ≥ 20 cm
- Bodenfreiheit (Achsen) ≥ 18 cm
- Rampenwinkel (H147) $\geq 14^\circ$

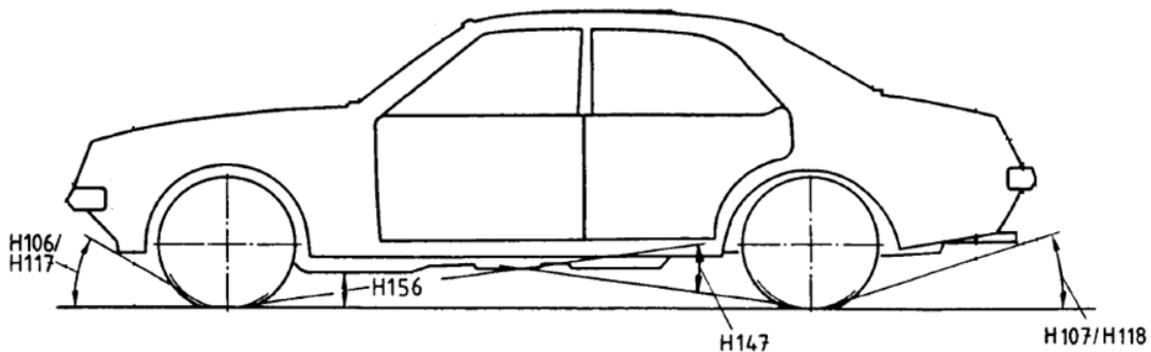


Abbildung 3-5 Maße zur Bestimmung der Geländegängigkeit (nach [DIN-70 020])

3.1.2 Bauteilintegration

Nachdem das Fahrzeug durch ein Maßkonzept geometrisch bestimmt wurde, muss in diesem Bauraum die nötige Technik untergebracht werden. Dabei ist die vorderste Prämisse, dem Kunden den größten möglichen Raum zur Verfügung zu stellen. Das bedeutet, dass die Technik in der vorgegebenen Geometrie den kleinsten möglichen Raum einnehmen muss. Die wesentlichen technischen Elemente, die in das Fahrzeug eingebracht werden müssen, sind in Abbildung 3-6 dargestellt.



Abbildung 3-6 Einflussfaktoren auf das Bauteilintegration

Jedes einzelne technische Element nimmt einen geometrischen Raum im Fahrzeug ein und hat dabei eine oder mehrere technische Funktionen zu erfüllen.

- Antriebsmaschine: Diese umfasst die Verbrenner-Aggregate und Elektromaschinen sowie deren Einbaulage. Diese können im Fahrzeug quer oder längs sowie als Front-, Mittel- oder Heckmotor eingebaut werden.
- Sitzanlage: Die Sitzanlage beinhaltet neben den verschiedenen ergonomischen Verstellmöglichkeiten, zusätzliche Komforteinrichtungen (z.B. Sitzheizung) und Sicherheitselemente (Seitenairbag).
- Getriebe: Packageseitig sind für den Antriebsstrang von Hybriden ein Getriebe zu berücksichtigen. Dabei bestehen verschiedene Möglichkeiten der Integration von Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Elektromotor. Beispielsweise können beide Motoren auf einer Antriebswelle in ein Getriebe eingehend oder aber über einzelne Antriebswellen durch ein Getriebe integriert werden. Für rein elektrische Fahrzeuge ist es sowohl möglich, ein Getriebe zur Untersetzung zu nutzen als auch z.B. über die Frequenz des Stromes den Elektromotor zu steuern.
- Abgasanlage: Ist für hybrid Fahrzeuge erforderlich. Zur Abgasanlage gehört neben den Katalysatoren und Schalldämpfern beim Diesel auch ein SCR-Tank. Die Bauteile der Abgasanlage und deren Verrohrung sind hinsichtlich ihrer volumetrischen Ausprägung und einem möglichen thermischen Eintrag in andere Bauteile zu berücksichtigen.
- Energiespeicher: Zum Energiespeicher gehören sowohl die elektrische Speichermedien (z.B. Traktionsbatterie) als auch der Kraftstofftank (für z.B. Vergaserkraftstoff) oder auch Kraftstoffbehälter für Gase.
- Leistungselektronik: Wesentliches Bauteil der Leistungselektronik ist der Wechselrichter oder auch Inverter, der den Spannungsbereich des elektrischen Antriebes determiniert. Dieser dient dazu, den DC-Strom der Traktionsbatterie in AC-Strom für die E-Maschine umzuformen. Die Leistungselektronik könnte somit auch die Funktionen des Ladens übernehmen. Für Syn-

chron-Maschinen wird zur Drehzahlsteuerung zusätzlich ein Frequenzumrichter benötigt. Außerdem müssen sekundäre, zumeist für den Fahrkomfort benötigte elektrische Geräte mit niedrigerer Spannung über einen zusätzlichen DC/DC-Wandler versorgt werden.

- Ladeverfahren: Wird benötigt, um den elektrischen Energiespeicher füllen zu können. Dabei stehen konventionelles Laden mit dem Kabel, induktives Laden oder ein Batteriewechselsystem zur Auswahl. Die Herausforderung liegt darin, diese aus funktionaler und technischer Sicht optimal ins Fahrzeug zu integrieren.
- Antriebsachsen und Lenksystem: Diese müssen entsprechend der Gewichts-, Leistungs- und Komfortanforderungen gewählt werden. Mit Hilfe der Lenkung muss über mindestens eine Achse die Fahrrichtung des Fahrzeuges beeinflusst werden können. Außerdem muss über mindestens eine Achse der Vortrieb des Fahrzeuges die Umsetzung der Antriebsenergie erfolgen. Bei elektrifizierten Fahrzeugen ist darüber hinaus zwischen kombinierte rein mechanischem oder elektrischem Antrieb der Achsen zu differenzieren. Die Achsen müssen über das Fahrzeug so verteilt sein, dass für den Kunden positive Fahreigenschaften erzielt werden (z.B. geringer Wendekreis).
- Klimatisierung: Diese ist bei elektrifizierten Fahrzeugen weitaus komplexer. Es werden, wie bei konventionellen Fahrzeugen auch, ein Hochtemperaturkreislauf für die VKM und jetzt zusätzlich ein Niedertemperaturkreislauf für die thermisch empfindlicheren elektrischen Geräte benötigt. Außerdem muss die Klimatisierung des Innenraums neu gestaltet werden, weil durch rein elektrisches Fahren nur geringe Abwärme aus dem Antriebsstrang zur Verfügung steht. Bei konventionellen Fahrzeugen steht mit der Abwärme des Motors genügend thermische Energie zur Beheizung des Innenraumes bzw. über Generatoren ausreichend elektrische Energie zur Klimatisierung zur Verfügung. Bei elektrifizierten, insbesondere rein elektrischen Fahrzeugen ist zur Klimatisierung nur die elektrische Energie des Energiespeichers verfügbar. Eine hohe Energieentnahme für sekundäre Verbraucher wie die Klimaanlage führt zu weniger Energie für den Antrieb und damit zu einer geringeren Reichweite¹⁰ des Fahrzeuges. Hinsichtlich der Reichweitenoptimierung muss das Ziel eine hohe Effizienz der Sekundärverbraucher, wie z.B. die der Fahrzeugklimatisierung, sein.
- Kabel, Schläuche, Steuerungsverbindungen: Alle genannten Bauteile müssen untereinander zur Ansteuerung verbunden sein. Diese Steuerungsverbindungen zu den einzelnen Geräten müssen dem Nutzer bzw. den Steuergeräten Einfluss auf die jeweiligen Funktionen geben. Bauelemente, die durch den Fahrbetrieb oder die Umgebungseinflüsse thermisch belastet sind und dadurch bedingt ausfallen können, müssen durch geeignete Maßnahmen entlastet werden. Dafür müssen Fluide durchs Fahrzeug, z.B. zum Batteriekasten, geleitet werden. Diese Verrohrung und Verschaltung durch Schläuche und Kabel kann im Anschluss an die Positionie-

¹⁰ Mit Reichweite ist die mögliche zurücklegbare Distanz das Fahrzeug zwischen zwei Orten mit Hilfe des im Fahrzeug verbauten elektrischen Energiespeichers gemeint

rung der Bauteile in den noch freien Bauräumen erarbeitet werden. Eine technische Umsetzbarkeit des Leitungsroutings muss schon bei der Positionierung der Bauelemente berücksichtigt werden.

- Anzeigen und Bedienelemente: Diese bilden die Schnittstelle zwischen Nutzer und Fahrzeug bzw. der Steuerung und des Informationsflusses [RoK-2000]. Anzeigen sind dabei zur allgemeinen Informationsaufnahme und als Auslöser des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses vorgesehen. Die Bedienelemente sind für die Informationsumsetzung durch den Nutzer gedacht und in Kraftfahrzeugen vorwiegend in finger-, hand-, oder fußbetätigte Schnittstellen einzuordnen. Diese orientieren sich in der Auslegung primär an der Fahraufgabe¹¹. Dabei muss bei den Bedienelemente eine schnelle, sichere und genaue Handhabung gewährleistet sein. Bei Bedienelementen muss die nötige Kraft bzw. die Energie zum Betätigen durch den Nutzer berücksichtigt werden [WHW-2012].
- Sicherheitsanforderungen: Ergeben sich z.B. für die spannungsführenden Bauteile und deren Isolierung oder auch hinsichtlich der elektromagnetische Verträglichkeit.
- Gesetzliche Anforderungen: Diese werden durch Gesetze und Verordnungen geregelt, in denen auch Vorschriften für die Zulassung zu Geländegängigkeit oder dem Gesamtgewicht behandelt werden.
- Produktionskonzept: Es stehen verschiedene Produktionskonzepte zur Verfügung, die sich vor allem nach der Produktart und dem Produktionsvolumen richten. Engineer-to-Order (ETO) bedeutet, dass erst mit einem Kundenauftrag eine mit individuellen Spezifikationen mögliche Endmontage beginnt. Diese Variante ist primär für kleine Stückzahlen geeignet. Das Konzept Market-to-Order (MTO) ist eine auftragsspezifische Fertigung, der Kunde hat jedoch keinen Einfluss auf Prozessplanung und Entwicklung. Diese Fertigung eignet sich für Kleinserien. Beim Produktionskonzept Assemble-to-Order (ATO) werden ausschließlich Standardmodule und -teile kundenindividuell verbaut. Es kann so auf marktseitige Sonderwünsche reagiert, jedoch eine Produktion mit hohen Stückzahlen ermöglicht werden. Market-to-Stock (MTS) umfasst die klassische Lagerfertigung, deren Fertigungsvolumen mit Hilfe einer Marktbedarfsprognose gesteuert wird [ScG-2006]. Eine weitere Anforderung der Produktion ist, dass das Package je nach Produktionskonzept und -volumen auch montierbar sein muss. Dabei müssen unter anderem Fügefolgen, Blechdicken, die Montagefolge und der Produktionstakt am Band bei einer Serienproduktion Berücksichtigung finden. Eine spätere Wartung bzw. der Service in der Werkstatt muss mit verhältnismäßigen Kosten und Arbeitsaufwand gewährleistet werden.

3.2 Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften

Fahrtechnische Eigenschaften eines Fahrzeuges sind von einer hohen Varianz geprägt. Dabei sind fahrtechnische Eigenschaften nicht gleich den Gesamtfahrzeugeigenschaften. Es werden bei fahrtech-

¹¹ Als Beispiel für nicht fahraufgabenbezogene Bedienelemente sind z.B. Taster für den Ladevorgang zu nennen.

nischen Eigenschaften nur bewegungsbeeinflussende, also fahrdynamische Kräfte berücksichtigt. Die Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen wird traditionell in Längs-, Quer- und Vertikaldynamik differenziert. Mit Vertikaldynamik ist das Schwingungsverhalten in Richtung der Fahrzeughochachse gemeint, diese hat vor allem Einfluss auf Komfort und Fahrzeugsicherheit. Die Querdynamik beeinflusst das Kurvenverhalten des Fahrzeuges. Die Bewegungsvorgänge in Fahrzeuglängsrichtung werden in der Längsdynamik zusammengefasst, dieses sind die verschiedenen Elemente des Fahrwiderstands sowie die Grenzen der Traktion und des Bremsens [GrF-2011]. Die genannten Punkte sind primär durch das Maßkonzept und Package des Fahrzeuges sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit beeinflusst. Es geht letztendlich um das Fahrgefühl bzw. die Empfindung des Nutzers beim Führen des Fahrzeuges. Dabei stehen nicht nur Fahrdynamik oder Komfort im Vordergrund, sondern z.B. auch der Energieverbrauch (Kraftstoffverbrauch) oder auditive Ansprüche an das Fahrzeug. Der Energieverbrauch ist besonders abhängig von den Fahrwiderständen, die Einfluss auf die Längsdynamik nehmen.

Um einen Vortrieb des Fahrzeuges erzielen zu können, muss der Antrieb den Fahrwiderstand überwinden. Der Gesamtfahrzeugwiderstand ergibt sich aus vier relevanten Widerständen, die im Folgenden vorgestellt werden.

3.2.1 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand (3-1) entsteht, sobald sich ein Körper durch ein Gas bewegt. Dieser wird durch die entstehenden Strömungswiderstände beschrieben. Diese setzen sich aus Druck-, induziertem Reibungs- und innerem Widerstand zusammen [WaH-2005].

$$\text{Luftwiderstand} \quad F_L = \frac{\rho_{Luft}}{2} * c_w * A * v_{Fzg.+Wind}^2 \quad (3-1)$$

Der Druck- und Reibungswiderstand wird vor allem durch den Staudruck vor dem Fahrzeug sowie der Widerstandskraft an der Heckabrisskante bestimmt. Der induzierte Widerstand wird durch die Fahrzeugbewegung und den daraus resultierenden Verwirbelungen hervorgerufen. Dieser Widerstand wird dem Druckwiderstand zugerechnet [HEG-2011]. Ein Teil der anströmenden Luft wird zur Klimatisierung genutzt, dadurch entstehen im Bereich der Lufteintrittsöffnungen des Fahrzeuges Verwirbelungen, Reibung und Ablösungserscheinungen, deren Verluste als innerer Widerstand beschrieben werden. Der Anteil dieses Widerstandes beträgt nur 3% bis 11% am gesamten Luftwiderstand [WaH-2005].

Zur Vereinfachung wird der Einfluss der spezifischen Fahrzeugform für Berechnungen mit einem dimensionslosen Koeffizienten (c_w) wiedergegeben. Dieser berechnet sich aus dem Druckwiderstandsbeiwert c_d und Reibungswiderstandsbeiwert $c_{f,g}$ (3-2). Bei Kraftfahrzeugen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, den c_w -Wert über die Reynolds-Zahl zu bestimmen [OBR-2011].

$$\text{cw-Wert} \quad c_w = c_d + c_{f,g} \quad (3-2)$$

Der c_w -Wert eines Fahrzeuges wird dabei maßgeblich von der Karosserieform beeinflusst und liegt bei modernen Fahrzeugen bei einem Wert um 0,3. Die Stirnfläche (A) ergibt sich aus der gesamten Fläche

der Front, vom Boden mit den Reifen bis zu Dachkante, inklusive der Außenspiegel, und ist bei modernen Fahrzeugen ca. 2 m² groß. Die Dichte der Luft ist abhängig von Temperatur und der Höhenlage. Bei 20°C und auf Meereshöhe beträgt diese 1,2041 kg/m³. Der einflussreichste Faktor beim Luftwiderstand (3-1) ist die Geschwindigkeit (v). Diese setzt sich aus Fahrzeug- und Windgeschwindigkeit zusammen und geht quadratisch ein. Die Windgeschwindigkeit ist dabei den örtlichen Gegebenheiten unterworfen. Als Faustformel kann angenommen werden, dass bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von rund 80 km/h und Windstille der Luftwiderstand der Summe der übrigen Widerstände entspricht [WaF-2011].

3.2.2 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand (3-3) ist die Kraft, die einer Rollbewegung des Rades entgegen wirkt.

$$\text{Rollwiderstand} \quad F_R = (m_{FZg} + m_{Zul}) * g * f_R \quad (3-3)$$

Es wirken primär drei Größen als Widerstand, der Walk-, der Reib- und der Lüfterwiderstand¹². Der Walkwiderstand ergibt sich aus der Verformung des Rades bei Belastung. Die Aufstandsfläche vergrößert sich und bildet den sogenannten Reifenlatsch. Durch die Verformung bzw. Stauchung des Rades zum Reifenlatsch entsteht innere Reibung, die die Verformungsenergie in Wärme umsetzt. Durch die Drehbewegung des Rades wiederholt sich der Vorgang fortlaufend und bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit steigt der energetische Aufwand an (Abbildung 3-7).

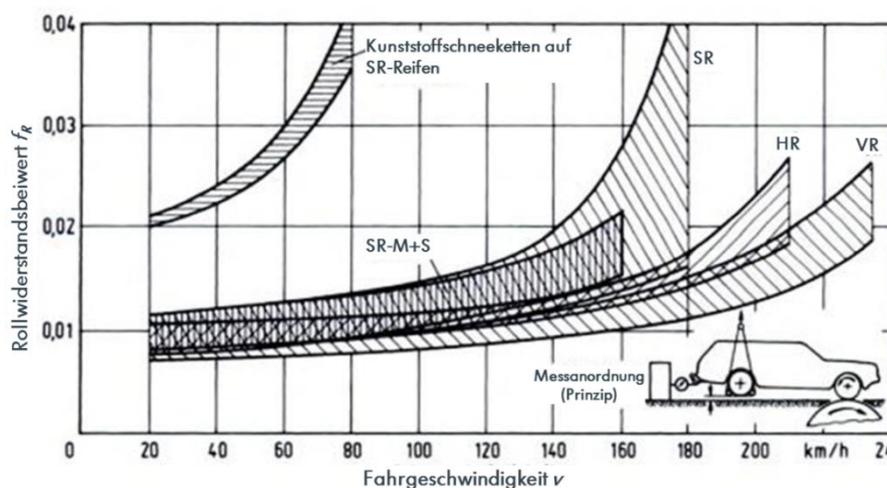


Abbildung 3-7 Rollwiderstandsbeiwert für PKW-Reifen [MiW-2004]

Der Reibwiderstandsanteil des Rollwiderstandes setzt sich vor allem aus der Reibung zwischen Reifenlatsch und der Fahrbahn zusammen. Dabei hat die Fahrbahn einen großen Einfluss, beispielsweise können Unebenheiten bzw. Oberflächenstruktur die Reibungsverluste schnell verstärken. Der Lüfterwiderstand wird durch das drehende Rad (Körper) in einem Fluid und damit verbundenen Strömungsverlusten induziert. Dieser Strömungsverlust steht in Abhängigkeit zur Relativgeschwindigkeit und ist sinnvollerweise im Zusammenhang mit der Luftströmung (Abschnitt 3.2.1) im Fahrzeuggesamtwider-

¹² Der Lüfterwiderstand wird durch die Rollbewegung des Reifens verursacht und in dieser Arbeit in Anlehnung an HEIBING, ERSOY, GIES dem Rollwiderstandsbeiwert zugeordnet (vgl. [HEG-2011]).

stand (Abschnitt 3.2.5) zu betrachten [HEG-2011]. Die genannten drei Widerstände werden für Berechnungen in einen dimensionslosen Koeffizienten, dem Rollwiderstandsbeiwert (f_R), zusammengefasst. Dieser wird mit der vertikalen Last des Fahrzeuges multipliziert. Die vertikale Last des Fahrzeuges ergibt sich aus dessen Gesamtmasse, welche aus dem Fahrzeugleergewicht (m_{Fzg}) und der Zuladung (m_{Zul}) besteht sowie der Erdbeschleunigung (g). Der Widerstandsbeiwert ist für Personenkraftwagen näherungsweise 0,01, wobei dieser geschwindigkeitsabhängig ist [WAF-2011] [BrS-2013]. In Abbildung 3-7 sind Rollwiderstandsbeiwerte für Reifen bis 180 km/h (S), bis 210 km/h (H) und über 210 km/h (V) zu sehen. Außerdem wird zwischen Radialreifen (R) und Matsch- und Schnee- Reifen (M+S) differenziert.

3.2.3 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand (3-4) ergibt sich, wie beim Rollwiderstand, aus der vertikalen Last des Fahrzeuges, multipliziert mit der Steigung ($\sin \alpha$). Diese Steigung ergibt sich aus der vertikalen zur horizontalen Fahrbahnprojektion.

$$\text{Steigungswiderstand} \quad F_S = (m_{Fzg} + m_{Zul}) * g * \sin(\alpha) \quad (3-4)$$

Der Antrieb muss die durch Steigung erzeugte Hangabtriebskraft überwinden, um das Fahrzeug in eine Vorwärtsbewegung zu bringen. Für Winkel unter 17° bzw. Steigungen unter 30 % gilt dabei das Verhältnis aus (3-5) [WaF-2011].

$$\text{Steigungswinkel} \quad \tan \alpha_{Steig} \approx \sin \alpha_{Steig} \quad (3-5)$$

Die Steigungen werden in Deutschland zumeist in Prozent angegeben und nach Straßentypen differenziert (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 Straßensteigungen in Deutschland nach [WaH-2005]

Straßenart	Entwurfsgeschwindigkeit*	Zulässige Steigung
Straßen außerhalb bebauter Bereiche		
Kreisstraßen	40 km/h	10 %
Landstraßen	60 km/h	6,5 %
Bundesstraßen	100 km/h	4,5 %
Bundesautobahnen	120 km/h	4 %
Stadtstraßen		
mehrspurige Sammelstraßen	-	5-6 %
Anliegerstraßen	-	10 %
Alpenstraßen		
Alpenstraße	-	30 %
* für diese Straßenart vorgesehene Geschwindigkeit bei entsprechender Steigung		

Die Besonderheit des Steigungswiderstandes ist, dass dieser gleich Null ist, so lange sich Start- und Zielpunkt theoretisch auf einem Höhenniveau befinden. Energie, die zum Überwinden einer Höhenlage aufgebracht werden muss, steht als potentielle Energie bei der Gefällefahrt zur Verfügung. Bei

elektrifizierten Fahrzeugen kommt hinzu, dass die Bremsenergie aus Bremsvorgängen teilweise reku- periert, also zurückgewonnen werden kann. Bei dieser Betrachtung muss der Wirkungsgrad des An- triebsstranges Berücksichtigung finden. Es bleibt letztlich festzuhalten, dass der Antrieb in der Lage sein muss, den Anstieg überwinden zu können [WaF-2011].

3.2.4 Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand (3-6) stellt Kräfte dar, die bei einer Änderung der Fahrzeuggeschwin- digkeit, also in instationären Zuständen, auftreten.

$$\text{Beschleunigungswiderstand} \quad F_B = (e_i * m_{Fzg} + m_{Zul}) * a_x \quad (3-6)$$

Bei der Beschleunigung des Fahrzeuges muss dabei vor allem dessen Massenträgheit überwunden werden. Die Massenträgheit lässt sich in eine translatorische Beschleunigung der Fahrzeugmasse und eine rotatorischen Beschleunigung der drehenden Antriebs Elemente unterteilen. Die Elemente, die einer rotatorischen Beschleunigung unterworfen sind (Motor, Kupplung, Getriebe, Räder), werden zur Berechnung in einem Massenfaktor zusammengefasst (Abbildung 3-8) [WaF-2011]. Der Massenfaktor wird zur Berechnung des Beschleunigungswiderstandes mit dem Fahrzeugleergewicht (m_{Fzg}) multipli- ziert. Zu dem Produkt wird die Zuladung (m_{Zul}) addiert und diese Summe mit der Fahrzeugbeschleu- nigung (a_x) multipliziert [WaF-2011].

Der Massenfaktor „ e_i “ im Gang „ i “ wird mit Hilfe des auf das Rad reduzierten Massenträgheitsmo- ments ($\theta_{red,i}$), die Fahrzeugleermasse (m_{leer}) und dem Radius des Rades (r_{dyn}) definiert (3-7).

$$\text{Massenfaktor} \quad e_i = \frac{\theta_{red,i}}{m_{leer} * r_{dyn}^2} + 1 \quad (3-7)$$

Die Getriebeübersetzung i_G geht in die Berechnung des Massenträgheitsmoments quadratisch ein. Dadurch bedingt kann der Massenfaktor e_i in einem breiten Bereich streuen (Abbildung 3-8). Ursache dafür sind die verschiedenen Einsatzszenarios der Fahrzeuge, so haben Gelände- oder Nutzfahrzeuge einen extrem hoch übersetzten Kriechgang [HEG-2011].

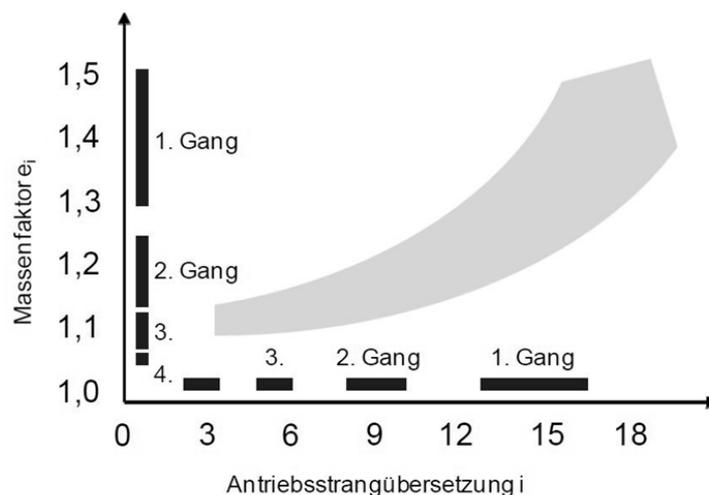


Abbildung 3-8 Massenfaktor in Abhängigkeit der Gesamtübersetzung [HEG-2011]

Im Bremsbetrieb wird die Gleichung (3-6) negativ, da eine negative Beschleunigung wirkt. In elektrifizierten Fahrzeugen kann diese Energie geschwindigkeits- und bremsleistungsabhängig (Abbildung 3-9) rekuperiert werden. In konventionellen Fahrzeugen geht diese komplett als Wärme verloren [WaF-2011]. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h sind die in Abbildung 3-9 dargestellten Roll- und Luftwiderstände nicht rekuperierbar. Nutzbar ist bei einer Bremsverzögerung von 1 m/s^2 idealisiert nur die masseabhängige Energie, die vorher auch beschleunigt wurde.

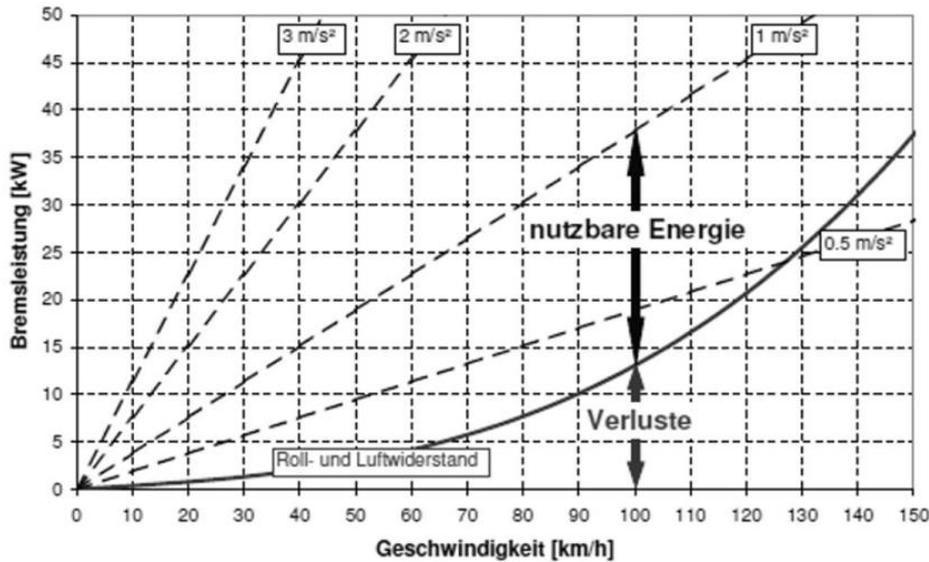


Abbildung 3-9 Rekuperation der Bremsenergie [GiS-2008]

3.2.5 Gesamtfahrwiderstand

Der Gesamtfahrwiderstand (3-8) ergibt sich aus den in den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.3 vorgestellten Einzelwiderständen.

$$\text{Gesamtfahrzeugwiderstand} \quad F_{Fzg-Ges} = F_L + F_R + F_S + F_B \quad (3-8)$$

Es ergibt sich, dass der Gesamtwiderstand vor allem von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges abhängig ist (Abbildung 3-10). Dazu trägt überwiegend der Luft- und in gewissem Maße der Rollwiderstand bei. Die anderen beiden Widerstände sind quasi konstant, der Steigungswiderstand ist es bei gleichbleibender Steigung, der Beschleunigungswiderstand wäre es bei einstufigen Getrieben auch. Unstetigkeiten ergeben sich beim Beschleunigungswiderstand durch die unterschiedlichen Massenfaktoren bzw. die Antriebsgangübersetzung des Getriebes (Abbildung 3-8) [WaF-2011].

Es wird deutlich, dass der Widerstandswert für die Beschleunigung individuell abhängig von der Getriebeübersetzung ist. Diese differenziert sich zwischen Fahrzeugtypen, z.B. Stadt- oder geländegängiges Fahrzeug und dem Hersteller, der mit dem Getriebe die Fahrdynamik seines Fahrzeuges beeinflussen möchte.

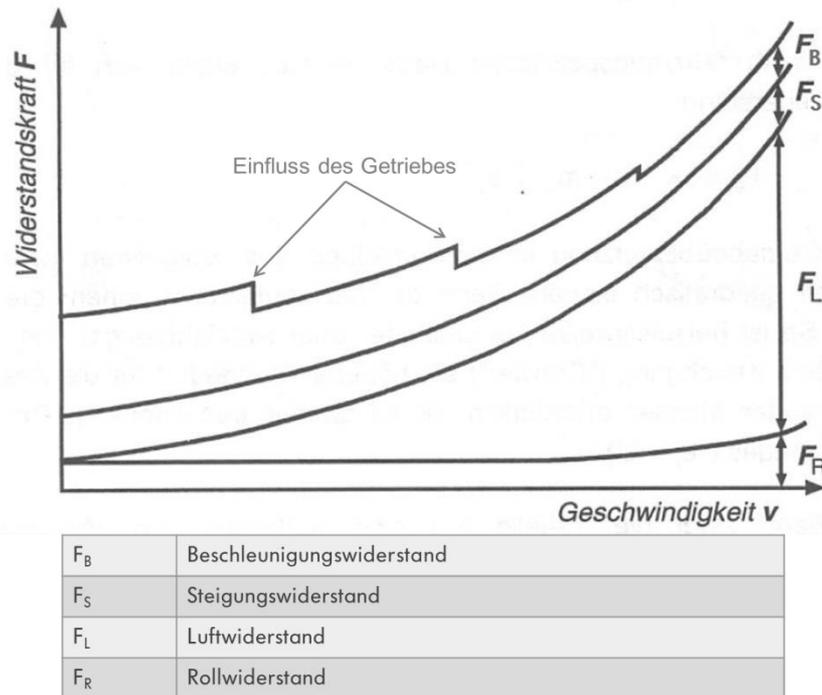


Abbildung 3-10 Gesamtfahrwiderstände über der Fzg.-Geschwindigkeit nach [WaH-2005]

Für eine Abschätzung der nötigen Beschleunigungsenergie reicht eine energetische Abschätzung über das Drehmoment der Antriebsräder (3-9). Dabei wird die Gesamtmasse des Fahrzeuges ($m_{Fzg} + m_{Zul}$) mit der Geschwindigkeit (v) sowie dem Radius der Antriebsräder (r_R) multipliziert und durch die Zeit der Beschleunigungsphase (t) geteilt.

$$\text{Drehmoment aus Beschleunigung} \quad M_B = \frac{(m_{Fzg} + m_{Zul}) * v * r_R}{t} \quad (3-9)$$

Gleiches gilt für die Steigfähigkeit des Fahrzeuges bei einem Bezug auf das Drehmoment der Antriebsräder (3-10).

$$\text{Drehmoment aus Steigfähigkeit} \quad M_S = (m_{Fzg} + m_{Zul}) * g * \sin(\alpha) * r_R \quad (3-10)$$

Noch weiter vereinfachen kann man die Abschätzung der benötigten Leistung des Fahrzeuges, indem man einen singulären Bezug zwischen Masse ($m_{Fzg} + m_{Zul}$), Beschleunigung (a) und Geschwindigkeit (v) herstellt (3-11).

$$\text{Leistungsformel} \quad P_{Ges} = (m_{Fzg} + m_{Zul}) * a * v \quad (3-11)$$

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass bei geringen Geschwindigkeiten die Masse (durch Roll- und Beschleunigungswiderstand) hohen Einfluss hat, bei konstanter Geschwindigkeit bei 80 km/h eine Parität zwischen Luft- und Rollwiderstand besteht und darüber der Luftwiderstand eine große Bedeutung hat (Abbildung 3-11).

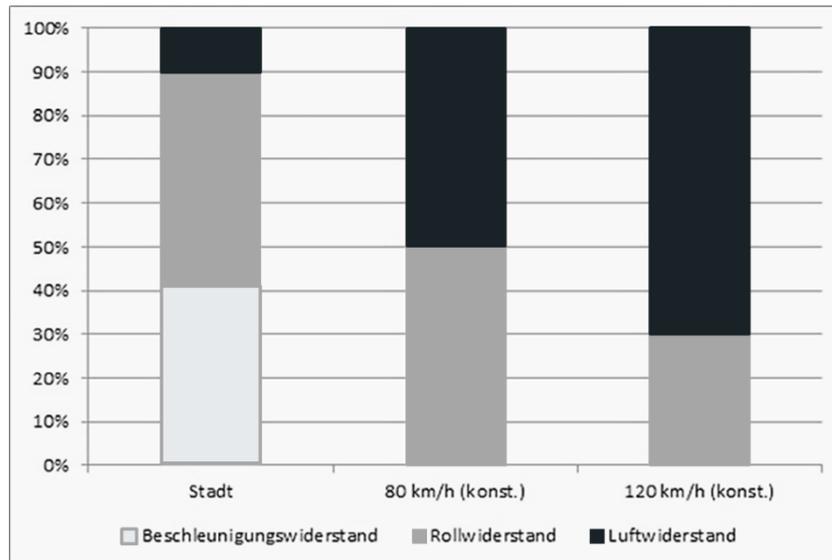


Abbildung 3-11 Fahrzeugwiderstände nach Fahrsituation nach [BuI-2011]

Zusätzlich zu den Fahrwiderständen müssen Nebenverbraucher betrachtet werden, da diese Aggregate, insbesondere bei elektrifizierten Fahrzeugen, auf den Energiespeicher des Fahrzeuges zurückgreifen und damit die potentielle Leistung für den Antrieb schmälern. Zu den Nebenverbrauchern gehören Lenkung, Bremse, Licht, Klimaanlage bzw. Heizung. In konventionellen Fahrzeugen werden diese (bis auf Licht und zum Teil die Lenkung) mechanisch oder über Abwärme des Motors betrieben. Bei Fahrzeugen mit einer größeren elektrischen Reichweite müssen diese grundsätzlich elektrisch gespeist werden. Dabei werden unterschiedliche Spitzenleistungen von den Systemen gefordert (Tabelle 3-2), die wiederum über einen Lastfaktor geglättet werden, da nicht permanent die maximale Leistung der Systeme gefordert wird [WaF-2011].

Tabelle 3-2 Leistungsanforderungen von Nebenaggregaten [EsM-2009]

		Klein- und Kompaktwagen	Mittel und Oberklassefahrzeuge
Klimaanlage	kW	4	6
Lenkunterstützung	kW	1	1,2
Bremsunterstützung	kW	0,2	0,2
Summe	kW	5,2	7,2
Lastfaktor	%	10	10
Summe (bereinigt)	kW	0,52	0,74

Eine weitere Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften ergibt sich aus dem Komfort bzw. Nutzungsanspruch des Kunden. Ein sportives Auto braucht eine harte Feder-Dämpfer-Abstimmung, während bei Ansprüchen hinsichtlich des Fahrkomforts „weichere“ Abstimmungen, insbesondere beim Fahrwerk, gefunden werden müssen. Die Fahrbahnoberflächenstruktur trägt dabei maßgeblich zum Abrollgeräusch des Fahrzeuges bei und hat somit nicht nur Einfluss auf den Fahrwiderstand. Eine Besonderheit bei elektrifizierten Fahrzeugen, die größere Strecken rein elektrisch fahren können, ist,

dass der Elektromotor keine bzw. nur leise Geräusche verursacht. So lang die Abrollgeräusche des Reifens bei kleinen Geschwindigkeiten nicht ausreichend sind, muss im Fahrzeug anderweitig ein Geräusch induziert werden. Dieses ist nicht nur da, um andere vor dem Fahrzeug zu warnen, auch der Fahrzeugführer sollte akustisch wahrnehmen können, ob sein Fahrzeug fahrbereit¹³ ist.

3.3 Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsgründen

Im Zusammenhang mit elektrifizierten Fahrzeugen wird häufig von deren Potential zur Verbrauchsverbesserung und der damit verbundenen Reduzierung von Emissionen berichtet. Das Ausnutzen des Reduktionspotentials basiert auf einem politischen Willen, der insbesondere in der EU und den USA, dort speziell in Kalifornien, gefördert wird. Ziel der EU ist es, den Kohlenstoffdioxidausstoß von Kraftfahrzeugen zu staffeln (Tabelle 3-3). Dabei ist das Fernziel 2050 nicht nur ein Ziel der EU, sondern auch eine Absichtserklärung der G8-Staaten [StC-2012].

Tabelle 3-3 CO₂ Ziele der Politik in Europa [StC-2012]

Jahr	Max Pkw-Flottenausstoß (g CO ₂ /km)
2012	120
2020	95 (bei 95% der aller Neuzulassungen)
2050	20

Die derzeitige Emissionseinstufung bezieht sich aktuell auf die geltenden Abgasnormen. Für die USA sind diese durch die Environmental Protection Agency in der TIER-Regelung und etwas strenger in der LEV-Regelung der California Environmental Protection Agency geregelt [CCR-2010].

Die EU-Gesetzgebung bezieht sich aktuell auf die Euro-Abgasnormen (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4 Aktuelle Abgasnormung der EU (nach [EUG-1970] und [StC-2012])

Abgasnorm (gültig ab)	CO (g/km)		HC+NO _x (g/km)		Partikel (g/km)	
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
EU4 (04/2005)	1	0,5	0,1+0,08	0,3 (x+0,25)	-	0,025
EU5 (09/2009)	1	0,5	0,1+0,06	0,23 (x+0,18)	0,005*	0,005
EU6 (09/2014)	1	0,5	0,1+0,06	0,17 (x+0,08)	0,0045*	0,0045

*Gilt für Motoren mit Direkteinspritzung

In der EU-Gesetzgebung ist der maximale Ausstoß von Emissionen geregelt. Ein Kraftfahrzeug wird danach klassifiziert und z.B. die Einfahrt in Umweltzonen festgelegt. Die berücksichtigten Emissionen

¹³ Bei elektrifizierten Fahrzeugen ist es vorstellbar, dass die Zündung des Fahrzeuges an ist (Fahrbereitschaft hergestellt) und durch fehlende Geräusche des Verbrenners z.B. Tätigkeiten im Motorraum ausgeführt werden, die dann unter einem hohen Risiko bzgl. der stromführenden Bauteile erfolgen.

sind Kohlenstoffmonoxide (CO), Kohlenstoffdioxide (CO₂), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x) und Partikel bzw. Feinstaub, die bei der Verbrennung von Kraftstoff entstehen. Wie viel des im Fokus stehenden CO₂ durch das Fahrzeug emittiert wird, ist letztendlich vom Verbrauch abhängig [StC-2012].

Bei der vollständigen Verbrennung von einem Liter Benzin werden 2,28 kg CO₂ freigesetzt, bei Diesel sind es auf einen Liter 2,58 kg CO₂ [TiT-2006]. Das bedeutet, dass bei einem Benzin-Verbrauch von 5,5 l/100 km also 0,055 l/km, ein Fahrzeug 0,125 kg CO₂/km bzw. 125 g CO₂/km produziert. Ein Verbrauch von 5,5 l/100 km ist ein realistischer Durchschnittswert für Fahrzeuge der Kompaktklasse. Die Herausforderung besteht also darin, in Bezug auf die gesetzlichen Normen einen Ausgleich zwischen Leistung und Drehmoment auf der einen sowie Schadstoffemission und Verbrauch auf der anderen Seite zu finden.

Der Verbrauch des Fahrzeuges bestimmt die von diesem verursachten Emissionen und wird in Europa über den NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) ermittelt (Abbildung 3-12). Dieser Zyklus bildet Fahrzustände ab und keine reale Fahrsituation. Dabei wird der Verbrauch, um reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, auf Motoren- oder Rollenprüfständen erfahren. Das bedeutet, dass die Fahrwiderstände sowie Luft- und Rollwiderstand für das jeweilige Fahrzeug im Vorhinein ermittelt werden müssen. Für Elektrofahrzeuge wird in dem Zyklus die verbrauchte Energie gemessen und die Reichweite der Fahrzeuge ermittelt [EUG-1970]. In den USA erfolgt die Messung mit dem FTP-75, in Japan im dem 10-15 Mode [BrS-2013]. In China und Indien wird auch der NEFZ für Verbrauchsberechnung herangezogen, wobei in Indien der NEFZ modifiziert als Modified Indian Driving Cycle (MIDC) zugrunde gelegt wird. Zukünftig ist es das Ziel, einen weltweit einheitlichen Fahrzyklus (WLTP Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) für die Verbrauchs- und Reichweitenmessung zu nutzen [ScT-2013].

Der NEFZ-Zyklus dauert 1180 Sekunden und umfasst zwei Teile. Teil eins ist der Grundstadtfahrzyklus (Abbildung 3-12). In diesem wird das Fahren in der Stadt simuliert. Der Stadtzyklus dauert 195 Sekunden und wird mit einer mittleren Geschwindigkeit von 19 km/h über eine Strecke von 1,013 km gefahren. In einem Gesamtzyklus wird der Grundstadtfahrzyklus viermal durchlaufen, also 4,052 km in 780 Sekunden zurückgelegt. Teil zwei des NEFZ ist der außerstädtische Fahrzyklus, der mit einer mittleren Geschwindigkeit von 62,6 km/h 400 Sekunden lang durchfahren wird. Dieser Streckenabschnitt umfasst 6,955 km, in dem die Höchstgeschwindigkeit 120 km/h beträgt und mit maximal 0,833m/s² beschleunigt, bzw. 1,389 m/s² verzögert wird. Der Zyklus wird bei 20° C bis 30° C durchfahren [EUG-1970]. In Summe betrachtet hat der NEFZ eine Gesamtlänge von 11,007 km, die mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,6 km/h gefahren werden. Darüber hinaus werden für die Messung im Fahrzeug die Nebenverbraucher abgeschaltet. Dazu gehören z.B. die Klimaanlage und die Lenkunterstützung; der Generator im konventionellen Fahrzeug wird bei Grundlast (150 W - 300 W) betrieben [LuM-2009].

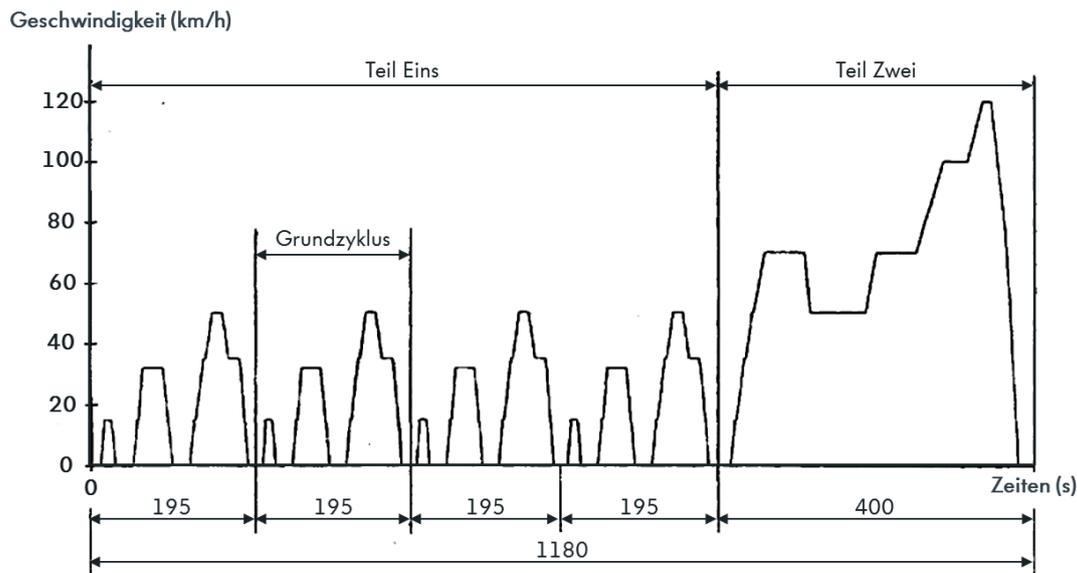


Abbildung 3-12 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) [EUG-1970]

Für Personenkraftwagen, die mit einem Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben und extern aufgeladen werden, ist der Verbrauch, insofern diese den Zyklus überwiegend elektrisch fahren können, anderweitig zu bestimmen. Dafür werden nach der Euro-Norm ECE-R101 Emissionen wie auch Verbrauch gewichtet gewertet (3-12) und (3-13). Dabei wird zwischen der elektrischen Reichweite (D_e) des Fahrzeuges und einer angenommenen Strecke zwischen zwei Batterieaufladungen ($D_{av}=25$ km) differenziert [ECE 101].

$$\text{Gewichteter CO}_2\text{-Wert (M)} \quad M = \frac{(D_e * M_1 + D_{av} * M_2)}{(D_e + D_{av})} \quad (3-12)$$

M_1 : emittierte CO_2 -Masse (g/km) bei voll aufgeladenem elektrischem Energiespeicher

M_2 : emittierte CO_2 -Masse (g/km) bei einem elektrischen Energiespeicher, der die Mindestladung aufweist (maximale Entladung)

$$\text{Gewichteter Kraftstoffverbrauchswert (C)} \quad C = \frac{(D_e * C_1 + D_{av} * C_2)}{(D_e + D_{av})} \quad (3-13)$$

C_1 : Kraftstoffverbrauch (l/100 km) bei voll aufgeladenem elektrischem Energiespeicher

C_2 : Kraftstoffverbrauch (l/100 km) bei einem elektrischen Energiespeicher, der die Mindestladung aufweist (maximale Entladung)

Da die Höchstgeschwindigkeit im Zyklus unter 120 km/h liegt und die Durchschnittsgeschwindigkeit sogar unter 80 km/h, ist dieser Zyklus hinsichtlich der Fahrwiderstände (Abschnitt 3.2) vorwiegend von der Masse abhängig. Dies ist auch bei den anderen bekannten Zyklen (FTP 75 / USA und 10-15 Mode / Japan) der Fall.

3.4 Auslegung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit

Die Fahrzeugsicherheit hat im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts einen bedeutenden Stellenwert eingenommen und zählt zu den wichtigsten Bereichen der Fahrzeugauslegung, denn der Insassenschutz

ist für das Image einer Fahrzeug-Marke sehr wichtig. Nicht zuletzt kann der Kunde bei seiner Kaufentscheidungen durch Testergebnisse beeinflusst werden. Bei Fahrzeugen wird dabei zwischen passiven und aktiven Sicherheitsmaßnahmen differenziert. Passive Sicherheitssysteme sind die, die Folgen von nicht vermeidbaren Kollisionen mindern. Aktive Sicherheitssysteme hingegen versuchen, Kollisionen im Vorhinein zu verhindern. In diesem Abschnitt wird primär auf passive Sicherheitssysteme eingegangen.

3.4.1 Gesetzgebung und Testverfahren

Die Gesetzgebung im Kraftfahrzeugumfeld ist in Deutschland durch die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) geregelt. In dieser werden zur passiven Sicherheit nur allgemeine Anforderungen formuliert und dem Automobilentwickler ein hohes Maß an Verantwortung, aber auch konstruktive Freiheiten gewährt. Dabei wird dem Fahrzeugführer letztendlich die Verantwortung für sein Handeln auferlegt. Auf europäischer Ebene gelten EU- bzw. EWG- Richtlinien, die nur optionale Anwendung in den Mitgliedstaaten finden. Regelungen der ECE können darüber hinaus von Ländern außerhalb der EU angenommen werden. In den USA gelten Gesetze zunächst zur Unfallvermeidung. Sie beziehen für die Verantwortlichkeit nicht den Fahrzeugführer, sondern den Hersteller ein. Dieser hat durch geeignete Baumaßnahmen die Insassen vor eventuellen Unfallfolgen zu schützen. Die Regelungen dafür sind in den Federal Motor Vehicle Safety Standards formuliert. In anderen Nationen (Kanada, Japan, Australien) gelten häufig US- oder EU-Regelungen. Für die Prüfung von Fahrzeugen haben sich in den einzelnen Ländern und Regionen Versuchsprogramme etabliert, die nationale Vorschriften als Mindestanforderungen annehmen und regelmäßig ihre Programme an den Stand der Technik anpassen. Diese New Car Assessment Programme (NCAP) werden in den unterschiedlichen Ländern für die jeweiligen Fahrzeuge durchgeführt, positive Ergebnisse dann von den Herstellern vorzugsweise zu Werbezwecken genutzt [KrF-2009].

Beim EuroNCAP werden vier verschiedene sicherheitsrelevante Bereiche geprüft. Das bestmögliche Ergebnis sind 5 Sterne, die sich aus der Summe der Einzelergebnisse der Testbereiche ergeben, wobei kein Teilergebnis zu schlecht¹⁴ abschneiden darf. In der Bewertung fließt zur Hälfte der Insassenschutz für Erwachsene ein. Diese wird durch drei verschiedene Tests, dem Frontal-, Seitenaufprall- und Pfahltest ermittelt (Abbildung 3-13). Jeweils gleichberechtigt fließen die Ergebnisse aus den Tests für den Insassenschutz von Kindern und dem Fußgängerschutz in das Gesamtergebnis ein. Beim Insassenschutz für Kinder werden die gleichen Tests wie für die Erwachsenen herangezogen und auf kinderspezifische Parameter bezogen. Beim Fußgängerschutz werden insbesondere das Anfahren von Verkehrsteilnehmern und die daraus folgenden Auswirkungen geprüft (Abbildung 3-13). Letzter und in die Bewertung am geringfügigsten einfließender Umfang sind die Elemente zu Sicherheitsunterstüt-

¹⁴ „zu schlecht“ ist eine Aussage aus dem New Car Assessment Programm [NCAP-2012]. Eine genauere Definition, bzw. Abhängigkeiten der Bewertung wurden am 02.05.2012 per Mail angefragt, Antwort ausstehend.

zung. Dabei handelt es sich vor allem um Technologien zur Unfallvermeidung und der Verminderung der Verletzungsschwere [NCAP-2012].

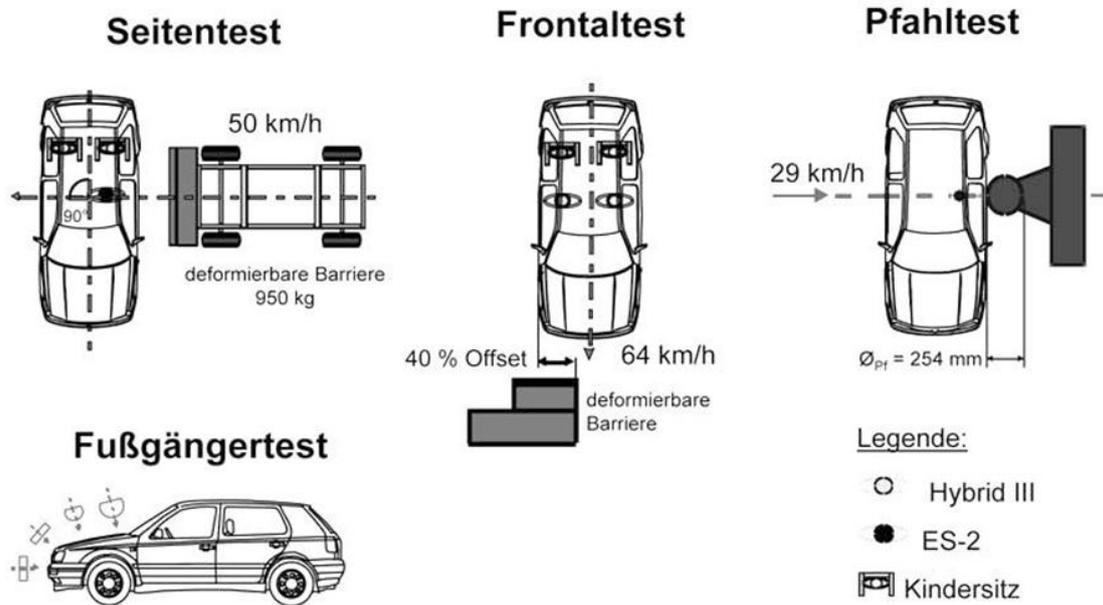


Abbildung 3-13 EuroNCAP Testverfahren [KrF-2009]

3.4.2 Zusammenspiel Fahrzeugsicherheit und Karosserie

Die Karosserie hat aus Sicht der Sicherheit zwei Aufgaben zu erfüllen: Es muss die Betriebsfestigkeit für den Fahrbetrieb gewährleistet werden und bei der Unfallbeanspruchung muss die Karosserie in der Lage sein, kinetische Energie in Formänderungsarbeit umzusetzen, ohne die Fahrgastzelle wesentlich zu verformen [BaH-2003].

Es gibt acht grundsätzliche Karosseriebauformen [WFO-2009]:

1. Selbsttragender Aufbau,
2. Hybridbauweise,
3. Mittragender Aufbau,
4. Multimaterial Bauweise,
5. Space-Frame-Bauweise,
6. Gitterrohrrahmen,
7. Monocoque und
8. Rahmenaufbau.

Der Rahmenaufbau wird vor allem bei Lastkraftwagen und schweren Geländewagen angewendet. Für Serien-Personenkraftwagen werden vorwiegend der selbsttragende Aufbau und die Space-Frame-Bauweise verwendet. Wenn das Fahrwerk und das Antriebsaggregat von einer Struktur der Karosserie aufgenommen werden, ist dieses eine selbsttragende Bauweise. Die eingebrachten Strukturelemente bilden darüber hinaus eine Sicherheitszelle um Fahrer und Insassen. Bei der Space-Frame-Bauweise bilden Strangpressprofile in Längs- und Querrichtung eine Trägerstruktur über das gesamte Fahrzeug. Die Fahrgastzelle wird so durch einen Sicherheitskäfig umgeben [WFO-2009]. Wie in Abbildung 3-14

dargestellt, können Längs- wie Querkräfte durch die verschiedenen Träger aufgenommen werden. Welche Träger entsprechend für den Crashfall ertüchtigt werden, ist individuell auslegbar.

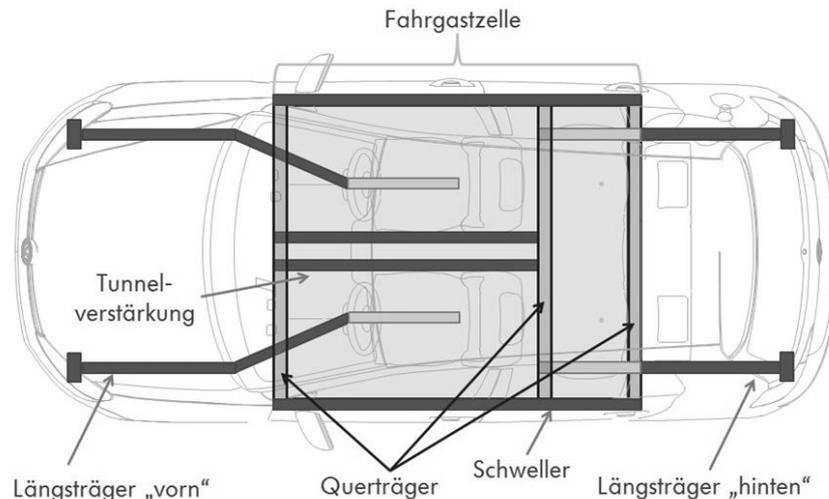


Abbildung 3-14 Beispiel für Karosserieträgerstruktur (schematische Darstellung)

Diese Träger müssen zum einen im Bereich der Fahrgastzelle eine hohe Steifigkeit ausweisen, damit der Überlebensraum der Insassen sichergestellt werden kann. Zum anderen sollen sie in Deformationszonen (vorn und hinten) nachgiebig ausgebildet sein, um kinetische Energie in Deformationsarbeit umwandeln zu können (plastische Verformung der Träger). Dabei übernehmen die Träger im Fahrzeug eine wichtige Aufgabe. Die Längsträger sollen eingeleitete Kräfte über den Mitteltunnel, die Schweller und den Dachrahmen weiterleiten und sich außerhalb des Überlebensraumes der Insassen auch verformen. Beim Seitenaufprall müssen die Querträger möglichst viel Energie in Dachrahmen und Schweller leiten, da der potentielle Deformationsweg bis zum Überlebensraum des Insassen sehr gering ist [KrF-2009].

Der seitliche Pfahlcrash ist sehr kritisch, da der Pfahl relativ schmal aufbaut und tief in die Fahrzeugseite eindringen kann [NCAP-2012]. Die Steifigkeit bzw. das axiale Widerstandsmoment (3-14) der rechteckigen Träger (Abbildung 3-15) ist nicht nur von der Materialstärke abhängig, sondern insbesondere von der geometrischen Dimensionierung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass keine beliebigen Materialstärken der Träger möglich sind. Es handelt sich vorwiegend um Baugruppen¹⁵, die geschweißt werden müssen, was ein Ertüchtigen durch unterschiedlich starke Blechdicken (>3 mm)¹⁶ schwierig und aus Sicht der Prozesssicherheit fragwürdig macht.

$$\begin{aligned}
 W_x &= \frac{B * H^3 - b * h^3}{6 * H} \\
 W_y &= \frac{H * B^3 - h * b^3}{6 * B}
 \end{aligned}
 \tag{3-14}$$

Axiales Widerstandsmoment

¹⁵ Baugruppe ist in diesem Zusammenhang als Zusammenstellung von Bauteilen in einem Fügeprozess zu verstehen. Dies entspricht nicht vollständig der Unterteilung in Baugruppen, Unterbaugruppen, Bauteile in 2.4.3.2 Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften.

¹⁶ z.B. Tailored Blanks der Firma Thyssen-Krupp sind, basieren auf einer Laser-Schweiß-Technologie, mit Blechdicken von maximal 0,6 mm – 3 mm zu erhalten [ThK-2012].

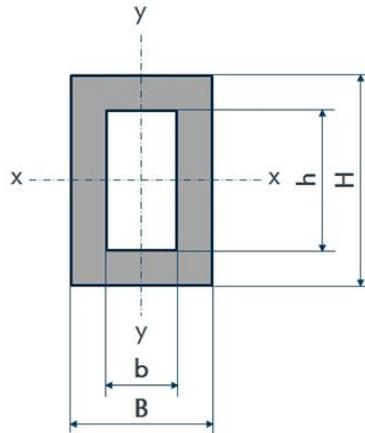


Abbildung 3-15 Axiales Widerstandsmoment beim Rechteck

Im EuroNCAP Test wird kein Heckcrash berücksichtigt, wie es z.B. in den USA der Fall ist. Bei der Heckkollision muss insbesondere die Lage des Energiespeichers überdacht sein, damit durch die eingebrachte Deformationsenergie das Risiko der Zerstörung des Speichers minimiert wird (Abbildung 3-16). Daher wird in den aktuellen Fahrzeugen der Kraftstofftank zumeist unter der Rücksitzbank oder über der Hinterachse verbaut [KrF-2009].

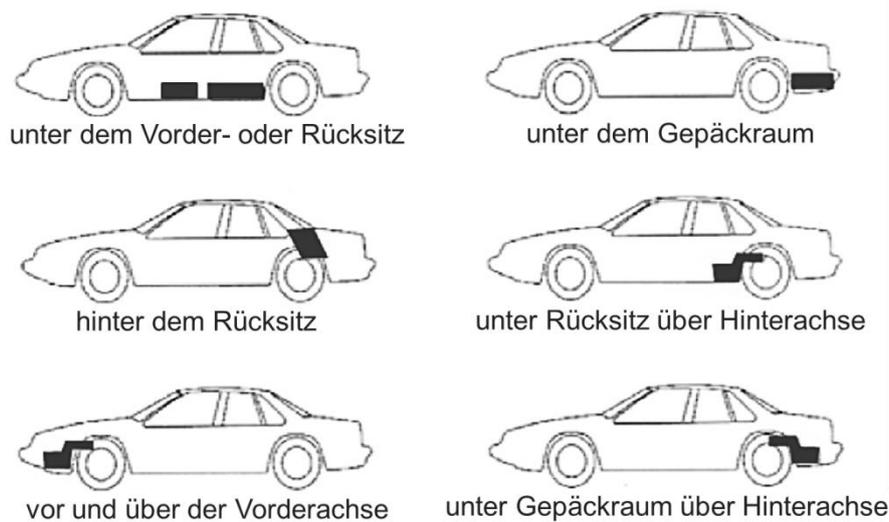


Abbildung 3-16 Einbaulagen für den Energiespeicher in Anlehnung an [KrF-2009]

3.5 Auslegung aus Sicht des Designs

Das Design gibt der Technik eine Form und hat Einfluss auf den potentiellen Käufer. Es sollte Emotionen wecken und auch markenspezifische Attribute transportieren. Dabei muss das Design Technik und Ökonomie, Sicherheit und Komfort sowie Prestige der Marke zusammenführen [BrS-2007].

Das Design ist von unterschiedlichen Aspekten getrieben, zuallererst die Kundenanforderungen, danach folgen Gesetzgebung, Package, Produktionstechnik und –verfahren sowie aus technischer Sicht ein wesentliches Element, die Aerodynamik. Das Design betrifft primär den Fahrzeug-Hut, also das vom Kunden wahrnehmbare Interieur- und Exterieur-Design im Bereich der Karosserie.

Im ersten Schritt muss das Produkt definiert werden (z.B. Sitzigkeit und Bauart), dann die Aufbauausprägung bestimmt werden (Abbildung 3-17), wobei dabei ein gewisser Designcharakter (Dynamik, Ästhetik, etc.) des Fahrzeuges gefunden werden muss [BrS-2013].

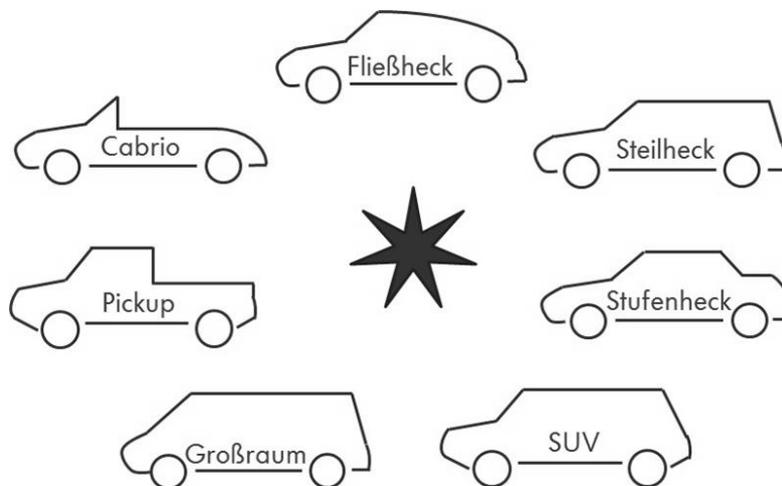


Abbildung 3-17 Fahrzeugaufbauausprägung

Der Designcharakter oder Bodystyle kann sportlich, eine konventionelle Limousine oder ein hochaufbauendes Fahrzeug sein. Sportliche Fahrzeuge haben zumeist einen guten $c_w \cdot A$ -Wert, da dieser von großer Bedeutung für den Verbrauch bei hohen Geschwindigkeiten ist (Abschnitt 3.2.1), aber Defizite in der Ergonomie. Im Gegensatz dazu stehen hochaufbauende Fahrzeuge, die ein im Verhältnis schlechteres $c_w \cdot A$, dafür aber mehr Möglichkeiten beim Package im Fahrzeug bieten.

Das Design hat Einfluss auf die Fahrzeugsicherheit, den Fußgängerschutz sowie die Klimatisierung von Fahrgastraum und Technik. Außerdem wird durch das Design der Komfort beeinflusst [BrS-2007].

Bei den alternativen Antrieben bekommt das Design eine weitere Bedeutung. Der Kunde kann sich über ein bestimmtes Fahrzeugdesign, einem „Purpose Design“ von der Masse abheben und so das Image seines Fahrzeuges auf sich projizieren. So hat unter anderem der Toyota Prius mit dem markanten Heck eine eigene Formensprache und einen damit verbundenen Wiedererkennungseffekt (Abbildung 3-18). Eine andere Alternative besteht darin, die alternativen Antriebe in das bestehende Design eines Fahrzeuges zu integrieren, dem „Conversion Design“.



Abbildung 3-18 Toyota Prius III [TPri-2012]

Darüber hinaus bietet die Technik der alternativen Antriebe die Möglichkeit, ein ganz individuelles „Purpose Designs“ zu entwickeln. Bei elektrifizierten Fahrzeugen könnten Radnabenmotoren eingesetzt werden, was die Möglichkeit schafft, die Überhänge zu reduzieren, da kein Motor im Vorder- oder Hinterwagen untergebracht werden muss. Im Interieur Design besteht die Möglichkeit, durch Entfall des Tunnels¹⁷ optisch größere Innenräume zu erzeugen. Trotzdem können mit Elektromaschinen auf der Vorder- und Hinterachse auch bei diesem Konzept Allradfahrzeuge dargestellt werden.

3.6 Auslegung aus elektrotechnischen Gesichtspunkten

Die Auslegung nach elektrotechnischen Gesichtspunkten erfolgt im Zusammenspiel der drei großen elektrischen Elemente, dem Antrieb, der Architektur sowie des Energiespeichers.

Die drei genannten Elemente stehen in Abhängigkeit zueinander und bilden ein komplexes Systemgebilde mit den unterschiedlichsten Ein- und Auswirkungen auf das gesamte Fahrzeug. Oberstes Ziel ist es, die Funktionalität des Antriebskonzeptes sicherzustellen. In diesem Abschnitt wird dabei zuerst auf den Energiespeicher, dann auf die Architektur und danach auf den elektrischen Antrieb eingegangen. In einem späteren Abschnitt wird das elektrische Laden extra betrachtet, da von diesem fahrzeugseitig der elektrische Energiespeicher und die elektrische Architektur betroffen sind.

3.6.1 Elektrischer Energiespeicher

Bei elektrifizierten Fahrzeugen wird entweder der gesamte Bedarf, mindestens jedoch ein Teil der Energie, für den Vortrieb des Fahrzeuges in Form von elektrischer Energie mitgeführt. Dafür werden elektrische Energiespeicher benötigt. Diese sind unterteilbar in elektrochemische Zellen und Kondensatoren (Abbildung 3-19), wobei primäre und sekundäre Zellen auch als galvanische Elemente zusammengefasst werden. Für ein Fahrzeugkonzept ist die Auswahl des Energieträgers eine der ersten richtungsweisenden Entscheidungen. Die Akkumulatoren bestimmen zwingend die Motorleistung und die Reichweite des Fahrzeuges.

Elektrochemische Zellen lassen sich in primäre und sekundäre Elemente unterscheiden. Grundsätzlich werden diese galvanischen Elemente aus Kathode, Anode und einem Elektrolyt gebildet. Kathode und Anode bestehen aus verschiedenen Metallen, an deren Grenzflächen durch chemische Reaktion eine Ladungstrennung stattfindet, die eine nutzbare Spannung freigibt. Das Elektrolyt stellt dabei ein unterstützendes, elektrisch leitendes Medium dar [BaG-2009].

¹⁷ Insofern die stabilisierende Funktion des Tunnels z.B. durch die Schweller übernommen wird.

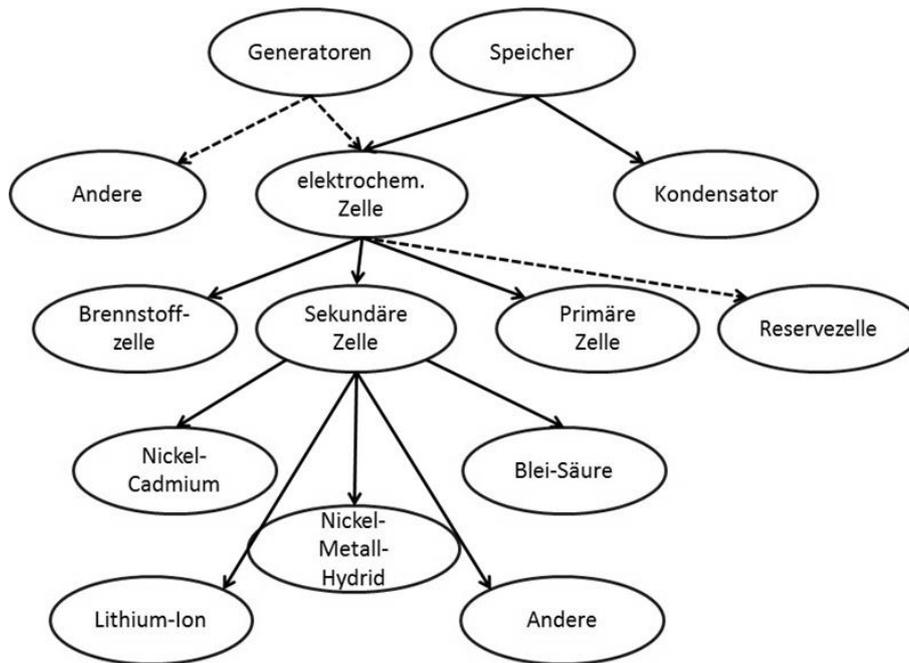


Abbildung 3-19 Energiequellen / elektrische Speichermedien [HaR-2001]

Primäre Elemente umschreiben Batterien im eigentlichen Sinne, wobei die chemische Energie nur einmal umgewandelt werden kann und ein Wiederaufladen nicht möglich ist, da bei der Nutzung das negative Elektrodenmaterial verbraucht wird. Der Einsatz dieser Zellen ist im Automobilsektor für einen elektrischen Vortrieb nicht geeignet, da bei regelmäßiger Energieentnahme (Fahrten) eine Vielzahl von Batterien nötig wäre.

Sekundäre Elemente oder auch Akkumulatoren können die chemische Reaktion, den chemischen Prozess der Entladung, umkehren. Dabei sind verschiedene chemische Zusammensetzungen möglich, am bekanntesten sind Blei-, Nickel-Metallhydrid und Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Letztere sind unter anderem aufgrund ihrer hohen Leistungs- (W/kg) und Energiedichte (volumetrisch Wh/l und gravimetrisch Wh/kg) am besten für den Einbau in Kraftfahrzeugen geeignet (Abbildung 3-20) [HaR-2001].

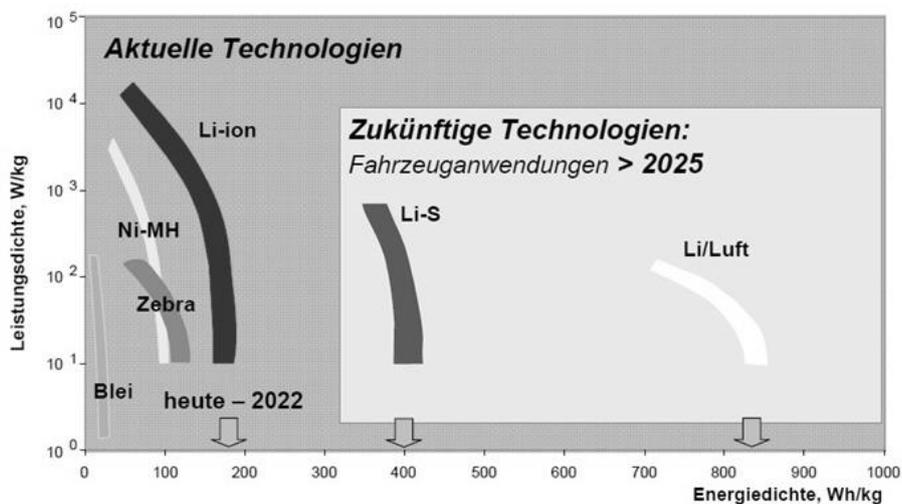


Abbildung 3-20 Gegenüberstellung von Akkumulatoren nach Leistungs- und Energiedichte [KoH-2012]

Für den Einsatz der Akkumulatoren in elektrifizierten Fahrzeugen sollte darüber hinaus zwischen Hochleistungs- und Hochenergiezellen differenziert werden. Diese Batteriezellen werden im Fahrzeug zu einer Traktionsbatterie zusammengebaut. Grundlegend bringen Hochleistungszellen Leistung für den Elektromotor und Hochenergiezellen Energie für eine größtmögliche Reichweite, eine hohe elektrische Fahrdistanz. In Hybrid-Fahrzeugen wird daher, hinsichtlich der häufigen Lade- und Entladezyklen sowie der Leistungsunterstützung der VKM, eine Hochleistungszelle benötigt.

Im Gegensatz dazu stehen die rein elektrischen Fahrzeuge, die auf Reichweite ausgelegt werden und dafür eine Hochenergiezellen benötigen (Abbildung 3-21). Energiezellen geben ihre Ladung langsam über die Fahrdistanz ab.

Wenn man Hochleistungs- und Energiezellen als jeweilige Extreme in Bezug auf das Verhältnis von Leistung zu Energie sieht, ist es möglich eine Zwischenzelle zu ergänzen, welche einen Kompromiss zwischen den extremen darstellt (vgl. Abbildung 3-21).

Bei Hybriden ist die Gesamtreichweite größer, es können mehr Rekuperationszyklen gefahren werden. Die Batteriezellen werden damit stärker belastet. Die Belastung wird technisch als C-Rate angegeben und spiegelt das Verhältnis von Kapazität zur maximal möglichen Stromstärke wider. Die C-Rate ist für das Laden des Akkus deutlich geringer als beim Verbrauch der Akkukapazität. Es können also zwei Raten für Beladung und Entladung angegeben werden. Die C-Rate hat einen Einfluss auf die Lebensdauer des Akkumulators. Ist die C-Rate hoch (für Ladung oder Entladung), folgt daraus eine höhere Belastung des Akkumulators.

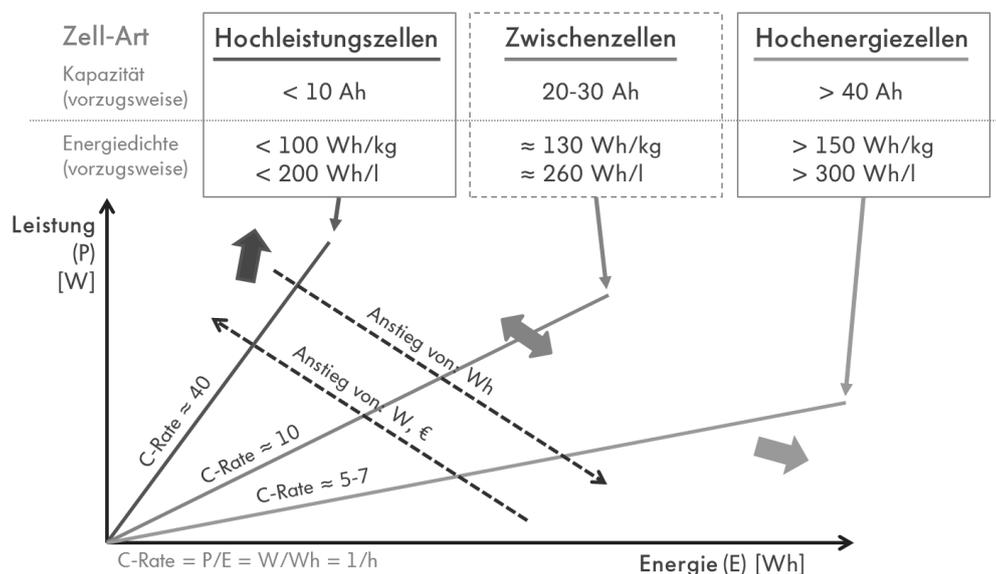


Abbildung 3-21 Unterschiedliche Hochvolt-Batterietypen [BuIn-2013]

Bei den Kondensatoren stehen für den Einsatz im Kraftfahrzeug als Energieträger „Supercaps“ (Superkondensatoren) zur Verfügung. Diese haben eine hohe Kapazität/Energiedichte sowie das Potential, Energie schnell zu speichern bzw. wieder abzugeben (Abbildung 3-22). Dabei hängt der Ladezustand des Kondensators ausschließlich von der Spannung ab, während Akkumulatoren diesbezüglich durch diverse physikalische und chemische Faktoren beeinflusst werden. Für den automobilen Sektor sind

zwei Kondensatorensysteme von primärer Bedeutung, die Doppelschichtkondensatoren und die Elektrolytkondensatoren. Diese Superkondensatoren können, mit einer hohen Leistungsdichte, den Vorteil der elektrochemischen Zellen mit hoher Energiedichte ergänzen. Die Kondensatoren können elektrische Leistung schneller abgeben sowie Bremsenergie effizienter rekuperieren und damit die Batteriezelle bei den Lade-/Entlade-Zyklen entlasten [JaM-2010].

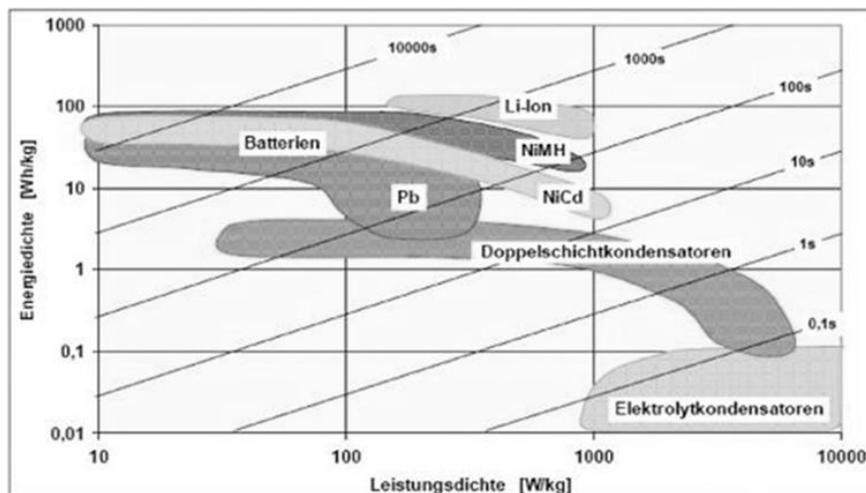


Abbildung 3-22 Differenzierung Supercaps und elektrochemischer Speicher [JaM-2010]

Die Volatilität der Energie (Selbstentladung) in einem Kondensator führt dazu, dass ein ausschließlicher Einsatz dieser Speichermedien zurzeit nicht möglich ist. Da die Energie aber schnell zur Verfügung steht, können die Kondensatoren zur Netzstabilität des Fahrzeuges beitragen und zügig ein hohes Leistungsniveau für den Vortrieb des Fahrzeuges bereitstellen.

Für den Einsatz von Kondensatoren und elektrochemischen Zellen in mobilen, elektrisch betriebenen Systemen sind neben den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Energieträger deren geometrische Ausprägung und das Gewicht von Bedeutung. Die geometrische Ausprägung von elektrochemischer Batteriezelle oder Kondensator setzt sich aus Breite, Höhe, und Tiefe (Prismatische- oder Pouch- bzw. Folien-Zelle) oder Höhe und Umfang (Rundzelle) zusammen. Je nach Zelltyp sind die abstehenden Pole in das Volumen mit einzubeziehen. Im Fahrzeug wird die gesamte Zelle mit einem Abstand zum nächsten Bauteil verbaut. Für eine Berechnung der Energie- oder Leistungsdichte der Zelle wird zumeist das Zellvolumen ohne die Pol-Höhe herangezogen.

3.6.2 Elektrische Verschaltung

Die elektrische Verschaltung baut primär auf den Bauelementen des elektrischem Energiespeichers und des Elektromotors auf und hat hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eines elektrifizierten Fahrzeuges eine erhebliche Bedeutung. Dabei müssen die zwei elektrischen Systeme, nämlich der Bereich des Energiespeichers und der des Antriebes (Abschnitt 3.6.3) differenziert werden. Verbunden sind die Systeme über die Leistungselektronik. Zwischen den genannten Systemen (Motor/Energiespeicher) besteht durch die elektrische Verschaltung (Spannung und Stromstärke) eine große Abhängigkeit. Dieses hat letztendlich Einfluss auf die Gesamtleistung, da die Spannung (U) multipliziert mit der

Stromstärke (I) die Leistung des elektrischen Systems ergibt (3-15). Die Bandbreite der Möglichkeiten, in der die beiden Variablen gesteuert werden können, ist dabei sehr groß.

$$\text{Elektrische Leistung} \quad P = U * I \quad (3-15)$$

Der verwendete Akkumulator hat den größten Einfluss auf das Hochvoltsystem¹⁸ des Fahrzeuges. Für die Fahrzeugauslegung (aus elektrotechnischen Gesichtspunkten) stellt der Akkumulator folgende wichtige Eigenschaften:

- Nennspannung,
- untere Spannungsgrenze,
- obere Spannungsgrenze oder Peakspannung,
- Kapazität,
- Peakleistung und
- C-Rate.

Da für einen längeren elektrischen Vortrieb eine größere Menge Energie und für den Nutzer auch eine ausreichende motorische Leistung zur Verfügung stehen soll, ist eine höhere Anzahl von Zellen erforderlich. An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine Batterie immer Gleichstrom zur Verfügung stellt. Wenn z.B. für einen Motor Wechselstrom benötigt wird, muss der Gleichstrom dementsprechend umgewandelt werden.

In elektrifizierten Fahrzeugen ist es zum Standard geworden, den elektrischen Energieinhalt des Energiespeichers in Watt-Stunden (Wh) anzugeben. Dafür wird in Formel (3-15) die Stromstärke (I) durch die elektrische Ladung (C in Ah) ersetzt und mit der Anzahl der verwendeten Zellen (n) multipliziert (3-16). Die Größe des Energiespeichers entscheidet letztendlich, abhängig vom Verbrauch des Fahrzeuges, über dessen Reichweite. Die Abhängigkeit der Motorleistung vom Energiespeicher wird im Abschnitt 3.6.3 erläutert.

$$\text{Energieinhalt} \quad E = U * C * n \quad (3-16)$$

Die einzelnen Batteriezellen können auf zwei Wegen verschaltet werden. Dabei haben zwei Gesetze von KIRCHHOFF eine besondere Bedeutung. Die Zellen können parallel oder in Reihe verschaltet werden. Nach der Kirchhoff'schen Knotenregel ist bei einer parallelen Verschaltung die Stromstärke gleich der Summe aller eingehenden Ströme. Die Spannung ist gleich der Einzelspannung der eingehenden Spannungen (3-17).

$$\text{Parallelschaltung} \quad I_{ges} = \sum_{n=1}^n I_n \quad \& \quad U_{ges} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3-17)$$

Die zweite Kirchhoff'sche Regel ist der Maschensatz. Dieser findet bei Reihenschaltungen Verwendung. Danach addieren sich die Spannungen und die Stromstärke bleibt gleich (3-18) [BuR-2011].

¹⁸ Das Hochvoltsystem sind alle Komponenten des elektrischen Teils des Antriebsstranges, welche, gegenüber der Bordnetzspannung, mit einer höheren Spannung betrieben und zum Vortrieb des Fahrzeuges benötigt werden.

Reihenschaltung
$$U_{ges} = \sum_{n=1}^n U_n \quad \& \quad I_{ges} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3-18)$$

Folglich gibt es die Möglichkeit, eine höhere Anzahl von Zellen entweder erst in Reihe und dann parallel oder umgekehrt zum beschriebenen Vorgehen zu verschalten. Eine Reihenschaltung ist bei gängigen Lithium-Ionen Zellen immer nötig, da diese sich singular vorwiegend in einer Spannungslage zwischen 3 V und 5 V bewegen (Abbildung 3-23).

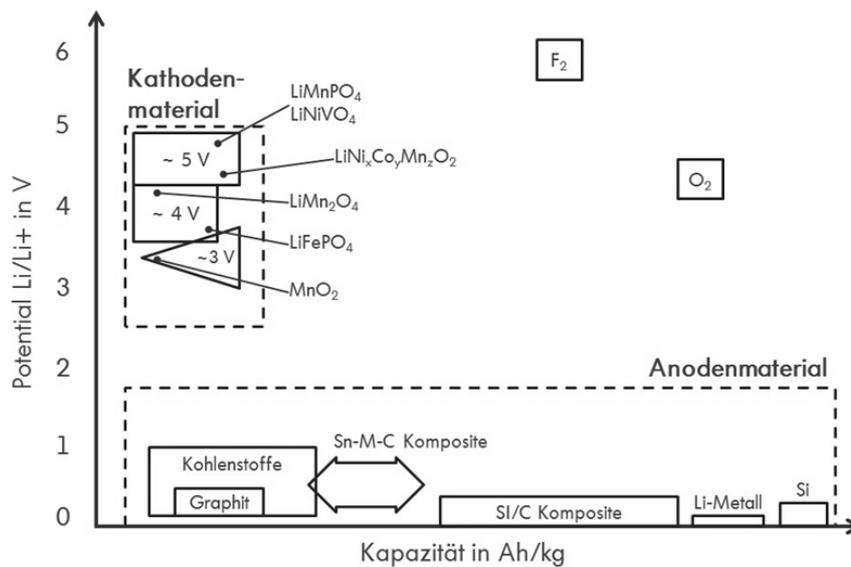


Abbildung 3-23 Spannungslage und Kapazität bei Li-Ionen Zellen (nach [BaS-2011])

Damit eine ausreichende leistungsorientierte Spannungslage erzielt werden kann, ist auf eine Reihenschaltung (3-18) zurückzugreifen. Heute liegt die Fahrzeugspannungslage für die Hochvoltkomponenten bei den meisten Herstellern elektrifizierte Kraftfahrzeuge zwischen 200 V und 500 V¹⁹. Die Dimensionierung der Spannungslage steht in Abhängigkeit zur im Fahrzeug verbauten Leistungselektronik. Diese wiederum ist abhängig von den elektronischen Bauteilen, deren Dimensionierung Parameter vorgeben, in denen diese spannungsseitig arbeiten können. Die Parallelschaltung ist nicht unbedingt nötig, bietet aber die Möglichkeit, für eine ausreichende Leistung sorgen zu können (3-15). Bei in einer Reihe verschalteten Batteriezellen ist nach (3-18) die Stromstärke gleich der Stromstärke der Einzelzelle, das heißt, die entnehmbare Stromstärke kann höchstens noch über die C-Rate erweitert werden. Es würde dann schneller mehr Strom aus den Zellen entnommen werden. Wenn man dieses vermeiden möchte oder aber die Zelle nicht den benötigten Strom liefern kann, ist eine Parallelschaltung nötig. In Anbetracht einer möglichst langen Lebensdauer der Akkumulatoren und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Motors sollte auch bei kleineren Batteriesystemen eine Parallelschaltung erfolgen. Reine Elektrofahrzeuge müssen zumeist parallelverschaltet werden, da mit einer einzigen Reihenschaltung, hinsichtlich der Spannungsobergrenze der Leistungselektronik, nicht genug Energie für eine ausreichende Reichweite bereitgestellt werden kann.

¹⁹ Dies bezieht sich auf Full- und Plug-In Hybride sowie reine Elektrofahrzeuge. Brennstoffzellenfahrzeuge haben je nach Dimensionierung und Verschaltung der Stacks (ein Stack hat unbelastet eine Spannung von ca. 1,25 V und eine Leistung 1 Watt/cm²) Spannungslagen zwischen 100 V und 200 V [BrS-2013].

Neben der direkten Verschaltung der Zellen zum Erhalt einer ausreichenden Nennspannung kann die Leistungselektronik über Stromrichter die Spannung heraufsetzen. Dafür werden Wechselstromsteller benötigt, die nur die Spannung im System ändern (bidirektional²⁰). Dabei wird Gleichstrom über Schaltungen im Wechselrichter in eine Art Wechselspannung gebracht. Um eine Sinuskurve zu erzeugen, sind weitere Hilfsmittel nötig, z.B. ein Frequenzumrichter. Darüber hinaus müssen die Wechselrichter die Schaltvorgänge extrem schnell durchführen, was zu Energieverlusten insbesondere über Abwärme führt [BuR-2011]. Die Wechselrichter erhöhen dabei nicht die Gesamtleistung des Systems, die relative Energiemenge bleibt gleich, bzw. verringert sich sogar durch Verluste bei der Wandlung. Durch das Hochsetzen der Spannung kann eine gewünschte minimale Leistung mit einer geringeren Stromstärke erzielt werden, wobei diese Änderung Auswirkungen auf die Frequenz des Wechselstroms hat.

Eine höhere Spannung hat bei Gleichstromsystemen darüber hinaus einen weiteren Vorteil. Wie aus der Formel (3-15) hervorgeht, kann für die gleiche Leistungsabgabe bei erhöhter Spannung ein geringerer Strom eingesetzt werden. Damit kann der erforderliche Leitungsquerschnitt verringert werden [BoA-2007].

Der Spannungsverlauf von Lithium-Ionen Zellen bei der Entladung (Abbildung 3-24) differenziert sich zwischen den verschiedenen chemischen Zusammensetzungen. Bei allen ist ein tendenzieller Verlauf erkennbar, ein starker Spannungsabfall zu Beginn und am Ende der Energieentnahme aus der Zelle. Diese Problematik lässt es nicht zu, die gesamt zur Verfügung stehende Energie der Zellen zu nutzen, da hohe bzw. tiefe Spannungen eine starke Alterung der Zelle verursachen. Der nutzbare Teil der für die Leistungsabgabe verwendbaren Energie wird in einem SOC-Fenster angegeben.

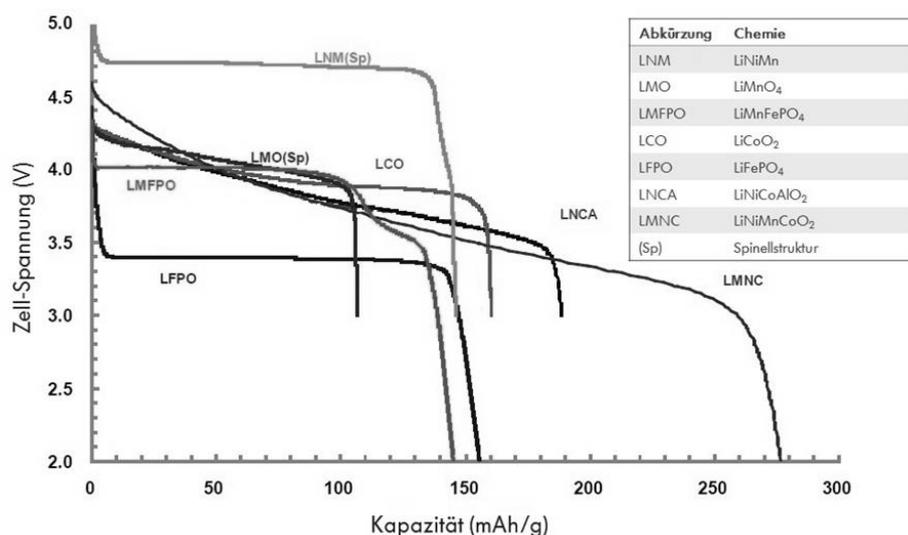


Abbildung 3-24 Spannungsverlauf Li-Ionen Zellen (nach [KrM-2011])

²⁰ Der Wechselstromrichter muss in beide Richtungen (bidirektional) arbeiten, wenn die Energie aus der Batterie in den Motor fließt und z.B. hoch gestellt wird, muss durch Rekuperation im Elektromotor gewonnene Energie, die in der Batterie gespeichert wird tiefgestellt werden. Wenn die Hochstellung vor der Leistungselektronik erfolgt, muss außerdem beim Laden, im genannten Beispiel, die Spannung ebenfalls tiefgestellt (herabgesetzt) werden.

SOC ist ein prozentualer Wert und steht für State of Charge. Berechnet wird dieser aus der zu entnehmenden Nettokapazität (E_b) und der Nennkapazität (E_N) (3-19).

$$\text{State of Charge} \quad \text{SOC} = \frac{E_N - E_b}{E_N} \quad (3-19)$$

Dieses Energie-Fenster beginnt nach dem ersten Spannungsabfall und endet vor dem Spannungsabfall am Ende der Energieabgabe. Der SOC ist für jede Zelle und dem entsprechenden Nutzungsfall neu auszulegen [BuI-2011]. Der SOC der Fahrzeuge der OEMs liegt beim Einsatz von Lithium-Zellen und abhängig von der Antriebsart (BEV, PHEV, etc.) im Bereich von 70% bis 90%. Je größer das SOC-Fenster ist, desto mehr Energie kann aus den Zellen für das elektrische Fahren und damit letztendlich für die Reichweite des Fahrzeuges zur Verfügung gestellt werden.

Um in der Produktion nicht mit einzelnen Zellen sondern mit geeigneten Zellpaketen arbeiten zu können, werden einzelne Zellen zu Modulen²¹ zusammengeschlossen. Dieses ergänzt im weitesten Sinne die oben genannte Verschaltung. Dabei kann es über der Laufzeit zu einem Auseinanderdriften der Spannungswerte der in Reihe geschalteten Module kommen. Dieses schwächt das Betriebsverhalten des gesamten Systems. Dieses ist vergleichbar mit einer Lichterkette. Bei einer in Reihe geschalteten Lichterkette muss nur eine Lampe ausfallen, um alle anderen auch ausfallen zu lassen. Sind die Lampen parallelverschaltet, ist nur eine Lampe betroffen, die anderen können weiter leuchten. Damit Ansprüche an Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Sicherheit gewährleistet werden können, hat die Leistungselektronik bzw. das Batteriemanagementsystem weitere Aufgaben zu erfüllen. Für die Lebensdauer ist, neben geringen thermischen Belastungen, ein austariertes elektrisches Betriebsverhalten der Zellen nötig, da die schwächste Zelle das System bzw. Modul bestimmt. Im Fahrzeugbetrieb ist dazu nur die entnommene Strommenge messbar und als Indikator verwendbar, da die Spannung nach Abbildung 3-24 Schwankungen unterliegt und nur die Ruhespannung bestimmt werden kann. Bei der Nutzung der Zellen muss es also eine Strombegrenzung als Tiefentladungsschutz geben. Ferner müssen Ladeprozesse überwacht und ein Temperatenausgleich ermöglicht werden. Überladung (Ladevorgang) und Tiefentladung (Fahrbetrieb) würden die Zellen nachhaltig schädigen. Bei einem Einsatz von Supercaps, also einem weiteren Energiespeicher, muss über das Energiemanagement eine Steuerung hinsichtlich der Systemspannung erfolgen [NaD-2006].

3.6.3 Elektrischer Antrieb

Der elektrische Antrieb ist das letzte wichtige Glied in der Kette der elektrifizierten Elemente der Auslegung. Hier wird die Energie aus dem Energiespeicher in Fahrleistung umgesetzt, aber auch Bremsenergie rekuperiert, also Energie zurückgewonnen. Dabei hat der Elektromotor einen wesentlichen Vorteil gegenüber der VKM, denn das Drehmoment der elektrischen Maschine steht von der ersten

²¹ Bei der Bündelung von Traktionsbatterien hat sich in der Automobilindustrie für das entstehende Gebilde der Name Modul durchgesetzt. Dieses entspricht nicht der im weiteren Verlauf dieser Arbeit (Kapitel 4 ff.) genutzten Differenzierung zwischen Baugruppen, Modulen, Komponenten etc.!

Umdrehung komplett zur Verfügung (Abbildung 3-25). Elektrische Motoren sind effizienter, wartungsärmer und verursachen weniger Geräusche [StC-2012].

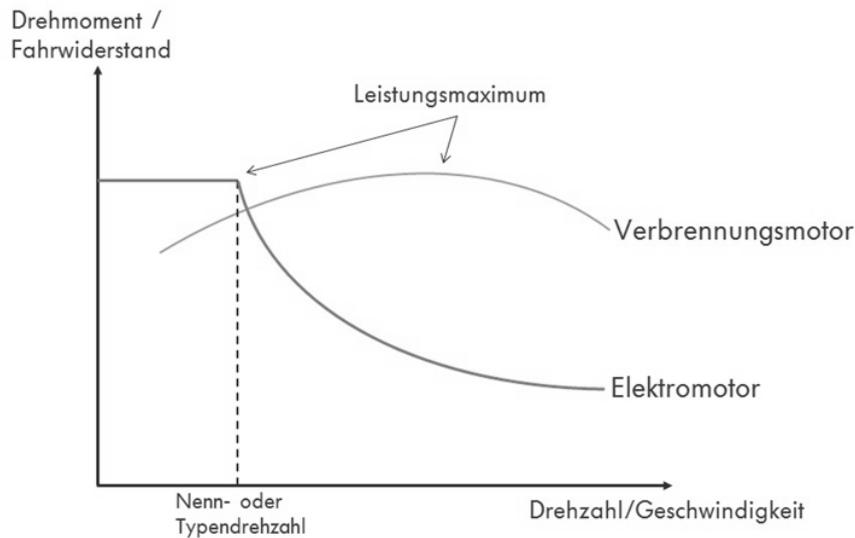


Abbildung 3-25 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Motoren (nach [NaD-2006])

Der elektrische Motor hat Schwächen bei hohem Drehmoment und hoher Drehzahl, dort ist der Verbrenner überlegen. In Hybriden wird dies genutzt, um die Anfahrtsschwäche der VKM zu überbrücken. Hieraus ergeben sich die wesentlichen Kraftstoffeinsparpotentiale. Außerdem kann, bei hybriden Antriebskonzepten, die Leistung von VKM und Elektromotor kurzfristig kombiniert werden, um in entsprechenden Fahrsituationen, z.B. Überholvorgang, mehr Leistung zur Verfügung zu stellen.

Elektrische Motoren können, im Gegensatz zur VKM, im Vier-Quadranten-Betrieb arbeiten, also motorisch und generatorisch. Dies bedeutet, dass die elektrische Maschine in beiden Drehrichtungen als Antrieb und Bremse eingesetzt werden kann, also bei der Geschwindigkeitsreduktion durch Rekuperation Bremsenergie zurückgewinnen kann (Abbildung 3-26) [WaF-2011].

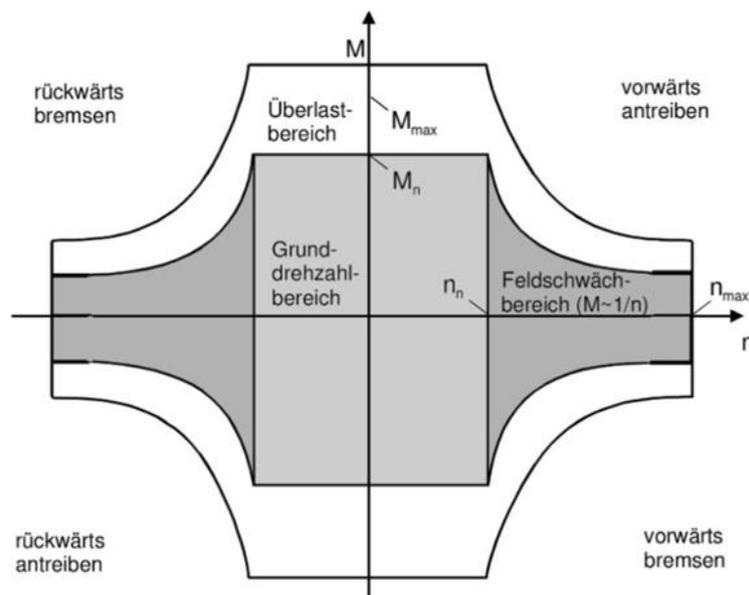


Abbildung 3-26 Drehmoment- Drehzahl- Diagramm eines Elektromotors [WaF-2011]

Elektromotoren sind vom System her meist ähnlich aufgebaut. Ein bewegliches, elektromechanisches Element (Rotor) dreht sich mit Hilfe eines Magnetfelds, welches ganz oder teilweise elektrisch erzeugt wird, um ein feststehendes elektromechanisches Element (Stator) [StC-2012].

Das Drehmoment eines Elektromotors wird zumeist über dessen Baugröße skaliert. Dabei haben Länge und Stärke der Wicklung eine besondere Bedeutung. Die Besonderheit eines Elektromotors ist es, im Kurzzeitbetrieb stark überlastet werden zu können, das heißt, in einem kurzen Zeitraum bis zum Doppelten des Nenndrehmomentes leisten zu können.

Die meisten elektrischen Motoren werden konventionell mit Luft gekühlt. Dafür wird ein Lüfter am Ende der Welle (Rotor) außerhalb des Gehäuses angebracht. Der Luftstrom am Gehäuse bzw. den Kühlrippen fördert die nötige thermische Entlastung. Für den automobilen Einsatz ist aus Package- und Gewichtsgründen eine kompliziertere, aber effizientere, da leichtere und vor allem kleinere Wasserkühlung vorzusehen [NaD-2006].

Ein wichtiger Verlustfaktor bei elektrischen Maschinen, die eine Spule mit einer Wicklung aus Kupferdraht haben, ist der Kupferverlust. Dieser steht im Zusammenhang mit dem Ohm'schen Widerstand der Wicklung bzw. des Kupfers. Bei niedrigen Spannungen und hoher Leistungsabfrage steigt die Stromaufnahme und damit der Widerstand in der Spule (Verlustleistung) [ReM-2007].

Die elektrische Leistung eines Motors P_1 (3-20) wird bestimmt durch die Leistungsaufnahme, die durch die Traktionsbatterie zur Verfügung gestellt werden kann (3-21). Das heißt, die Leistungsaufnahme setzt sich aus Spannung und Stromstärke zusammen. Da Drehstrommaschinen mit Wechselstrom betrieben werden, kommt der Faktor $\sqrt{3}$ für die drei Phasen²² hinzu, dieses gilt auch für den Strom der Zellen, der für jede Phase berechnet werden muss (3-22).

$$\text{Elektrische Leistung Drehstrommotor} \quad P_1 = \sqrt{3} * U * I_{\text{Phase}} \quad (3-20)$$

$$\text{Elektrische Leistung Traktionsbatterie} \quad P = U * I \quad (3-21)$$

$$\text{Max. Strom je Phase} \quad I_{\text{Phase}} = \frac{P_{\text{Peak-Zelle}}}{U_{\text{Zelle}}} / n_{\text{Phasen}} \quad (3-22)$$

Drehstrommaschinen werden dreiphasig betrieben. Wechselstrommaschinen können nach (3-23) eine differenzierte Anzahl von Phasen haben, mit den entsprechenden Änderungen für die Formeln (3-20) und (3-22). Die Leistung der Wechselstrommaschine ergibt sich danach aus (3-24) mit dem entsprechenden Versatz der Pole (3-25).

$$\text{Phasen für Wechselstrommaschinen} \quad 1 - n \text{ Phasen für } n \rightarrow \infty \quad (3-23)$$

$$\text{Leistung Wechselstrommaschine} \quad P_{\text{Wechsel}} = \sqrt{n} * U * I_{\text{Phase}} \quad (3-24)$$

²² Bei dreiphasigem Wechselstrom bzw. Stern-Dreieck-Schaltung sind die Effektivwerte der Spannungen zwischen den Außenleitern um den Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ größer als die der Spannungen zwischen den Außenleitern und dem Neutralleiter. Entsprechend größer ist bei gleichem Strom die Leistung.

Pol-Versatz bei Wechselstrommaschinen
$$\text{Versatz} - \text{Winkel} = \frac{360^\circ}{n} \quad (3-25)$$

Welche Leistung der Elektromotor erbringen muss, ergibt sich aus den in Abschnitt 3.2 gezeigten Fahrwiderständen und den damit verbundenen Leistungsansprüchen. Diese Leistungsabgabe (P_2) errechnet sich aus dem Moment (M) und der Winkelgeschwindigkeit (ω), die abhängig von der Drehzahl (n) ist (3-26). Diese Werte ergeben sich aus den Ansprüchen an die Fahreigenschaften des Fahrzeuges in Abhängigkeit zu der Leistungsfähigkeit der Elemente des Antriebsstranges.

Mechanische Leistungsabgabe Drehstrommotor
$$P_2 = M * \omega \quad (3-26)$$

Winkelgeschwindigkeit
$$\omega = 2 * \pi * n \quad (3-27)$$

Dabei ist die Leistungsabgabe immer kleiner der Leistungsaufnahme, weswegen der Motor nach der geforderten Leistungsabgabe ausgelegt wird. Leistungsaufnahme und -abgabe sollten im Betriebskennfeld im Verhältnis annähernd gleich sein, da sich aus diesen der Wirkungsgrad des Motors ableitet (3-28). Der Wirkungsgrad von Elektromotoren liegt bei bis zu 95 % [SyC-2008].

Wirkungsgrad Motor
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3-28)$$

Um die hohe Drehzahl des elektrischen Motors auch an die Drehzahl der Antriebsräder anzupassen, ist darüber hinaus eine Untersetzung nötig. Die Drehzahl eines Elektromotors kann bei gleichbleibendem Moment über die Frequenz des Eingangsstroms gesteuert werden [BuR-2011]. In Hybriden ist durch die Kopplung von Verbrenner und Elektromotor eine Getriebeuntersetzung vorhanden.

Die Charakteristik der Leistungs- bzw. Drehmomentenabgabe eines Elektromotors über der Drehzahl (Abbildung 3-27) zeigt, dass in zwei Betriebsbereiche differenziert wird.

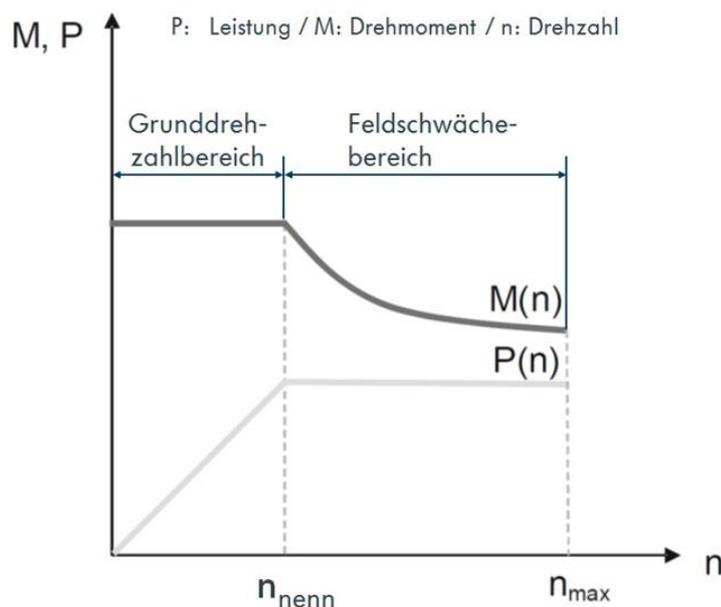


Abbildung 3-27 Leistungscharakteristika von Elektromotoren nach [WaF-2011]

Im Grunddrehzahlbereich, vom Stillstand bis zur Nenn- oder Grunddrehzahl n_{nenn} in (3-29), kann das Nennmoment bzw. das maximale Moment eingestellt werden. In diesem Bereich des Betriebsfeldes

steigt die Erhöhung der Drehzahl bei gleichbleibendem Moment (M_{nenn}). Die mechanische Leistung steigt linear an, bis die Nennleistung erreicht ist (P_n).

Nenndrehzahl
$$n_{nenn} = \frac{P_n}{2 * \pi * M_{nenn}} \tag{3-29}$$

Im Grunddrehzahlbereich ist der Strom dem Drehmoment und die Spannung der Drehzahl proportional. Nach dem Erreichen der maximalen Spannung muss, um die Spannung konstant zu halten, der magnetische Fluss in der Maschine reduziert werden. Dieser dem Grunddrehzahlbereich folgende Betriebsbereich wird Feldschwächebereich genannt. Der Feldschwächebereich tritt bei fremderregten Maschinen auf. Er ist für permanenterrechte Maschinen nur mit zusätzlichen Maßnahmen, wie Erreger- spulen im Läufer, zu erzielen [FaS-2002].

Durch die Feldabschwächung ergibt sich eine Absenkung des Drehmomentes $M_{(max-Felds.)}$, bei dem die Leistung (P_n) konstant gehalten werden kann, wenn dies umgekehrt proportional zur Drehzahl (n) erfolgt [HoP-2010].

Max. Drehmoment im Feldschwächebereich
$$M_{max-Felds} = \frac{P_n}{2 * \pi * n} \tag{3-30}$$

 mit $P_n = konst.$

In Kraftfahrzeugen können potentiell die in Abbildung 3-28 dargestellten Motoren verwendet werden. Der Standard im Fahrzeugbau umfasst dabei vier Motoren:

1. Gleichstrommaschinen, fremd- und permanenterreget
2. Asynchronmaschinen
3. Permanent- und fremderregte Synchronmaschinen
4. Geschaltete Reluktanzmaschine [NaD-2006].

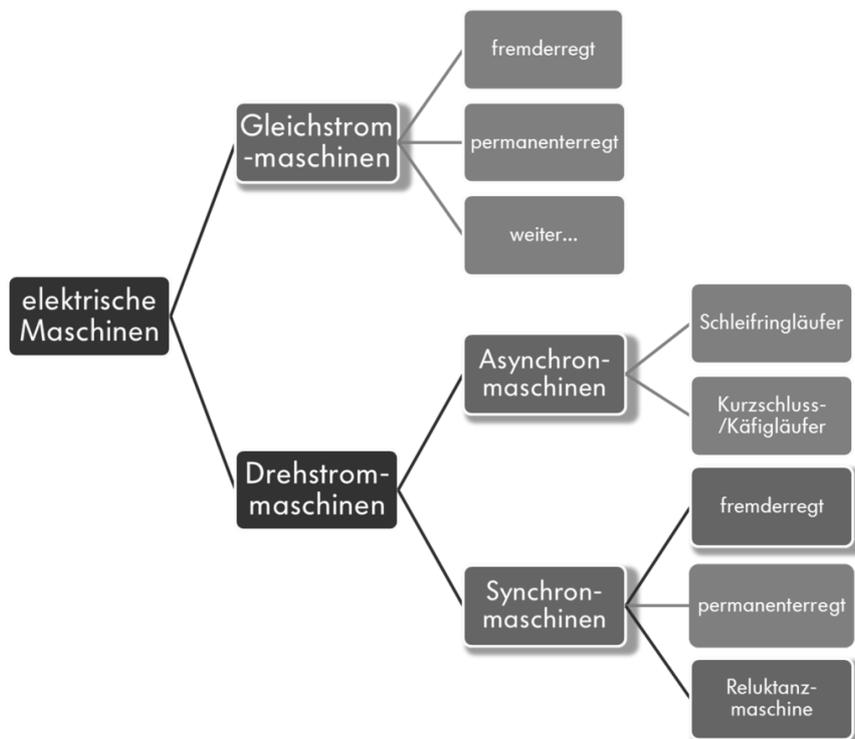


Abbildung 3-28 Auswahl elektr. Maschinen mit Einsatzmöglichkeit im Automobil (nach [HoP-2010])

Die grundsätzliche Leistungsfähigkeit der oben genannten elektrischen Maschinen ist in Tabelle 3-5 aufgetragen.

Tabelle 3-5 Übersicht der technischen Eigenschaften geeigneter Elektromotoren (nach [GrR-2001])

Motor- Kriterium	Gleichstrom	Synchron, fremderregt	Synchron, permanent- erregt	Asynchron	Reluktanz
Höchstdrehzahl [1/min]	6.000	>10.000	>10.000	>10.000	>10.000
Spez. Drehmoment [Nm/kg]	0,7	0,6-0,75	0,95-1,72	0,6-0,8	0,8-1,1
Spez. Leistung [kW/kg]	0,15-0,25	0,15-0,25	0,3-0,95	0,2-0,55	0,2-0,62
Wirkungsgrad Maschine	0,82-0,88	0,87-0,92	0,87-0,94	0,89-0,93	0,9-0,94
Wirkungsgrad Steuerung	0,98-0,99	0,93-0,98	0,93-0,98	0,93-0,98	0,93-0,97
Gesamt- wirkungsgrad	0,8-0,85	0,81-0,9	0,81-0,92	0,83-0,91	0,83-0,91

Bei der Gleichstrommaschine ist am Rotor ein Ankerleiter befestigt, dieser wird zur Anpassung der Stromrichtung an die Feldrichtung benötigt (Abbildung im Anhang *B2 Aufbauarten von E-Maschinen*). Dies erfolgt über Kollektoren (Bürsten), die einen mechanischen Kontakt zum Ankerleiter haben. Dieser Schleifkontakt zwischen den Lamellen des Kollektors wirkt sich negativ auf Gewicht und Kosten aus, wobei die Kohlebürsten nach aktuellem Stand der Technik die geforderte Lebensdauer des Motors überstehen. Gleichstrommaschinen sind durch zwei Stromkreise zu beschreiben, den Anker- und Erregerstromkreis. Diese Art von Maschine ist am einfachsten über die Drehzahl zu steuern, welche im Wesentlichen von der zugeführten Spannung abhängig ist [NaD-2006] [StC-2012] [WaF-2011]. Nachteil der Gleichstrommaschinen liegt in der geringen spezifischen Leistung und der kleineren Höchstdrehzahl, was den Einsatz in elektrifizierten Fahrzeugen nicht attraktiv macht (Tabelle 3-5).

Drehstrommaschinen, in der Literatur auch als Wechselstrommaschinen bezeichnet, entwickeln ein Drehfeld, welches elektrische Energie in mechanische umwandelt. Um dieses Drehfeld zu erzeugen, sind Wicklungen erforderlich, die in einem Drei-Phasen-System um 120° verschoben sind, weswegen zum Betrieb ein Wechselstrom benötigt wird. Der Strom der einzelnen Phasen erzeugt in der jeweiligen Wicklung einen resultierenden Flussdichtevektor konstanter Länge. Dieser Vektor weist beim Erreichen eines positiven Maximalwertes der drei Wicklungsströmungen immer auf die Spule, die diesen Maximalwert gerade führt. Kurz, das Drehfeld entsteht, weil sich der Flussdichtevektor zwischen den Wicklungen mit einer Winkelgeschwindigkeit dreht, die der Frequenz der Spulenströme proportional ist. Die Drehfeldrehzahl (n_s) ist abhängig von der Frequenz (f_1) des speisenden Stromes des Spulensystems sowie der Polpaarzahl (p) der Maschine (3-31) [BuR-2011]. Die Drehfeldrehzahl gibt die Drehzahl des Ständerfeldes an. Wenn (wie bei Asynchronmaschinen nötig) die Läuferdrehzahl

davon abweicht, ist dies der Schlupf. Dieser wird als prozentuale Abweichung der Drehfeldrehzahl angegeben. Ein großer Schlupf wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad der Maschine aus.

$$\text{Drehfeldrehzahl} \quad n_s = \frac{f_1}{p} \quad (3-31)$$

Eine häufig ausgeführte Bauart der Drehstrom-Asynchronmaschinen ist die des Kurzschlussläufers oder auch Käfigläufers. Dieser hat auf dem Rotor massive, gut leitfähige Leiterstäbe, die am Anfang und Ende kurzgeschlossen sind (Abbildung 3-29 und Anhang *B2 Aufbauarten von E-Maschinen*). Im Stator wird ein elektrisches Feld erzeugt, welches per Induktion ein elektrisches Feld im Rotor bewirkt. Beide Felder laufen immer asynchron. Würden sie gleich laufen, würde die Maschine stehen, da keine magnetische Flussänderung mehr möglich ist und durch die angelegten Ströme aber das fehlende Drehmoment des Läufers Schaden nehmen. Diese Asynchronität von Rotor und Stator wird durch einen Schlupf dargestellt, der wiederum in einer Schlupfdrehzahl bemessen werden kann. Damit die Asynchronmaschine auch als Generator angetrieben werden kann, muss diese in einen übersynchronen Lauf gebracht werden, das heißt, schneller laufen als das Drehfeld [BuR-2011].

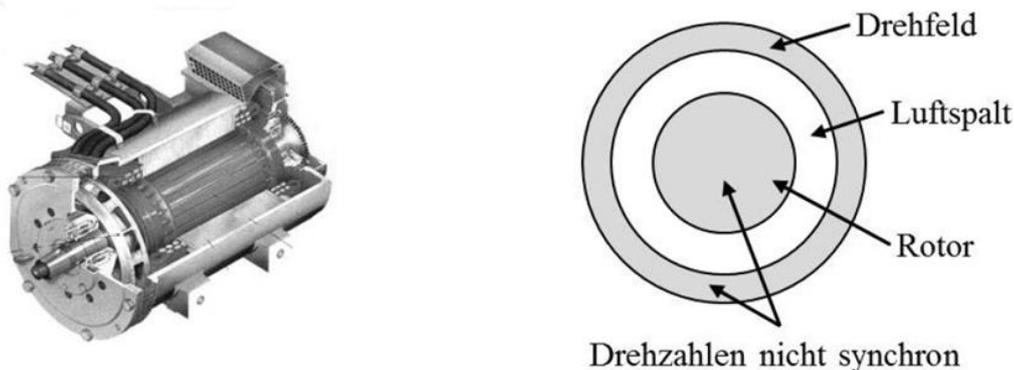
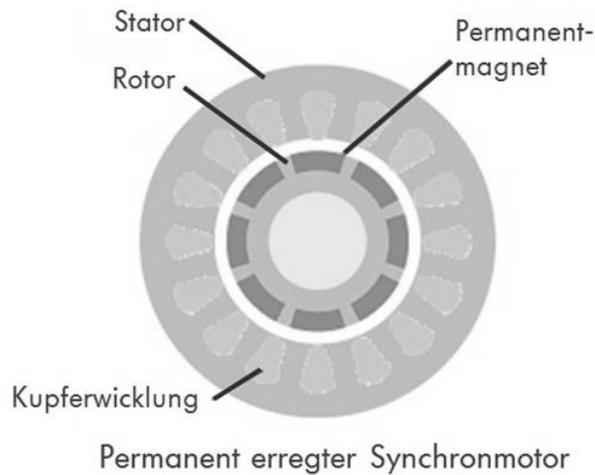


Abbildung 3-29 Prinzip einer Asynchronmaschine [StC-2012]

Eine weitere Bauart der Asynchronmaschine ist die des Schleifringläufers, bei dem die Enden des Läufers bzw. der Spulen auf Schleifringe geführt sind und hinsichtlich einer Rotationsbewegung kurzgeschlossen werden.

Vorteil der Asynchronmaschine ist, dass diese leichter ist und einen höheren Wirkungsgrad als Gleichstrommaschinen hat. Gegenüber Drehstrom-Synchronmaschinen ist sie aber schwerer und baut größer auf [NaD-2006] [ZeD-2012].

Drehstrom-Synchronmaschinen werden, im Gegensatz zu den Asynchronmaschinen, mit einer synchronen Drehzahl von Rotor- und Statorfrequenz betrieben. Die Statorfrequenz ist abhängig von der Polpaarzahl des Motors. Um das magnetische Feld bilden zu können, werden Permanentmagnete auf dem Rotor eingesetzt (Abbildung 3-30). Der Magnet des Rotors richtet sich selbständig zum durch die Ständer- bzw. Statorwicklung erzeugten Drehfeldvektors aus. Da in den Rotor (Läufer) kein Strom induziert werden muss, benötigt die Maschine keine Drehzahldifferenz. Rotor und Drehfeld bewegen sich in einer Synchrondrehzahl (n_s) [BuR-2011].



Permanent erregter Synchronmotor

Abbildung 3-30 Prinzip einer permanent erregten Synchronmaschine nach [ZeD-2012]

Permanent erregte Synchronmaschinen haben die höchste spezifische Leistung und den besten Wirkungsgrad der hier vorgestellten Elektromaschinen (Tabelle 3-5). Außerdem haben diese Motoren ein sehr hohes spezifisches Drehmoment. Sie sind für den Einsatz im elektrifizierten Fahrzeug durch das kompakte Design und dem geringen Gewicht prädestiniert [NaD-2006].

Der Nachteil dieser Elektromotoren ist, dass sie Permanentmagneten haben. Diese enthaltenen seltene Erden (z.B. Neodym und Dysprosium), die aktuell einer starken Preissteigerung unterliegen (Abbildung 3-31) [ZeD-2012].

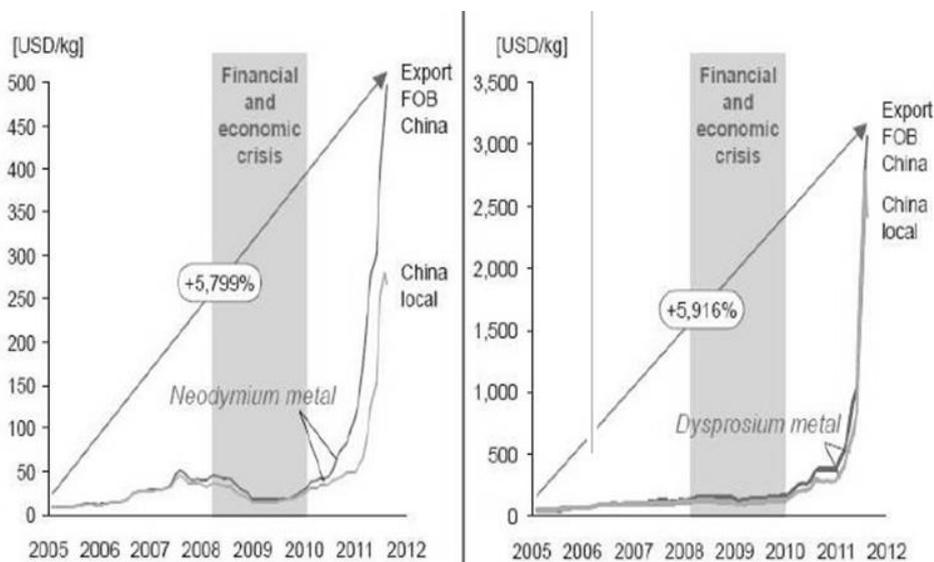


Abbildung 3-31 Preisentwicklung der seltenen Erden Neodym und Dysprosium [ZeD-2012]

Alternativ zur permanent erregten Synchronmaschine gibt es auch die fremderregte Synchronmaschine, die keine seltenen Erden benötigt. Bei dieser wird anstelle von Dauermagneten eine Kupferverdrahtung auf den Rotor gewickelt (Abbildung 3-32). Der Strom für die Rotorspule wird über Schleifbürsten übertragen. Für diese Maschinen wird zusätzlich ein Pulswechselrichter benötigt, um einen Erregerstrom für den Rotor zu erzeugen. Dieser hat eine höhere Komplexität der Maschine zur Folge [ZeD-2012].

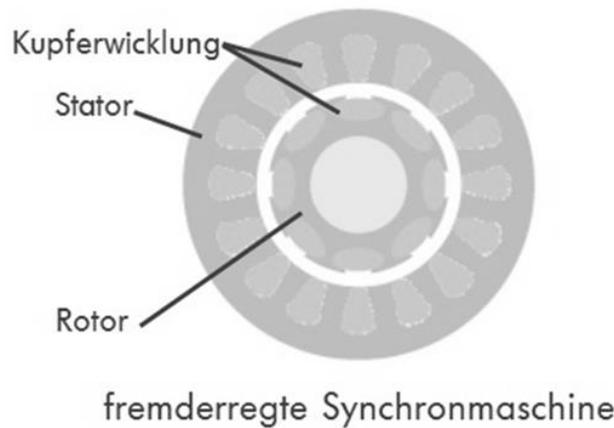


Abbildung 3-32 Prinzip einer fremderregten Synchronmaschine nach [ZeD-2012]

Fremderregte Synchronmaschinen haben eine ähnliche spezifische Leistung und Wirkungsgrad wie Asynchronmaschinen (Tabelle 3-5), sind aber schlechter hinsichtlich des spezifischen Drehmomentes. Trotzdem sind diese Maschinen interessant für den Einsatz im elektrifizierten Fahrzeug, da ein synchroner Betrieb ohne permanent Magneten dargestellt und somit auf seltene Erden verzichtet werden kann.

Eine weitere Bauart der Synchronmaschine ist die mit Außenläufer. Dieser Typ findet speziell in Radnabenmotoren Anwendung. Da diese Maschinen auf sehr kleinen Raum die elektrische Energie in mechanische wandeln müssen (hohe Leistungsdichte) und das Drehmoment über die Baugröße skaliert, sind diese Motoren zurzeit nur bedingt für den automobilen Sektor einsetzbar und müssen zwingend flüssigkeitsgekühlt werden [BIU-2012].

Geschaltete Reluktanzmaschinen sind vom Aufbau her sehr einfach aufgebaut, da sie keine Wicklung oder Magnete auf dem Läufer haben und somit sehr preiswert sind (Abbildung 3-33). Der Nachteil dieser Motoren liegt darin, dass der Rotor im Betrieb radiale Kräfte auf das Ständergehäuse überträgt und dieses zum Schwingen anregt, was letztendlich zu Geräuschen führt [NaD-2006]. Seitens der Leistungsfähigkeit ist dieser Maschinentyp schlechter als die permanenterregte Synchronmaschine, aber besser als Asynchron- oder fremderregte Elektromotoren [Tabelle 3-5].

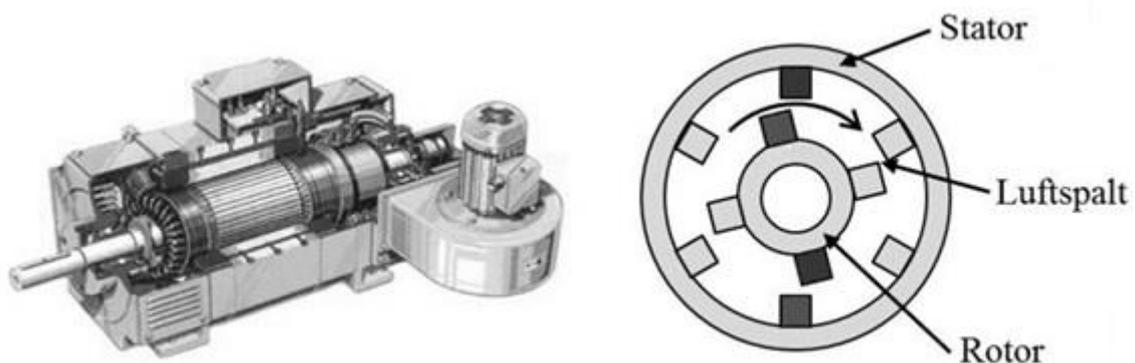


Abbildung 3-33 Reluktanzmaschine [StC-2012]

3.6.4 Elektrisches Laden

Das Laden des Energiespeichers bekommt im Bereich der Elektromobilität gegenüber dem Laden (Tanken) konventioneller Fahrzeuge eine neue Bedeutung. Diese liegt an einer neuen bzw. zusätzlichen Schnittstelle am Fahrzeug, der Ladedose, und der Dauer bzw. der Häufigkeit des Betankungsvorgangs. Da das Füllen des Kraftstofftanks bzw. einer Gasflasche sich nicht grundlegend von heutigen Systemen unterscheidet, wird im Folgenden auf die elektrische „Betankung“ der Fahrzeuge eingegangen. Dabei stehen für die Auslegung drei wesentliche Punkte im Fokus:

1. Das elektrische Verfahren zum Laden,
2. die Art der Verbindung zwischen Fahrzeug und Energiespeicher/Stromnetz und
3. die Position der Ladeeinrichtung im bzw. am Fahrzeug.

3.6.4.1 Elektrische Verfahren zum Laden

Das elektrische Verfahren meint das Laden mit Gleich- oder Wechselstrom (DC-/ AC-Laden). Da die Akkumulatoren Gleichstrom (DC) abgeben, könnten diese direkt DC-geladen werden.

Die meisten Niedrigstromnetze in der Welt sind Wechselstromnetze (AC-Netz). In diesem Fall muss der Wechselstrom zum Laden der Akkumulatoren in DC-Strom mit einem Stromrichter gewandelt werden. Dies geschieht über ein Ladegerät, welches im Fahrzeug wie auch fahrzeugunabhängig zur Verfügung stehen kann. Beim Laden mit Hilfe eines Ladegeräts sind dessen Wirkungsgrad und die damit verlängerte Ladezeit zu berücksichtigen.

Das Stromnetz in Deutschland wird in zwei Bereiche eingeteilt, dem Bereich der Niederspannung und der Hochspannung. Letztere beginnt mit einer Mittelspannung von über 1.000 Volt im örtlichen/überörtlichen Verteilnetz und endet mit Höchstspannungen beim Anschluss von Großkraftwerken mit über 150.000 Volt. Das Mittelspannungsnetz dient als Zubringer in das Niederspannungsnetz bzw. wird in Ballungsräumen und Gewerbegebieten mit erhöhtem Strombedarf auch als Verteilnetz eingesetzt (20.000 Volt). Primär steht für Haus- und Gewerbeanschlüsse das Niederspannungsnetz bis 1.000 Volt (230/400 Volt) zur Verfügung [BAS-2012].

Stromnetze in Haus- und Gewerbebereichen in Deutschland sind über Leitungsschutzschalter abgesichert, die die abnehmbare Strommenge begrenzen. Ähnliches gilt für das örtliche Verteilnetz. Die abnehmbare Strommenge hängt dort von verschiedenen Faktoren, z.B. der Gesamtbelastung des Netzes ab. Bezogen auf das normale Haus- und Gewerbenetz im Niederspannungsbereich lassen sich bei 230 V bzw. 400 V und einer Absicherung von 16 A, 32 A oder 63 A die in Tabelle 3-6 aufgezeigten Leistungen zum Laden elektrifizierter Fahrzeuge erreichen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass an diesem Stromkreis keine weiteren Verbraucher angeschlossen sind und das örtliche Verteilernetz die geforderte Leistung auch abgeben kann.

Tabelle 3-6 Ladeleistung Niederspannungsnetz

Netzspannung (Volt)	Leitungsschutz (Ampere)		
	16 A	32 A	63 A
230 V	3,68 kW	7,36 kW	14,49 kW
400 V	6,4 kW	12,8 kW	25,2 kW

Unter der Berücksichtigung, dass ein BEV (Battery Electric Vehicle) in der Kompaktklasse mit ca. 150 km Reichweite ca. 20 kWh Energie benötigt, um diese theoretische Strecke zurücklegen zu können, würde ein Aufladen mit der „Haushaltssteckdose“ (230 V / 16 A) rund 6 Stunden dauern. In Anbetracht der Tatsache, dass die im angenommenen Beispiel mitgeführte Energie für ca. 10% bis 20% der Reichweite konventioneller Fahrzeuge reicht, ist zusätzlich davon auszugehen, dass nicht nur länger, sondern auch häufiger als bei konventionellen Fahrzeugen nachgeladen werden muss.

Bei Betrachtung des Ladens auf Zell-Ebene, hier speziell von Lithium-Ionen-Akkumulatoren, wird zunächst mit einem konstanten Strom und nach dem Erreichen einer bestimmten Zellspannung, knapp unter der Peak-Spannung, mit konstanter Spannung geladen. Lithium-Zellen haben eine Schnellladefähigkeit, bei der relative Ladeströme von 2C möglich sind. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine mögliche höhere Ladeleistung oder äußere Spannung zu erhöhten Temperaturen und damit zum Schaden der Zelle führen kann. Hohe Ladespannungen können zu thermisch instabilen Kathodenmaterial führen. Höhere Temperaturen haben eine exotherme Reaktion im Zellen-Inneren zur Folge [WoH-2012]. Wenn hohe Ladeleistungen in einem Fahrzeug genutzt werden sollen, ist immer eine geeignete Kühlung der Zellen zu prüfen.

3.6.4.2 Art der Verbindung zwischen Fahrzeug und Energiespeicher/Stromnetz

Um einen Ladevorgang an einem Fahrzeug durchzuführen, ergeben sich fahrzeugeitig drei Möglichkeiten:

1. Kabelgebundenes Laden (konduktives Laden)
2. Kabelloses Laden (induktives Laden)
3. Batteriewechselsysteme

Beim kabelgebundenen Laden muss über Kontakte (Stecker) eine Verbindung zwischen dem Fahrzeug und dem Stromnetz aufgebaut werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, Ladestecker und Ladedose auf der Seite des Fahrzeuges sowie auf der Seite der Ladeinfrastruktur zu definieren. Im Markt sind zurzeit mehrere Stecker-Varianten, insbesondere nach Ländern abhängig bekannt. In Europa primär verwendete Ladestecker und -dosen sind für DC-Laden der CHAdeMo (Handelsname) und für DC- und AC-Laden die Stecker der DIN IEC 62196, bekannt unter dem Namen CCS (combined charging system). Das Laden mit Kabel ermöglicht auch eine Informationsverbindung zwischen dem Batterie-Management-System (BMS) im Fahrzeug und dem öffentlichen Stromnetz des jeweiligen Energieanbieters. Beim Einsatz eines bidirektionalen Ladegerätes kann neben dem Laden des Akkumulators so auch eine Rückspeisung von Energie in das öffentliche Stromnetz z.B. für Netzstützungsfunktionen

ermöglicht werden [Sch-2009]. Im öffentlichen Raum und (bei höheren Ladeleistungen) auch zu Hause sind für das Laden Ladesäulen aufzubauen. Es werden dabei zwei Systeme differenziert. Das On-board-Laden, bei dem der Wechselstrom aus dem Haushaltsnetz ins Fahrzeug eingespeist wird und dort „on-board“ gleichgerichtet wird. Das andere System ist das Off-board-Laden, bei dem der Strom in einer externen Ladestation gleichgerichtet und direkt zur Batterie geleitet wird. Insbesondere für das letztere System ist der zusätzliche Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Ladestation sehr wichtig, um Systemzustand und mögliche Fehler zu kommunizieren [CAB-2001].

Der Verbau des Ladegerät fürs AC-Laden im Fahrzeug ist unter dem Gesichtspunkt einer flächendeckenden Versorgung mit mehr Ladesäulen als Fahrzeugen nicht nur aus Kostengründen in Betracht zu ziehen. Eine Schnittstelle zwischen Energienetz und Fahrzeug ist technischer Natur, eine Schnittstelle zwischen externem Ladegerät und Traktionsbatterie im Fahrzeug ist gleichzeitig eine System-Schnittstelle, die zu Fehlern führen kann.

Das stationäre und instationäre induktive Laden benötigt am Fahrzeug eine Fläche, um das Magnetfeld zum Laden aufbauen zu können. Geeignet sind dazu z.B. Ladeplatten im Bereich der Nummernschilder sowie Ladeplatten am Unterboden des Fahrzeuges. Das induktive Laden ermöglicht den Wegfall des Ladekabels und ist damit vor allem aus Komfortgründen zu betrachten. Jedoch ist die Ladeleistung begrenzt, da die Ladeleistung aus EMV- und Sicherheitsgründen reduziert werden muss. Zu hohe Ströme bei einem kontaktlosen induktiven Ladevorgang können im öffentlichen Raum z.B. zur Erhitzung herumliegender metallischer Gegenstände oder der körperlichen Beeinträchtigung Dritter (Herzschrittmacher) führen.

Die letzte Variante ist der Batteriewechsel bzw. das Schnell-Wechselsystem, bei dem der Batterietrog komplett ausgewechselt wird. Dieses Verfahren bedarf einer hohen Präzision (z.B. Stecker, Befestigungspunkte, etc.) und stellt besondere Ansprüche an die Steifigkeit des Fahrzeuges. Außerdem muss das System eine hohe Anzahl von Wechseln unter gleichbleibenden Sicherheitsansprüchen ermöglichen. Um ein Wechselsystem betreiben zu können, müssen dafür mehr Batterietröge als potentielle Fahrzeuge im Markt vorhanden sein. Da der Batterietrog in reinen Elektrofahrzeugen einen großen Raum einnimmt und damit hohe Auswirkungen auf die Fahrzeuggestalt hat, ist ein markenübergreifender Batterietrog über mehr als zwei eigenständige OEMs schwer vorstellbar. Das bedeutet auch, dass in einer möglichen Wechselstation mehr als eine Variante an Batterietrögen vorhanden sein bzw. eine Station auch verschiedene Systeme bedienen können muss.

3.6.4.3 Position der Ladeeinrichtung

Die Position der Ladedose im bzw. am Fahrzeug ist immer unter den schon genannten Punkten für das kabelgebundene Laden zu betrachten. Dabei müssen die wesentlichen Punkte, dass der Ladevorgang häufig (täglich) stattfinden und zusätzlich ein längerer Zeitraum benötigt werden kann, Berücksichtigung finden.

Die Positionierung der Ladedose ist von drei Hauptpunkten abhängig:

1. Ergonomie der Steckverbindung,
2. Sicherheit (elektrische Verbindung und Fahrzeug) und
3. Nutzungseinschränkung des Fahrzeuges und der nahen Umgebung.

Die Steckverbindung sollte für den Nutzer möglichst einfach und schnell herzustellen sein, ähnlich dem Gebrauch der heutigen Zapfpistole an einer Tankstelle. Da das Laden sich über einen längeren Zeitraum erstrecken kann und nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Fahrzeug beaufsichtigt wird, ist eine Ladedose im Innen- oder Motorraum (z.B. Kofferraum) zu vernachlässigen. Darüber hinaus sollte durch das Laden der Zugang zum Fahrzeug nicht eingeschränkt werden. Aus technischer und aus Kostensicht sollte zudem der Leitungsweg zwischen Ladegerät, Leistungselektronik und Traktionsbatterie möglichst gering gehalten werden. Grundsätzlich können alle konventionellen Einfüllöffnungen zum Tanken auch zum elektrischen Laden genutzt werden. Bei Plug-In Hybriden sollte es aus Sicherheitsgründen eine räumliche Trennung zwischen Kraftstoffzuführung und Ladedosenposition geben. Die in Abbildung 3-34 gezeigten Positionen für das Nachfüllen von Kraftstoff bzw. das Laden von Energie sind die aus dem derzeitigen Markt entstehenden fahrzeugklassenübergreifenden Möglichkeiten.

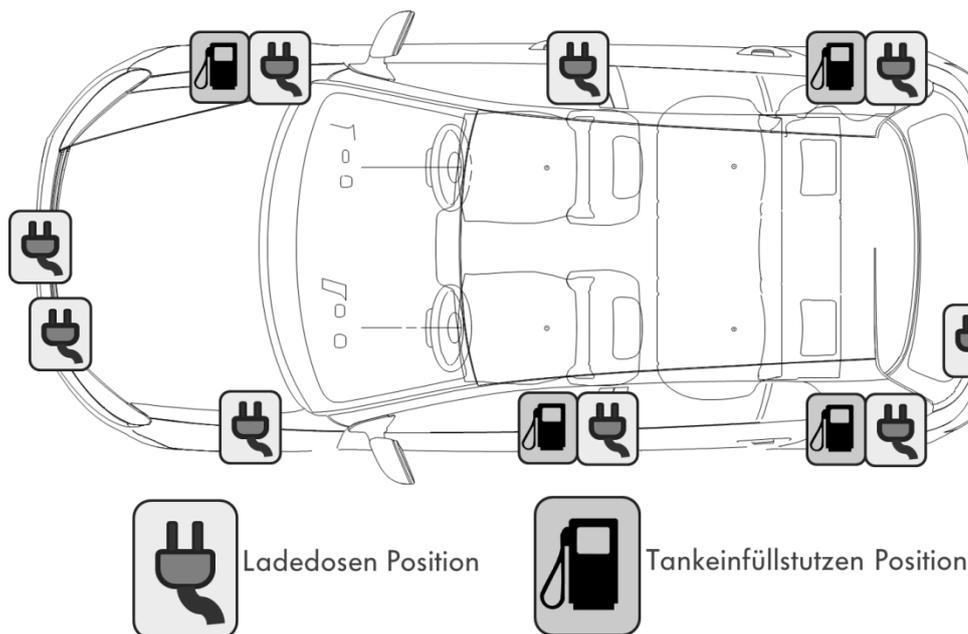


Abbildung 3-34 Fahrzeugklassenunabhängige Ladedosen und Tankeinfüllstutzen Positionen

Die Position einer Ladevorrichtung für induktives Laden orientiert sich an einer ausreichenden Fläche, um das Magnetfeld zwischen den Ladevorrichtung und dem Fahrzeug aufbauen zu können. Im Moment stehen dafür primär die Bereiche am Unterboden bzw. Front und Heck des Fahrzeuges zur Verfügung.

Das Batteriewechselsystem für Fahrzeuge und die Zugänglichkeit zu einzelnen Modulen bzw. dem gesamten Batterietrog, ist primär abhängig von der Positionierung der Traktionsbatterie im Fahrzeug.

4 Entwicklungsprozess für Automobile, insbesondere für elektrifizierte Antriebe

In diesem Kapitel wird auf den Entwicklungsprozess und das Vorgehen von Entwicklern beim Verfolgen einer Baukastenstrategie speziell in der Konzeptentwicklung eingegangen. In der Konzeptphase ist eine Anpassung der Ausrichtung des Projektes noch problemlos möglich (vgl. [BSF-2004]). In den weiteren Abschnitten werden dazu die Konzeptphase und ein Vorgehen bei der Entwicklung von Fahrzeugbaukästen in der Konzeptentwicklung anhand eines Modellaufbaus betrachtet.

Der Entwicklungsprozess ist Teil des Produktentstehungsprozesses (vgl. Abbildung 2-15), der wiederum im Kontext zur Produktstrategie (ausführlicher in Abschnitt 4.1) zu betrachten ist. Der Entwicklungsprozess kann in die in Abbildung 4-1 aufgezeigten Phasen untergliedert werden. In 2.2.2 *Technischer Produktlebenszyklus* wurde aufgezeigt, dass die Forschung Teil der Produktplanung ist. Bei großen Unternehmen ist neben der Forschung zusätzlich die Vorentwicklung der Produktplanungsphase zuzurechnen, da diese unabhängig von den Projekten ist und je nach Entwicklungsstand Beiträge für die zukünftigen Produkte leistet. Außerdem gibt es zwei Vertriebsphasen in der Automobilindustrie. Diese sind zum einen der informative Vertrieb (Werbung) als Aufklärung des potentiellen Kunden und zum anderen die Beauftragung der Produktion vom expliziten Kunden sowie der physischen Vertrieb (Distribution) in Form der Auslieferung des Fahrzeuges. Zu der Distribution gehören auch das Nachkaufverhalten (Förderung kognitiver Dissonanzen - Marketing) einschließlich Instandhaltung und ggf. Verbesserungen (Anhang C1 *Produktlebenszyklus Automobilindustrie*). Die Produktion bezieht sich in der Automobilindustrie primär auf Montage und Prüfung. Der Umfang der Produktion ist je nach Hersteller insbesondere von der Fertigungstiefe abhängig.

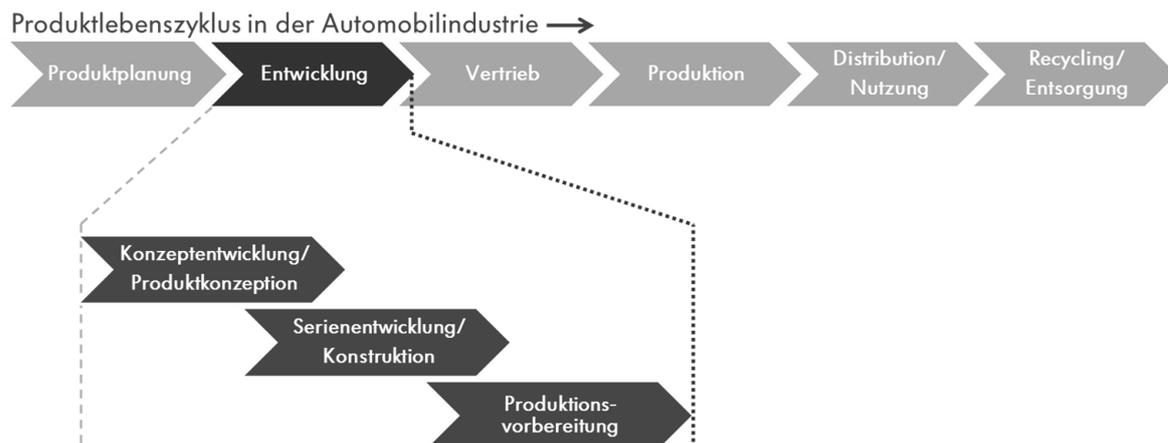


Abbildung 4-1 Entwicklungsphase im Produktlebenszyklus eines Kraftfahrzeuges

In der Konzeptphase, als eine der ersten Phasen im Produktlebenszyklus, werden zum ersten Mal Anforderungen technisch umgesetzt. Grundsätzlich besteht das Erstellen eines Fahrzeugkonzeptes aus dem Zusammenführen, Verdichten und Bewerten unterschiedlicher Anforderungen hinsichtlich des späteren Package und der Fahrzeugfunktionen [BrS-2013]. Das Grundkonzept wird fortlaufend immer detaillierter zum virtuellen Prototyp definiert. Im Anschluss erfolgt die finale Detaillierung des Konzeptes in der Serienentwicklung bzw. die physische Umsetzung in der Produktionsvorbereitung (Abbildung 4-1).

4.1 Produktstrategie in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie werden Fahrzeugprojekte in Abhängigkeit von Unternehmens-, Produkt- und Innovationsstrategie initialisiert [SOS-2012]. Die Unternehmensstrategie ist eine Geschäftsbereich übergeordnete Strategie hinsichtlich der gesamten Ausrichtung sowie der Aufgabenverteilung (vgl. HECKER [HeF-2012] oder VOIGT [VKI-2008]).

Die Innovationsstrategie betrifft viele Unternehmensbereiche (u.a. Vertrieb, Entwicklung, Beschaffung, Produktion etc.), ist wesentlich vom Markt sowie den Nutzern abhängig und orientiert sich an Innovationszielen und -feldern (vgl. [ScG-2012] [WRC-2008]). Die Bedeutung der Innovation in der Entwicklung wird in Abschnitt 4.2.2 *Bedeutung von Innovationen im Entwicklungsprozess* weiterführend betrachtet.

Die Produktstrategie der Automobilindustrie basiert bei Volumenherstellern auf einer Plattform-/ Modulstrategie und zunehmend auf einer Baukastenstrategie (Abbildung 4-2). Da in der Literatur die Modul- und die Baukastenstrategie unterschiedlich dargestellt wird (vgl. u.a. [BeK-2013], [BiH-1971], [BrS-2013], [EFR-2013], [GaS-2013], [HaU-2011], [HoR-2012], [HuBa-2008], [LeH-2013]), wird im Folgenden die Sichtweise in dieser Arbeit erläutert.

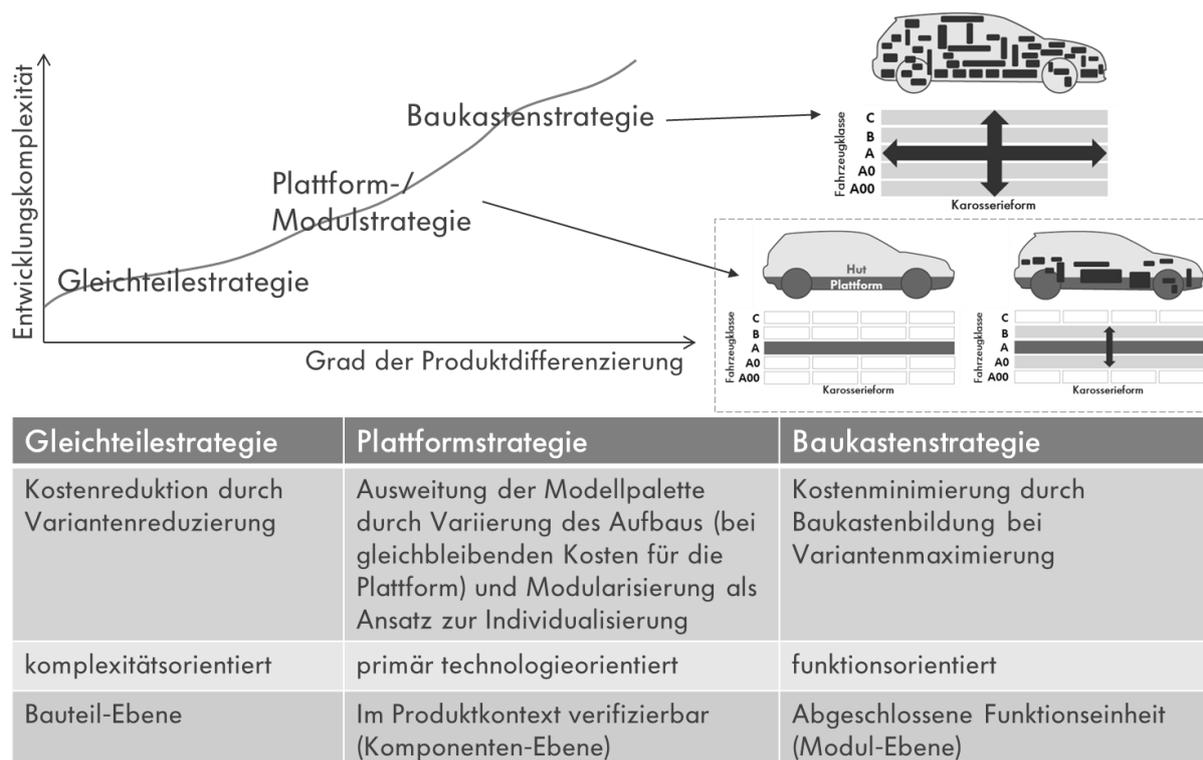


Abbildung 4-2 Produktstrategie in der Automobilindustrie (in Anlehnung an [BeK-2013] [BrS-2013] [EFR-2013] [GaS-2013] [LeH-2013])

Die Plattformstrategie basiert nach MEYER und LEHNERD [MeLe-1997] auf einem Anfangsprodukt, bei dem es durch die Definition von Komponenten und deren Schnittstellen möglich ist, kostengünstige Produktderivate zu erzeugen. Eine Plattform ist durch den Einsatz in mehreren Produkten bzw. das Ableiten weiterer Produktderivate und durch eine Bauart, basierend auf Komponenten (Subsystemen)

und definierten Schnittstellen, gekennzeichnet. Als Beispiel nennen MEYER und LEHNERD den Sony Walkman, der bei gleichem technologischem Aufbau in diversen Ausprägungen verfügbar war [Me-Le-1997]. In der Automobilindustrie wurde die Plattformstrategie mit der Modulstrategie kombiniert. Dabei werden Synergien innerhalb einer Fahrzeugklasse (Plattformstrategie) und auch fahrzeugklassenübergreifend (Modulstrategie) erzielt [LeH-2013]. Ziel der kombinierten Plattform-/ Modulstrategie ist es, das Produkt flexibler, d.h. für den Kunden individueller gestalten zu können [HuBa-2008].

Bei der Baukastenstrategie sollen Vereinheitlichungen über mehrere Produktfamilien, bei vollständiger Flexibilität und übergreifend über mehrere Fahrzeugklassen, erzielt werden. Die Baukastenstrategie besteht auf dem Verständnis, dass es keine Plattform im eigentlichen Sinne gibt (Abbildung 4-3). Das Produkt besteht aus Modulen und einem möglichst geringen hutspezifischen Anteil (vgl. 3.5 *Auslegung aus Sicht des Designs*), der zur Individualisierung und Personalisierung von für den Kunden sichtbaren Teilen benötigt wird [LeH-2013] [EFR-2013].

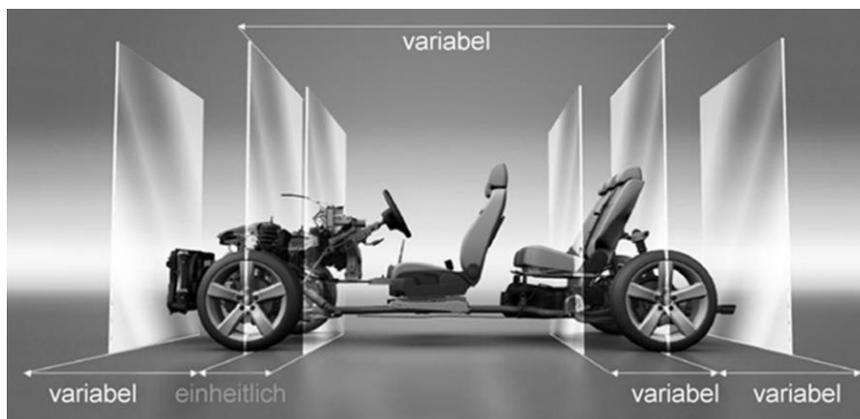


Abbildung 4-3 Baukastensystem - Volkswagen Modularer-Quer-Baukasten

Bei Mehrmarken-Konzernen steht die Baukastenstrategie nicht nur in Abhängigkeit zur Produktstrategie, sondern auch zur Markenstrategie. Die Produkte müssen der jeweiligen Markenidentität entsprechen, was in der Entwicklung zu einer noch höheren Flexibilität von Fahrzeugkonzepten und erhöhten Eigenschaftsspektren, bedingt durch die starke Differenzierungen zwischen den Produkten, führt (Abbildung 4-2) [BrS-2013].

Ziel der Baukastenstrategie in der Automobilindustrie ist es (vgl. [BrS-2013] [GaK-2006] [GaS-2013],

- die Innovationsrate zu erhöhen,
- die Entwicklungszeit zu verkürzen,
- die Kosten in den in Produktion, Logistik sowie im After Sales Service zu reduzieren,
- durch höhere Stückzahlen Skaleneffekte zu erzielen und
- die schnelle Abdeckung weiterer Marktsegmente zu ermöglichen.

Die Baukastenstrategie hat somit Auswirkung auf alle Geschäftsbereiche (u.a. Entwicklung, Produktion, Vertrieb, Beschaffung), bis hin zu internen Unternehmens- bzw. Personalorganisation [GaK-2006]. Für die Umsetzung einer Baukastenstrategie empfiehlt es sich, eine bauteil- bzw. funktionsorientierte Organisationsstruktur anstelle z.B. einer am Fahrzeugprojekt oder an Fahrzeugklassen orien-

tierten Struktur zu wählen, denn während bei der Plattformstrategie eine Anzahl von Fahrzeugen einer Produktfamilie betrachtet wurde, müssen in der Baukastenstrategie übergreifend Produktfamilien betrachtet werden. Dies erfordert neue Herangehensweisen, insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung. Dabei müssen die Komplexität und dementsprechend die Kosten bei der beschriebene Individualisierung der Produkte minimiert werden, wodurch eine globale Standardisierung der Module innerhalb der Baukastenstrategie nötig wird.

Bedingt durch neue elektrifizierte Antriebsformen und deren Auswirkungen auf das gesamte Fahrzeug (vgl. Kapitel 3 *Grundlegende Auslegungsmaßnahmen von elektrifizierten Fahrzeugen*) sind diese Einflüsse in einer Baukastenstrategie frühzeitig zu berücksichtigen oder eigene Plattformen, je nach Antriebsform, zu entwickeln. Das bedeutet, dass bei einer Baukastenstrategie neben der Fahrzeugklasse und der Karosseriebauform zusätzlich die Antriebsart berücksichtigt werden muss. Dazu muss in der Konzeptphase geklärt werden, welche Antriebsformen am besten zu den Anforderungen an die Produktfamilie(n) passen. Dabei müssen die unterschiedlichen Karosseriebauformen wie Limousine, SUV, SAV, Kombi, etc. ebenso wie eine mögliche Markendifferenzierung Berücksichtigung finden. Hinzu kommt, dass alternative Antriebe im Wesentlichen auf Basis von Anforderungen des Gesetzgebers entwickelt werden (CO₂-Reduzierung vgl. Tabelle 3-3). Der Gesetzgeber ist aber in der Automobilindustrie nicht der primäre Kunde und somit besteht zunächst kein Markt im eigentlichen mikroökonomischen Sinn von Angebot und Nachfrage.

Eine Produktstrategie bezieht sich auf ein bestimmtes Produktgefüge. In Abbildung 4-4 werden die in der Automobilindustrie verwendeten Module und Komponenten in Bezug zu dem in 2.3 *Das Produktgefüge* aufgezeigten allgemeinen Produktgefüge gestellt.

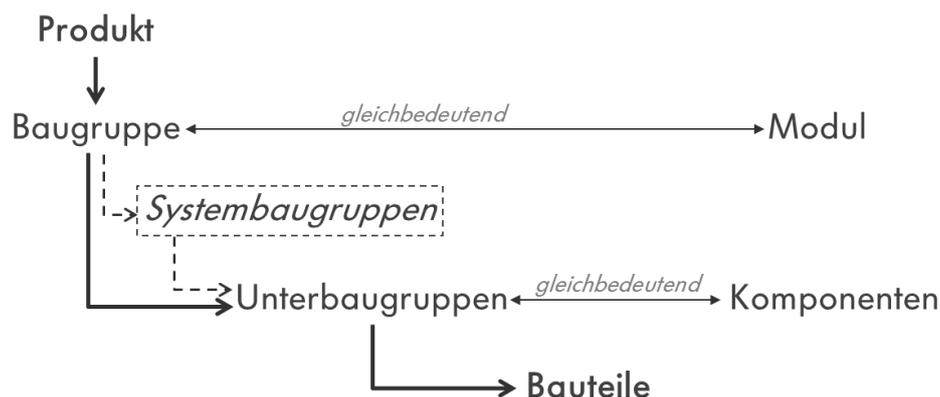


Abbildung 4-4 Produktgefüge in der Automobilindustrie

Aufgrund der komplexen Struktur eines Kraftfahrzeugs wird das Produktgefüge um die Systembaugruppe ergänzt (Abbildung 4-4). Systembaugruppen ergeben sich z.B. durch komplexe funktional eigenständige Elemente eines Moduls. Sie können z.B. erst im Produkt zu einem funktionierenden System aus dezentralen Komponenten, über verschiedene Zählpunkte der Produktionslinie (vgl. Fortschrittszahlenprinzip [ScP-2011]) verbunden oder komplett von einem Zulieferer entwickelt werden (z.B. Stack der Brennstoffzelle).

Die Definition von Modulen und Komponenten ist in der Literatur durch die jeweilige Sichtweise (z.B. betriebswirtschaftlich oder technisch) beeinflusst und somit nicht eindeutig (vgl. Anhang C2 *Unterschiede zwischen Modul, Komponente und System*). Der Begriff „System“ wird in der Literatur im Kontext von Modulen und Komponenten häufig als zusätzliche, zum Teil übergeordnete Einheit genannt. Dabei wird in beiden wissenschaftlichen Sichtweisen auf das Produktgefüge gefolgert, dass es Abgrenzungsschwierigkeiten zwischen Systemen und Modulen gibt (vgl. u.a. [AnT-2005] [WFO-2009]). Daher wird in dieser Arbeit ein System allgemein als Ordnung bzw. Gliederung, in Bezug auf Elemente mit einer gemeinsamen Funktion verstanden.

Das Verständnis von Modulen und Komponenten in dieser Arbeit stimmt im Wesentlichen mit der Sichtweise von SCHUH [ScG-2012] überein. SCHUH differenziert die Bauteile nach dem Grad der funktionalen und physischen Unabhängigkeit. Die physische Unabhängigkeit orientiert sich z.B. an der Trennbarkeit der Elemente in der Nutzungsphase, so sind z.B. Schweißverbindungen schwer und Steckverbindungen leicht trennbar. Danach sind Komponenten in funktionaler und physischer Sichtweise geschlossene Elemente sowie Bestandteile eines Moduls und nur im Produktkontext verifizierbar (vgl. Abbildung 4-2). Module hingegen weisen eine hohe funktionale und auch physische Unabhängigkeit aus, so kann z.B. ein Verbrennungsmotor in verschiedenen Baureihen eingesetzt werden [ScG-2012]. Ein Modul ist somit eine austauschbare, komplexe Funktionseinheit innerhalb eines Produktes [Duden-2014].

Bei der Verfolgung einer Baukastenstrategie ist es somit wichtig, die physischen und funktionalen Schnittstellen der Module zu determinieren. Es ist darüber hinaus wichtig, den Stoff-, Energie- und Signalfluss der Module zu kennen bzw. zu definieren, um Module austauschen zu können. Dies entspricht der bereits aufgezeigten nötigen Standardisierung der Module innerhalb der Baukastenstrategie und ist insbesondere in Bezug auf Innovationen über den Produktlebenszyklus einer Produktfamilie zu berücksichtigen.

Um die Ansprüche einer Baukastenstrategie in der Entwicklung in Bezug auf komplexe Produkte bzw. Produktfamilien zu erfüllen, ist bereits in der Konzeptphase ein geeignetes Vorgehen zu entwickeln. Da in der Anfangsphase der Entwicklung primär Eigenschaften des Produktes im Vordergrund stehen (vgl. 2.4.2 *Produktentwicklungsprozess*), müssen diese auf Basis der bekannten Produktelemente und deren Merkmale entwickelt werden. Dazu ist ein Eigenschaftsnetzwerk von Vorteil, welches insbesondere einen Bezug zu übergeordneten Produktfamilien ermöglicht.

Unter Berücksichtigung des in 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften* vorgestellten Ansatzes wird im Folgenden ein Vorgehensmodell aufgezeigt, welches es dem Konzeptentwickler ermöglicht, Elemente von Produktfamilien übergreifend zu entwickeln. Weiter soll das Vorgehensmodell Auswirkungen auf das Produkt bzw. die Produktfamilie durch die laufende Entwicklungstätigkeit oder durch Innovationen über den Produktlebenszyklus aufzeigen. Dazu werden die Elemente eines Produktes bzw. einer Produktfamilie, die sich daraus erge-

benden Eigenschaften und deren Abhängigkeit untereinander in einem Netzwerk aufgezeigt. Da, wie in 2.4.2 *Produktentwicklungsprozess* beschrieben, zu Beginn eines Entwicklungsprozesses dem Konzeptentwickler eine unvollständige Datenbasis zur Verfügung steht, ist in der frühen Entwicklungsphase ein heuristischer (ein Ansatz zur Gewinnung neuer Erkenntnisse auf Basis eines begrenzten Wissens) und erst in der Serienentwicklung ein algorithmischer Ansatz möglich.

4.2 Der Entwicklungsprozess komplexer Produkte in großen Unternehmen

Die Phasen der Produktentwicklung von Kraftfahrzeugen werden in die Sequenzen

- Konzeptentwicklung,
- Serienentwicklung und
- Produktionsvorbereitung

unterteilt (Abbildung 4-5).

Das Entwickeln von komplexen Produkten wie dem Automobil in großen international agierenden Unternehmen erfolgt durch das Zusammenspiel von Entwicklerteams. Diese arbeiten, entsprechend der Ablauforganisation des Entwicklungsprozesses (Abbildung 4-5), zeitgleich (simultan) oder über den Entwicklungsprozess versetzt (sequentiell). Die Entwicklerteams setzen sich aus Mitarbeitern unterschiedlicher Fachrichtungen (i.S.v. Wissensgebieten) und aus verschiedenen an der Produktentwicklung beteiligten Organisationseinheiten zusammen. Für ein Modul ist entweder ein Mitarbeiter oder ein Team technisch verantwortlich. Zusätzlich können übergeordnete Teams gebildet werden, die sich aus den einzelnen Entwicklern einer jeweiligen Baugruppe und zugehörigen betroffenen Geschäftsbereichen, z.B. aus der Produktion oder Beschaffung, zusammensetzen.

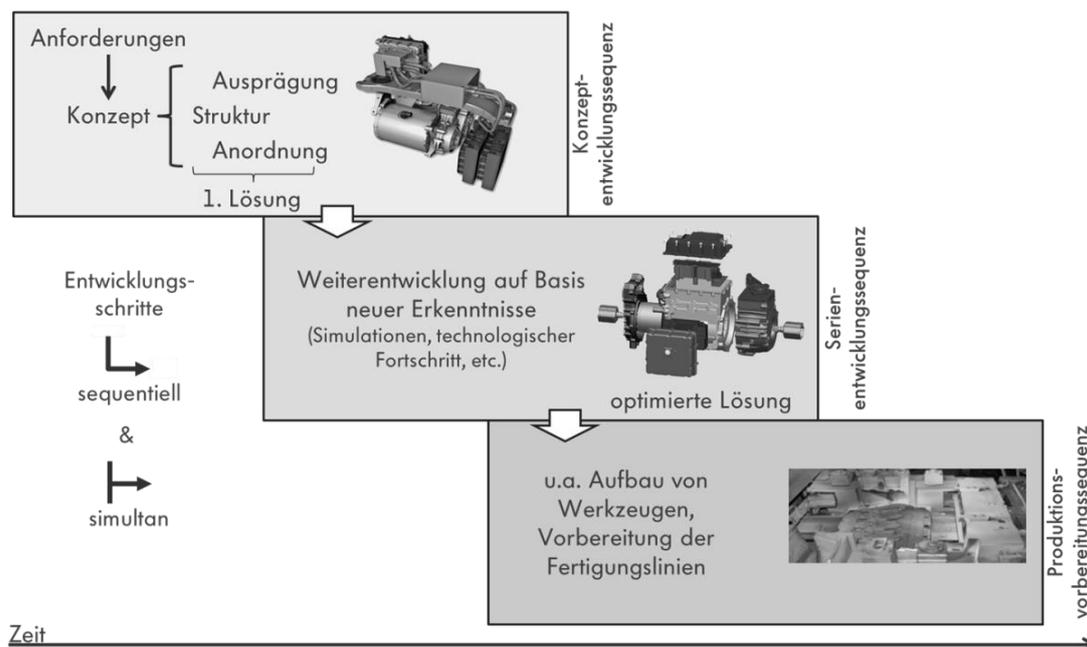


Abbildung 4-5 Sequenzen in der Entwicklung innerhalb der Produktentstehung

Die Bauteilverantwortung bei Fahrzeugserienprodukten lässt sich in die Entwicklungsbereiche Rohbau/Exterieur, Ausstattung/Interieur, Elektrik/Elektronik, Fahrwerk und Triebstrang differenzieren.

Neben der Produktion ist in der Entwicklung auch der Einfluss der Beschaffung von Bedeutung. Je nach Fertigungstiefe im Unternehmen müssen eine größere Menge der Bauteile als Kaufteile von Zulieferern erworben oder diese zusätzlich in strategischen Partnerschaften mit dem jeweiligen Zulieferer oder Entwicklungsdienstleistern entwickelt werden [HaW-2013] [EnW-2006].

4.2.1 Entwicklungsphasen und Rahmenbedingungen

Bei der weiteren Unterteilung des Entwicklungsprozesses in die Phasen von Konzeptentwicklung, Serienentwicklung und Produktionsvorbereitung ist der Vor- bzw. Nachlauf zwischen den einzelnen Phasen zu berücksichtigen. Zur Abgrenzung der Entwicklungsphasen müssen definierte Arbeitsergebnisse eine Trennung ermöglichen, so dass ein bestimmtes Arbeitsergebnis in Daten oder physischem Aufbau den Startpunkt der nächsten Entwicklungsphase darstellt. In der Konzeptphase besteht dieses aus einem funktional und packageseitig vollständig aufgebauten Fahrzeuggrundmodell, für die Serienentwicklungsphase in dem Beginn des Aufbaus von Werkzeugen für Herstellung von Bauteilen und für die Produktionsvorbereitungsphase in der fertigen Nullserie²³ (Abbildung 4-6).

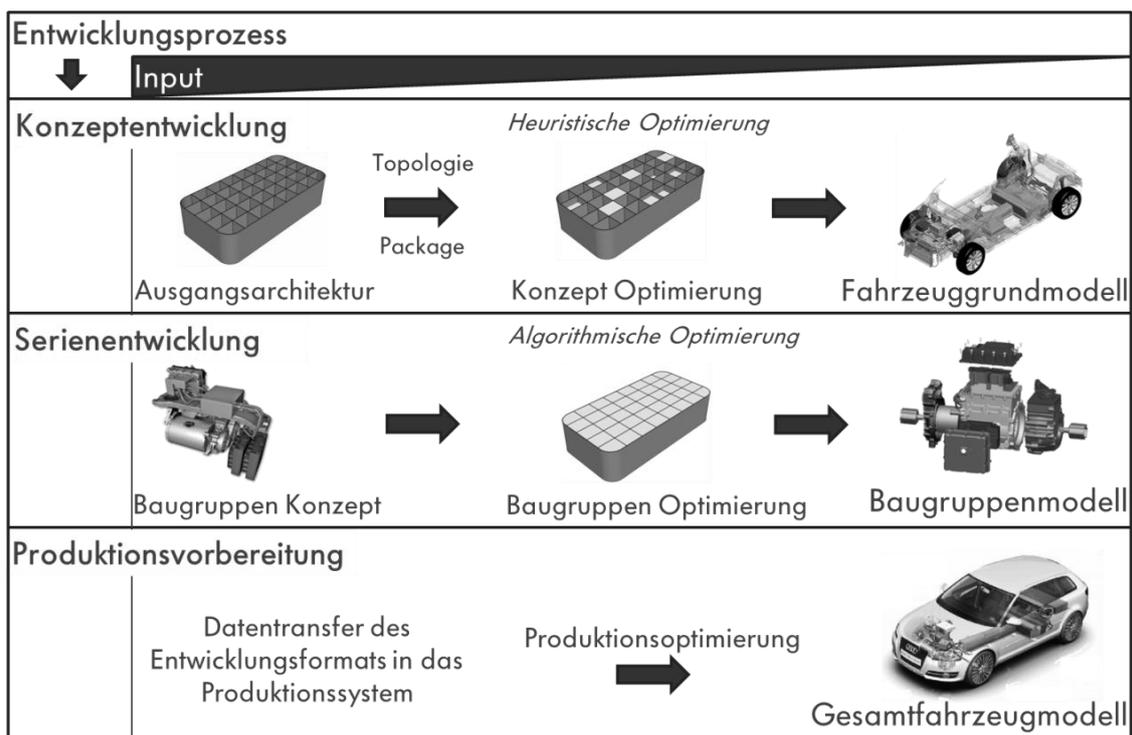


Abbildung 4-6 Inhaltliche Orientierung der Entwicklungsphase

Das parallele und simultane Arbeiten der Entwickler erhöht den Steuerungsbedarf eines Projektes, was wiederum zu einer übergeordneten Steuerung durch Projektmanager führt. Für einen zielorientierten Ablauf müssen zudem in der frühen Konzeptphase die Anforderungen, Randbedingungen und erste Produkteigenschaften bzw. minimal die wichtigsten davon bekannt sein, welche auch in Bezug auf die heuristische Optimierung der Konzepte von Bedeutung sind (Abbildung 4-6), da sich an diesen die

²³ Bei der Nullserie wird in der Produktion von Pilot- auf Serienwerkzeuge gewechselt. Dies kann Auswirkungen auf die Bauteile und damit auf die erwarteten Eigenschaften haben. Die Nullserie stellt zugleich die seriennahe Produktion und den letzten Schritt vor dem eigentlichen „Hochlauf“ der Produktion dar [OsR-2008].

Auslegung der Bauteile orientiert. Die elementaren Produkteigenschaften für die Konzeptentwicklung werden für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antrieb über ein zu entwickelndes Eigenschaftsnetzwerk in Abschnitt 6.1 *Analyse der Eigenschaften* ermittelt.

Randbedingungen sind insbesondere als Auslegungsprämissen für kritische Situationen der späteren Nutzung zu definieren (vgl. [BSF-2004]). Hinzu kommt, dass, bedingt durch „running targets“, etwaige Ergebnisse im Prozess hinfällig werden können und neue Lösungswege erfolgsversprechender erscheinen. Des Weiteren können Anforderungen und deren Synthese in einem Produkt im Widerspruch zueinander stehen. Dies führt zu Problemen beim Zusammenführen von technischen Ergebnissen unterschiedlicher Entwicklungsteams.

Die Berücksichtigung von „running targets“ im Entwicklungsprozess ist in der industriellen Praxis zu beobachten, wenn z.B. Entscheidungsträger im Projektverlauf aufgrund von Erfahrung oder sich ändernder Marktbedingungen Einfluss auf Anforderungen und somit mittelbar auf Fahrzeugeigenschaften nehmen. Aufgrund dessen verändert sich der Input in den Entwicklungsphasen. Stehen in der Konzeptentwicklung die Plausibilisierung und Festlegung der Anforderungen im Vordergrund, ist in der Serienentwicklung die Optimierung innerhalb des Produktes, beginnend auf dem Fahrzeugkonzept, maßgeblich. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sich die Produktvarianz durch Entscheidungen in den Entwicklungsphasen verringert.

4.2.2 Bedeutung von Innovationen im Entwicklungsprozess

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, werden Fahrzeugprojekte in Abhängigkeit zur Innovationsstrategie initialisiert. Im Entwicklungsprozess werden Innovationen, genauer Produkt- bzw. Teilproduktinnovation sowie Prozessinnovation, in das Produkt implementiert. Durch den Markterfolg, welcher durch die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie gefördert werden kann, wird aus einer Erfindung eine Innovation (wie in 2.1 *Begriffsklärung* aufgezeigt). Wer eine neue Technologie ökonomisch nutzbar machen möchte, muss diese unter Einbeziehung des gesellschaftlichen Umfelds entsprechend konzipieren [GrA-2000].

Innovationen, die auf einem Status quo aufbauen (z.B. auf einem Vorgängermodell) und deren schrittweise Veränderungen zu einem besseren technologischen Stand führen, stellen den vorrangig industriellen Entwicklungsprozess dar [BBP-2012]. Gefördert wird dies durch die heutige Betrachtungsweise von Qualität (2.1 *Begriffsklärung*) und die ständige Verbesserung der Produkte (z.B. durch eine kontinuierliche Produktverbesserung „KVP“ vgl. [DIN 9001]). Dabei können radikale Neuerungen (Basis-Innovationen) aus den auf dem Status quo aufbauenden Innovationen entstehen. Beide Arten der Innovation regen sich gegenseitig an [HBB-2012]. Die technologische Entwicklung als schrittweise Weiterentwicklung spiegelt sich in der S-Kurve der Leistungsfähigkeit einer Technologie wider (Abbildung 2-8), welche wiederum Einfluss auf die Produktziele hat (vgl. 2.1 *Begriffsklärung*).

Innovationen stehen in besonderer Abhängigkeit zu den in Abbildung 2-3 genannten Produktzielen. Sie brauchen Zeit, verursachen Kosten und die Güte der Umsetzung im Produkt hat Auswirkung auf die Qualität. Letztlich ist die Innovationen von der Akzeptanz durch den Kunden und damit die Marktdurchdringung eines Kraftfahrzeuges abhängig [PiF-2013]. Dabei kann die Innovation sogar Teil der Erwartungshaltung des Kunden an ein Produkt sein (vgl. [SchM-2001]). Wenn die Innovation durch den Kunden wahrgenommen und akzeptiert wird, dient sie auch der Differenzierung vom Wettbewerber und kann als Begeisterungsanforderung für eine zusätzliche Produktzufriedenheit des Kunden sorgen. Begeisterungsanforderungen stellen eine besondere Anforderung dar, da in Abwesenheit dieser Attribute zwar keine Unzufriedenheit ausgelöst wird, jedoch umgekehrt ein überproportionaler Zuwachs der Zufriedenheit erzielt werden kann. Es handelt sich dabei um Anforderungen an ein Produkt/ Dienstleistung, die der Kunde nicht erwartet. Begeisterungsanforderungen sind daher eine eigene Klasse im betriebswirtschaftlichen Kano-Modell²⁴ [EnW-2006] [SMS-2002].

Ein Vorgehensmodell in der Entwicklung muss zum einen das Erkennen von Innovationsfeldern, zum anderen den Überblick auf die Auswirkungen von neuen Ideen im Produktkontext ermöglichen (vgl. 2.1 Begriffsklärung).

4.2.3 Bewertung von Ergebnissen in den Entwicklungsphasen

Die letztendliche Bewertung von Entwicklungsergebnissen bzw. die Auswahl der zu verfolgenden Lösungen erfolgt in der Praxis großer Unternehmen nicht primär modellfundiert über systematische Analysen, wie diese beispielhaft in 2.4.4 *Werkzeuge und Hilfsmittel* vorgestellt wurden. Die Entscheidungen fallen häufig intuitiv und nicht streng rational z.B. nach dem BERNOULLI-Prinzip (vgl. [LGS-2012]). Zusätzlich werden Entscheidungen in Risikosituationen, in denen der Entscheider Eintrittswahrscheinlichkeiten nur grob abschätzen kann, oder unter Unsicherheit, in denen der Entscheider nicht in der Lage ist, Konsequenzen seines Handelns zu erkennen, getroffen [LGS-2012]. Ein Grund dafür ist die Begrenzung der Entwicklung durch Zeit und Kosten.

Die Anforderungen an das Produkt orientieren sich grundsätzlich an Markanforderungen in Bezug auf die Produkteigenschaften. Eine Synthese der Anforderungen (Abbildung 4-7) kann dabei nicht immer erreicht werden.

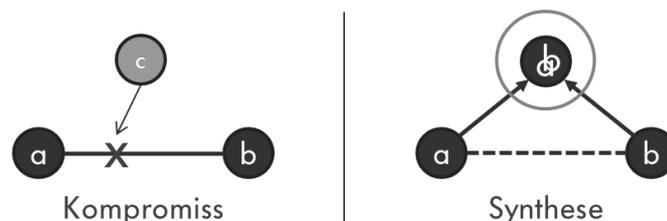


Abbildung 4-7 Unterschied Kompromiss und Synthese

²⁴ Nach KANO können Anforderungen entsprechend der Kundenrelevanz im Kano-Modell gewichtet werden. Basisanforderungen werden vom Kunden stillschweigend vorausgesetzt, Leistungsanforderungen stehen im Zusammenhang mit der Kundenzufriedenheit und Begeisterungsanforderungen sind außerhalb der Kundenerwartung (aus [PoL-2011]).

So ist es z.B. in der Elektromobilität aktuell technisch schwer möglich, die entsprechende Reichweite konventionell angetriebener Fahrzeuge zu gleichen Kosten und denselben Kundennutzen zu erreichen. An diesem Beispiel weiterführend, kann ein Szenario mit vier verschiedenen Lösungsvarianten aufgebaut werden:

- a. Eine elektrische Reichweite gleich zu der von konventionellen Fahrzeugen.
- b. Eine elektrische Reichweite entsprechend der Kosten von konventionellen Fahrzeugen im gleichen Marktsegment.
- c. Ein Kompromiss aus Variante „a“ und „b“ (Abbildung 4-7 im Sinne einer gegenseitige Übereinkunft [Duden-2014]).
- d. Eine gleiche Reichweite zu gleichen Kosten, erreicht durch die technologische Weiterentwicklung der Akkumulatoren und die Optimierung der Fahrzeuge.

Die Entscheidung, welche Variante weiterverfolgt wird, trifft zumeist das Management des Unternehmens, stellvertretend für den Kunden. Dabei orientiert es sich z.B. an den Effizienzkriterien (vgl. Abbildung 2-3) aus Qualität, Kosten und Zeit (Termin) [BSF-2004]. Der Entscheidungsprozess verläuft in der Praxis jedoch, wie bereits erwähnt, unabhängig von Methoden (2.4.4 *Werkzeuge und Hilfsmittel*). Er wird individuell bestimmt von der Einstellung, Wahrnehmung und Meinung der entscheidenden Personen und kann zusätzlich zu „running targets“ führen. Daraus können spezifischen Lösungen resultieren, bei denen wenige Anforderungen voll, andere gar nicht erfüllt werden. Wenn es das primäre Ziel ist, dass das Kraftfahrzeug extrem sportlich sein soll, wird daran bei der Umsetzung voll und ganz festgehalten. Entsprechend werden Einschränkungen in anderen Bereichen des Fahrzeuges (z.B. Komfort) in Kauf genommen.

Jedoch ist die eigentliche Aufgabe des Entwicklers, die bestmögliche Synthese aus den gestellten und sich ändernden Anforderungen sowie Randbedingungen zu generieren. Erst wenn dies nicht zielführend ist, sollte ein Kompromiss gesucht werden. In der industriellen Praxis wird häufig ein Kompromiss gesucht, da dieser die Idealform des Konfliktmanagement darstellt, bei dem die Parteien Teile ihres Standpunktes aufgeben, um zu einer gemeinsamen Lösung zu gelangen [BSF-2004].

Eine große Auswahl an Produktvarianten führt schnell zu einer Überforderung, geeignete Varianten im Entscheidungsprozess zu selektieren, was wiederum zu schlechten Entschlüssen und damit zur Unzufriedenheit führt (The paradox of Choice vgl. [ScB-2005]). Um dieses zu vermeiden, müssen klare Kriterien (Anforderungen) an das Produkt gestellt und das jeweilige Maß der Erfüllung in den einzelnen Varianten bewertet werden. Ändern sich die Anforderungen, müssen auch die bisher ausgeschlossenen Varianten wieder berücksichtigt werden. Um diese Bewertung zu ermöglichen, sollten von den im Aufbau befindlichen Produktvarianten möglichst früh viele Eigenschaften bekannt sein.

4.2.4 Entwicklungsteams im Produktentstehungsprozess

Die primäre Tätigkeit der Entwickler ist die Lösungsfindung, also von einem Ausgangszustand zum Zielzustand zu gelangen. Bei der Lösungsfindung beginnen Entwickler die Arbeit auf Basis von An-

forderungen und müssen Barrieren (Abbildung 4-8) und Probleme, wie u.a. Komplexität oder Intransparenz überwinden [BSF-2004]. Je nach Konstruktionsart (vgl. 2.4.1 *Konstruktionsarten*) werden unterschiedliche Forderungen und dementsprechend hohe Erwartungen an Entwickler gestellt. Bei diesem Vorgehen müssen Entwickler die Qualität berücksichtigen und das Einbringen von Innovationen gewährleisten (Abschnitt 4.2.2). Zur Lösungsfindung, wie das Produkt bzw. dessen Merkmale gestaltet werden müssen, ist, im Sinne der aus 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften* angewendeten Methode der Einfluss von Außen und die Wirkung auf die Beziehung zwischen Merkmalen und Eigenschaften zu berücksichtigen. Ziel ist es, die Produktelemente bzw. deren Merkmale entsprechend zu ändern, um den gewünschten Zustand zu erreichen (vgl. Abbildung 2-18). Dies erfolgt im Sinne der Analyse und Synthese als Erweiterung oder Eingrenzung des möglichen Such- und Lösungsraumes (vgl. 2.4.2 *Produktentwicklungsprozess*) und prozessual z.B. über das TOTE-Schema (vgl. Abbildung 2-16). Die äußeren Bedingungen lassen sich in Bezug auf Zielkriterien und Anforderungen sowie dem Bekanntheitsgrad der Mittel an den Konstruktionsarten aufzeigen (vgl. [DoD-1987] und [SeS-2002]).

Problemstellung

Klarheit der Zielkriterien und Anforderungen

		Klarheit der Zielkriterien und Anforderungen	
		hoch	gering
Bekanntheitsgrad der Mittel	hoch	Interpolationsbarriere: einfache Variantenkonstruktion	Dialektische Barriere: einfache Entwicklungsstudie
	gering	Synthesebarriere: komplexe Anpassungskonstruktion	Synthesebarriere und dialektische Barriere: Neukonstruktion

Abbildung 4-8 Barrieren und Problemtypen nach DÖRNER und FRICKE aus [BSF-2004]

Bei der Variantenkonstruktion handelt es sich primär um ein Interpolationsproblem (vgl. 2.4.1 *Konstruktionsarten*). Da Ist- und Sollzustand sowie die Operatoren bekannt sind, ist die analytische Sichtweise zielführend [DoD-1987]. Ein Beispiel für ein Interpolationsproblem ist die anwendungsspezifische und verträgliche Variation von Komponenten oder Bauteilen eines entwickelten Moduls innerhalb eines vorgegebenen Spektrums [BSF-2004].

Bei einer Anpassungskonstruktion wird in einem ersten Schritt betrachtet, inwieweit die Anforderungen mit vorhandenen Modulen und Komponenten erfüllt werden können. Danach sind entsprechend Module anzupassen und die erzielten Eigenschaften zu analysieren. Somit sind der Ausgangs- und der Zielzustand bekannt, jedoch fehlen die zielführenden Operatoren (geeignete Werkzeuge und Methoden). Damit stellt sich dem Entwickler ein synthetisches Problem [BSF-2004]. Anpassungskonstruktionen treten in einem Baukasten dann auf, wenn aus den verfügbaren Modulen keine geeignete Lösung gefunden und neue, ergänzende Module entwickelt werden müssen. Die Herausforderung besteht da-

bei darin, nur wenige neue Module zu generieren. In der Konzeptentwicklung muss dazu eine erste Abschätzung der Auswirkung der geänderten Module auf die zu erwartenden Produkteigenschaften erfolgen.

Bei einer Neukonstruktion werden Module und Komponenten für einen Baukasten neu entwickelt. Auch hier muss, wie bei der Anpassungskonstruktion, primär eine Synthesebarriere überwunden werden. Zusätzlich kann eine Neukonstruktion eine dialektische Barriere darstellen, wenn beispielweise der Zielzustand fehlt oder unklar ist. In einem Baukasten tritt dies auf, wenn die zu berücksichtigen Fahrzeugklassen, die Antriebsart oder die späteren Karosserieformen unklar sind. Bei Neukonstruktionen werden im Rahmen der Konzeptentwicklung erste Abschätzungen der zu erwartenden Eigenschaften des gesamten Baukastens getroffen. In den darauf folgenden wiederkehrenden Schritten können Merkmale verändert und die entstehenden neuen Eigenschaften analysiert werden.

Beim Verfolgen einer wie in Abschnitt 4.1 dargestellten Baukastenstrategie ist eine Differenzierung der Tätigkeit der Entwickler in spezifisch oder global orientierte möglich (vgl. Abbildung 4-9).

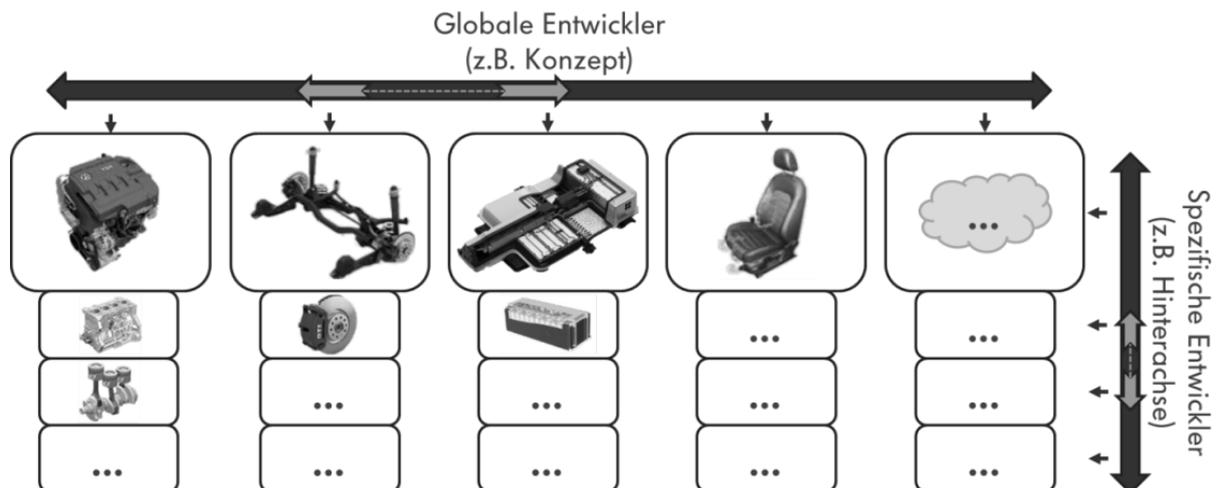


Abbildung 4-9 Unterschied zwischen globalem und spezifischem Entwickler

Bei einer Baukastenstrategie werden Module und dazugehörige Elemente (vgl. Abbildung 4-4) für mehrere Fahrzeuge bis zur Serienreife entwickelt. Der global in der Grobstruktur des Produktes tätige Entwickler prüft dabei die Kompatibilität mit anderen Modulen und leitet neue Entwicklungsziele für die Module auf das Gesamtprodukt ab. Die Akzeptanz abstrakter Ideen ist dabei in einem Team sowie bei entsprechenden Entscheidungsträgern möglicherweise nicht vorhanden. Somit ist die Bereitschaft nicht gegeben, auf Basis komplexer rechneroptimierter Algorithmen Ergebnisse zu erzielen. Innerhalb einer Baukastenstrategie müssen in der Konzeptentwicklung die Auswirkungen von Änderungen eines Moduls schnell, also auf Basis von heuristischen Ansätzen (vgl. Abschnitte 4.1 und 4.2.1) nachvollziehbar sein. Dies hat den Vorteil, dass mögliche, aus Sicht der Beteiligten widersprüchliche Ergebnisse nicht an die eigene subjektive Realität angepasst werden. Dies geschieht, da der Mensch dazu neigt, Erkenntnisse, die zu den eigenen Kognitionen (d.h. Meinungen, Einstellungen, Erwartungen) inkonsistent sind und zu Dissonanzen führen, was in der Literatur als Disconfirming Evidence (vgl. [KoB-

1996)) beschrieben wird, durch Hinzufügen, Eliminieren oder Ersetzen von Kognitionen zu reduzieren [SJH-2002].

Bei der Lösungsfindung ist die Klärung der Aufgabenstellung durch den Entwickler wesentlich für die Qualität des Ergebnisses. Zentralen Einfluss auf die Abarbeitung der Aufgabenstellung hat die Ausbildung der Entwickler. GÜNTHER (vgl. [GuJ-1998]) differenziert hier z.B. zwischen Entwicklern mit Hochschulausbildung und einer methodisch ablaforientierten Vorgehensweise sowie Praxis-Entwicklern mit einer teilproblemorientierten Vorgehensweise. In der frühen Phase der Entwicklung kann es daher hilfreich sein, die unterschiedlichen Kategorien von Entwicklern parallel laufen zu lassen, um anschließend die erzielten Ergebnisse zu diskutieren und zu kombinieren [GuJ-1998].

In großen Unternehmen, bei denen in Entwicklungsteams gearbeitet wird, können zusätzliche Effekte die Lösungsfindung behindern. Bei der Bildung kohäsiver, auf einen starken inneren Zusammenhalt basierender Gruppen (vgl. [Duden-2014]), kann der Verbleib in der Gruppe für Mitglieder zur zentralen Motivation werden [BSF-2004]. Objektives Denken und eine gute Entscheidungsfindung können dann nach IRVING (vgl. [JIL-1972]) durch Gruppendenken behindert werden, da nur selektiv nach Informationen bzw. Lösungen gesucht wird.

Es besteht die Möglichkeit, durch einen gezielten Aufbau einer Gruppe mit unterschiedlichen Charakteren und fachlichen Hintergründen, die auf Basis einer Teamkultur mit offen kommunikativen und sachlich geprägten Verhalten zusammenarbeiten, den Zwang zur „Einheitsmeinung“ in einer Gruppe zu unterbinden [AHM-2005]. Die Herausforderung besteht darin, die Teams entsprechend zusammenzustellen, den offenen Diskurs zu unterstützen und möglicherweise auch abstrus anmutende Ideen im Brainstorming zu erzielen und zuzulassen (vgl. 2.4.4 *Werkzeuge und Hilfsmittel*). Dabei muss in Wirtschaftsunternehmen auch die Qualität einer Idee überprüfbar sein. Einen Dissens zu fördern, nur um eine Diskussion anzuregen, ist nicht förderlich. Wenn es nicht gelingt, einen positiven Dissens in einer Gruppe zu implementieren, besteht das Risiko, dass in der Gruppe die gefundene technische Lösungsvariante als alleinige Lösung angesehen wird. Damit wird es keinen Widerspruch oder weitere Untersuchungen im Lösungsraum geben. In der Sozialpsychologie wird dieser Fall als pluralistische Ignoranz umschrieben [AWA-2008].

Im Entwicklungsprozess sollte es den Entwicklern möglich sein, Eigenschaften der in der Entwicklung befindlichen Module oder Komponenten (vgl. Abbildung 4-4) hinsichtlich des zusätzlichen Nutzen im Bezug zum Gesamtprodukt und den Randbedingungen des Lösungsraumes kurzfristig verifizieren zu können. Im erweiterten Kontext ist dabei auch die Fragestellung zu prüfen, wie das Produkt oder Teile davon (Module etc.) weiterführend eingesetzt werden können.

4.3 Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung ist der erste Schritt in der Entwicklungsphase des Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2-10). Sie führt zu dem ersten konstruktiven Entwurf einer Produktidee. Sie wird im All-

gemeinen auch als „frühe Phase“ der Produktentwicklung umschrieben [BrS-2013]. Im Fokus stehen die Produktkonkretisierung sowie die Produktgestaltung (z.B. Maßkonzept) und dabei insbesondere im Automobilbau die Packageerstellung und deren Detaillierung. Zu einem Konzept gehört es, das Package im Fahrzeug zu plausibilisieren, Funktionen des Fahrzeuges zu erarbeiten, mögliche technische Innovationen zu integrieren und die Varianten gesamtheitlich zu bewerten.

Für ein Fahrzeugkonzept bedarf es also des Zusammenführens und Verdichtens von unterschiedlichen Zielen und insbesondere Anforderungen sowie deren wiederkehrende Bewertung [BrS-2013]. In der Automobilindustrie sind in der Entwicklung in Bezug auf das technische Fahrzeugkonzept eine Vielzahl von Unterkonzepten bekannt (Abbildung 4-10).

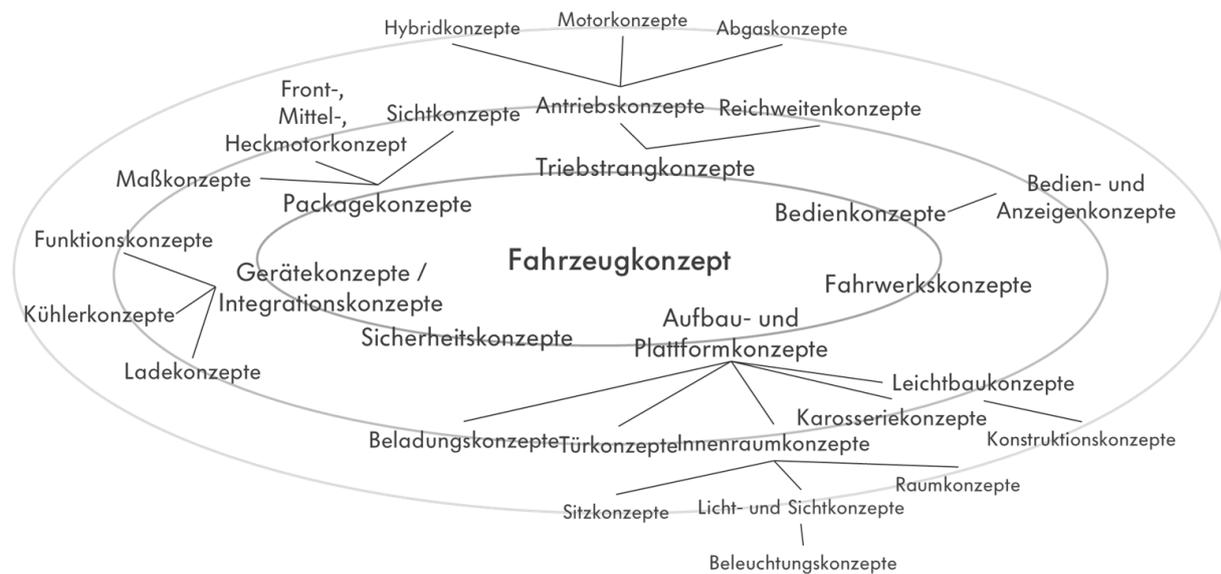


Abbildung 4-10 Arten von Konzepten (aus [BiW-2011], [BrS-2013], [JoB-2011], [KEM-2004] und erweitert)

Diese aufzubauen und zu plausibilisieren erfolgt in mehreren Entwicklungsschritten, angefangen mit der Entwicklung von Produktzielen, der Einbringung von Ergebnissen der Vorentwicklung, dem Aufbau des eigentlichen Fahrzeugkonzepts und der Übergabe an die Serienentwicklung (Abbildung 4-11).



Abbildung 4-11 Die Black-Box der Produktkonzeptionierung

Dabei muss in der Konzeptentwicklung besonders auf die Kernelemente des Produktes bzw. die Kernkompetenz des Unternehmens geachtet werden [EnW-2006] (Erwartungen an die Marke und Bedürfnisse des Kunden in Abbildung 2-2).

4.3.1 Konzeptentwicklungsphasen

Die Konzeptentwicklung baut projektseitig auf der Produktplanungsphase auf (vgl. Abbildung 4-1). Es werden dabei neue Technologien und Forschungsergebnisse mit dem Ziel berücksichtigt, diese in die Serienentwicklung zu überführen. Die behandelten Themen der Forschung bzw. Vorentwicklung weisen einen hohen Neuheitsgrad auf und bedürfen zumeist weiterführender Grundlagenuntersuchungen. Die Konzeptdefinition ist die erste Phase der Konzeptentwicklung (vgl. [BrS-2013]). Ein Konzept beruht auf einer Konzeptidee, bei der die technologischen Ideen (Inventionen) der Vorentwicklung berücksichtigt werden, inwieweit der technologische Stand in den Entwicklungsprozess eines Produktes überführbar ist.

In der Konzeptdefinition werden primär die Anforderungen des Produktkerns und des konkreten Produktes (vgl. Abbildung 2-1) realisiert, da dem Entwickler zu Beginn der Konzeptentwicklung nur erste Anforderungen und Wünsche (vgl. Kapitel 2.2 *Produktlebenszyklus* und 2.3 *Das Produktgefüge*) sowie grobe Randbedingungen bekannt sind. In dieser Phase ist jedoch die Betrachtung des gesamten Produktes im Kontext zum Baukasten für Konzeptentwickler möglich. Anforderungen können z.B. mit Hilfe der Szenarioanalyse gesammelt und strukturiert werden, um die Konzeptidee zu detaillieren (2.4.4 *Werkzeuge und Hilfsmittel*).

In den entstehenden Konzepten werden die Anforderungen aus der Produktplanungsphase in Produkteigenschaften technisch übersetzt. Die Umsetzung der geforderten Eigenschaften im Produkt erfolgt im ersten Schritt durch

- a. eine Priorisierung (Rangfolge der zu erzielenden Eigenschaften)
- b. eine Synthese aus der vorangegangenen Priorisierung der zu erzielenden Eigenschaften

Die aufgezeigte Produktkonkretisierung ist ein erster projektseitig kostenverursachender und richtungsweisender Schritt in der Konzeptentwicklungsphase, da eigene und dritte Entwickler (strategische Partnerschaft mit Zulieferern oder Entwicklungsdienstleistern) in die Entwicklung einbezogen werden.

Aus diesem ersten Schritt gehen zumeist mehrere mögliche Konzeptvarianten hervor, da für den Konzeptentwickler eine wesentliche Herausforderung die große Varianz der Lösungsmöglichkeiten innerhalb des Lösungsraumes ist (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4). Ein systematisches Durcharbeiten auf der Suche nach weiteren Lösungsmöglichkeiten ist vor allem aus zeitlichen Gesichtspunkten in einem komplexen, multikriteriellen Such-, Bearbeitungs-, Bewertungs- und Optimierungsprozess nicht ohne methodische Unterstützung möglich. Hinzu kommt eine Mischung aus einer opportunistischen, dem Weg des geringsten Widerstandes folgenden (vgl. Abschnitt 4.2.4) und nicht systematischen Vorgehensweise des Entwicklers [CIS-2006].

Auf Basis der Konzeptvarianten erfolgt die weitere Konzeptuntersuchung. Diese umfasst eine Prüfung auf Umsetzbarkeit und Marktrelevanz. Auf Basis des grob definierten Konzeptes folgt die Konzeptauslegung zum Aufbau eines konkreten Produktes. Das Vorgehen basiert auf einer Mischung von

Funktionsfindung, Konzeptdefinition und –auslegung unter Berücksichtigung der Anforderungen und Randbedingungen sowie deren Optimierung. Ziel ist es, mit der fortlaufenden Entwicklung des Konzeptes das Entwicklungsziel stärker zu fokussieren und bei Unstimmigkeiten dieses stärker zu plausibilisieren.

Der nächste Schritt der Konzeptentwicklung ist die Produktgestaltung. Sie umfasst neben dem Aufbau des technischen Fahrzeugkonzeptes (Abbildung 4-10) auch die Berücksichtigung der Einflüsse aus anderen Bereichen des Produktentstehungsprozesses bzw. darüber hinausgehender Phasen des Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2-15). In der Konzeptentwicklung gilt es also neben den technischen (Abbildung 4-10) weitere Konzepte in die Entwicklung zu integrieren. Dazu gehören unter anderem Fertigungs- und Montagekonzepte (Produktionskonzepte), Nutzungs- und Nachnutzungskonzepte (u.a. Kundendienstkonzept für Werkstätten, Reparaturkonzept, Recyclingkonzepte für Hilfs- und Betriebsstoffe) für den Produktbetrieb, das Vertriebskonzept sowie das Entsorgungskonzept. Weitere Berücksichtigung findet das Qualitätswesen bzgl. der Zuverlässigkeit und Sicherheit der Produkte.

Zusätzlich zu den Einflüssen aus anderen Geschäftsbereichen müssen bei der Produktgestaltung z.B. die Baukastensystematik (vgl. Abbildung 4-2) oder zunehmend die Konnektivität mit der Umwelt einfließen. Die Konnektivität ist eine wesentliche Herausforderung der zukünftigen Mobilität. Dazu gehören beispielsweise die „car to car communication“ oder auch die Kommunikation zwischen Smartphone und Auto, was insbesondere auf die Bedienkonzepte Auswirkungen hat.

Die Baukastensystematik muss im Kontext einer vertikalen (Fahrzeugklassen) wie auch horizontalen (Karosseriebauformen) Produktdifferenzierung (vgl. Abbildung 4-2) sowie zusätzlich hinsichtlich der Antriebsartdifferenzierung gesehen werden. Das bedeutet, dass bestehende Komponenten verschiedenen Ursprungs in ein Konzept integriert werden müssen und die Kompatibilität der Module in der Konzeptphase und darüber hinaus gewährleistet werden muss.

Für den Konzeptentwickler ergeben sich demnach unterschiedliche Zielkonflikte beim Erstellen des Konzeptes [BrS-2013]. Dazu gehören fahrzeugbezogene geometrische Konflikte, da der Kunde den größtmöglichen Innenraum bei gleichzeitig kleinstmöglichen Außenabmaßen des Fahrzeuges zur Verfügung gestellt bekommen soll. Es bestehen auch physikalisch-funktionale Zielkonflikte, z.B. hinsichtlich der Steifigkeit des Fahrzeuges und der sich ergebenden Akustik oder hinsichtlich des Gewichts und Funktionen der Bauteile durch Verbundwerkstoffe. Weitere Zielkonflikte bestehen zwischen der Produktkomplexität, der Qualität und Zuverlässigkeit sowie den Kosten. Letzterer Konflikt beinhaltet alle Arten von Kosten, wie die Einzelkosten der Bauteile selbst, Gemeinkosten, die z.B. durch die Entwicklung oder Produktion entstehen, aber auch Investitionen, die bei der Erprobung oder Zulassung neuer Technologien getätigt werden. Zielkonflikte ergeben sich auch aus den angestrebten unternehmensspezifisch abhängigen Produktzielen und der politischen Einflussnahme. Der wesentliche Konflikt für den Konzeptentwickler in einer Baukastenstrategie ergibt sich aus der Pluralität der Anforderungen verschiedener Fahrzeugmodelle (vgl. Abbildung 4-2). Dies betrifft insbesondere global arbei-

tende Entwickler (Abbildung 4-9), die die verschiedenen Fahrzeugprojekte innerhalb der Baukastenstrategie vernetzen. Der spezifische Entwickler kann, bei vollständigen Randbedingungen und eindeutiger Entwicklungsrichtung, weiter singular sein Modul (bzw. Komponente oder Bauteil) bearbeiten.

Mit den über den Zeitraum der Konzeptentwicklung aufgebauten Daten (CAD-Daten) und Abschätzungen der daraus resultierenden Fahrzeugeigenschaften können erste heuristische Simulationen auf Basis von Modellen erstellt und Ergebnisse erzielt werden. Die Vorgehensweise beruht auf einer kybernetischen Hypothese, dem TOTE-Schema (Abbildung 2-17). Es besteht jedoch in der Konzeptphase der Unterschied, dass bei jedem erzielten Ergebnis neue Anforderungen hinzukommen können, die wiederum zu völlig anderen als den bisher erzielten Erkenntnissen führen können (Abbildung 4-12). In diesen Phasen sind theoretisch beliebig viele Zyklen der Konzeptoptimierung zu durchlaufen. Jedoch unterliegen die jeweiligen Prozesse in Wirtschaftsunternehmen zeitlichen Restriktionen. Damit wird die Anzahl der Zyklen zur Konzeptoptimierung, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen, begrenzt.

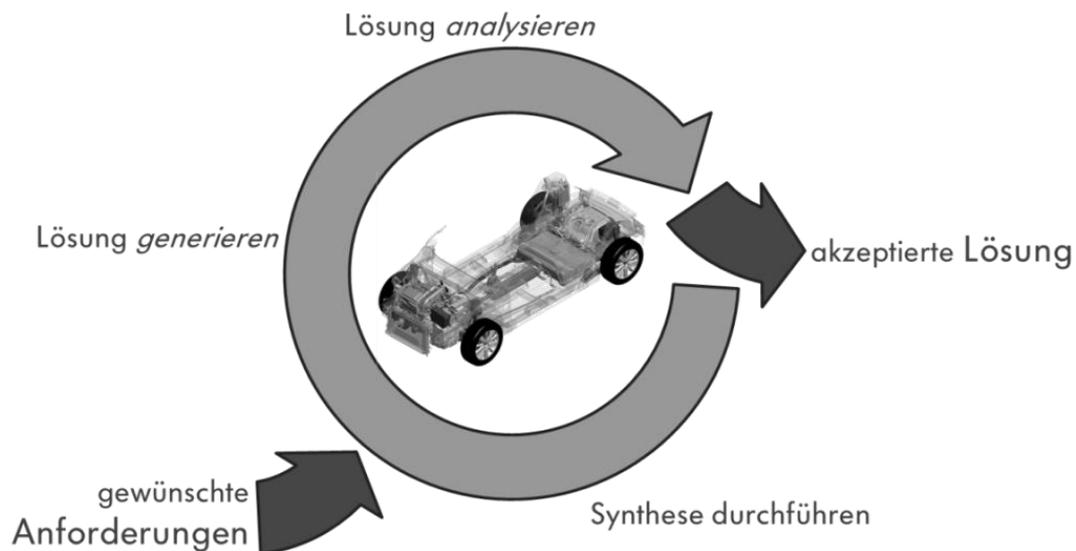


Abbildung 4-12 Arbeitsschritte der Lösungsgenerierung

4.3.2 Ende der Konzeptentwicklung

Das Ende der Konzeptentwicklung liegt je nach Unternehmen und Branche bei einem ersten virtuellen Produktkonzept oder einem fertigen funktionsfähigen Prototypen [GGG-2010].

In Anbetracht heutiger technischer Möglichkeiten (CAD- und Simulations- Technologie [SHB-2010] oder [VWB-2009]) wird in dieser Arbeit das Ende der Konzeptarbeit und der Beginn der Serienentwicklung mit dem Aufbau eines virtuell funktionsfähigen Prototypen festgesetzt. Des Weiteren müssen am Ende der Konzeptentwicklung die geforderten Produkteigenschaften durch eine Synthese vollständig erfüllt oder Kompromisse entschieden worden sein (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Mit dem Konzept wird die nötige Bauteilspezifikation erbracht, um die ersten daraus resultierenden Eigenschaften aufzuzeigen. Die Bauteilspezifikation ergibt sich durch die Merkmale der Bauteile (vgl.

Abbildung 2-14). In der Konzeptentwicklung müssen dafür die Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten und die Abmessungen der Bauteile, mindestens aber ihrer Bauräume definiert sein. Weniger präzise können die Geometrie, der Werkstoff und die Oberflächenparameter sein. Bei der Geometrie können in der Konzeptentwicklung z.B. Gewindespezifikationen, Schweißpunkte oder Sicken im Blech vernachlässigt werden. Beim Werkstoff ist nur die grundsätzliche Auswahl (Stahl, Aluminium, Polymere, Faserverbund oder Hybridwerkstoffe) für die Gewichtsableitung wichtig, entsprechend verhält es sich auch mit den Oberflächenparametern, wobei, je nach Funktion des Bauteils, auch diese unpräziseren Merkmale fahrzeugspezifisch definiert werden können. Dies ist der Fall, wenn durch diese Merkmale wesentliche Eigenschaften des Fahrzeuges beeinflusst werden. Die weitere Detailentwicklung und mögliche Produktionsprozesse sind Teil der Serienentwicklung, die im Anschluss mit dem Aufbau eines bzw. mehrerer Prototypen-Generationen beginnt (Abbildung 4-13).

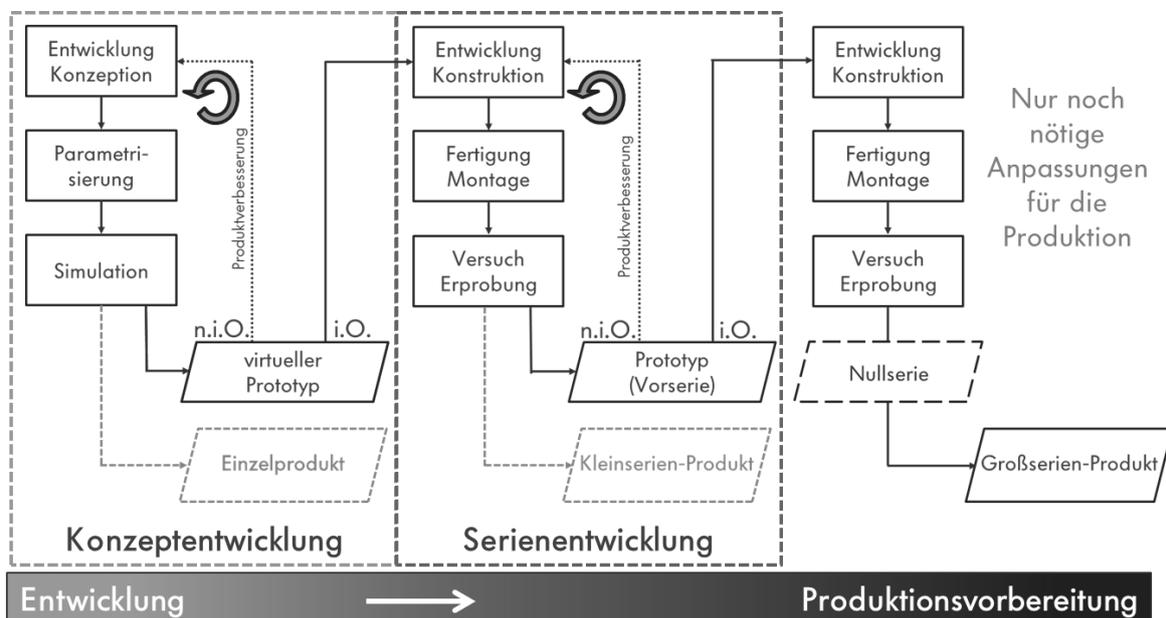


Abbildung 4-13 Entwicklungsprozess eines Kraftfahrzeuges [BuIn-2013]

Der Übergang von der Konzeptentwicklung in die Serienentwicklung (vgl. Abbildung 4-13) stellt bei einer Baukastenstrategie die nächste Herausforderung in der Produktentwicklung dar. Der global arbeitende Konzeptentwickler (Abbildung 4-9) übergibt die Arbeit an einen spezifisch arbeitenden Serienentwickler. Während in der Konzeptentwicklung das Fahrzeugkonzept global mit einem Fahrzeuggrundmodell betrachtet wird (Abbildung 4-6), stehen in der Serienentwicklung einzelne Baugruppen (Baugruppenmodell in Abbildung 4-6) und deren Komponenten und Bauteile im Vordergrund. Da sich der Serienentwickler innerhalb eines konzeptionell gegebenen Bauraumes bewegt und nicht den Stoff-, Energie- oder Signalfloss wesentlich ändert, ist grundsätzlich eine singuläre Betrachtung der Bau- oder Unterbaugruppen möglich. Ein Baukasten, mit seiner Vielzahl an Modulen und daraus resultierenden Produkten, wird somit nur in der Konzeptentwicklung gebündelt betrachtet. Das bedeutet auch, dass eine Synthese über den Baukasten primär in der Konzeptentwicklung möglich ist. Mehrere Varianten eines Moduls in der Serienentwicklung stellen dabei einen Kompromiss dar (vgl. Abschnitt

4.2.3), insofern die unterschiedlichen Module nicht zur Individualisierung nötig sind (vgl. Abschnitt 4.1).

Zusätzlich ist mit dem Schritt von Konzept- zur Serienentwicklung (Abbildung 4-13) die Übergabe von Daten bzw. Informationen an mehrere neue Entwicklerteams verbunden. Dazu ist ein einheitliches Vorgehen wünschenswert, da andernfalls Reibungsverluste im Prozess entstehen (z.B. durch Doppelarbeit oder Neubestimmung der Randbedingungen). Die Übergabe von CAD-Daten ist dabei eine vergleichsweise einfache Angelegenheit. Das Verständnis vom Produkt, die damit verbundenen Produkteigenschaften und insbesondere Abhängigkeiten zwischen einzelnen Modulen (z.B. Bauteilverstärkung aus Crashgründen, etc.) ist nicht unbedingt offensichtlich. Reibungsverluste können mit Hilfe eines hohen und individuellen kommunikativen Aufwands zwischen den Entwicklern, durch einen definierter Prozess oder eine einheitliche Methodik reduziert werden.

4.4 Vorgehen in der Konzeptentwicklung

Im Produktentstehungsprozess und auch bei der Produktion von Kraftfahrzeugen werden aufgrund der sich inhaltlich differenzierenden Aufgaben (vgl. Abschnitt 4.3) unterschiedliche Methoden und Werkzeuge angewendet (Abbildung 4-14). Ein modernes Vorgehensmodell beschreibt dabei einen Ablauf für Projekte gleicher Art, benennt die beteiligten Personen und berücksichtigt geeignete Methoden für deren Bewältigung (vgl. [BPK-2008]).

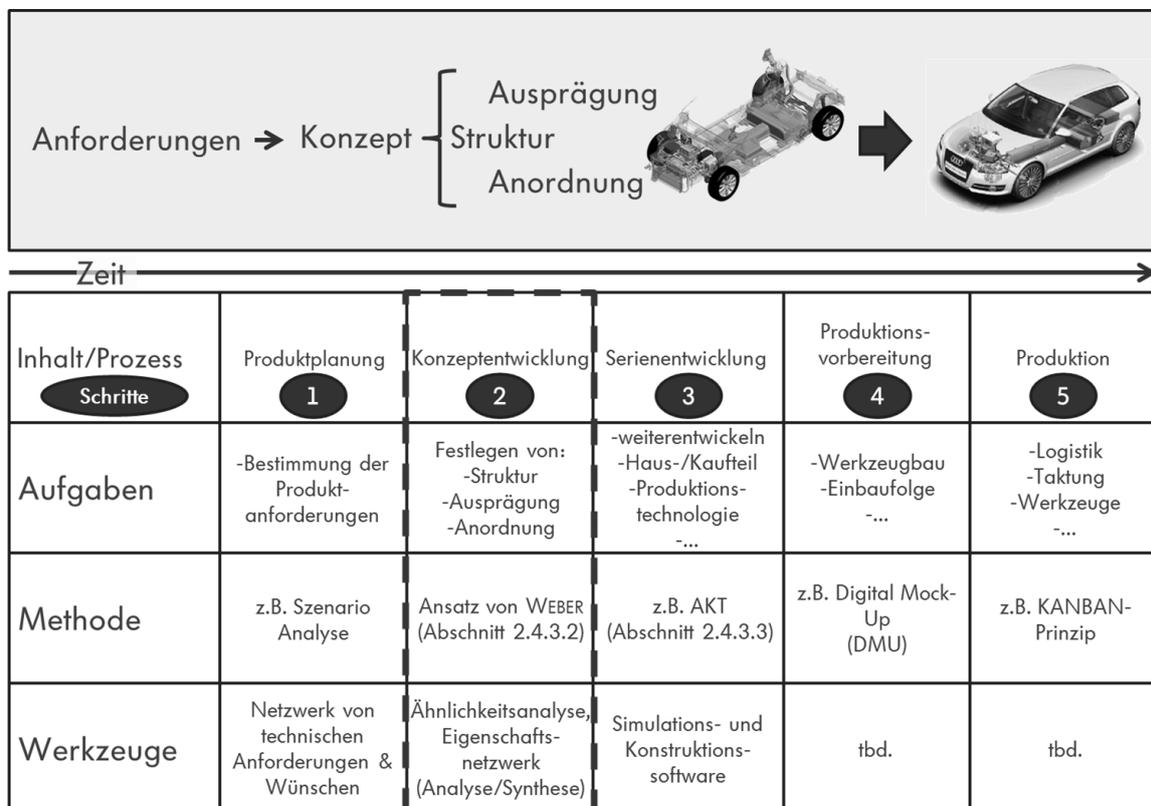


Abbildung 4-14 Aufgaben, Methoden und Tools im Produktentstehungsprozess des Automobils

Eine Herausforderung für den Konzeptentwickler besteht in der Kenntnis der vielfältigen Zusammenhänge der Produktelemente sowie die daraus resultierende Beeinflussung der Fahrzeugeigenschaften

[PoL-2011]. In einer Plattformstrategie ist dabei die Betrachtung einer Fahrzeugklasse ausreichend, während in einer Modulstrategie zusätzlich einzelne Module in anderen Fahrzeugklassen mitberücksichtigt werden müssen (vgl. Abschnitt 4.1). In einer Baukastenstrategie müssen die Zusammenhänge der Bauteile und die Beeinflussung der Fahrzeugeigenschaften über mehrere Fahrzeugprojekte hinweg mit unterschiedlichen Fahrzeugklassen sowie differenzierten Karosseriebauformen und Antriebsarten betrachtet werden. Hinzu kommen, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, der zeitlicher Druck und eine primär virtuelle Entwicklung mit einer späten Verifikation im Projekt.

Im Konzeptentwicklungsprozess muss es möglich sein, dass neue Ziele (Anforderungen oder Randbedingungen) kurzfristig aufgenommen sowie die Auswirkung auf die Fahrzeugeigenschaften zügig abgeschätzt werden können (vgl. Abschnitt 4.2.4). In der Elektromobilität ist der Zeitaspekt von besonderer Bedeutung, da das Tempo der technologischen Entwicklung nicht vorhersehbar ist. Wenn die Technologieentwicklung turbulent verläuft (Abbildung 2-9), ergeben sich Produkte nur durch die Entscheidung für eine Technologie. Die Umsetzung der Entscheidung stellt dabei ein erhöhtes unternehmerisches Risiko dar, im Vergleich zu Entscheidungen bei stabilen oder dynamischen Technologieentwicklung mit entsprechender Marktnachfrage. Wenn Auswirkungen von Änderungen einzelner Technologien nicht zügig bewertbar gemacht werden können, besteht das Risiko, dass sie abgelehnt werden oder die Prüfung der Umsetzung hohe Kosten verursacht und lange Entwicklungskapazitäten bindet. Dies bezieht sich auch auf die Lock-In bzw. Lock-Out Effekte (2.2.1 *Betriebswirtschaftlich Produktlebenszyklus*), wenn eine Technologie nicht im Kontext eines Gesamtproduktes oder eines Baukastens bewertet werden kann.

Eine Methode zur Konzeptentwicklung sollte gleichermaßen Konzeptuntersuchungen, Konzeptauslegung und inhaltlich die vertikale oder horizontale Produktdifferenzierungen unterstützen. Der Ansatz der Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis deterministischer Regeln und Funktionen zum beidseitigen Überführen von Produktmerkmalen und Eigenschaften als sequenzarme Konstruktion ist in der Konzeptentwicklung hinsichtlich der Produktkonkretisierung bzw. der „running targets“ sowie der Variantenvielfalt einer Baukastenstrategie vielversprechend und wird weitergehend in den Abschnitten 4.4.1 und 4.5 ausgeführt.

In Bezug auf die der Konzeptentwicklung folgenden Entwicklungsphasen ist das Vorgehen gesondert zu prüfen. Beispielsweise möchte der Serienentwickler innerhalb der konzeptseitig festgelegten Bauteilspezifikationen die Bauteileigenschaften innerhalb einer Baugruppe optimieren und auf den ausgearbeiteten Funktionen der Bauteile aufbauen. Der Serienentwickler ist auch bestrebt, das Datenvolumen in den CAD-Anwendungen zu begrenzen, um Übersichtlichkeit und Geschwindigkeit des Programms zu gewährleisten. Bei der Nutzung von Simulationsmodellen wird primär ein Fahrzeugausschnitt oder ein abgeleitetes Modell betrachtet, um Simulationszeiten zu minimieren. In diesem Fall bietet z.B. die Autogenetische Konstruktionstheorie (2.4.3.3 *Autogenetische Konstruktionstheorie*) die Möglichkeit, das Resultat der Konzeptentwicklung als erste Lösung für weitere Optimierungsschritte zu betrachten. Zudem können konzeptionelle Bauräume in der AKT als physikalische oder organisato-

rische Randbedingungen betrachtet werden, die sich im invertierten Lösungsraum als Tabuzonen modellieren lassen. Das heißt, es lassen sich mögliche nicht betrachtete Module oder Komponenten der Konzeptentwicklung in die Serienentwicklung übertragen. Beispielhaft zu nennen ist die Optimierung bzw. Anpassung der Anströmung der Konverteranlage in [CJS-2004] und [VBC-2004]. Innerhalb des Bauraumes eines Kraftfahrzeuges werden die Verrohrung und die Funktionsweise des Abgasstranges optimiert. Erst wenn diese Optimierung nicht mehr packageneutral erfolgt oder Funktionseinschränkungen zur Folge hat, ist wiederum eine gesamtheitliche Fahrzeugbetrachtung und damit auch des Konzeptes nötig.

Die primäre virtuelle Entwicklung hat auch Konsequenzen für die Methoden der Produktionsvorbereitung. Betreffend Zugänglichkeit, Kollisionen, Verbaubarkeit, Werkzeugauslegung, Montagereihenfolge etc. erfolgen diese Prüfungen heute in der Automobilindustrie z.B. über ein Digital Mock-Up (vgl. [BSW-2009]). Auch in der Produktion muss eine Produktstrategie Berücksichtigung finden. So ist es z.B. nach WIENDAHL sinnvoll, bei einer größeren Anzahl von Standardprodukten oder Werkstücken mit definierten Varianten, eine KANBAN-Methode zu verwenden (aus [SWM-2014]).

4.4.1 Strukturierung eines Konzeptes bei einer Baukastenstrategie

Um die in diesem Kapitel aufgeführten Ansprüche an ein Vorgehen in der Konzeptentwicklung umsetzen zu können, müssen die Ziele der Konzepterstellung, die Produktkonkretisierung und Produktgestaltung in sinnvolle Arbeitsbereiche strukturiert und im Entwicklungsprozess sukzessive festgelegt werden. Angrenzende Schritte des Entwicklungsprozesses und übergreifende Anforderungen an Fahrzeugkonzepte müssen zusätzlich Berücksichtigung finden. Die Informationen, welche Eigenschaften das Produkt erzielen soll, kommen aus der Produktplanung (vgl. 2.4.2 *Produktentwicklungsprozess* sowie 4.3 *Konzeptentwicklung*)

Um diese Aufgaben zu erfüllen, bedarf es einer geeigneten Herangehensweise, um ein Konzept zu strukturieren. Dabei entsteht das Fahrzeugkonzept nicht im leeren Raum. Die Fahrzeugsystematik ist abhängig von der Umwelt, in der sich das Fahrzeug bewegt, und dem Produkt selber. Alle an das Fahrzeug gestellten Ansprüche (Anhang C3 *Ansprüche an ein Produkt*) sind, aus Sicht der Entwicklung, aus dem (Produkt-)Umfeld ableitbar (Abbildung 4-15). Ziel der Konzeptentwicklung ist es, das Produkt, bzw. die Produkte in einem Baukasten in einer jeweiligen Struktur mit entsprechend ausgeprägten Produktelementen und einer spezifische Anordnung darzustellen.

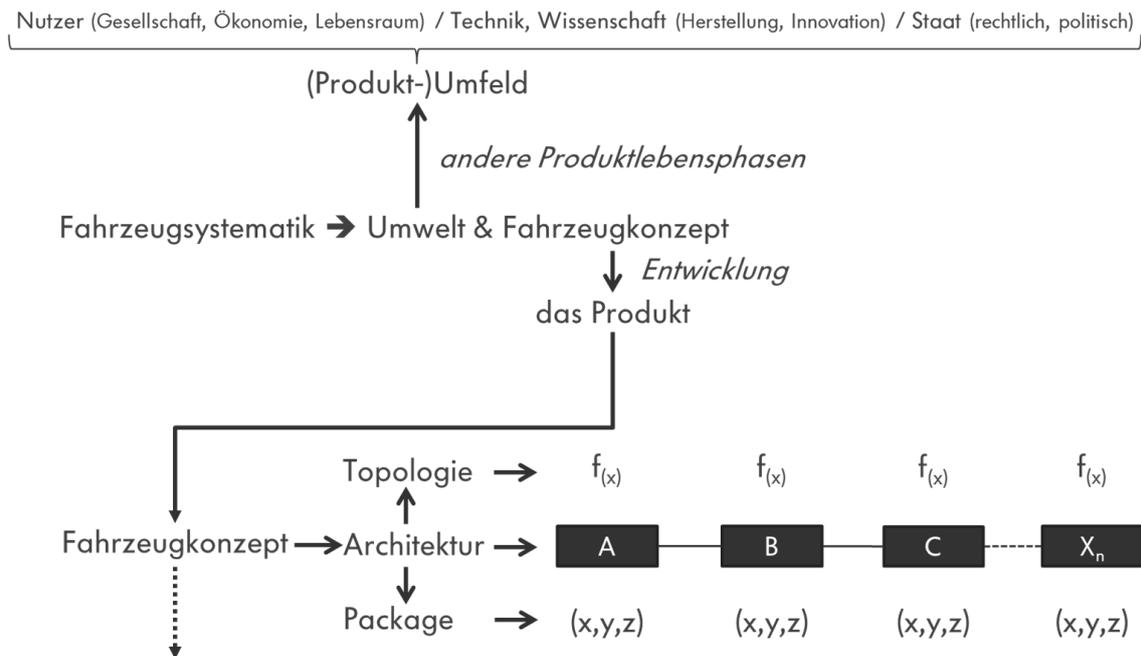


Abbildung 4-15 Die Fahrzeugsystematik in Bezug auf die Konzeptphase

Bei einer grundlegenden Betrachtung kann ein Fahrzeugkonzept in die Bereiche Architektur, Topologie und Package unterteilt werden (Abbildung 4-15). Methodisch wird dabei der Ansatz verfolgt der in 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften* vorgestellt wurde.

Für den weiteren Verlauf werden folgende Definitionen zum Aufbau eines Kraftfahrzeugkonzepts verwendet:

1. Architektur: Die Zusammensetzung des Produktes in einer Struktur bzw. in Abhängigkeit der Produktstrategie disponible Module und Komponenten.
2. Topologie: Der Zusammenhang der Bauteile bzw. derer Funktionen, daraus resultierende Abhängigkeiten und die Dimensionierung innerhalb des Produktes im Sinne einer Ausprägung der Produktelemente.
3. Package: Die physische Orientierung bzw. Anordnung von Bauteilen innerhalb des Produktes.

Diese Unterteilung ist dann sinnvoll, wenn durch die Produktstrategie (z.B. Baukastenstrategie) und eine zusätzliche Markenstrategie eine hohe technische Komplexität in der Produktentwicklung zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 4.1). Die Erarbeitung der Fahrzeugkonzepte im Baukasten erfolgt iterativ, also über mehrere Arbeitsschritte der Analyse und Synthese (Abbildung 4-12).

In einem Baukasten müssen verschiedene Fahrzeugklassen, Karosseriebauformen und zusätzlich die Antriebsarten in einer Architektur vorgehalten werden, um die jeweiligen Produkte daraus ableiten zu können. Die Architektur, insbesondere die Fahrzeugarchitektur, wird in der Literatur differenziert dargestellt (z.B. nach FUCHS [FJL-2013]). In Abschnitt 4.4.1.1 *Architektur* wird das Verständnis der (Fahrzeug-) Architektur für diese Arbeit aufgezeigt. Die systematische Produktarchitekturgestaltung spielt je nach Produktstrategie eine größer werdende Rolle, da durch eine fahrzeugübergreifende Wie-

der Verwendung von Komponenten und Modulen größere Skaleneffekte über das gesamte Produktprogramm erzielt werden (vgl. [ScG-2012]).

Die Bedeutung der Topologie wird in dieser Arbeit abweichend zu der in der Literatur gängigen Verwendung als Anordnung von Objekten (dies ist hier Teil des Package) bzw. als Verwendung in der Mathematik des topologischen Raumes (vgl. [JaK-2008]) oder als Verschaltung und Aufbau der elektronischen Steuerungselemente bzw. des Bordnetzes (vgl. [WaR-2006]) gebraucht. In der Automobilindustrie wird die Topologie auch im Zusammenwirken elektrischer Komponenten und Systeme des Antriebes verwendet, um unterschiedliche Fahrzeugklassen zu bedienen (vgl. [StR-2013]). In Bezug auf einen Baukasten wird dieser Ansatz auf das Gesamtfahrzeug in Abschnitt 4.4.1.2 *Topologie* erweitert.

Das Package wird in der Automobilindustrie als Füllen von Bauräumen durch Fahrzeugkomponenten in entsprechenden Karosserieformen verstanden (näher erläutert in Abschnitt 4.4.1.3 *Package*). Der Prozess läuft dabei in enger Verbindung mit dem Design (vgl. [BrS-2013]).

Beim Fahrzeugkonzept ist weiter die Wechselwirkung mit dem Produktumfeld zu berücksichtigen (Abbildung 4-15). Zunächst wird durch eine grobe Strukturierung des Produktes und den Aufbau entsprechender Merkmale eine erste Lösung generiert. Dieses Ergebnis wird analysiert und eine Synthese von Anforderungen und Lösungseigenschaften durchgeführt, bis eine Lösung akzeptiert wird (Abschnitt 4.2.3) bzw. die Anforderungen erfüllt sind.

In der Praxis macht es Sinn, den Baukasten auf eine bestimmte Anzahl von Produktgruppen zu reduzieren. Dazu kann ein Baukasten bzw. die entsprechenden Produktgruppen in drei verschiedene Bereiche differenziert werden (Abbildung 4-16).

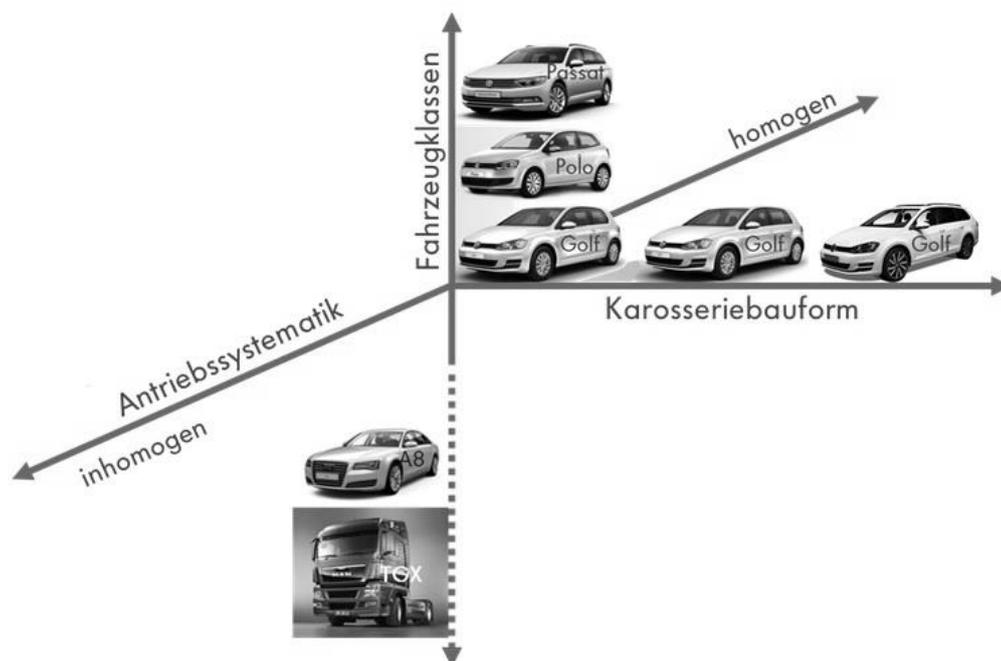


Abbildung 4-16 Differenzierung von Produktgruppen im Baukasten (bezogen auf Quermotorisierung)

Die vertikale Differenzierung umfasst die Fahrzeugklassen, während die horizontale Differenzierung die verschiedenen Arten der Karosseriebauformen eines Modells umfasst. Dazu gehören z.B. Varianten mit unterschiedlichen Tür-Anzahlen oder Formgebung (vgl. Abbildung 4-16). Zusätzlich zu der in Abbildung 4-2 aufgezeigten Differenzierung muss bei der Produktstrategie die Antriebsystematik z.B. in Quer-, Längs- oder Schwerlastmotorisierung berücksichtigt werden. In diesen drei Varianten sind weitere Differenzierungen hinsichtlich der Antriebsart, z.B. Verbrenner, Hybrid oder Brennstoffzelle möglich. Dabei sollten die Produktgruppen eines Baukastens mindestens in einem der drei aufgezeigten Bereiche eine Gemeinsamkeit aufweisen, z.B. die Quermotorisierung (vgl. homogene Bereich in Abbildung 4-3). Bei rein elektrischen Fahrzeugen ist z.B. von einer reinen Quermotorisierung bis in die Oberklasse auszugehen, was zu größeren Produktgruppen in einem Baukasten führen kann als es heute bei konventionellen Verbrennern üblich ist.

Selbst bei der Gruppierung mehrerer Produktgruppen in unterschiedlichen Baukästen (vgl. Inhomogenität bezogen auf die Antriebsystematik in Abbildung 4-16) besteht dennoch die Möglichkeit, Module bzw. Komponenten zwischen allen Produktgruppen zu vereinheitlichen. Ein beispielhaftes Bauteil ist die Verbrennungskraftmaschine: Dieselmotoren aus dem Automobilbereich können auch im Lkw als Range Extender eingesetzt werden (vgl. [FuA-2012]). Ein wesentliches Bauteil bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen ist die Traktionsbatterie (*3.6.1 Elektrischer Energiespeicher*), welche als Energieträger in allen Produkten (Fahrzeugklassen) zum Einsatz kommen könnte.

4.4.1.1 Architektur

Die Architektur (Definition Abschnitt 4.4.1) eines Produktes repräsentiert seinen Aufbau und seine Struktur in Baugruppen. Durch die Architektur werden im Wesentlichen das Struktur-Merkmal (vgl. Abbildung 2-14) und darüber die Produkteigenschaften beeinflusst.

Vom Grundsatz her kann die Architektur eines Produktes mit den vertikalen Gruppen²⁵ eines morphologischen Kastens verglichen werden (vgl. [ZwF-1966] und [RWG-1991]). Die Ausprägung der Produktelemente bzw. derer Merkmale innerhalb der Architektur wird durch das Package und die Topologie bestimmt. Die Architektur stellt in einem Vergleich zum Hochbau (Bauingenieurwesen) ein Fachwerk dar (im Unterschied zum Massivbau). Beim Vergleich zum Fachwerk besteht der Bezug zum Skelettbau als zur Ständerbauweise (vgl. Ständerbauweise in heutigen Systemen [RenM-2012]). Bei der Skelettbauweise stellt das entstehende Gerippe einen monolithischen Aufbau dar. Der Aufbau erfolgt in Stützen (vertikal) und Balken (horizontal), die den Rohbau des Gebäudes ergeben und die primäre Tragfunktion haben (Abbildung 4-17). Die bei der Skelettbauweise sich ergebenden Fächer müssen im Folgenden entsprechend der Verwendung gefüllt werden [MBW-2008].

²⁵ Die vertikale Gruppe stellt in diesem Fall ein benötigtes Element dar, während die horizontale Gruppe die unterschiedlichen möglichen Ausprägungen mit den jeweiligen Merkmalen darstellt.

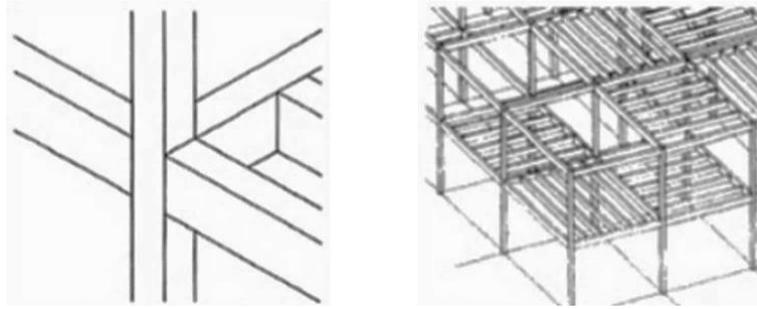


Abbildung 4-17 Tragsysteme eines Skelettbau [FDF-2002]

Dieser Gerippe- Aufbau kann auf die Struktur eines Fahrzeugkonzeptes mit entsprechenden Elementen (Abbildung 4-18) übertragen werden. Verschiedene kombinierbare Fahrzeugarchitekturen ergeben dabei eine übergeordnete Architektur innerhalb einer Produktstrategie. Die Ausgestaltung der jeweiligen Baugruppen entspricht dem Bau einer Fassade (Package) und dem Ausbau im Inneren (Topologie). Die Tragfunktion des Konzeptes, also das Vorhandensein aller benötigten Elemente in einer Struktur obliegt der Architektur. Package und Topologie gestalten die restlichen Merkmale im Produktkontext aus. Innerhalb einer Baukastenarchitektur wird angestrebt, eine minimal nötige Anzahl an Baugruppen aufzubauen.

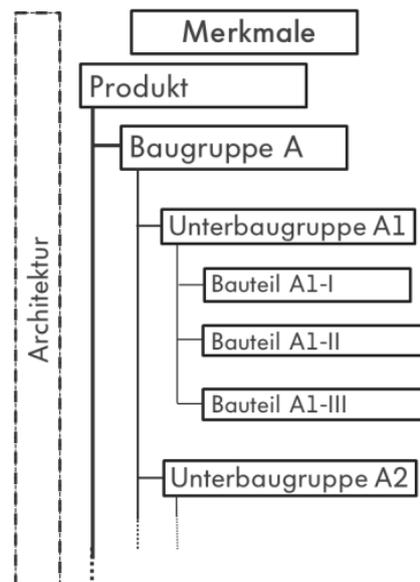


Abbildung 4-18 Architektur von Produktelementen im Fahrzeugkonzept

Wenn bestimmte Bauteile und deren Merkmale noch nicht bekannt sind oder aber ganze Baugruppen im Sinne eines Baukastens übernommen werden, so können die einzelnen entstehenden Fächer im Sinne einer vernetzten Black-Box (Topologie) bzw. eines Bauteil-Dummy (Package) für die Weiterentwicklung des Konzeptes betrachtet werden. Durch die Betrachtung des unbekanntes Feldes bei der Lösungssuche ist es möglich, abstrakte Ideen in die Gesamtbewertung einzubeziehen und zügig entsprechende Erkenntnisse daraus abzuleiten. Die Architektur kann weiter dem Aufbau einer Entwicklungsstückliste entsprechen und für spätere Vorbereitungen einer Stückliste in der Produktion (vgl. [HaW-2013], [KIF-2010] [KroM-2009] [SchK-2011]) zusätzlichen Nutzen stiften.

Zumeist wird dem Konzeptentwickler in den Entwicklungsvorgängen die Architektur (z.B. Diesel, Benzin, PHEV, HEV oder BEV bei der Antriebsart) vorgegeben (Abbildung 4-19). Vor dem Hintergrund von Flottenverbrauchszielen seitens des Gesetzgeber (Flottenverbrauch vgl. [EUK-2013], CO₂-Ziele Tabelle 3-3), kann die Auswahl der Fahrzeugarchitekturen im Baukasten entscheidend sein. Die optimale Strategie ist zum einen vom Marktvolumen (häufig abhängig vom Preis vgl. 2.2.1 *Betriebswirtschaftlich Produktlebenszyklus*) und zum anderen von technischen Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion abhängig. Unter Berücksichtigung des jeweiligen Marktsegmentes kann ein Full-Hybrid mit hoher Stückzahl einen größeren CO₂-Hebel haben als ein Plug-In Hybrid mit kleiner Stückzahl.

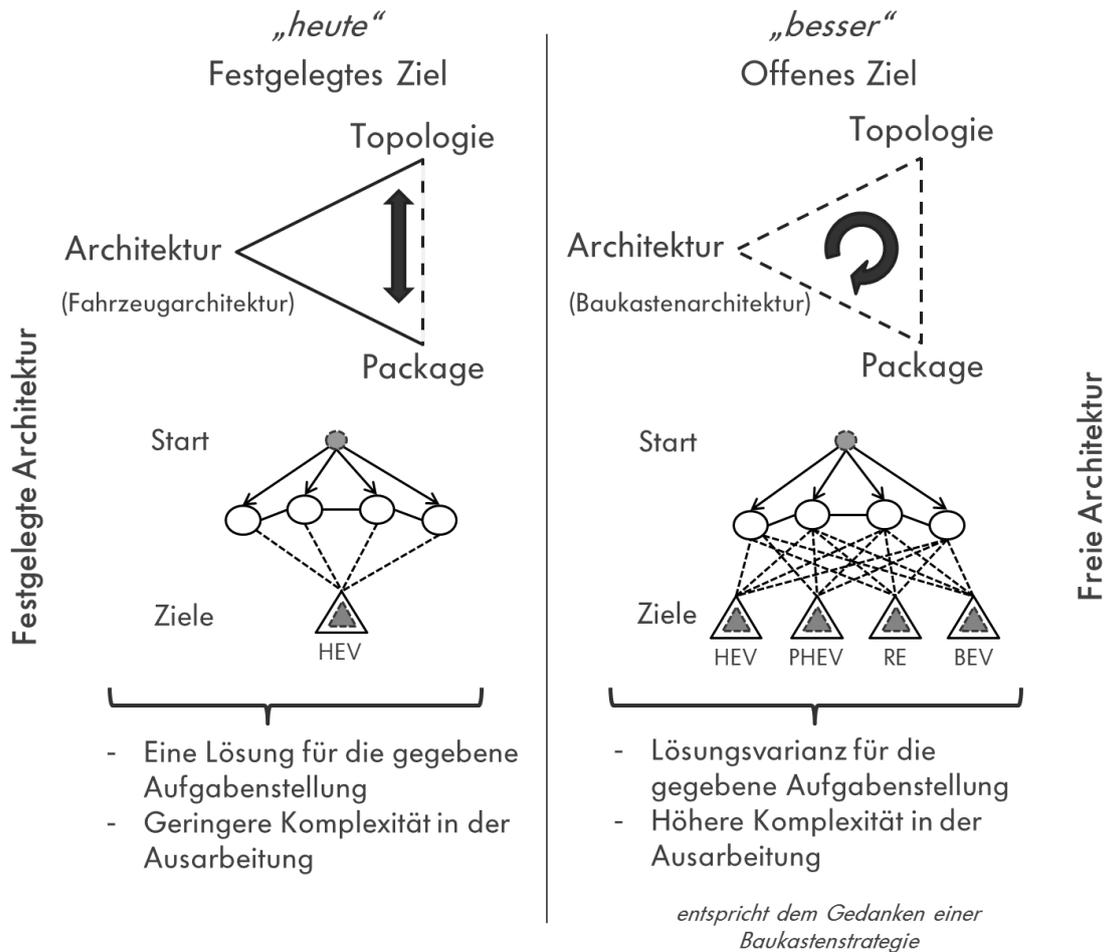


Abbildung 4-19 Stellschrauben für den Konzeptentwickler

Die Schätzung des Absatzes ist nur über eine Abschätzung des Produktpreises möglich. Dieser hängt in erster Linie von den Materialeinzelkosten, bei denen wiederum im Produkt vorgesehenen Elemente Berücksichtigung finden müssen, und den Produktgemeinkosten (z.B. Entwicklungs- und Produktionskosten) ab. Bei der Umsetzung einer Baukastenstrategie, bei der ein Entwickler verschiedene Freiheitsgrade insbesondere durch zusätzliche Antriebsarten berücksichtigen muss, sollten die Fahrzeugarchitekturen nicht von vornherein festgelegt sein (Abbildung 4-19). Die Fragestellung zu Beginn der Entwicklung lautet dann, mit welchen Fahrzeugarchitekturen die gestellten Anforderungen am besten erreicht werden können. Nur so kann der Baukasten optimal für die Anforderungen konzeptioniert und aus ihm heraus verschiedene zielführende Fahrzeugarchitekturen entwickelt werden.

4.4.1.2 Topologie

In Zeiten des System Engineering, der vernetzten Sichtweise der Entwicklung, gewinnt neben der Komponentenbetrachtung auch die übergreifende Funktionsbetrachtung innerhalb der Fahrzeugentwicklung an Bedeutung (Abbildung 4-20) (vgl. [VaBu-1998]).

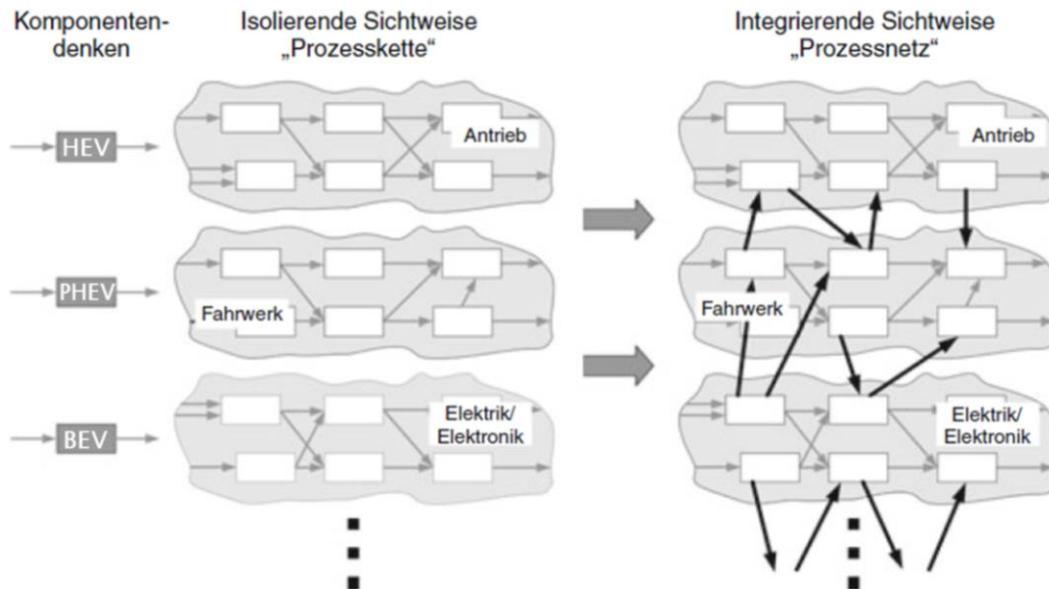


Abbildung 4-20 System Engineering in Anlehnung an [BrS-2013]

Die Topologie (Definition Abschnitt 4.4.1) stellt die Abhängigkeiten der Baugruppen der Architektur (Abschnitt 4.4.1.1) in sich sowie untereinander her und sorgt für die den Anforderungen entsprechenden Ausprägungen der Bauteile. Damit hat die Topologie z.B. über die konzeptionellen Bauräume einen Einfluss auf das Merkmal der Abmessungen der Produktelemente. Es wird weiter das Zusammenspiel der Baugruppen aus technischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet (integrierende Sichtweise (Abbildung 4-20)). Dabei spielt insbesondere die Dimensionierung der einzelnen Bauteile aufgrund der gegebenen Anforderungen verschiedener Fahrzeuge in einem Baukasten eine Rolle. Zusätzlich müssen Änderungen der Bauteile im Entwicklungsprozess, die daraus folgenden wechselseitigen Auswirkungen der Bauteile sowie auf die Fahrzeugeigenschaften Berücksichtigung finden.

In der Topologie werden verschiedene physikalische Aspekte des Fahrzeuges zusammengeführt. Zum Beispiel sind in Bezug auf das Bordnetz eines Kraftfahrzeuges die Module untereinander gekoppelt bzw. über Energieleitungen verzweigt. Neben dieser elektrischen Auslegung können auch mechanische, strömungsmechanische oder thermodynamische Sichtweisen hinsichtlich des Zusammenspiels der Bauteile herangezogen werden.

Bestandteil der Fahrzeugtopologie sind Bauteile, die an einem Stofffluss im Fahrzeug beteiligt sind (z.B. Kraftstoff oder Luft), die den Signal- bzw. Informationsfluss sicherstellen oder die einen Anteil am Energiefluss im Fahrzeug haben (z.B. Hochvolt- oder Niederspannungsenergie) (vgl. Abbildung 4-21). Demnach gehören alle Elemente des Antriebsstrangs und alle für den Kunden primär verfügbaren Sicherheits- und Zusatzeinrichtungen (z.B. Licht oder Klimaanlage/Heizung) dazu. Im Rahmen

der Topologie sind bzgl. der Ausprägung auch die Auslegung von Bauteilen mit einer statischen oder dynamischen Belastung (z.B. Teile des Rohbaus) sowie Verbindungselemente (Kabel, Schläuche etc.) zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu werden designspezifische Produktelemente ohne zusätzliche Funktionen im Fahrzeug nicht topologisch betrachtet. Das Zusammenspiel der Produktelemente und die Dimensionierung ihrer Merkmale (vgl. Abbildung 2-14) haben letztendlich Auswirkung auf die Fahrzeugeigenschaften.

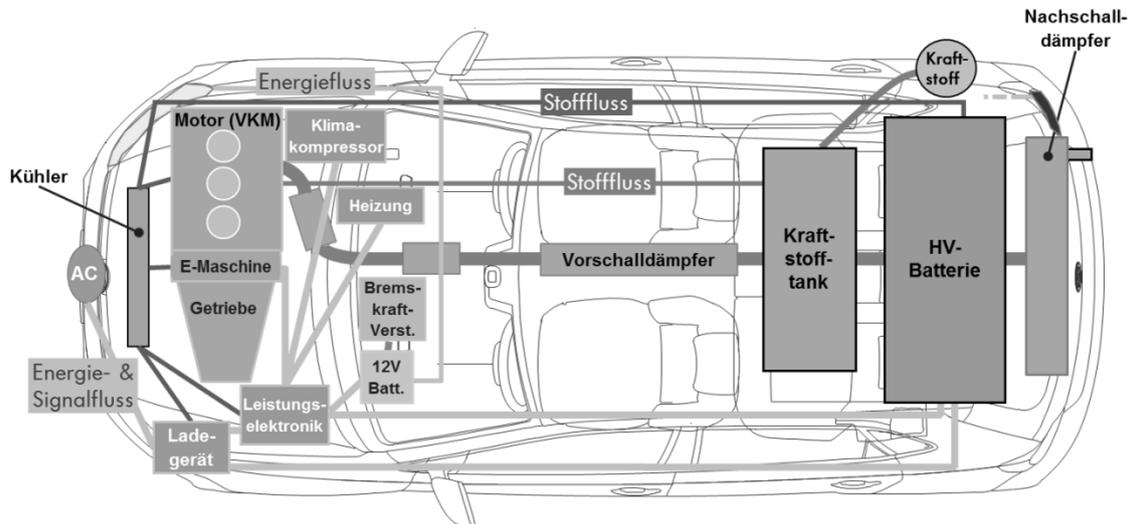


Abbildung 4-21 Schematischer Aufbau der Architektur eines Plug-In Hybriden mit wesentlichen Produktelementen für die Fahrzeug-Topologie

Ein vereinfachtes Beispiel für die topologische Auslegung ist die Dimensionierung der Elektromaschine bei einem Parallel-Hybrid unter der Annahme, dass die Anforderungen eine Leistung an der Antriebsachse von 60 kW ergeben. Die Architektur hält eine E-Maschine vor, die vom Package ins Fahrzeug passt. Um den entsprechenden Vortrieb leisten zu können, muss die E-Maschine konstruktiv entsprechend aufgebaut sein (vgl. 3.6.3 *Elektrischer Antrieb*) und die nötige elektrische Leistung aus der Traktionsbatterie bekommen (vgl. 3.6.2 *Elektrische Verschaltung*). Wenn aus technischen Gründen die Grenze der Leistung der Traktionsbatterie bei 20 kW liegt, besteht ein Missverhältnis zwischen dieser max. Leistung und einer spezifischen Leistungsfähigkeit der 60 kW E-Maschine. Das Beispiel bezieht sich auf ein singuläres Fahrzeugprojekt. Wenn in einem Baukasten eine E-Maschine für den Einsatz in unterschiedlichen Fahrzeugen entwickelt wird, müssen entsprechend unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften (z.B. Gewicht vgl. 3.2 *Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*) in Bezug zu den Anforderungen, die abhängig von Produktgruppen sind, berücksichtigt werden. Die Synthese zu einer baukastengeeigneten E-Maschine und Traktionsbatterie muss dementsprechend durch die topologische Auslegung der Fahrzeugkonzepte sichergestellt werden.

4.4.1.3 Package

Das Package (Definition Abschnitt 4.4.1) beschreibt die Anordnung der Baugruppen im Fahrzeug (Abbildung 4-22). Die Ausprägung der Bauteile ergibt sich in der nötigen Dimension, wie in Abschnitt 4.4.1.2 aufgezeigt, aus der Topologie. Damit werden im Fahrzeug-Package von den für die Konzept-

entwicklung in Abschnitt 4.3.2 aufgezeigten wesentlichen Merkmalen die räumliche Anordnung, die detaillierten Bauteil-Abmessungen und grobe, wie in Abschnitt 4.3.2 aufgezeigt, Bauteil-Geometrien konstruktiv umgesetzt. Im Package müssen unterschiedliche Varianten für ein Fahrzeug vorgehalten werden. Ein einfaches Beispiel ist der Vorhalt einer Grund- und einer Leistungsmotorisierung in einer Fahrzeugklasse mit entsprechender Karosseriebauform. Sollten die Bauteilmaße den verfügbaren Bau-raum überschreiten, muss entweder eine entsprechende Änderung der Anforderungen oder eine andere technische Konzeptlösungen (neue Fahrzeugarchitektur) geprüft werden.

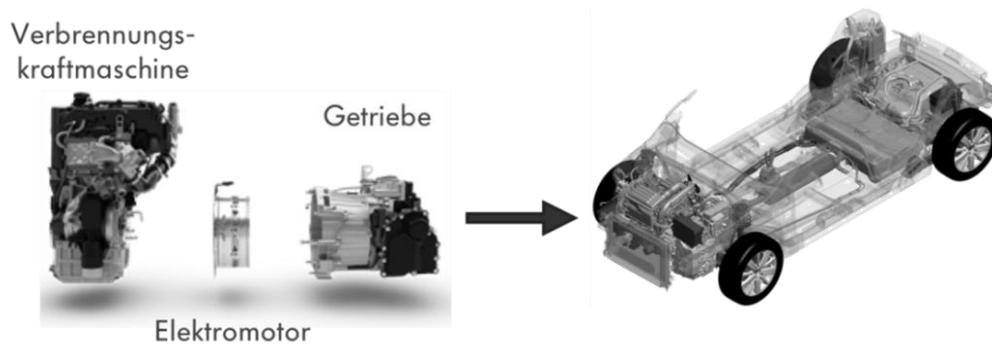


Abbildung 4-22 Package von Bauteilen im Fahrzeug

Die Anordnung der Bauteile im Fahrzeug erfolgt unter der Prämisse, dass zwei Bauteile in einem Raum nicht denselben Platz einnehmen können. Zu berücksichtigen ist auch der kollisionsfreie Einbau der Bauteile unter dynamischen Aspekten. Dies erfolgt z.B. durch die Berücksichtigung von Dynamikflächen als zusätzliche Bauteilhülle. Des Weiteren hat das Package durch die Positionierung der Bauteile Einfluss auf die Fahrzeugeigenschaften wie z.B. die Achslastverteilung. Diese Fahrzeugeigenschaften sind wiederum durch die Topologie hinsichtlich der Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug (z.B. Beschleunigung, Fahrverhalten, etc.) zu prüfen.

Über den Entwicklungsprozess hinaus müssen im Package auch Anforderungen wie z.B. die Zugänglichkeit für Montage und den Servicefall berücksichtigt werden [VWB-2009].

4.4.2 Anforderungen und Randbedingungen in der Konzeptentwicklung

Die Anforderungen und Randbedingungen ergeben sich aus dem Umfeld des Produktes (vgl. Abbildung 4-15). Bei elektrifizierten Fahrzeugen werden diese u.a. von den in Abbildung 4-23 genannten Interessensgruppen formuliert, welche ein direktes Interesse am Produkt haben. Die Anforderungen basieren auf sozialen, politischen, wirtschaftlichen, rechtlichen oder umweltbedingten Einflüssen. Sie können qualitativer (z.B. schnell fahren können) oder quantitativer ($v_{\max} = 180\text{km/h}$) Natur sein und werden dabei in der Regel durch mehreren Eigenschaften des Produktes erfüllt. Da die frühe Phase der Entwicklung im Automobilbereich mehrere Jahre vor dem SOP und dem Kundenbetrieb liegt, werden Anforderungen als Extrapolation vom aktuellen Kundennutzen aufgestellt (vgl. [FJG-2013]). Außerdem müssen die nichttechnischen Anforderungen (z.B. großzügiges Raumgefühl) qualitativ bestimmt und technisch übersetzt werden. Bei den Anforderungen und den damit verbundenen Eigenschaften ist zu differenzieren, welche den Produktkern (Abbildung 2-1) betreffen und somit erfüllt, bzw. welche

als Wünsche nicht unbedingt erfüllt werden müssen, aber z.B. überproportional zur Amortisation des Produktes beitragen können.

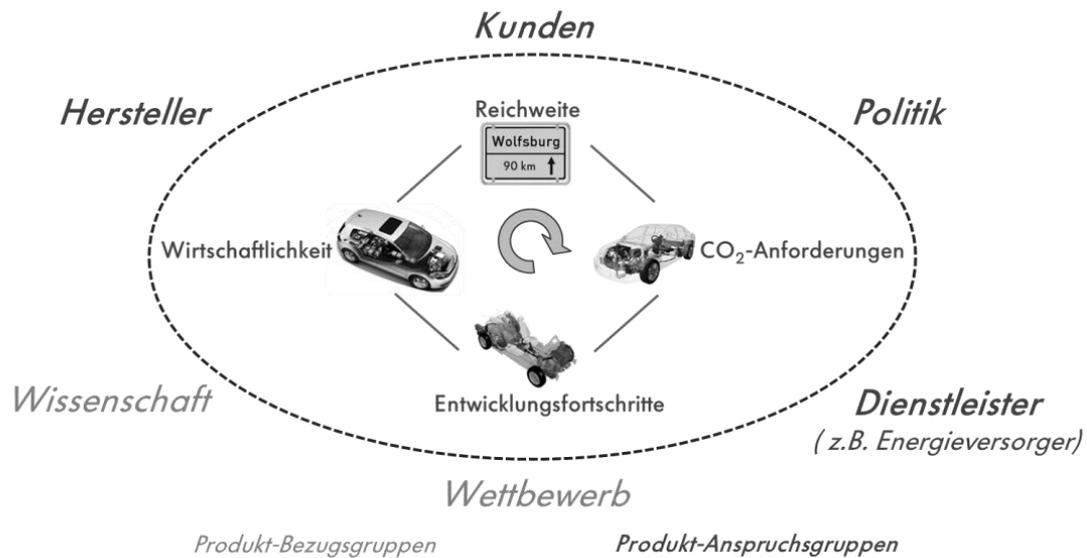


Abbildung 4-23 Interessensgruppen eines elektrifizierten Fahrzeuges in Anlehnung an [BuI-2013]

Anforderungen der Kunden als eine der Anspruchsgruppen können sich im Bereich der Elektromobilität aus der täglichen zurückzulegenden Fahrstrecke ergeben (Abbildung 4-23). In Deutschland würden demnach mit 50km elektrischer Reichweite in einem PHEV 70% der Kunden die tägliche Fahrstrecke bewältigen können (vgl. [BuI-2013]). Die elektrischen Reichweite der Fahrzeuge wird dabei in Europa in einem gesetzlich festgelegten Fahrzyklus ermittelt (vgl. 3.3 Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂-Reduktionsgründen). Staatliche Fahrzeuganforderungen sind z.B. bei einer LDT-Zulassung in den USA u.a. mindestens sieben Sitzplätze und ein ebener Ladeboden im Bereich der dritten Sitzreihe. Randbedingungen in der Automobilindustrie bzw. des Herstellers ergeben sich z.B. über die Produktionstechnik, das Produktionssystem oder über das Entwicklungs- und Erprobungsbudget.

Bezugsgruppen (Abbildung 4-23) haben aus Herstellersicht keinen direkten Anspruch an das Produkt, von ihnen gehen andere Randbedingungen aus, wie die Verfügbarkeit einer Technologie auf Basis von Grundlagenforschung oder Informationen durch mediale Ankündigungen (z.B. Ankündigung von neuen Produkten der Wettbewerber).

Auch bei einer Baukastenstrategie ist eine wie in Abbildung 4-24 dargestellte fahrzeugbezogene Betrachtung von Anforderungen und Randbedingungen möglich. Der Entwickler baut ein Element eines Baukastens auf, das jedoch in mehrere Fahrzeuge des Baukastens integriert werden soll. Er muss somit unterschiedliche Anforderungen von möglicherweise differenzierten Kundengruppen, unterschiedliche Randbedingungen sowie, bedingt durch das Zusammenspiel verschiedener Baugruppen, inhomogene Zwangsbedingungen bei der Auslegung berücksichtigen. Durch den Aufbau und die Kombination von Modulen und Komponenten entstehen Zwangsbedingungen, die bestimmte Lösungen im Lösungsraum ausschließen (eher „innere Zwangsbedingungen“ [VWB-2009]) und sich z.B. durch Baubarkeitsregeln ergeben [EiS-2009] [WanH-2010].

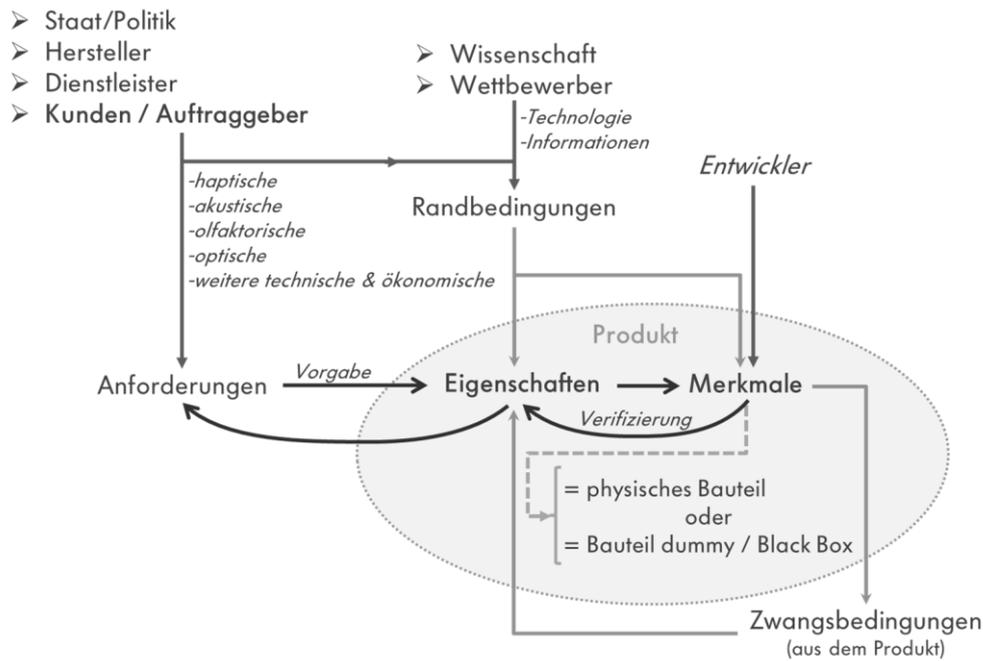


Abbildung 4-24 Zusammenhang von Produktmerkmalen und -Eigenschaften

Insbesondere die Anforderungen der Kunden sind für große Unternehmen schwer einzuschätzen, da sie das Produkt meist nicht direkt an den Kunden, sondern über einen Vertriebspartner vertreiben (Abbildung 4-25) (vgl. 2.2.2 *Technischer Produktlebenszyklus* mit B2B/ B2C/ B2A). Noch komplizierter wird es, wenn der Kunde nicht der Nutzer des Fahrzeuges ist, was z.B. beim Carsharing der Fall ist, wobei insbesondere Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen (z.B. Volkswagen Quicar oder Flinkster der DB AG). Es ist also eine Herausforderung, Kundenanforderungen in das Produkt zu integrieren, was besonders in der frühen Phase der Entwicklung zu den schon genannten Änderungen der Anforderungen („running targets“) führen kann. Grundsätzlich ist der Kundenanspruch bzw. dessen Erwartung an das Produkt, dass die Eigenschaften dem Stand der Technik oder des Wettbewerbs entsprechen und, wie z.B. im Bereich der Unterhaltungselektronik sehr gut zu sehen, idealerweise darüber hinausgehen (vgl. Qualität und Innovationen in Abschnitt 4.2.2).

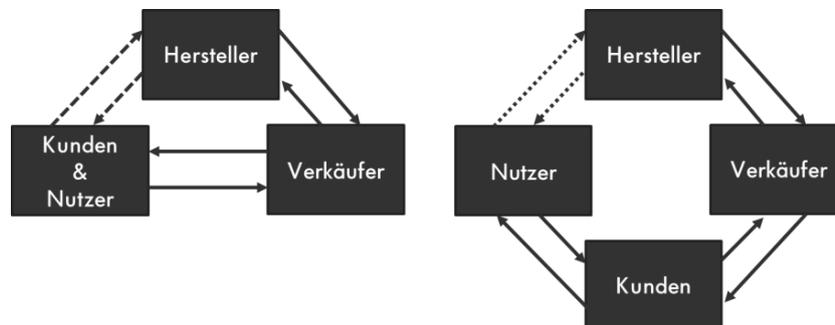


Abbildung 4-25 Herausforderung der Integration der Kundenanforderungen [BuIn-2013]

Zusammengefasst: Anforderungen, Rand- und Zwangsbedingungen beschreiben den Lösungsraum für das potentielle Produkt. Aus einer bestimmten konstruktiven Lösung ergibt sich innerhalb oder außerhalb des Lösungsraumes ein Produkt mit spezifischen Eigenschaften, die gegenüber den Anforderungen zu verifizieren sind (Abbildung 4-24). Eine Kombination von Baugruppen im Lösungsraum stellt

eine Lösung dar, von denen es mehrere gleichberechtigte geben kann. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Architektur (Abbildung 4-19) frei gewählt werden kann. Der Lösungsraum als solches ist beliebig erweiterbar. Es können neben den bisher erwähnten elektrifizierten Fahrzeugen auch die Brennstoffzelle, konventionelle Antriebsarten oder alternative Kraftstoffe berücksichtigt werden.

4.5 Fahrzeugmodelle in der Konzeptentwicklung

In der Fahrzeugentwicklung sind technische Modelle für die geometrische Konstruktion oder als Sammlung von Daten (z.B. Stückliste) gängige Anwendungen. Ein Modell für die Konzeptentwicklung unterliegt aufgrund der in der frühen Phase unvollständigen Datenbasis besonderen Anforderungen. Angesichts der noch hohen Varianz an Möglichkeiten bietet das Modell dennoch eine Unterstützung für den Konzeptentwickler. Insbesondere der größere Lösungsraum bei freien Architekturen (Abbildung 4-19) erfordert eine systematische Unterstützung des Konzeptentwicklers. Dabei bedarf es eines Modells zur Topologie- und Package-Optimierung im Sinne einer Erkennung der Varianz oder der Vereinheitlichung der Baukastensystematik. Die Detailoptimierung von Bauteilen und die algorithmische Simulationen, die auf Basis der ersten Konzeptmodelle bzw. des virtuellen Prototypens entstehen, sind Teil der Serienentwicklung (vgl. Abschnitt 4.1).

4.5.1 Bedeutung von technischen Modellen in der Entwicklung

Wie in Abbildung 4-13 dargestellt, ist heute durch computervisualisierte Entwicklungsmethoden der virtuelle Prototyp das Ergebnis der Entwicklungsschleifen in der Konzeptentwicklung. Erst im Anschluss werden Prototypen bzw. Versuchsträger aufgebaut. Dies spart Kosten für deren Aufbau, verursacht aber einen hohen Anspruch an wirklichkeitsnahe Ergebnisse der Simulationen. Auch in der Serienentwicklung wird versucht, einen immer größer werdenden Teil der Erprobung und Auslegung durch Simulationen sicherzustellen (vgl. insbesondere [SHB-2010] oder auch [BeBu-2007]). Dieser Trend, die Entwicklung des Produktes zunächst in einem virtuellen technischen Modell darzustellen, entspricht sowohl einem Erklärungs- als auch einem prognostischen Interesse. Beim Aufbau eines Modells ist sowohl ein induktives als auch ein deduktives Vorgehen möglich²⁶. Auf Basis der Daten der Vergangenheit wird das Modell aufgebaut und mit seiner Hilfe werden zukünftige Lösungen überprüft. Die angewendeten Modelle und Analysen in der Produktentwicklung sind zumeist prospektiv ausgelegt.

Modelle jeglicher Art sind im Entwicklungsprozess insbesondere von der Datenbasis, aus der die Ergebnisse erhoben werden, abhängig. Die Herausforderung für die Entwicklung von Modellen besteht darin, zukünftige technologische, rechtliche und auch gesellschaftliche Einflüsse richtig zu deuten. Die Prognosezeit der ersten konzeptionellen Modelle eines Automobils beträgt dabei mehr als zwei Jahre (vgl. Abbildung 2-5).

²⁶ Induktion versteht sich methodisch als Schlussfolgern vom Einzelfall auf das Allgemeine oder Gesetzmäßige. Deduktion ist das Gegenteil, also das Ableiten des Besonderen aus dem Allgemeinen [HSE-2010].

Ohne die Nutzung technischer Modelle und entsprechender computervisualisierter Entwicklungsmethoden wären die heutigen vergleichsweise schnellen Entwicklungszeiten der Produkte und die damit möglichen Produktaufwertungen bzw. Neuerungen nicht umsetzbar. Bei der Weiterentwicklung der Modelle (z.B. in Bezug auf neue Produktstrategien wie die Baukastenstrategie) müssen entsprechende Entwicklungsprozesse sowie eine einheitliche Datenbasis in der gesamten Entwicklung sichergestellt werden. Darüber hinaus müssen Entscheidungen bzw. Veränderungen am Produkt, die Auswirkungen auf dessen Eigenschaften haben, transparent gemacht werden.

Die in der Industrie zur Erstellung von Modellen herangezogene Software ist vielschichtig. Je nach Entwicklungsziel und Wissenschaftszweig werden unterschiedliche Tools zur Unterstützung herangezogen. Dies beginnt z.B. mit der Erweiterung der CAx-Software (vgl. u.a. [VaP-1998]) und endet bei dem Aufbau parametrischer Modelle und deren Simulation (vgl. [VWB-2009]). Die Modelle zielen darauf ab, Realitätsnähe herzustellen. Dabei wird der Bezug zur Wirklichkeit bzw. die Annäherung daran oftmals als Qualitätskriterium gesehen. Die mit dem virtuellen Modell erzielten Ergebnisse sowie deren Aussagekraft hinsichtlich ihres Wirklichkeitsbezugs sind von der zur Verfügung stehenden Datenbasis abhängig, welche sich in ihrem Umfang letztendlich auf die Rechenzeit auswirkt. Als Datenbasis dienen die bekannten Produktmerkmale und die damit verbundenen Eigenschaften (vgl. Abbildung 2-13). Andernfalls können die Datenbasis und die Kenntnisse über Produktmerkmale, deren Eigenschaften und das Zusammenspiel im Produkt nicht vollständig beschrieben werden (Abbildung 4-26).

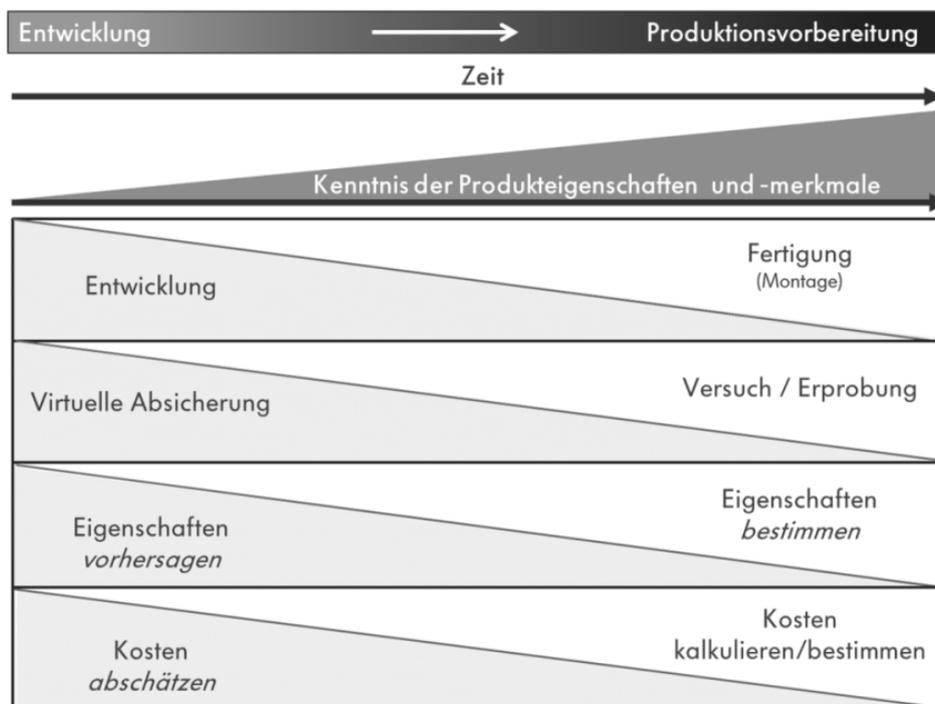


Abbildung 4-26 Kenntnis und Herkunft der Produkteigenschaften im Entwicklungsprozess

Das Produkt setzt sich, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, aus Produktelementen (Baugruppen, Systembaugruppen, Unterbaugruppen und Bauteilen) zusammen. Bei einem hohen Maß der Übernahme von Bauteilen bzw. Bauteilgruppen aus einem Vorgängerprodukt ist die Bestimmung der Eigenschaf-

ten in der frühen Phase der Entwicklung einfacher als bei einer vollständigen Neukonstruktion. Die in Abbildung 4-26 aufgezeigte Entwicklung der Kenntnisse von Eigenschaften und deren Herkunft (Berechnungs- oder Erprobungsergebnis) verläuft nicht wie dargestellt linear, sondern in der beschriebenen Abhängigkeit unterschiedlich über diesen Zeitraum.

Das technische Modell bildet das Produkt in einem bestimmten Detailierungsgrad ab, welcher sich, abhängig vom Entwicklungszeitpunkt, aus einer entsprechenden Anzahl von verfügbaren Elementen ergibt. Dabei werden Daten der 3D-Modellierung mit Daten weiterer Entwicklungsbereiche (z.B. elektrotechnische Auslegung mit Strombedarf 12V Bordnetz oder elektrische Energie der Traktionsbatterie, etc.) verknüpft. Um z.B. die kundenrelevanten Eigenschaften der eingebrachten Bauteile des Modells bestimmen zu können, ist eine Abbildung der Umwelt, in der sich das Produkt bewegt, nötig was in der frühen Phase nur zum Teil möglich ist (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Bei der Entwicklung in der frühen Phase ist es somit wichtig, das Fahrzeugsystem und damit die Systemgrenzen für das Modell zu bestimmen. Die Systemgrenzen sind die Grenzen der Modellsimulation nach außen. Innerhalb bestehen mögliche Zwangsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.4.2) als Grenzen im Lösungsraum. Die Auswahl der Systemgrenzen richtet sich nach der Zielsetzung und unternehmensspezifischen Anforderungen (von GRUNWALD umschrieben als Beschreibung des Gegenstandsbereiches hinsichtlich des Erkenntniszweck und –Interesse [GrA-2000]) und ist abhängig vom Produkt sowie von Fall zu Fall unterschiedlich.

Um ein Modell als nichtphysisches Produkt (fiktiv) im Konzeptentwicklungsprozess für einen Baukasten nutzen zu können, sind vier Schritte mit entsprechenden Bedingungen nötig:

1. Definition des Modells auf Basis erster Anforderungen, anhand ausgewählter Bauteile und deren Merkmale.

Bedingung: Das Modell ist flexibel hinsichtlich der Gliederungsebenen (von der Baugruppen bis zum Bauteil) und berücksichtigt funktionale sowie geometrische Aspekte des Produkts.

2. Definition des Systems, in dem das Modell eingebracht wird, und Bestimmung der Systemgrenzen (Anfangs- und Randbedingungen).

Bedingung: In einem Baukasten sind die geforderten Produktziele, Märkte, Anspruchs- u. Bezugsgruppen (u.a. Marken, Kunden/Nutzer) etc. bekannt.

3. Die Austauschbarkeit von Baugruppen mit den daraus resultierenden Auswirkungen auf das Produktverhalten wird ermöglicht.

Bedingung: Es können mehrere Baugruppen als gleichwertig betrachtet werden (z.B. eine E-Maschine im BEV und eine VKM im konventionellen Fahrzeug).

4. Entscheidung über die Methode zur Modellierung von Modell und System, wovon insbesondere die Qualität der Resultate abhängig ist.

Bedingung: Es kann z.B. die Fertigungstiefe berücksichtigt werden (Baugruppe ist ein Kaufteil).

4.5.2 Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung

Ein Modell besteht aus Produktelementen und deren Merkmalen, welche einem Eigenschaftsnetzwerk gegenüber stehen. Die Eigenschaften ergeben sich aus Produktelementen bzw. deren Merkmalen, die vom Entwickler in das Modell eingebracht werden (Abschnitte 2.3 *Das Produktgefüge* und 4.4.1 *Strukturierung eines Konzeptes*). Aufbauend auf dem Ansatz der Produktmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften (2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften*) wird eine hierarchische Gliederung von Bauteilen in Form von Baugruppen etc. (2.3 *Das Produktgefüge*) vorgenommen.

Da, wie Abschnitt 4.4.1.1 erläutert, verschiedene Fahrzeugarchitekturen in einem Baukasten enthalten sind und die Menge an Bauteilen und damit Merkmalen in einem technisch komplexen Produkt, wie einem Kraftfahrzeug, sehr hoch ist, muss dies in einem übergeordneten Aufbau dargestellt werden. Durch die Einteilung der Produkte in Segmente als Teilbereich eines größeren Ganzen [Duden-2014] und Segmentgruppen ist dies möglich. Die Unterteilung der Baugruppen erfolgt gemäß ihrer technischen Spezifikation in Segmente und entsprechend eines speziellen Charakteristikums innerhalb der Segmente in Segmentgruppen. Dabei ist in einer beliebigen Fahrzeugarchitektur mindestens eine Baugruppe aus jeder Segmentgruppe vertreten. In Bezug auf ein singuläres Produkt kann durch Segmente und Segmentgruppen die Fahrzeugarchitektur globaler dargestellt werden (Abbildung 4-27). Dieser Aufwand würde bei einem singulären Fahrzeugprojekt jedoch keinen Nutzen stiften.

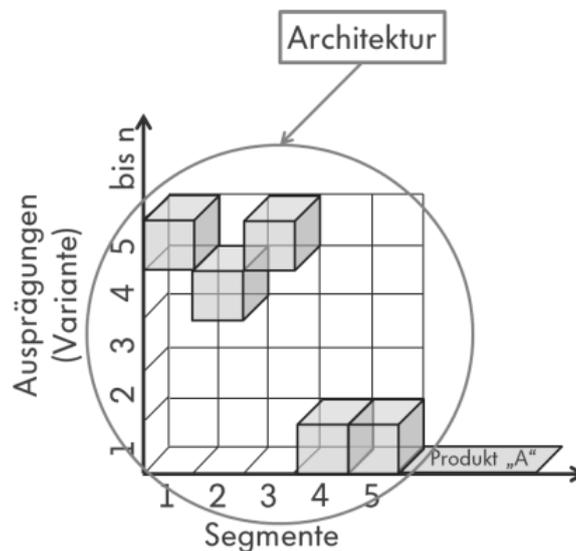


Abbildung 4-27 Darstellung der Fahrzeugarchitektur durch Segmente

Der Nutzen ergibt sich erst, wenn wie in einem Baukasten verschiedenen Fahrzeugarchitekturen vorhanden sind. Innerhalb der Segmentgruppen können dann die unterschiedlichen Baugruppen vorgehalten und abgestimmt werden. Als Beispiel wird in „Produkt A“ und „Produkt B“ das Segment 1 in gleicher Ausprägung genutzt. Die anderen vier Segmente unterscheiden sich jedoch durch das Variieren von mindestens einer Baugruppe innerhalb einer der Segmentgruppen. Die Anzahl an Baugruppen ermöglicht die Varianz der Produkte innerhalb der Baukastenarchitektur (Abbildung 4-28). Ziel ist es

jedoch, die an den Baukasten gestellten Anforderungen mit so wenig wie möglichen Baugruppen zu erreichen (vgl. Abschnitt 4.4.1.1).

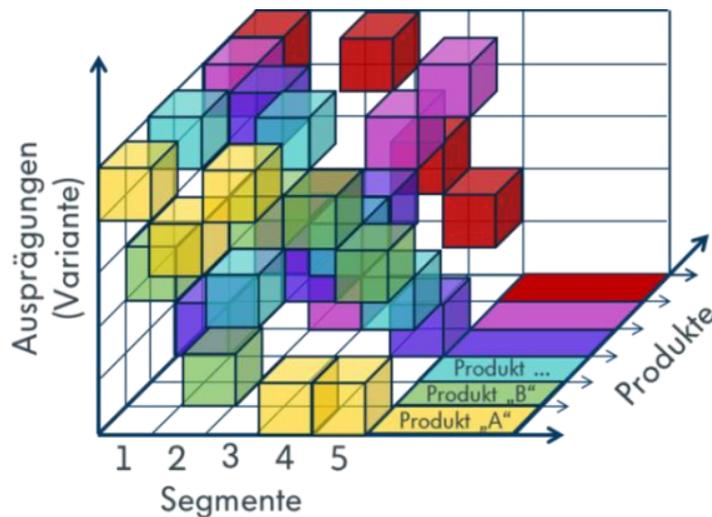


Abbildung 4-28 Betrachtung mehrerer Produkte als Baukastenarchitektur

Ein weiterer Vorteil der Unterteilung in Segmente liegt darin, dass eine Innovation (Prozess- oder Produktinnovation, vgl. Abbildung 2-4) in realen wirtschaftlichen Prozessen innerhalb eines Segmentes oder einer Segmentgruppe erfolgt. Die Auswirkung der Änderungen einer Baugruppe auf Fahrzeugigenschaften lässt sich entsprechend des „ceteris paribus“-Gedankens vereinfacht darstellen.

Die in Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 gezeigten Segmente eines Kraftfahrzeuges sind:

1. Antrieb und Energiespeicher
2. Fahrwerk
3. Elektronische und mechatronische Systeme der Bodenbaugruppe
4. Fahrzeugkarosserie (mit Aufbau, Bodengruppe und Rohbau)
5. Maßkonzept und Ergonomie (Bauräume)

Eine Unterteilung in Segmente und Segmentgruppen unterstützt die Übersichtlichkeit des Produktes und vereinfacht es, Konzepte an spezifischen Punkten zu ändern oder eine Synthese über mehrere Produkte hinweg herbeizuführen (z.B. Innovationen vgl. Abschnitt 4.2.2). Eine vereinfachte Darstellung der Baukastenarchitektur hilft zusätzlich, Entwicklern ein genaueres Verständnis der Abhängigkeiten innerhalb des Produktes bzw. darüber hinaus im Baukasten zu geben.

Um eine Architektur z.B. eines PHEV mit der eines HEV vergleichen zu können, werden unterschiedliche Produkte nebeneinander gestellt (Abbildung 4-28). Diese Betrachtungsweise ist z.B. für die CO₂-Belastung (Tabelle 3-3) innerhalb einer Produktgruppe oder über die gesamte Fahrzeugflotte anzuwenden.

Die Aufschlüsselung der Segmentgruppen und die Zuordnung zu den Baugruppen erfolgt, aufgrund der Übersichtlichkeit der Darstellung, nach funktionalen Gesichtspunkten (Abbildung 4-29). Es wäre auch eine geometrische Orientierung denkbar, was eine andere Strukturierung der Segmente erforder-

lich machen würde (z.B. kompletter Motorraum, komplette Fahrgastzelle, etc.). Diese Betrachtung würde dann aber nicht im Einklang mit der Organisationsstruktur stehen, wie diese in Abschnitt 4.2 eingeführt wurde.

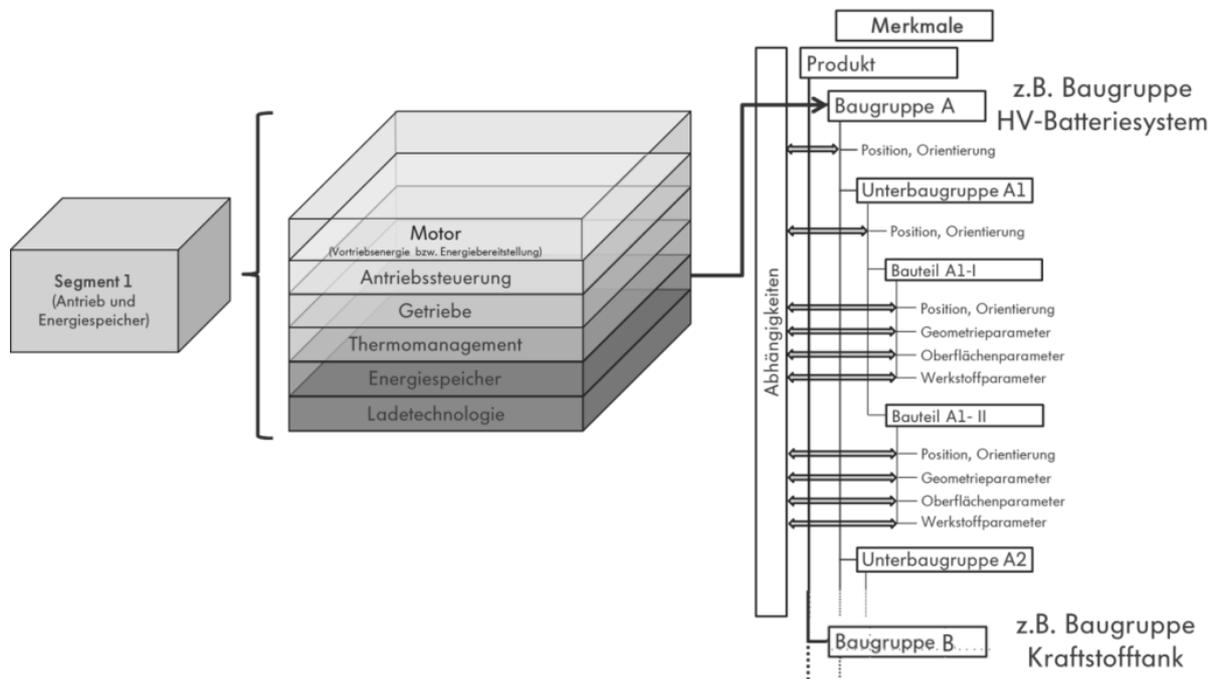


Abbildung 4-29 Baugruppen der Segmentgruppe Energiespeicher

Diese Gesamtbetrachtung des Baukastens und der dort vorgesehenen Fahrzeuge ist insofern wichtig, da Änderungen insbesondere in den Schnittstellen zwischen Baugruppen entstehen, die von unterschiedlichen Parteien, möglicherweise nur auf ein Produkt bezogen, entwickelt werden. Die Konzeptentwicklung muss dies aus der Baukastensicht übergreifend betrachten, um Fehlerquellen auszuschließen oder zu reduzieren und um die Kompatibilität von Baugruppen sicherstellen zu können.

Die Unterteilung über die Unterbaugruppen bis zum Bauteil ist in Abbildung 4-30 zu sehen. Die technische Aufschlüsselung wird im Kapitel 5 *Abhängigkeiten in der elektrifizierten Fahrzeugauslegung* in Vernetzungsdiagrammen erfolgen.

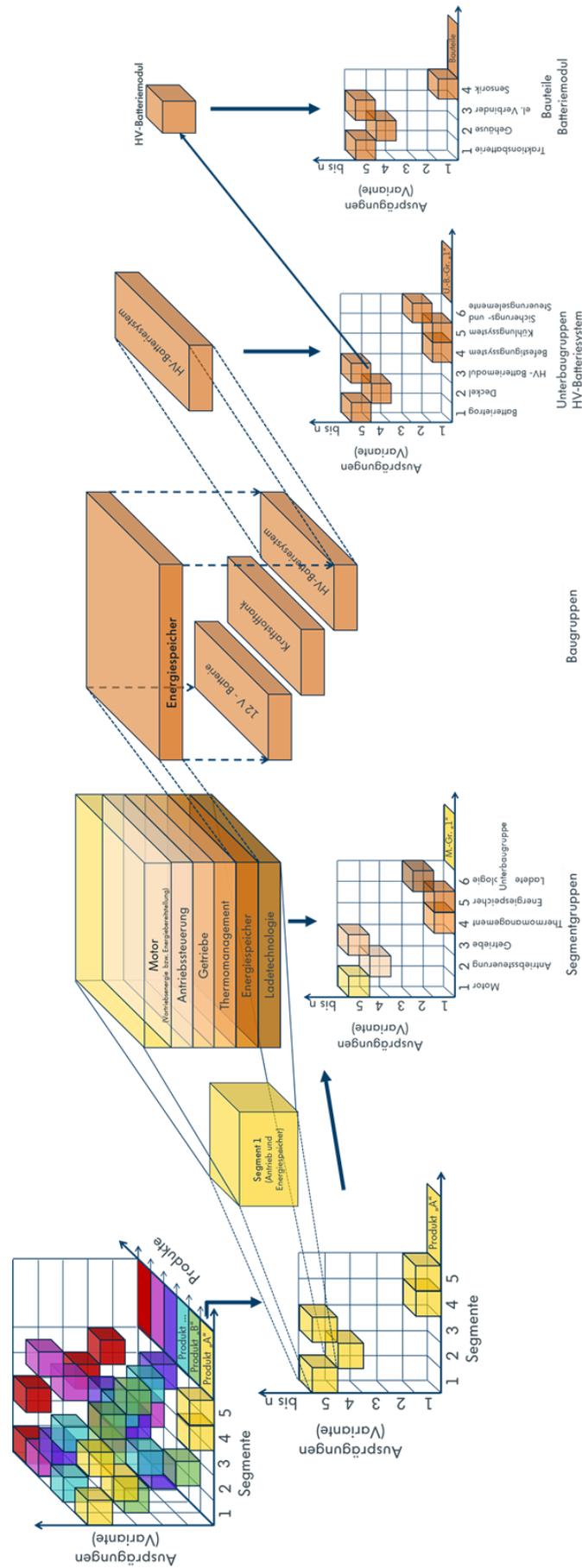


Abbildung 4-30 Aufbau eines Fahrzeugübersichtsmodells in der Konzeptentwicklung

Die Fahrzeugarchitektur wird über die Gliederung der Segmente bzw. Segmentgruppen dargestellt (Abbildung 4-27). Die Baugruppen werden durch die Unterbaugruppen bis hin zum Bauteil durch die Topologie (Abschnitt 4.4.1.2) und das Package (Abschnitt 4.4.1.3) bestimmt.

Jede Baukasten-Ebene kann in beliebiger Tiefe (Segmentgruppe, Baugruppe, Unterbaugruppe oder Bauteil) durch eine Black-Box bzw. durch einen oder mehrere Bauteil-Dummies ersetzt werden (vgl. Abschnitt 4.4.1.1). Der Einsatz einer Black-Box ermöglicht eine abstrakte Darstellung von Bauteilen sowie die unvoreingenommene Suche, z.B. mit unkonventionellen Ideen [LiR-2007] [MBL-1995]. Des Weiteren können Randparameter des Antriebsstranges als auch des Energiespeichers eines Wettbewerbers im Zusammenspiel mit den Segmenten des eigenen Fahrzeuges verglichen werden, um z.B. unter den cw- und Gewichtswerten des eigenen Produktes einen Vergleich der Reichweiten vornehmen zu können. Damit eine Black-Box eingesetzt werden kann, muss bekannt sein, welcher Input gebraucht wird und welche Eigenschaften durch die Bauteile und ihre Merkmale angesprochen werden. Im Vordergrund stehen daher der Informations-, Energie- und Stofffluss des jeweiligen Produktelements bzw. zusammengefasst von einer Merkmalgruppe und der damit verbundene wechselseitige Einfluss (Abbildung 4-31).

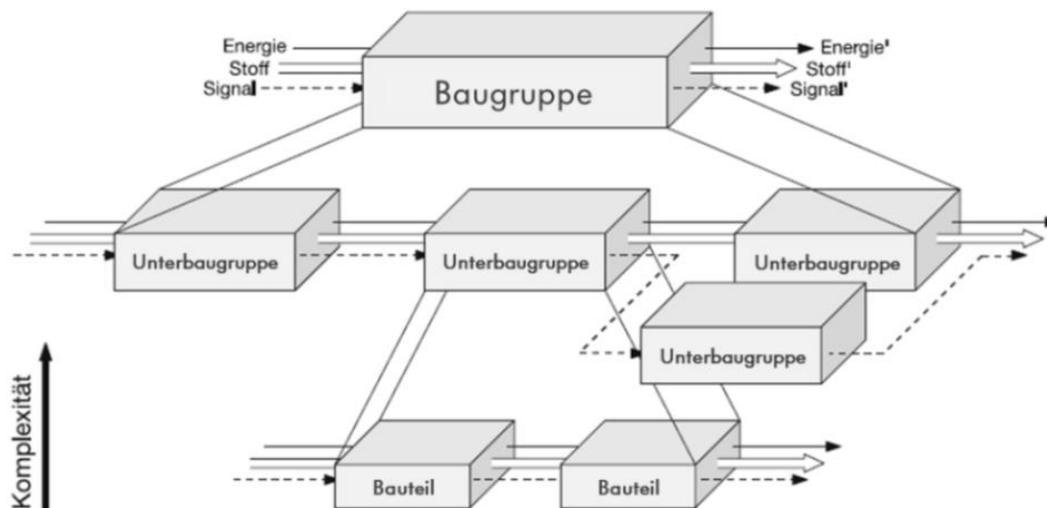


Abbildung 4-31 Systematik von Baugruppe bis Bauteil in Anlehnung an [PBF-2007]

Primäres Ziel dieses Modellaufbaus ist es, durch Analyse und Synthese das Produkt entsprechend der Anforderungen (Eigenschaften) zu optimieren und dabei Auswirkungen der Entwicklung über das gesamte Fahrzeugkonzept aufzuzeigen.

Neben der technischen Analyse besteht bei dem Vorgehen die Möglichkeit, eine finanzielle Bewertung des einzelnen Produktes sowie einen Produktvergleich zu ermöglichen. Nach dem Ansatz der *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften* (Abschnitt 2.4.3.2) sind die Kosten Teil der Eigenschaften, da der Entwickler diese nicht direkt (das kann höchstens die Beschaffung des Unternehmens durch Verhandlungen), sondern nur durch die Merkmale beeinflussen kann. Eine differenzierte Aufschlüsselung der Kosten in Material- und Gemeinkosten lässt jedoch eine bessere Zuordnung zum Produkt zu (Abbildung 4-32).

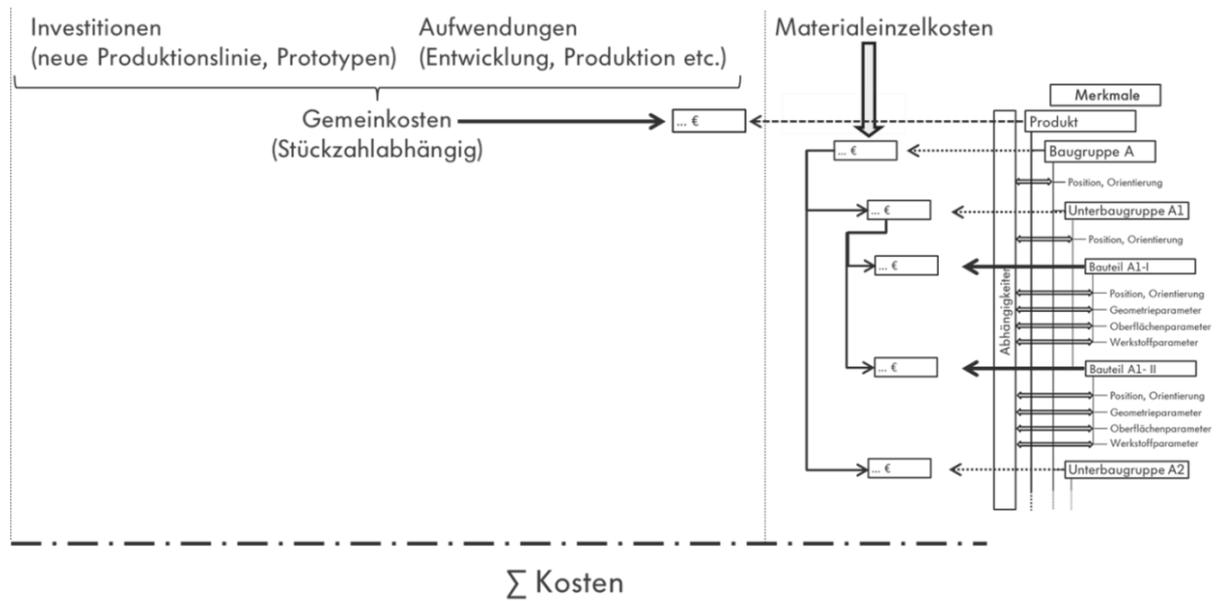


Abbildung 4-32 Auf das Produkt bezogene Material- und Gemeinkosten

Jedes Bauteil verursacht Materialeinzelkosten, die mit den Gemeinkosten aufsummiert die Materialgesamtkosten ergeben. Beim Zukauf von Teilen (Kaufteil in 2.2.2 *Technischer Produktlebenszyklus* und 4.2 *Der Entwicklungsprozess komplexer Produkte in großen Unternehmen*) ergeben sich die Gesamtkosten aus einer ganzen Bau- oder Unterbaugruppe.

Die Gemeinkosten ergeben sich aus möglichen Investitionen sowie den Entwicklungs- und Produktionsaufwendungen. Sie beziehen sich auf die abgesetzte Menge des Endprodukts. Damit sind Gemeinkosten und Investitionen vor allem vom betriebswirtschaftlichen Produktlebenszyklus abhängig (Abbildung 2-7).

Es kann somit der Fall sein, dass eine Baugruppe mit geringen Materialeinzelkosten, aber hohen Gemeinkosten, aufgrund einer niedrigen Stückzahl weniger profitabel ist, als eine Baugruppe mit höheren Materialeinzelkosten und z.B. geringeren Entwicklungskosten. Insbesondere bei Produkten mit einem erwarteten geringen Absatz ist diese Betrachtung notwendig und dementsprechend die weitere Aufschlüsselung der Kosten.

Neben den Kosten sind auch die zu erzielenden Erträge Eigenschaften. Wenn durch eine Merkmalauswahl bestimmte Eigenschaften bzw. Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.4.2) erfüllt werden, ist eine entsprechende Zahlungsbereitschaft der Kunden zu erwarten (Abbildung 4-33). Zum Beispiel ist der Kunde bereit, für ein hochmotorisiertes Fahrzeug mehr zu zahlen als für eines mit geringeren Antriebsleistungen. Stimmen viele Eigenschaften mit den Erwartungen einer Kundengruppe überein, ist ein entsprechendes Marktvolumen zu erwarten (Abbildung 2-7). Darüber hinaus können beim Erfüllen bestimmter Eigenschaften staatliche Subventionen für das Unternehmen oder den Kunden in Anspruch genommen werden. Welche Eigenschaften die Preisfindung des Vertriebs unterstützen, ist unternehmensabhängig und je Produkt individuell zu definieren. Durch die Erträge müssen sich die Kosten einer Technologie (2.2.2 *Technischer Produktlebenszyklus*) und über den Absatz (2.2.1 *Betriebswirt-*

schaftlich Produktlebenszyklus) vor allem Gemeinkosten (Entwicklungs- und Produktionsgemeinkosten) amortisieren. Technologien mit ungenügendem Marktpotential sollten nicht umgesetzt werden.



Abbildung 4-33 Erträge entsprechend der Fahrzeugeigenschaften

4.5.3 Produktvarianz

Die Untersuchung der Produktvarianz kann erfolgen, wenn in einem bestehenden Produktportfolio ein oder mehrere Baukästen aufgebaut werden oder wenn innerhalb von Baukästen eine Variantenreduktion erfolgen soll.

Die Vielfalt eines Baukastens wird in der Automobilindustrie durch zusätzliche vordefinierte Varianten, im Sinne von Ausstattungsmöglichkeiten innerhalb einer Produktgruppe, erhöht. Diese Varianz bezieht sich nicht nur auf technisch nötige Baukasten-Module (z.B. Kraftstofftank oder Wischwasserbehälter), sondern insbesondere auf die zur Individualisierung vorgehaltenen hutspezifischen Komponenten (z.B. beim Fahrersitzes neben den Aufbauformen Normal, Komfort oder Sport auch eine jeweilige Farb- und Materialkombination). Bei der Betrachtung eines Baukastens sind Bauräume für ein Modul oder mehrere Module und deren Ausprägungen im Sinne von Abmessungen zu berücksichtigen bzw. ist eine Vereinheitlichung in den Produkten wünschenswert. Varianten in der Ausstattung sind auf persönliche Vorlieben des Kunden ausgerichtet und sollen individuelle Bedürfnisse erfüllen bzw. das Gefühl der Einzigartigkeit des Produktes vermittelt. Diese Anforderungen gehen als spezifische Kundenanforderungen in die Entwicklung ein (Abbildung 4-23). Darüber hinaus ergeben sich technische Varianten aus länderspezifischer Anforderungen, z.B. Ladeleistung und -stecker (3.6.4 *Elektrisches Laden* ff.), elektrische Reichweiten durch die jeweiligen Normzyklen (3.3 *Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsgründen*) oder Sicherheitsaspekte (3.4.1 *Gesetzgebung und Testverfah-*

In der Konzeptentwicklung ist daher die Eignung bestimmter Produktelemente eines Baukastens bzw. deren Bauräume zwischen unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen (Abbildung 4-16) zu prüfen oder die Eignung herzustellen. Um Ähnlichkeiten²⁷ zu analysieren, sind z.B. bei einer hohen Varianz an Teilen in der Industrie die Ordnung durch Sachmerkmalleisten²⁸ (DIN 4000) bekannt, in der eine Ähnlichkeitsbeziehung zwischen den zu prüfenden Teilen hergestellt wird. Die Elemente werden funktional sowie geometrisch klassifiziert [EiS-2009]. Für einen Baukasten und eine globale konzeptionelle Betrachtung ist eine Ähnlichkeitsanalyse mit nicht so kleinteiligem Vorgehen sinnvoll.

Bei elektrifizierten Fahrzeugen ist die Traktionsbatterie ein beispielhaftes Bauteil, welches in allen Produktgruppen verbaut wird. Das Ziel der Ähnlichkeitsanalyse ist es, das Variantenspektrum zu bereinigen und damit Lager- sowie Steuerungskosten zu verhindern bzw. den Entwicklungsaufwand zu verringern (Beispiel in Kapitel 6 *Anwendung und Umsetzung des Eigenschaftsnetzwerkes*). Neben der Analyse der konzeptionellen technischen Auslegung sind weitere Analysen, z.B. hinsichtlich der Produktarchitektur selber, der Montage oder der Analyse des gebundenen Kapitals und der Lagerkosten möglich [ZaM-2006].

Die Ähnlichkeitsanalyse beginnt mit der Abgrenzung des Untersuchungsbereiches, um die Datenmenge nicht exorbitant groß werden zu lassen. Dazu sind eine zielgerichtete Auswahl der relevanten Produkte sowie die relevanten Produktelemente oder Bauräume nötig. Die Auswahl muss passend zu der zu untersuchenden Fragestellung (z.B. gibt es für die Produktauswahl A bis M eine energetisch und geometrisch optimale Traktionsbatterie?) gewählt werden (Abbildung 4-35). Die Analyse kann dann vergleichend oder weiterführend nach dem TOTE-Schema (Abbildung 2-17) vereinheitlichend erfolgen.

		Ähnlichkeitsanalyse															
		Benennung	Toleranz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	m-1	m		
				Produkt A	Produkt B	Produkt C	Produkt D	Produkt E	Produkt F	Produkt G	Produkt H	Produkt I	...	Produkt R	Produkt S		
Charakterisierende Kriterien	Merkmale	1	Abmaße - Länge [cm]	x [cm]													
		2	Abmaße - Breite [cm]	x [cm]													
		3	Abmaße - Höhe [cm]	x [cm]													
		4	Volumen [cm ³]	x [cm ³]													
														
		n-1													
	n														
	Eigenschaften	a	Gewicht [kg]	x [kg]													
		b	Funktion - A [ja, nein]	-													
		c	Funktion - B [ja, nein]	-													
		d	Funktion - C [ja, nein]	-													
														
		n-1													
	n														

Abbildung 4-35 Ähnlichkeitsanalyse in Anlehnung an MEPORT ® [GfU-2013]

²⁷ Ähnlichkeit im Sinne eines Grades an Übereinstimmung von zwei oder mehreren Objekten.

²⁸ „Eine Sachmerkmalleiste ist die Zusammenstellung und Anordnung der für eine Gegenstandsgruppe relevanten Sachmerkmale“, aus [EiS-2009] S. 75.

Die manuelle Durchführung einer Ähnlichkeitsanalyse ist mit einem entsprechenden Aufwand verbunden, da exponentiell mit der Anzahl an Vergleichsoperationen die Anzahl der Untersuchungselemente steigt. Dieses erfordert ab einer gewissen Komplexität eine rechnergestützte Unterstützung.

Bei kleineren Stichproben ist das Aufführen der zu untersuchenden Produkte und deren charakteristischen Elemente in Form von Merkmalen und Eigenschaften in einer Ähnlichkeitsmatrix (Abbildung 4-35) möglich. Es ist bei der Analyse festzulegen, ab wann zwei Wertepaare als gleich oder ähnlich aufzufassen sind. Wenn die Elemente in ihrer Ausprägung identisch sind, können diese als gleich aufgefasst werden. Eine Ähnlichkeit besteht dann, wenn ein Element eines Produktes innerhalb des Toleranzfeldes eines Elementes eines anderen Produktes oder in einer zuvor festgelegten Toleranz liegt. Die Analyse entspricht in Teilen einer Abweichungsanalyse, die vor allem im industriellen Kostenmanagement eingesetzt wird (vgl. [SJN-2005]).

Darüber hinaus ist bei einem reinen Vergleich der Produktvarianz hinsichtlich der Gleichheit durch Überschneidungen von Produkten festzulegen, in wie vielen Elementen diese übereinstimmend sein müssen, um als gleich zu gelten. Hierbei kann auch zwischen der nötigen Anzahl der Elemente als identisch oder ähnlich differenziert werden. Die Ergebnisse des Vergleichs der Elemente und deren Gleichheit in den verschiedenen betrachteten Aspekten wird bei Bedarf zu besserer Auswertung in eine Dreiecksmatrix eingetragen [GfU-2013].

Auswertung Ähnlichkeitsanalyse auf Produktebene z.B. Anzahl der Produkte mit ähnlichen Bauräumen (>1)											
gemeinsame Bauräume		1	2	3	4	5	6	...	m-1	m	Auswertungs- kriterium bzgl. der Überein- stimmung
		Produkt A	Produkt B	Produkt C	Produkt D	Produkt E	Produkt F	...	Produkt R	Produkt S	
1	Produkt A		1	2	3	-	1		2	-	3
2	Produkt B			-	-	-	-		1	-	0
3	Produkt C				-	-	-		-	-	0
4	Produkt D					2	-		-	1	1
5	Produkt E						-		2	2	2
6	Produkt F								-	1	0
...	...										
m-1	Produkt R									2	1
m	Produkt S										
Auswertungs- kriterium bzgl. der Überein- stimmung	(Als Summe von Zeile und Spalte)	3	0	1	2	3	0		3	1	

Abbildung 4-36 Aufbau einer Dreiecksmatrix in Anlehnung an MEPORT ® [GfU-2013]

Wenn in dieser Matrix der bestimmte Wert für Gleichheit (identisch oder ähnlich) überschritten ist, kann entsprechend der Fragestellung weiter verfahren werden. Im Normalfall dient die Ähnlichkeitsanalyse der Bereinigung des Sortiments durch Reduzierung gleichwertiger Produkte. In der Elektromobilität könnten bei Fahrzeugen, die gleiche Attribute aufweisen, der Einsatz gleicher Komponenten erreicht werden. Beim Angebot einer größeren Produktpalette kann darüber hinaus bewertet werden, welches bisher nicht elektrifizierte Fahrzeug potentiell geeignet wäre, auf einem schon bekannten Konzept innerhalb einer Baukastensystematik aufzubauen.

Eine weitere Variante der Analyse bietet die Harmonisierung der Anforderungen an ein Produkt bzw. einzelner Produktelemente. Ein Beispiel dafür ist das Hochvoltladegerät, welches in der elektrifizierten Produktpalette in BEV, PHEV oder F-Cell Fahrzeugen eingebaut wird. Die Leistung des Ladegerätes ist jedoch abhängig von der Netzleistung, von der energetischen Größe der Traktionsbatterie und von der vom Kunden gewünschten Ladedauer. Dadurch bedingt kann es in einem Baukasten mit diversen Fahrzeugklassen den Bedarf für mehr als ein Ladegerät geben, jedoch sollte nicht ein individuelles Ladegerät je Produkt entwickelt werden.

5 Abhängigkeiten in der elektrifizierten Fahrzeugauslegung

Damit das in 4.4 *Vorgehen in der Konzeptentwicklung* aufgezeigte Vorgehen zur Strukturierung eines Fahrzeugkonzeptes umgesetzt werden kann, ist der technische Aufbau eines Modells für Full Hybride (HEV), parallele Plug-In Hybride (PHEV) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sowie für die Brennstoffzelle (F-Cell) erforderlich. Dazu werden im Folgenden Vernetzungsdiagramme aufgebaut. Ein daraus abgeleitetes Eigenschaftsnetzwerk stellt den Bezug zwischen Fahrzeugeigenschaften und Produktelementen her. Durch diese Vernetzung ist eine Optimierung von Produktelementen bzw. deren Merkmale hinsichtlich der Anforderungen innerhalb eines Baukastens möglich. Methodisch können weiterführend auch Semantische Netze und Ontologien aufgebaut werden, wie z.B. WESTPHAL aufzeigt (vgl. [WeC-2014]). Für die Strukturierung des Modells bzw. die Spezifizierung der Segmente ist die Darstellung in Vernetzungsdiagrammen sowie ein daraus folgendes Eigenschaftsnetzwerk eine erste, für die frühe Konzeptphase ausreichende Lösung.

5.1 Vernetzungsdiagramme der Segmente für elektrifizierte Fahrzeuge

Die Darstellungsart der Vernetzungsdiagramme beruht auf den in 4.5.2 *Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung* eingeführten Segmente und Segmentgruppen und den in 4.1 *Produktstrategie in der Automobilindustrie* eingeführten Produktgefüge (Abbildung 5-1).

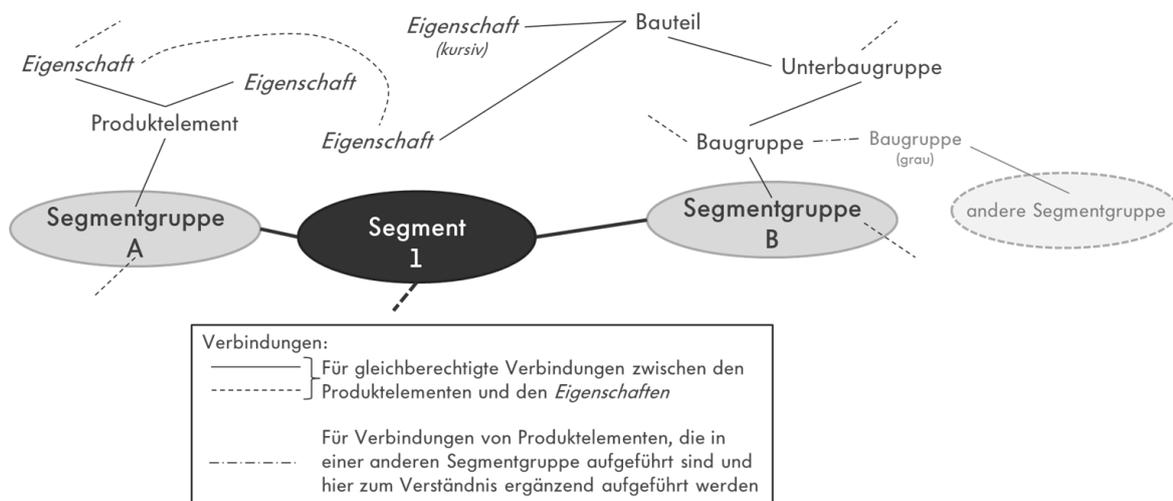


Abbildung 5-1 Aufbau der Vernetzungsdiagramme in Abhängigkeit von Segment, Segmentgruppen, Produktelementen und Eigenschaften

Der Aufbau erfolgt auch auf Basis der in 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften* aufgezeigten Modellierung von Produkten. Es werden die wesentlichen technischen Produktelemente berücksichtigt (3 *Grundlegende Auslegungsmaßnahmen von elektrifizierten Fahrzeugen*) und die Auswirkungen auf die Fahrzeugeigenschaften herausgearbeitet und in einem weiteren Schritt in Verbindung gebracht. Ein weiterer Nutzen der Vernetzungsdiagramme und dem daraus abgeleiteten Eigenschaftsnetzwerks soll die Analyse der wesentlichen für die Konzeptentwicklung wichtigen Eigenschaften darstellen. Um die in 4.5.2 *Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung* aufgezeigte Verwendung der Black-Box oder von Bauteil-Dummys zu ermöglichen,

müssen die jeweiligen Randparameter der für die Konzeptentwicklung elementaren Bauteile zur Auslegung elektrifizierter Fahrzeuge bestimmt werden.

Die Unterteilung der Segmente und deren spezifischen Baugruppen ist in Anhang *D1 Segmente des Konzeptfahrzeugs* aufgeführt. Die berücksichtigten Produktelemente für die in diesem Kapitel einleitend genannten Fahrzeugarchitekturen werden in der entsprechenden Strukturierung im Anhang *D2 Verwendete Produktelemente des Modell KEIBPro 11-14* aufgezeigt.

Grundlegend sind der Aufbau der Segmente und ihre Unterteilung in Segmentgruppen bei allen Fahrzeugprojekten gleich, da die Aufteilung der Segmente in Segmentgruppen so gewählt ist, dass eine beliebige Fahrzeugarchitektur (Diesel-, Benzin-Hybrid, Brennstoffzelle) gewählt werden kann und immer mindestens eine Baugruppe in einer Segmentgruppe vertreten ist (vgl. *4.5.2 Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung*). Jedes Kraftfahrzeug hat einen Motor im Sinne einer Antriebseinheit, mindestens ein Fahrwerk, einen Aufbau usw. Die nötigen Baugruppen, Unterbaugruppen und Bauteile in den Segmentgruppen ist von der Topologie und dem Package in Verbindung mit den zu erzielenden Anforderungen abhängig. Im Folgenden finden die in Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie* aufgeführten Produktvarianten besondere Berücksichtigung. Es ergeben sich somit unterschiedliche Ausprägungen innerhalb der Segmentgruppen und daraus folgend differenzierte Fahrzeugarchitekturen.

Im Folgenden wird die Annahme getroffen, dass die Architektur und damit verbundene Produktelemente in den Segmenten, elektronische und mechatronische Systeme und Fahrzeug-Karosserie sowie Teile der Segmente Maßkonzept und Ergonomie bei konventionell und elektrisch angetriebenen Fahrzeug gleich sind. Jedes moderne Fahrzeug hat ein Mindestmaß an Komfortausstattung mit Klima- bzw. Heizsystem, Infotainment und Sensorik (z.B. für die Außentemperatur), eine Karosserie mit Bodengruppe, Roh- sowie Aufbau und es unterliegt einem Maß- und Ergonomekonzept (auf einem Standard-VW-Golf kann hinsichtlich der Karosserie auch ein Elektrofahrzeug oder Hybrid aufgebaut werden vgl. [WiM-2013]). Die genannten Segmente unterscheiden sich nur durch die topologische und packageseitige Ausprägung (z.B. hat ein Kleinwagen im Gegensatz zum Oberklassefahrzeug i.d.R. konzeptseitig keinen Kühlschrank).

Für die Übersichtlichkeit der Darstellung werden in den Vernetzungsdiagrammen der einzelnen Segmenten nicht alle in Abbildung 2-13 aufgezeigte Eigenschaften dargelegt. Es wird z.B. auf die Verknüpfung von einzelnen Bauteil-Gewichten verzichtet, in dem diese direkt dem Fahrzeuggewicht (Masse DIN-Leer) zugeordnet werden. Zwischen den im Vernetzungsdiagramm aufgezeigten Eigenschaften werden nur Verbindungen zum Gewicht dargestellt, wenn diese für die Eigenschaft von besonderer Bedeutung ist (vgl. z.B. *3.2 Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*). Auch die Eigenschaft Produktionstauglichkeit der Bauteile wird nicht für jedes Produktelement aufgeführt. Gleiches gilt auch für Produktelemente mit einzelnen spezifischen Wirkungsgraden, deren Aufschlüsselung bis auf Komponentenebene durch spezifische Untersuchungen erfolgen müsste. Auch Funktio-

nen der Produktelemente werden nicht im Vernetzungsdiagramm dargestellt und werden individuell zugeordnet. Die primäre Funktion des Produktelements erschließt sich jedoch zumeist aus dem Kontext der Segmenteingliederung.

Für die Auswahl der Fahrzeugarchitektur und der sich daraus ergebenden Aufbauart der Segmente ist die Berücksichtigung der Betriebsstrategie des Fahrzeuges von Bedeutung. Entsprechend der Fahrprofile ergeben sich Betriebsstrategien, die insbesondere bei Hybriden zu berücksichtigen sind und primär von den entsprechenden Lastanforderungen und Kundenwerten abhängen (Weiterführende Ausführungen dazu im Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie*). In einer Baukastenstrategie sollte die Möglichkeit bestehen, alle Betriebsstrategien umsetzen zu können.

5.1.1 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Antrieb und Energiespeicher

Das Segment Antrieb und Energiespeicher besteht aus sechs verschiedenen Gruppen:

1. Die Segmentgruppe Motor umfasst Energieerzeuger bzw. –Verbraucher, die zur Vortriebsenergie des Fahrzeuges beitragen. Dazu gehören VKMs, die in ihrer Bauform auch im Range-Extender-Betrieb (neben Hubkolbenmotoren auch Wankel- oder Stirlingmotoren) genutzt werden können (Diesel, Benzin, CNG/LPG, etc.), die Lichtmaschine und Starter (auch Riemenstarter- Generator), Elektromaschinen sowie die Brennstoffzelle.
2. Die Segmentgruppe Antriebssteuerung enthält die Baugruppen Leistungselektronik, Motorsteuergerät und die Getriebesteuerung, insofern diese nicht in das Motorsteuergerät integriert ist.
3. Zur Segmentgruppe Getriebe gehören die Baugruppen Getriebe und Kupplung.
4. Die Segmentgruppe Thermomanagement (Kühlungssystem) umfassen insbesondere Kühlerpakete und Lüfter etc.
5. Die Segmentgruppe Energiespeicher beinhaltet elektrische wie chemische Speicher.
6. Die Segmentgruppe Ladetechnologie umfasst Bauteile entsprechend der im Fahrzeug zu ladenden Energieformen.

Auf die technische Funktionsweise der hier angesprochenen elektrifizierten Bauteile wurde, mit Ausnahme der VKM und Brennstoffzelle, in *3.6 Auslegung aus elektrotechnischen Gesichtspunkten* eingegangen. Die Bestandteile des Segments Antrieb und Energiespeicher tragen insbesondere zur Längsdynamik des Fahrzeuges bei, was der Kunde im Fahrverhalten wahrnimmt.

5.1.1.1 Segmentgruppe Motor

Die Segmentgruppe Motor unterteilt sich in die drei Baugruppen Verbrennungskraftmaschine, E-Maschine und Brennstoffzelle. Aus Gründen der Komplexität der Schaubilder werden, im Gegensatz zu den Darstellungen der anderen Segmentgruppen, im Folgenden die jeweiligen Baugruppen in einzelnen Vernetzungsdiagrammen dargestellt.

Die Baugruppe VKM wird in dieser Arbeit als Teil eines elektrifizierten hybriden Antriebsstranges betrachtet. Bei der konzeptionellen Auslegung eines elektrifizierten Antriebstrangs kann die VKM tiefgehend mit Hubvolumen, thermischen Effekten, Gemischbildung, etc. (vgl. [KoF-2011] [ReK-2011] [RNB-2012]) betrachtet werden. Die hier vorgenommene konzeptionelle Auslegung berücksichtigt eine globalere Sicht auf die VKM mit dem Kundenanspruch an Fahrdynamik und Verbrauchs- sowie damit verbundene Emissionsreduktionsaspekte. Des Weiteren werden bei OEMs Motorenfamilien innerhalb einer Produktstrategie aufgebaut, so dass es geometrisch meist nur ein oder zwei Motoren je Kraftstoffart (Diesel/Benzin) innerhalb mehrerer Produktgruppen gibt [ScG-2012].

Auch das Getriebe wird ebenfalls global hinsichtlich seiner Auswirkung auf Fahrdynamik und Verbrauch betrachtet. Es ist für ein frühes Konzept ausreichend, eine Annahme der Getriebeart mit entsprechendem Massenfaktor und Übersetzungsverhältnissen zu treffen.

Bei der Betrachtung der VKM und einem Getriebe oder Übersetzung²⁹ sind für das Gesamtfahrzeugkonzept die Bereiche Leistung und Verbrauch sowie die Abmaße und Geometrie der dafür eingesetzten Bauteile von Bedeutung. Die Kraftstoffart als Betriebsstoff ist ein indirektes Merkmal (im Sinne eines (Werk-) Stoffes, insbesondere für den Kunden). Betriebsstoffe sind jedoch abhängig vom Aufbau des Motors und den gewünschten Eigenschaften (Leistung im Sinne der Fahrdynamik, Zielregion im Sinne der Verfügbarkeit des Kraftstoffes, angestrebten Verbrauchs- und Emissionswerten). Daher muss die Kraftstoffart zum Teil über Eigenschaften in Form der Bauteilfunktionen (z.B. Einspritztechnologie passt zum Kraftstoff) und aus der Topologie des Fahrzeuges bestimmt werden (Kraftstoffverbrauch und Tankvolumen sollten, entsprechend der Anforderungen, in angemessenem Verhältnis stehen).

Eine wichtige Eigenschaften der VKM ist die Leistung (P_{VKM}), da die unter 3.2.5 *Gesamtfahrwiderstand* eingeführten Anforderungen (Kunde) Beschleunigung und Steigfähigkeit u.a. darüber beeinflusst werden können. Die Antriebsleistung der VKM ergibt sich aus dem Drehmoment (M_{VKM}) sowie der Drehzahl (n_{VKM}) in Formel (5-1).

$$\text{Leistung VKM} \quad P_{VKM} = 2\pi * n_{VKM} * M_{VKM} \quad (5-1)$$

Das Drehmoment M_{VKM} ist bei einem Viertaktmotor abhängig vom Hubvolumen in den Zylindern V_{Zyl} , dem effektiven Mitteldruck p_{ef} , der wiederum abhängig von der Drehzahl ist (5-2).

$$\text{Drehmoment VKM} \quad M_{VKM} = \frac{V_{Zyl} * p_{ef}}{4\pi} \quad (5-2)$$

Bei der Betrachtung der VKM kann auch der Range-Extender, wie in Abschnitt 5.1.1 bereits angesprochen, mit einbezogen werden. Dieser nutzt zum Zurücklegen von Strecken primär elektrische Energie, hat aber für den „Notfall“ ein im Fahrzeug verbautes Aggregat zur Reichweitenverlängerung. Das Range-Extender-Aggregat ist auch eine VKM und kann in unterschiedlichen Varianten aufgebaut werden (z.B. Hubkolben- oder Rotationskolbenmotor). Wie bei konventionellen Fahrzeugen kommen

²⁹ Das Getriebe ist mehrgängig, während die Übersetzung ein einfaches Getriebe mit fester Übersetzung ist.

primär Hubkolbenmotoren im Viertaktverfahren mit ein bis vier Zylindern und den bekannten unterschiedlichen Kraftstoffen zum Einsatz. Zu berücksichtigen sind je nach Konzept die Auswirkungen der Technologie auf Wirkungsgrade (insbesondere durch den Carnot-Prozess), Emissionswerte chemischer Stoffe, die entsprechende Abgasnachbehandlung und die Geräuschemission. Ein weiterführender Vergleich von geeigneten Motoren als Range-Extender ist in [GEM-2009] zu finden. Auch der Einsatz einer Brennstoffzelle als Range-Extender ist möglich.

In einem hybriden Antriebsstrang (Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie*) entsteht der Nutzen bzw. die Wirkungsgradsteigerung aus der Kombination von VKM und E-Maschine. Dies erfolgt durch die Betriebspunktverschiebung der VKM in einen verbrauchsärmeren Bereich bei gleicher Fahrdynamik [ReK-2011]. Ermöglicht wird dies durch die E-Maschine und deren höheren Drehmomente bei kleinen Drehzahlen (*3.6.3 Elektrischer Antrieb*). Die Folgen sind neue Möglichkeiten des Downsizings, z.B. eine Verringerung der verbrennungsmotorischen Leistung, die mit Hilfe der E-Maschine ausgeglichen werden kann. Dabei können durch eine gezielte Kombination von rein elektrischem oder hybridischem Fahren ungünstige Betriebsbereiche der VKM vermieden und z.B. dynamische Drehmomentschwächen ausgeglichen werden.

Durch die Vermeidung ungünstige Betriebspunkte der VKM werden Emissionen (CO₂, NO_x, HC und Rußpartikel) reduziert [ReK-2011]. Eine Optimierung im Bereich der VKM kann durch die Veränderung des Verbrennungszyklus erreicht werden (z.B. Atkinson- oder Miller Verfahren). Bei geringerem Verbrauch ist bei der Abgasnachbehandlung weiteres Einsparpotenzial vorhanden. Jedoch können aus akustischen Gesichtspunkten, nach dem leisen elektrischen Fahren, stärkere Maßnahmen zur Dämmung des Anspringgeräusches der VKM getroffen werden (abhängig von den Kundenanforderungen hinsichtlich der Innenraumakustik und gesetzlichen Bestimmungen zur akustischen Wirkung des Fahrzeugs auf Dritte, z.B. in Innenstädten).

Die Elektrifizierung wirkt sich auch auf die Dimensionierung der Bauteile aus, die bisher z.B. die Abwärme oder den Unterdruck der VKM nutzen konnten. So konnte beispielweise die Innenraumheizung konventioneller Fahrzeuge mit dem heißen Motorkühlwasser über Wärmetauscher betrieben werden. Wenn die Funktion dieser Bauteile aus Sicherheits- bzw. Komfortgründen beim längeren rein elektrischen Vortrieb zur Verfügung stehen muss, sind diese Nebenaggregate elektrifiziert umzusetzen (z.B. der Bremskraftverstärker).

Die Baugruppe Elektromaschine enthält neben den in *3.6.3 Elektrischer Antrieb* dargestellten Elektromotoren zum reinen Vortrieb auch den Riemenstarter-Generator (als Kombination von Starter und Lichtmaschine, was insbesondere bei „Start-Stopp“-Systemen nötig ist). Er könnte in einem Mild-Hybrid in kleinerem Umfang zusätzlich zum Vortrieb des Fahrzeuges als Drehmomentenquelle beitragen (vgl. [WaR-2006]). Dies fällt unter die im Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie* vorgestellte Betriebsstrategie Boosten.

Zum Motorgehäuse gehören die drei Hauptkomponenten Stator, Rotor und Ständer. Die E-Maschine ist von Leistungselektronik, Kühlungssystem und der verfügbaren Leistung aus dem elektrischen Energiespeicher abhängig. Hinsichtlich der topologischen Auslegung der E-Maschine besteht, wie auch bei der VKM bei der verfügbaren Leistung der gleiche Bezug zu den Norm-Zyklen bzw. zum Kundenwert. Bei einem Hybriden ist über die Betriebsstrategie zusätzlich eine geeignete Kombination von E-Maschine und VKM zu finden. Die Baugruppe E-Maschine besteht aus den Unterbaugruppen Motorgehäuse und Hilfseinrichtungen. Sie ist im Anhang *D4 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe E-Maschine* in einem Vernetzungsdiagramm dargestellt.

Die Brennstoffzelle weist aufgrund der kontinuierlichen Energieproduktion (Energiewandlung) inkl. der Leistungsabhängigkeit vom Füllgrad des Energiespeichers Ähnlichkeiten zur VKM auf. Daher wird die Brennstoffzelle in dieser Arbeit als eigenständige Baugruppe zur Energieumformung für den Fahrzeugvortrieb betrachtet und der Segmentgruppe Motor zugeordnet. Eine Brennstoffzelle besteht neben dem Gehäuse und Hilfseinrichtungen wie Dichtungen aus Elektroden (Bipolarplatten), einem Katalysator im Sinne einer Beschichtung der Elektroden und einem umgebenden Elektrolyt. Diese Bestandteile können aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt werden. Mehrere dieser Zellen werden zu einer Unterbaugruppe, dem Stack, in Serie zusammengeschaltet, um entsprechende Leistungen für den Fahrzeugvortrieb zu erhalten [WaR-2006]. Das Vernetzungsdiagramm der Brennstoffzelle ist im Anhang *D5 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe Brennstoffzelle* dargestellt.

5.1.1.2 Segmentgruppe Antriebssteuerung

Die Segmentgruppe Antriebssteuerung setzt sich aus den Baugruppen Motor- und Getriebesteuergerät sowie der Leistungselektronik zusammen. Die Leistungselektronik setzt sich aus mehreren Wandlern bzw. Strom- und Frequenzrichtern zusammen, die unter anderem aus Transistoren und Kondensatoren bestehen und eine elektrische Schaltung bilden. Leistungstransistoren (z.B. MOSFETs, gehören zu den Feldeffekttransistoren) schalten den Strom auf die gewünschten Spannungen und Ströme [HGB-2005]. Neben MOSFETs können auch IGBTs als bipolare Transistoren eingesetzt werden. IGBTs werden über einen integrierten MOSFET angesteuert, der über eine nahezu leistungslose Ansteuerung verfügt [EmA-2005]. Reguliert werden die Wandler über eine Steuerungseinheit. Die Grenzwerte für Ströme sowie Spannungen werden durch die Leistungsgrenzen der Bauteile (Wandler) festgelegt und beeinflussen damit letztendlich Drehmoment und Drehzahl der E-Maschine.

Je nach Elektrifizierungsart des Fahrzeuges und E-Maschinen Typ (vgl. Abbildung 3-28) gibt es bis zu drei Wandler in einer Leistungselektronik. Zum einen wird mit dem AC/DC-Wandler der Gleichstrom aus dem Energiespeicher in mehrphasigen Wechselstrom für die E-Maschine umgewandelt. Zum anderen wird der DC/DC-Wandler für die Wandlung des Hochspannungsstroms (>200 V) aus der Traktionsbatterie in Niederspannungsstrom für das Bordnetz (12 V – 48 V) sowie ein weiterer optionaler DC/DC-Wandler für die Hochvolt-Bordnetzspannung für Geräte, die aus Leistungs- und Effizienz-

gründen nicht über die Niederspannung des Bordnetzes betrieben werden (z.B. elektrische Heizung, Klimakompressor, etc.) verwendet.

Wenn die Spannungen des Energiespeichers nicht zu den Spannungen der E-Maschine oder den vom Hochvolt-Bordnetz abhängigen Geräten passen, kann eine Anpassung über einen Hoch- oder Tiefsetzsteller vorgenommen werden. Diese Flexibilität führt jedoch zu Wirkungsgradverlusten beim Umsetzen der Energie für den Vortrieb und wenn Energie in den Speicher zurückgeführt wird (Rekuperation). Aufgrund dieser Wirkungsgradverluste wird der Hoch- oder Tiefsetzsteller im Folgenden vernachlässigt.

In der Segmentgruppe Antriebssteuerung sind die Baugruppen der Motor- sowie der Getriebesteuerung quasi gleich zu heutigen Systemen. Jedoch ist bei den elektrifizierten Fahrzeugen eine Softwareanpassung vorzunehmen. Dies hängt zum einen mit den in Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie* beschriebenen Betriebsstrategien sowie zum anderen mit den in Abschnitt 5.1.1.1 genannten Betriebsweisen (Atkinson- und Miller Zyklus) zusammen. Das Vernetzungsdiagramm der Antriebssteuerung ist im Anhang *D6 Segment 1 – Segmentgruppe Antriebssteuerung* dargestellt.

5.1.1.3 Segmentgruppe Getriebe

Die Segmentgruppe Getriebe besteht aus den bereits in Abschnitt 5.1.1.1 genannten Baugruppen Getriebe, Übersetzung und Kupplung. Kupplungen werden bei der Betrachtung elektrifizierter Fahrzeuge nicht als Teil der Getriebe erfasst, da z.B. durch die K0-Kupplung (vgl. [HoP-2010]) eine Trennung von VKM und E-Maschine im Betrieb erfolgen kann (Anhang *D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie*). Abhängig ist dies sowohl von der topologischen und geometrischen Auslegung als auch von der Art des Getriebes. Dies wären z.B. Schalt- und Automatikgetriebe oder stufenlose CVT-Getriebe, letztere bei Hybriden z.B. als Planetengetriebe. Bei der Auswahl muss neben dem Kundenwunsch (Schaltung oder Automatik) auch das Kriterium der Leistungsgrenzen der verschiedenen Getriebearten berücksichtigt werden.

In einfachen Antriebssystemen können auch Differentialgetriebe Verwendung finden, die beim Antrieb mehrerer Achsen oder bei Kurvenfahrten als Momentenausgleich zwischen den Rädern der angetriebenen Achse fungieren (Zwangsschlupf vgl. [BrS-2013]).

Ein entsprechendes Vernetzungsdiagramm für das Getriebe ist im Anhang *D7 Segment 1 - Segmentgruppe Getriebe* dargestellt.

5.1.1.4 Segmentgruppe Thermomanagement/ Kühlungssystem

Das Thermomanagement elektrifizierter Fahrzeuge bezieht sich primär auf das Kühlungssystem, da über die elektrifizierten Module keine nennenswerte Verlustwärme, z.B. zur Temperierung des Innenraumes, gewonnen werden kann. Die geringe Verlustwärme steht im Zusammenhang mit dem ver-

gleichsweise hohen Wirkungsgrad elektrischer Bauteile. Die Verlustleistung steht in Abhängigkeit der Bauteilwiderstände bzw. ist abhängig vom Strom, z.B. der Strom für Dauerfahrleistung der E-Maschine. Die daraus resultierende Verlustleistung ist durch Kühlung aus dem System abzuführen. Da die elektronischen Bauteile temperaturempfindlicher sind, ist deren Kühlung von hoher Bedeutung. Beim rein elektrischen Fahren muss die Erwärmung des Innenraumes auf Basis fossiler bzw. synthetischer Brennstoffe oder der verfügbaren elektrischen Energie erfolgen (weiteres dazu in Abschnitt 5.1.3 *Produktelemente und deren Vernetzung im Segment elektronische und mechatronische Systeme*). Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Verbrennerfahrzeug, bei denen die abgeführte Wärme für andere Zwecke im Fahrzeug (z.B. Temperierung des Innenraumes) verwendet werden kann.

Das Thermomanagement von Modulen oder Komponenten besteht auf der thermischen Wechselwirkung eines Fluides, primär durch Konvektion. Es stehen im Wesentlichen zwei Arten der Kühlung mit Hilfe von Fluiden zur Verfügung. Zum einen Flüssigkeiten wie Wasser oder Kältemittel, zum anderen die Kühlung mit Hilfe eines Luftstroms (Luftkühlung). Letztere Kühlungsart ist bei den elektrifizierten Modulen von der Leistungsanforderung abhängig und beim Ladegerät oder der Traktionsbatterie möglich.

Die Kühlung von elektrifizierten Bauteilen ist neben der Erhöhung von Leistungsfähigkeit (E-Maschine) und Wirkungsgraden auch eine Frage der Lebensdauer der Bauteile. So können in Schaltungen z.B. die Transistor- Halbleiterkristalle (Ladegerät, Leistungselektronik) thermisch zerstört werden, da die Innenwiderstände der elektrischen Bauteile die elektrische Energie in Wärme umsetzen. Gleiches gilt auch für die Belastung der Traktionsbatterie, insbesondere beim Laden. Die Wärme muss abgeführt werden, um Leistungsvermögen und Lebensdauer der Bauteile zu erhalten.

Bei der Flüssigkeitskühlung wird das Fluid in einem Kreislauf geführt. Es wird mit Hilfe von Pumpen, Lüftern und Röhren heruntergekühlt und zu einem Abnehmer, z.B. dem Batteriekasten, gefördert, wo über Wärmetauscher (Kühlkörper) die Wärmeenergie der elektrischen Bauteile abtransportiert wird. Bei der Luftkühlung wird der kühle Luftstrom an Kühlrippen oder Kühlkörper eines Abnehmers geführt, um mit der Zuluft thermische Energie aus dem Modul abzuführen. Die Abluft muss aus dem System transportiert werden, was auch über physikalische Effekte erfolgen kann (z.B. warme Luft steigt nach oben).

Die Kühlleistung ist vom Bedarf des jeweiligen Abnehmers und der gewünschten Eigenschaften, z.B. Wirkungsgrad und Leistung, abhängig. Für das Kühlsystem stehen das Kühlmittel und daraus abgeleitete Systemdrücke, der Volumenstrom und die benötigte Temperatur-Differenz im Vordergrund. Das Prinzip und die Eigenschaften der Kühlungsvarianten (Luft oder Flüssigkeit) sind gleich, jedoch unterscheiden sich die Merkmale der Systeme. Deshalb werden im Vernetzungsdiagramm des Thermomanagement/ Kühlsystems im Anhang D8 *Segment 1 – Segmentgruppe Thermomanagement/ Kühlsystem* beide Wege der Kühlung separat dargestellt.

5.1.1.5 Segmentgruppe Energiespeicher

Die Segmentgruppe Energiespeicher besteht aus den Baugruppen Kraftstofftank, Niedervoltbatteriesystem und Traktionsbatterie. Ein entsprechendes Vernetzungsdiagramm der Energiespeicher ist im Anhang *D9 Segment 1 – Segmentgruppe Energiespeicher* dargestellt.

Die Baugruppe Kraftstofftank besteht aus dem Behälter, der Befestigung und weiteren Hilfsbauteilen wie Schwimmer, Füllstandventil und Rückschlagklappe für fluide Kraftstoffe. Elementar abhängig von der geometrischen Ausprägung des Behälters bzw. der Tankblase ist in Verbindung mit dem verbrennungsmotorischen Verbrauch die Reichweite des Fahrzeuges. Bei elektrifizierten Antrieben, die ohne die VKM den Vortrieb des Fahrzeuges gewährleisten können, kann ein Großteil der Fahrstrecke des Kunden rein elektrisch zurückgelegt werden (abhängig von der zu fahrenden Strecke und der Lastanforderung bzgl. des elektrischen Verbrauchs). Werden die Fahrten primär rein elektrisch zurückgelegt, kann es durch eine Nichtnutzung der VKM zu adhäsiven oder korrosiven Vorgängen, z.B. an den Zylinderlaufflächen, und durch das fehlende Spülen des Aktivkohlefilters des Kraftstofftanks zur olfaktorische Wahrnehmung von Betriebsstoffen kommen. Wenn dies vermieden werden soll, müssen entweder die Spülvorgänge der VKM erhöht oder ein Drucktank, der das Austreten von Geruchsstoffen aus dem Tank verhindert, eingebaut werden. Letzteres kann auch eine gesetzliche Anforderung sein.

Die Baugruppe des Niederspannungsenergiespeichers umfasst insbesondere die 12V-Batterie (bzw. eine Batterie im Bereich der Spannungslage des 12V – 48V Bordnetzes). Sie entspricht einer Batterie in konventionell betriebenen Fahrzeugen und wird daher nicht weiter betrachtet.

Die Baugruppe Traktionsbatterie setzt sich aus den Unterbaugruppen Batteriemodule, Sensorik, Befestigungssystem, Gehäuse und Sicherungssystem zusammen. Zum Sicherungssystem gehören unter anderem die Schaltschütze, Sicherungen und Messtechnik des Batteriekastens. Das Kühlungssystem (vgl. Abschnitt 5.1.1.4) kann, bei entsprechenden Gegebenheiten in Bezug auf das Hochvoltbatteriesystem (geringe Ladeströme, geringe Strom-Belastung im Fahrbetrieb) in der Traktionsbatterie auch ganz entfallen. Das wesentliche Element der Traktionsbatterie ist die Unterbaugruppe der Batteriemodule, die wiederum aus mehreren Batteriezellen bestehen. Die Befestigungen der Batteriemodule im Batteriekasten und des gesamten Kastens am oder im Fahrzeug bedürfen geeigneter Anbindungsmittel zum Rohbau. Die Leistung einer Batteriezelle ist von der geometrischen Dimension und den chemischen Eigenschaften abhängig. Die Anzahl der Zellen ist, in Abhängigkeit des elektrischen Verbrauchs, für die elektrische Reichweite des Fahrzeuges und, in Abhängigkeit der Verschaltung, für die Leistungsfähigkeit des Hochvoltbatteriesystems maßgeblich.

Aus der elektrischen und der verbrennungsmotorischen Reichweite, letztere abhängig vom hybriden Verbrauch der VKM und dem Inhalt des Kraftstofftanks, ergibt sich die Gesamtreichweite des Fahrzeuges.

5.1.1.6 Segmentgruppe Ladetechnologie

Die Segmentgruppe Ladetechnologie hat bei elektrifizierten Fahrzeugen besondere Bedeutung. Das elektrische Laden der Fahrzeuge wird bedingt durch die geringere Energiedichte der Lithium-Ionen-Technologie (vgl. Abbildung 3-20) häufiger stattfinden, als es derzeit bei konventionellen Fahrzeugen, bedingt durch die hohe Energiedichte der Kraftstoffe (Diesel 11.890 Wh/kg, Benzin 12.070 Wh/kg vgl. [AJJ-2013]), der Fall ist. Der Bedarf zum elektrischen Laden eines Fahrzeugs ist von der Fahrzeugarchitektur und der energetischen Dimension des Hochvoltbatteriesystems abhängig (vgl. Anhang D3 *Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie*).

Zur Baugruppe des konventionellen Kraftstoffsystems gehören der Einfüllstutzen und die Kraftstoffpumpe. Der Einfüllstutzen ist dabei abhängig von der Zapfpistole bzw. der Zapfsäule (bei konventionellen PKWs üblich: Benzinzapfpistolen mit 21 mm und Dieselpistolen mit 25 mm Durchmesser). Die Kraftstoffpumpe ist als Fördereinheit abhängig von den Rahmenbedingungen der VKM, der Kraftstoffart sowie dem Behälter (Energiespeicher) für den Kraftstoff selbst.

Beim Laden des elektrischen Energiespeichers stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl (*3.6.4.2 Art der Verbindung zwischen Fahrzeug und Energiespeicher/Stromnetz*). Ein Batteriewechselsystem stellt, was Präzision und Schnelligkeit des Prozesses betrifft, hohe Ansprüche an die Wechselstation. Auch im Fahrzeug werden durch ein Wechselsystem hohe Anforderungen an den Batteriekasten und die Dauerhaltbarkeit der mechanischen Verbindung zwischen Batteriekasten und Fahrzeugaufnahmepunkten gestellt. Das Aufladen durch einen Wechsel der Traktionsbatterie wird im Weiteren nicht betrachtet, da diese Technologie hoher Investitionen in der Fahrzeugperipherie bedarf und diese zurzeit nicht wirtschaftlich darstellbar sind.

Bei der Baugruppe des elektrischen Ladesystems wird in kabelgebundenes und kabelloses Laden unterschieden. Außerdem müssen regional Spannungsarten (Wechsel- oder Gleichstromnetze) und die jeweilig verfügbare Stromstärke (Primär in Abhängigkeit der jeweilig verbauten Überstromsicherung) berücksichtigt werden.

Beim kabelgebundenen Laden sind die elektrifizierten Stecker noch nicht vollständig vereinheitlicht. Zurzeit bekannte Ladesteckerarten sind u.a. CHAdeMO-, CCS- und Schuko-Stecker. Die Auswahl des Steckers hat Auswirkungen auf die Wahl der Ladedose und das Spektrum der Spannungen sowie der Ströme, die geleitet werden können. Zum kabelgebundenen Laden gehört ein Ladegerät, bestehend aus einem Gehäuse mit entsprechender Steuerungs- und Schaltungselektronik, ähnlich der Leistungselektronik der Motorsteuerung in Abschnitt 5.1.1.2 (IGBT, MOSFET, Kondensatoren).

Das kabellose Laden hat dagegen ein im Fahrzeug verbautes Spulensystem zur Energieübertragung. Beide Systeme müssen je nach Ladeleistung gekühlt werden, sie benötigen eine Abschirmung hinsichtlich elektromagnetischer Wellen (EMV) und einen Kommunikationsaustausch mit dem elektrischen Netz, an welches das Fahrzeug angebunden wird.

Die Ladeleistung ist gleichermaßen abhängig von den fahrzeugseitigen Systemen wie auch von der Ladeinfrastruktur (mit Stromnetz, Ladesäule, etc.). Auf letztgenannten Punkt wird im Weiteren nicht näher eingegangen, vertiefend ist dies z.B. hinsichtlich der Bewertung und des Ausbaus der Ladeinfrastruktur in [KleF-2011] ausgearbeitet.

Ein Vernetzungsdiagramm der Ladetechnologie ist im Anhang *D10 Segment 1 – Segmentgruppe Ladetechnologie* dargestellt.

5.1.2 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Fahrwerk

Das Segment Fahrwerk umfasst die Segmentgruppen Achse, Reifen, Bremsen sowie fahrdynamische Sicherheitssysteme. Das Segment trägt insbesondere zu Querdynamik des Fahrzeuges bei und hat damit wesentlichen Einfluss auf die Empfindungen des Nutzers zum Fahrverhalten (siehe auch Längsdynamik des Antriebes im vorherigen Abschnitt 5.1.1). Ein Netzdiagramm dieses Segmentes ist im Anhang *D11 Segment 2 – Fahrwerk* zu sehen.

Die Unterteilung der Achse in die Baugruppen Vorder- und Hinterachse ist bei PKWs weiter differenzierbar in Lenk- und Antriebsachse. Sowohl Hinter- als auch Vorderachse können Antriebsachsen sein. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Vorderachse die Funktion der Lenkachse übernimmt und entsprechend ausgerüstet wird (Unterbaugruppe Lenkung). Die Auslegung der Lenkgeometrie mit Lenkrollradius, Spreizungsversatz, Störkrafthebelarm, Sturzwinkel etc. (vgl. [Pfh-2011]) wird nicht weiter berücksichtigt, da hier kein wesentlicher Unterschied zu konventionellen Fahrzeugen besteht.

Die Auswahl der Achsenart erfolgt nach topologischen und Packagekriterien. In die derzeit weltweit produzierten Autos werden als Vorderachse vor allem die McPherson- Aufhängung (2005 weltweit 78%) und die Doppelquerlenkerachse (20%) verbaut. Für die Hinterachse werden bei rund der Hälfte der produzierten Fahrzeuge zwei verschiedene Achssysteme verbaut, zum einen die Verbundlenkerachse (2005 weltweit 26%) und zum anderen die Starr- bzw. Mehrlenkerachse (23%) [HEG-2011]. Sowohl in die Mehrlenkerachse als auch in die Doppelquerlenkerachse kann eine E-Maschine als Koaxialmotor integriert werden.

Anstelle einer Antriebswelle kann auch ein Radnabenmotor zum Einsatz kommen. Radnabenantriebe haben den Vorteil, dass durch den Wegfall des zentralen Motors Bauräume entstehen. Gegen die Radnabenmotoren sprechen zurzeit jedoch neben dem Preis auch ihre Größe bei entsprechender Dimensionierung (z.B. für Bordsteinauffahrten etc.), und der Verbau je Rad (im Vergleich zu einer zentralen E-Maschine). Die höhere Anzahl an Radnabenmotoren führt auch dazu, dass die ungefederten Massen sich im Verhältnis zur Fahrzeugmasse mit entsprechenden Nachteilen erhöhen.

Die Achsen bauen im Allgemeinen auf einem Achsträger (Hilfsrahmen) auf, der die jeweiligen Bauteile wie Radträger, -Nabe oder Lager beinhaltet. Auch die Federung und Dämpfung wird auf dem Achsträger integriert, was vor allem aus Produktionssicht den Vorteil des kompakten Zusammenbaus bietet.

Federung und Dämpfung werden hier jedoch als Baugruppe der Segmentgruppe Rad zugeordnet. Die weitere Baugruppe wäre der Reifen, von dem z.B. der Rollwiderstandsbeiwert (Abbildung 3-7) und von dessen Reifenradius z.B. der Massenfaktor (vgl. Abbildung 3-8) abhängig ist.

In der Segmentgruppe Bremse muss bei elektrifizierten Antrieben berücksichtigt werden, dass der Unterdruck der VKM (Benziner) nicht ständig zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 5.1.1). Der Bremskraftverstärker muss mit einer elektrischen Vakuumpumpe ausgerüstet werden, die zusätzliche elektrische Energie erfordert. Dies ist auch für andere Baugruppen aus der Segmentuntergruppe fahrdynamische Sicherheitssysteme der Fall. Die elektrische Energie steht dann nicht mehr für den Vortrieb des Fahrzeuges zur Verfügung (vgl. Tabelle 3-2). Die weiteren Baugruppen in der Segmentgruppe Bremse bestehen aus der Betriebsbremse und der Feststellbremse. Beide sind wie bei konventionellen Fahrzeugen im Fahrzeug vorzusehen und auszulegen. Die aktive Sicherheit des Fahrzeuges wird durch fahrdynamische Sicherheitssysteme wie ABS, ESP, ASR oder RSC und damit verbundenen Eingriffe in das Bremsverhalten des Fahrzeuges fahrsituationsabhängig unterstützt (vgl. 3.4 *Auslegung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit*).

5.1.3 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment elektronische und mechatronische Systeme der Bodengruppe

Das Segment elektronische und Mechatronische Systeme bezieht sich primär auf Elemente der Bodengruppe und teilt sich in zwei Segmentgruppen auf. Die Segmentgruppen sind zum einen Systeme, die zum Kundenkomfort beitragen, zum anderen die Sensorik für Systeme der Fahrerassistenz, die zur aktiven Sicherheit des Fahrzeuges bzw. der Insassen und beteiligter Dritter beitragen und Unfälle vermeiden sollen.

Der wesentliche Unterschied zu konventionellen Fahrzeugen besteht in der fehlenden Abwärme der VKM für das Heizen des Innenraumes und dem mechanischen Riemenantrieb, der von der VKM abgeht und den Klimakompressor betreibt. Beide Baugruppen müssen durch elektrifizierte Lösungen ersetzt werden. Dies führt dazu, dass ein Teil der verfügbaren Energie aus dem Hochvoltbatteriesystem nicht für den Vortrieb, sondern, je nach Kundenwunsch, für den Komfort eingesetzt wird. Gleiches gilt für die Assistenzsysteme und das Infotainmentsystem im Fahrzeug. Diese werden über das Bordnetz gespeist, welches wiederum über den DC/DC-Wandler der Leistungselektronik mit dem Hochvoltbatteriesystem verbunden ist (siehe Abschnitt 5.1.1.2). Hinsichtlich des Leistungsbedarfs der Niedervolt-Bordnetzgeräte ist ein negativer Einfluss auf die elektrische Reichweite, also auf die für die Fahrzeuglängsdynamik zur Verfügung stehende elektrische Energie der Traktionsbatterie z.B. von mechatronisch komplexeren Getrieben, den Betrieb des Kühlerlüfters, der Fahrzeugbeleuchtung oder den beheizbaren Scheiben, zu erwarten.

Bei den Modulen und Komponenten, die direkt am Hochvoltsystem angeschlossen sind (z.B. beim Klima-System), wird ein nennenswerter Teil der verfügbaren elektrischen Energie verbraucht.

Für die Verbindung der Bauteile sind das elektrische Kabel und dessen Kabelquerschnitt als Geometrieparameter ein Beispiel der topologischen Auslegung. Der Kabelquerschnitt ist ohne die Betrachtung der geometrischen Position von Quelle bzw. Senke (Leitungslänge), der Spannung im System und dem zu übertragenden Strom nicht bestimmbar. Beeinflussbare Kriterien im Hinblick auf den Kabelquerschnitt sind neben der Positionierung von Quelle und Senke durch das Package der Werkstoff des Kabels. Gleiches gilt für Fluidleitungen, wie sie für die VKM oder die Kühlung benötigt werden.

Das Segment 3 und die dazugehörigen Segmentgruppen sowie deren Baugruppen sind im Anhang *D12 Segment 3 – Elektronische und mechatronische Systeme* als Vernetzungsdiagramm dargestellt.

5.1.4 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Fahrzeugkarosserie

Das Segment Fahrzeugkarosserie besteht aus den Segmentgruppen Bodengruppe, Rohbau / Aufbau (Exterieur), Rohbau / Aufbau (Interieur) sowie Sicherheits- und Zusatzsysteme. Da vorerst keine großen Absatzzahlen bei elektrifizierten Fahrzeugen in den einzelnen Segmenten erwartet werden, ist es für Volumenhersteller ratsam, im Sinne einer Kosten- und Aufwandsreduktion elektrifizierte Produktvarianten auf bestehenden Fahrzeugen aufzubauen. Dies bedeutet, dass ein maximaler Anteil der Bodengruppe, des Exterieurs und des Interieurs dem konventionell angetriebenen Produkt entspricht. Aus diesem Grund konzentriert sich diese Arbeit auf einen Ausschnitt der verbauten Elemente im Fahrzeug. Der Hauptfokus liegt auf dem Werkstoff der Bauteile und der sich ergebenden Gewichte sowie einer sicheren Fahrgastzelle durch entsprechende Konstruktion der Träger und Säulen in den entsprechenden Segmentgruppen. Die Konstruktion des Aufbaus und der Bodengruppe (selbsttragender Aufbau, Hybridbauweise, Space-Frame, etc.) ist vom Entwickler unter topologischen Gesichtspunkten zu wählen. Gleiches gilt für die geometrische Dimensionierung der Träger, bezogen auf das Fahrzeuggewicht und Lastanforderungen (Abbildung 3-15) sowie in Abhängigkeit der zu erzielenden Widerstandsmomente und Produzierbarkeit (Schweißbarkeit der Bleche hinsichtlich der Materialstärke) vgl. *3.4.2 Zusammenspiel Fahrzeugsicherheit und Karosserie*.

Die Segmentgruppe Sicherheits- und Zusatzsysteme besteht aus mechatronischen bzw. elektronischen Systemen in der Karosserie. Dazu zählen z.B. die elektrischen Fensterheber, ein ausstellbares Panoramadach, Bildschirme in den Sitzen und ein Kühlschranks im Kofferraum (für Fondpassagiere in Oberklassefahrzeugen). Weiter hinzugezählt werden Bauteile, die zur passiven Sicherheit des Fahrzeuges bzw. der Insassen oder beteiligter Dritter führen. Dazu gehören das Gurtsystem, die Airbags sowie eine durch den Aufbau bedingte sichere Fahrgastzelle (vgl. *3.4 Auslegung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit*). Passive Sicherheitssysteme sollen die Unfallfolgen mindern.

Die zu den Segmentgruppen gehörenden Baugruppen sind im Vernetzungsdiagramm im Anhang *D13 Segment 4 – Fahrzeugkarosserie* dargestellt. Im Vernetzungsdiagramm wird dabei von Längs- und Querträgern ausgegangen, so dass diese beim Rahmenaufbau (Gitterrohrrahmen, Zentralrohrrahmen oder als Leiterraum) entsprechend ersetzt werden.

5.1.5 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Maßkonzept und Ergonomie

Das Segment Maßkonzept und Ergonomie ist für die Konzeptentwicklung das wichtigste Segment und setzt sich aus den Segmentgruppen Bauräume und Ergonomie zusammen. Eine Forderungen an die Konzeptentwicklung ist das Vorhalten und Definieren von Bauräumen im Fahrzeug über das Maßkonzept (vgl. 4.3.2 *Ende der Konzeptentwicklung*). Diese Bauräume sind als abstrakte Produktelemente zu sehen und können über Merkmale (z.B. räumliche Anordnung, Abmessung und zum Teil auch die Geometrie vgl. Abbildung 2-14) beschrieben werden. Der Vorhalt von Bauräumen spiegelt ein Basis-Package und damit eine übergeordnete Produktstruktur wieder. Dabei muss insbesondere die Ergonomie späterer Nutzer über das Maßkonzept Berücksichtigung finden (vgl. 3.1.1 *Maßkonzept*). Dazu müssen die Bauräume im Entwicklungsverlauf mit Bauteil-Dummys oder mit Produktelementen gefüllt werden. Der Konzeptentwickler muss diese Teile-Bauräume in der frühen Phase der Entwicklung über Maße festlegen. Insbesondere bei einer freien Architekturwahl (Abbildung 4-19) ist dieses Segment hinsichtlich der Bedürfnisse des Nutzers und bei der Markendifferenzierung (vgl. 4.1 *Produktstrategie in der Automobilindustrie*) zu berücksichtigen.

Über die Bauräume können in der frühen Phase Fahrzeugeigenschaften bestimmt werden, ohne explizit Bauteile konstruiert zu haben (vgl. 4.4.1.2 *Topologie*). Um mit einem elektrifizierten Fahrzeug (F-Cell, BEV oder PHEV) eine ausreichende Reichweite darstellen zu können, wird als Ziel von der USABC (Forschungsvereinigung von US-Automobilherstellern) eine Energiedichte in der Traktionsbatterie von 230 Wh/l bis 300 Wh/l ausgegeben (vgl. [GVL-2013]). Wenn ein Bauraum für die Traktionsbatterie definiert ist, kann über das Volumen und die abgeleitete Energiedichte der aktuellen Zelltechnologie (vgl. 3.6.1 *Elektrischer Energiespeicher*) die Energie der Traktionsbatterie abgeschätzt werden.

Über das Maßkonzept ergeben sich weitere Punkte (z.B. Gurt-Anbindungspunkte) und Flächen (z.B. Fahrzeuggrundfläche, Stirnfläche, etc.). Die Fahrzeuggrundfläche ist für den Footprint, die Stirnfläche (projizierte Fläche) für den Fahrwiderstand von Bedeutung (vgl. 3.2 *Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*). So wird auf Basis des Footprint des Fahrzeuges in den USA nach der CAFE-Gesetzgebung der durchschnittliche Verbrauch für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ermittelt (vgl. [FVS-2013] und [CFR 49-2006]).

Im Entwicklungsprozess werden die Bauräume und Maße teilweise zu Randbedingungen für den bauteilbezogen arbeitenden spezifischen Serienentwickler (vgl. Abbildung 4-9 und Abschnitt 4.2.1 *Entwicklungsphasen und Rahmenbedingungen*).

Bei der Betrachtung der Bauräume ist die Sichtweise insbesondere der Interessensgruppen (vgl. Abbildung 4-23) wichtig. So ist das Sichtfeld des Fahrers u.a.:

- eine politisch bzw. rechtliche Anforderung (vgl. § 35b StVZO - Einrichtungen zum sicheren Führen der Fahrzeuge),
- für den Konzeptentwickler ein über Merkmale für das Fahrzeug zu definierender Raum und

- für den Kunden bzw. Fahrer eine Eigenschaft (Übersichtlichkeit, die er im Fahrzeug erfährt).

Die verschiedenen Sichtweisen würden, entsprechend der hier angewendeten Methodik (vgl. 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften*), zu einer Vermischung von Merkmalen und Eigenschaften führen. Daher werden Bauräume und Maße in dieser Arbeit als Merkmale für das Fahrzeug und somit aus der Sicht des (Konzept-) Entwicklers betrachtet.

Bauräume und Maße, die in der frühen Phase der Konzeptentwicklung zur Abschätzung und Proportionierung dienen, sind in Anhang *D14 Segment 5 – Maßkonzept und Ergonomie* dargestellt.

5.1.5.1 Bauräume des Fahrzeugkonzeptes

Bei den Bauräumen können drei Arten differenziert werden. Dies sind Bauräume, die sich

1. primär aus Sicherheitsgründen herleiten lassen,
2. die für Produktionsmittel vorgehalten werden und
3. die innerhalb der Bodengruppe oder des Aufbaus definiert werden.

Zu den Sicherheitsbauräumen zählen Räume/ Flächen, die aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen oder für den Kunden (z.B. Verbotflächen wegen Lichtspiegelung) freigehalten werden. Dazu gehören auch Bauräume, die der Geländegängigkeit des Fahrzeuges sowie als Deformationszonen zur passiven Sicherheit im Fahrzeug dienen (vgl. 3.4 *Auslegung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit* und Anhang *D15 Deformationszonen im Fahrzeug*). Deformationszonen sollen die Energie bei einem Aufprallszenario mittels Intrusion von Elementen ermöglichen. Dabei dürfen der für die Nutzer wichtige Überlebensraum (Fahrgastzelle) und sicherheitsrelevante Komponenten nicht betroffen sein [BuI-2013]. Ziel ist es, eine gute Bewertung im Crashtest zu erhalten (vgl. Abbildung 3-13).

Für Produktionsmittel gibt es zusätzliche Räume, die vorgehalten werden müssen, um z.B. Spur- und Sturzeinstellung (vgl. [HEG-2011]) nach der Montage mit entsprechenden Werkzeugen vornehmen zu können.

Mit den Maßen der Bauräume innerhalb der Bodengruppe bzw. des Aufbaus definiert der Konzeptentwickler das Fahrzeug in der frühen Phase. Dies erfolgt unter der Annahme, dass der sich bildende Raum mit entsprechenden Produktelementen gefüllt wird. Auf dieser Basis lässt sich, wie bereits in Abschnitt 5.1.5 aufgezeigt, die Energie der Traktionsbatterie vorhersagen und so Fahrzeugeigenschaften heuristisch abschätzen.

Für die Konzeptentwicklung ist in diesem Zusammenhang eine Abschätzung des Fahrzeuggewichts sowie der Achslastverteilung von besonderer Bedeutung, da viele Bauteile in Abhängigkeit von diesen Fahrzeugeigenschaften ausgelegt werden. Das Fahrzeuggewicht kann z.B. über die neuen Fahrzeugmaße bestimmt werden, in dem ein Bezug zum Vorgängermodell hergestellt wird (vgl. [FuL-2013]). Mit dem erwarteten Gewicht kann bei elektrifizierten Fahrzeugen der Verbrauch ermittelt (vgl. über Faktorbestimmung [BuI-2013] oder Simulation [FuL-2013]) und durch die Bestimmung der verfügbaren Bauräume für die Traktionsbatterie (Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung*) die

elektrische Reichweite abgeschätzt werden [BuI-2013]. Außerdem kann bei entsprechender Anordnung der Bauräume die Achslastverteilung abgeschätzt werden. Das bedeutet, dass sich die Eigenschaften Gewicht, Reichweite, Energieinhalt und Achslastverteilung über ein Maßkonzept in der frühen Phase herleiten lassen.

Die im Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung* vorgestellten Bauräume im Fahrzeug werden nur zum Teil auf Basis der heute bei konventionellen Fahrzeugen verwendeten Maße beschrieben (vgl. *3.1.1 Maßkonzept*). Bauräume, wie z.B. der Fahrzeugtunnel, die bei konventionellen Fahrzeugen für Kardanwelle und Abgasanlage vorgesehen sind, haben in elektrifizierten Fahrzeugen als sicherer Bauraum für die Traktionsbatterie eine höhere Bedeutung. Für die Unterbringung von Batteriezellen prädestinierte, also geschützte, Bauräume sind für Abschätzungen bereits in der Konzeptphase zu bemaßen.

Auch eine Baukastenstrategie hat Auswirkungen auf die Bemaßung von Bauräumen. Beispielsweise sind die Bauräume unter der ersten und zweiten Sitzreihe in den Fahrzeugklassen ähnlich. Der Aufbau der Sitze ändert sich je nach Wertigkeit des Produktes, die Größe der Nutzer bleibt hingegen gleich (bei gleicher Region und Perzentil des Maßkonzeptes). Im Sinne einer Ähnlichkeitsanalyse (vgl. *4.5.3 Produktvarianz*) werden diese Bauräume über Produktgruppen hinweg verglichen (vertikal und homogen, vgl. Abbildung 4-16).

Die Bauräume müssen daher um neue Maße zur detaillierteren Definition ergänzt werden (vgl. in Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung* Maße mit ergänzenden Buchstaben).

5.1.5.2 Ergonomie-Maße im Fahrzeugkonzept

Ergonomie- Maße (vgl. Abbildung 3-2) beziehen sich auf die Insassen im Fahrzeug und die Handhabung des Fahrzeuges (Bedienkonzept). Mit der RAMSIS- Puppe³⁰ kann der Entwickler bestimmte Körperlängen und Verhältnisse sowie Blickwinkel definieren, die für den Nutzer zu bestimmten Fahrzeugeigenschaften führen (vgl. das in Abschnitt *5.1.5* angesprochene Sichtfeld des Fahrers). Dabei ist die in Abschnitt *5.1.4* getroffene Annahme, dass ein Großteil der Bodengruppe bzw. des Aufbaus dem konventionell angetriebenen Produkt entspricht, zu berücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass die Ergonomie und große Teile des Bedienkonzeptes vom konventionellen Fahrzeug übernommen werden. Daher werden im Folgenden nur die für die Elektrifizierung nötigen Ergonomie-Maße berücksichtigt. Dazu gehören der H- bzw. R-Punkt für die Insassen und die im Anhang *D14 Segment 5 – Maßkonzept und Ergonomie* dargestellten Maße.

Der Hackenaufstellpunkt des Fahrers wird neu hinzugezogen, damit der Bauraum unter den Sitzen auch ergonomisch definiert werden kann. Dieses Maß könnte auch bei konventionellen Fahrzeugen, insbesondere für Langstrecken- und automatikgetriebene Fahrzeuge, von Bedeutung sein. Die vorge-

³⁰ RAMSIS Puppen wurden von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) des Verbands der Automobilindustrie (VDA) zur CAD-Simulation von Ergonomie-Ansprüchen in Fahrzeugen als virtuelles Menschmodell entwickelt [HSG-2013].

stellten Ergonomie-Maße können mit entsprechenden Auswirkungen auf den Aufbau variiert werden, wie z.B. durch eine neue Positionierung der Sitzplätze innerhalb der Bodengruppe (vgl. Anhang *D17 Auswirkung des Maßkonzepts*). Das Sichtfeld der Fond-Passagiere muss dabei an der Positionierung der Passagiere der ersten Sitzreihe ausgerichtet werden. Ergonomie-Maße, die den Nutzer außerhalb des Fahrzeuges betreffen, sind z.B. die Höhe der Ladedose. Da es noch keine einheitliche Anordnung der Ladedose gibt (vgl. Abbildung 3-34) und der elektrische Ladevorgang im Vergleich zur Kraftstoffbetankung an Häufigkeit zunimmt, ist ein ergonomisches Maß für die Höhe der Ladedose zu definieren (vgl. *3.6.4.3 Position der Ladeeinrichtung*).

5.2 Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge

Die in Abschnitt 5.1 aufgezeigten Produktelemente bzw. ihre Merkmale haben Eigenschaften zur Folge, die untereinander in Verbindung stehen. Der „innere“ Zusammenhang der Produktelemente ist mit dem in *4.4.1 Strukturierung eines Konzeptes* aufgezeigten Vorgehen verbunden. Darüber hinaus stehen Eigenschaften in einem „äußeren“ Zusammenhang zu den Anforderungen der involvierten Interessensgruppen des Produktes (Abbildung 4-23). Erst über den Vergleich von Ist- und Soll-eigenschaften des Produktes kann eine ausreichende Kenntnis über das Produkt erlangt werden (vgl. *4.2.3 Bewertung von Ergebnissen in den Entwicklungsphasen*). Ausgehend von den im Abschnitt 5.1 eingeführten Vernetzungsdiagrammen der einzelnen Segmente sind die komplexen Verbindung der Eigenschaften und deren „interne“ Vernetzung im Produkt im Anhang *D18 Fahrzeugeigenschaften die aus den Merkmalen der Produktelemente resultieren* dargestellt.

5.2.1 Fahrzeugeigenschaften aus Sicht der Interessensgruppen

Die Eigenschaften aus den in Abschnitt 5.1 aufgebauten Vernetzungsdiagrammen können in zwei Bereiche klassifiziert werden. Zum einen gibt es Eigenschaften, die nur durch ein einzelnes Bauteil bzw. dessen Merkmale bestimmt werden (in Abbildung 5-3 als Eigenschaft dargestellt), die jedoch in der Synthese (vgl. *2.4.2 Produktentwicklungsprozess* und *4.2 Der Entwicklungsprozess komplexer Produkte in großen Unternehmen*) von anderen Eigenschaften beeinflusst werden. Dazu gehört z.B. die Spannung oder das Gewicht einer einzelnen Traktionsbatterie. Zum anderen werden viele Fahrzeugeigenschaften durch mehrere Produktelemente beeinflusst (In Abbildung 5-3 als vernetzte Eigenschaften dargestellt). Somit umfassen diese Eigenschaften mehrere Produkteigenschaften bzw. sind von diesen abhängig.

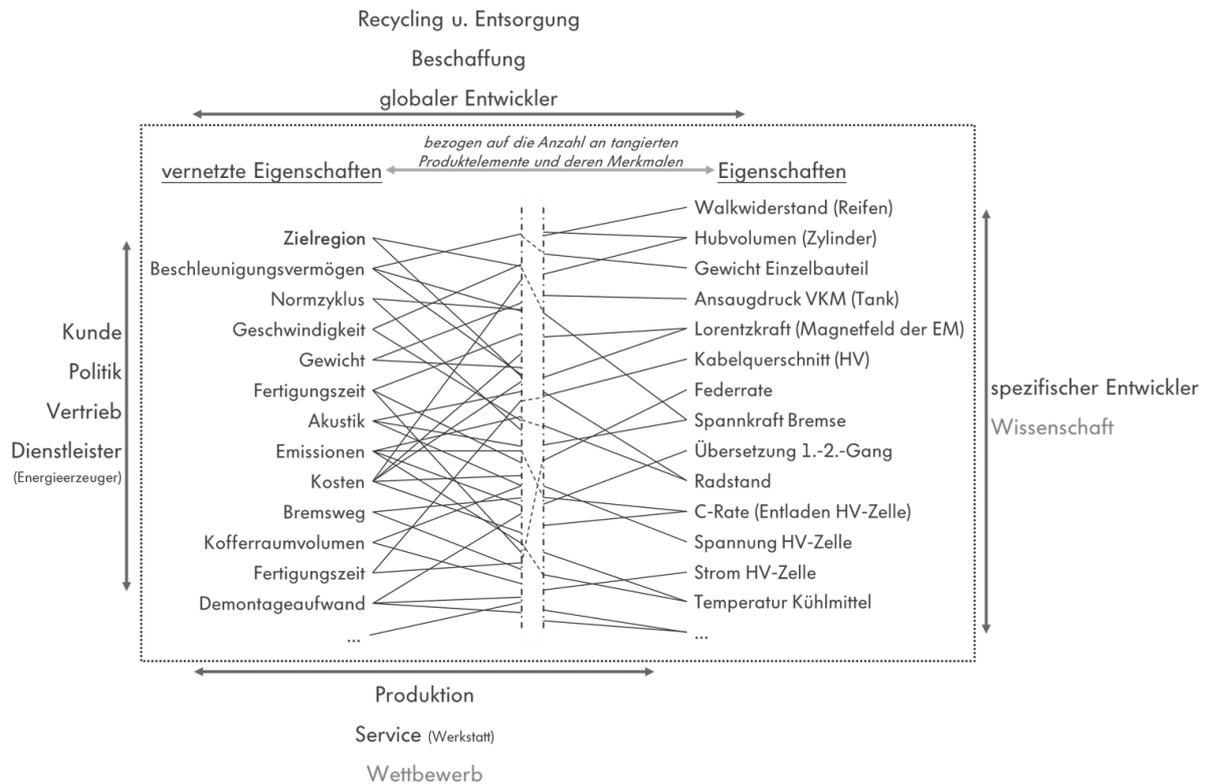


Abbildung 5-3 Klassifizierung von Fahrzeugeigenschaften bezogen auf die Interessensgruppen

Beispiele hierfür sind die projizierte Frontfläche und der cw-Wert des Fahrzeuges, welche beide in die Berechnung des Fahrwiderstandes ($cw \cdot A$ in 3.2.1 *Luftwiderstand*) eingeht, der Energieverbrauch des Fahrzeuges je Kilometer (fossiler oder elektrischer Art) oder die Akustik. Letztere Eigenschaft ist gleich zu derjenigen von konventionellen Fahrzeugen, was die Abrollgeräusche betrifft. Beim elektrischen Fahren kann es zu einer stärkeren Wahrnehmung von Abrollgeräuschen durch den Nutzer kommen, da das überlagernde Geräusch der VKM fehlt. Dies führt wiederum zu neuen Anforderungen der Anspruchsgruppen (Abbildung 4-23). Dabei stehen, hinsichtlich der quantitativen Anforderungen an das Produkt (vgl. 4.4.2 *Anforderungen und Randbedingungen in der Konzeptentwicklung*), primär die vernetzten Eigenschaften mit den Soll-Anforderungen zu den Ist-Eigenschaften in Bezug.

Die in Abbildung 4-23 aufgezeigten Interessensgruppen können auch hinsichtlich ihres Bezugs auf die Eigenschaften unterschieden werden. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass der Hersteller den gesamten Produktlebenszyklus (Abbildung 2-12 und Abbildung 4-1) betreut und die Anspruchsgruppen, in Bezug auf den Hersteller weiter untergliedert. In diesem Zusammenhang wird außerdem zwischen dem global und dem spezifisch arbeitenden Entwickler (Abbildung 4-9) differenziert.

5.2.1.1 Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf spezifische Entwickler und Wissenschaft

Die Eigenschaften (Abbildung 5-3) der Komponenten oder Bauteile stehen im Fokus des spezifischen Entwicklers, der bestmögliche Ergebnisse aus dem jeweiligen Produktelement zu generieren versucht (z.B. packageseitig die Kapazität der Zelle im kleinsten Raum zu maximieren). Darüber hinaus muss der spezifische Entwickler seine Bauteile bzw. dessen Merkmale an die anderen Module und Kompo-

nen im Fahrzeug anpassen (z.B. muss er aus der Topologie des Fahrzeuges bzw. Baukastens eine geeignete Spreizung der Gänge im Getriebe finden).

Forschungsergebnisse aus der Wissenschaft haben Einfluss auf einzelne Komponenten oder Bauteile bzw. deren Merkmale (z.B. die Verwendung neuer Werkstoffe für den Leichtbau oder die Beschichtungen von Zylinderlaufflächen). Es werden somit erst einmal Eigenschaften verändert, die dann Auswirkung auf die vernetzten Eigenschaften und damit auf das Gesamtfahrzeug haben.

5.2.1.2 Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Kunde, Politik, Vertrieb und Dienstleister

Anspruchsgruppen (vgl. Abbildung 4-23) wie Kunde, Politik, Vertrieb und Dienstleister beziehen sich zumeist auf die vernetzten Eigenschaften (Abbildung 5-3). Diese sind u.a. von der Zielregion³¹ geprägt. In einer Zielregion leben bestimmte Kunden, die gewisse Serviceansprüche haben, welche mit einem entsprechend differenzierten Angebot von Dienstleistungen einhergehen.

In den USA haben Kunden andere Anforderungen an die Anmutung des Interieurs oder den Zeitraum bis zur Verfügbarkeit des Fahrzeuges (Kauf direkt aus dem Showroom) als in der EU. Auch die Anforderungen an Reichweite, Verbrauch sowie Ökologie unterscheiden sich je nach Region. Entsprechend haben individuell geregelte Gesetze und Verordnungen einen Einfluss. Beispielsweise wird der Verbrauch gemäß regionsspezifischer Fahrzyklen differenziert ermittelt (vgl. 3.3 *Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsgründen*). Es gelten regionsspezifische Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit (vgl. 3.4.1 *Gesetzgebung und Testverfahren*). Vom Kunden bzw. seiner Zahlungsbereitschaft ist auch der Ertrag (Abbildung 4-33) abhängig, der zu den vernetzten Eigenschaften gehört. Die Zahlungsbereitschaft des Kunden ist zumeist abhängig von expliziten vernetzten Eigenschaften. Auch Subventionen (Vergünstigungen) des Staates orientieren sich an vernetzten Eigenschaften und bestimmten Grenzwerten für diese. Neben Subventionen müssen auch Strafzahlungen berücksichtigt werden, wenn z.B. CO₂-Grenzwerte der Flotte nicht eingehalten werden (vgl. Tabelle 3-3). Der Kunde berücksichtigt nicht eine bestimmte Spannung der Zelle oder deren individuellen Energieinhalt, sondern er gleicht die motorische Leistung oder die Reichweite (beides vernetzte Eigenschaften) mit seinem subjektiven Nutzungsprofil ab. Der Vertrieb bedient diese Ansprüche, indem er seine Forderungen an das Produkt an diesen ausrichtet. Auch der Staat wird Kaufanreize oder Restriktionen an vernetzten Eigenschaften festlegen (z.B. Emissionen, Reichweite oder Akustik).

Dienstleister ergänzen in der Nutzungsphase (Abbildung 4-1) das Angebot für den Kunden länderspezifisch. Beispielsweise können Energieerzeuger elektrifizierte Fahrzeuge als Zwischenspeicher für regenerative Energien nutzen und dem Kunden diese netzstabilisierende Maßnahme vergüten (vgl. [INEES-2013]).

³¹ Als Region werden ein oder mehrere Staaten (Wirtschaftsräume) mit gleichen, zum Teil gesetzlichen Anforderungen an das Produkt verstanden (z.B. EU27).

5.2.1.3 Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Produktion, Service und Wettbewerb

Die für die Produktion wichtigen Produkteigenschaften (Abbildung 5-3) hängen zum einen mit der Fertigungstiefe und dem Produktionsort (Region) zusammen. Bei der Fertigung von Komponenten sind z.B. Eigenschaften wie das Tiefziehverhalten oder die Gießbarkeit (z.B. daraus resultierende Entformungsschrägen) der Werkstoffe von Interesse. In der Montage werden Module und Komponenten zu einem Endprodukt zusammengesetzt und dieses dem Erstnutzer/ Verbraucher zugeführt oder an entsprechende Händler übergeben. In diesem Fall sind vorrangig vernetzte Eigenschaften von Interesse, welche z.B. Auswirkungen auf die Montagemaschinen (z.B. das Fahrzeuggesamtgewicht) oder die Lagerung von Komponenten an der Montagelinie (z.B. Spannung von Batteriemodulen) haben. Die Produktion ist darüber hinaus von der Zielregion abhängig, da sich z.B. die Lohnkosten in den jeweiligen Produktionsstandorten unterscheiden und auch Logistikkosten berücksichtigt werden müssen. Ein Standort mit hohen Lohnkosten hält auch eine höhere Automatisierung vor, was entsprechende Auswirkungen auf das Produkt (z.B. Fügefolgen) hat. Darüber hinaus sind weitere Faktoren wie Wechselkurse sowie Zölle³², Rohstoffverfügbarkeit und die örtliche Infrastruktur zu berücksichtigen.

Der Service am Produkt in der Nutzungsphase (Abbildung 4-1) richtet sich z.B. nach Möglichkeiten und Ansprüchen an die Montage/ Demontage von Bauteilen (z.B. Öl- oder Leuchtmittelwechsel).

Der Wettbewerb als Bezugsgruppe dient zum Vergleich mit dem entstehenden Produkt. Dabei werden primär vernetzte Eigenschaften zwischen den Produkten (z.B. Spritverbrauch) und erst im weiterführenden Schritte (wenn überhaupt möglich) Eigenschaften verglichen.

5.2.1.4 Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf Recycling, Entsorgung, Beschaffung und globalen Entwickler

Das Recycling wird im Folgenden nach Wiederverwendung, Weiterverwendung oder Verwertung differenziert:

- Die Wiederverwendung des Fahrzeugs oder von einzelnen Modulen ist abhängig von Zielregion. Der Grund der Wiederverwendung liegt im Gegenwert der vernetzten Eigenschaften (Abbildung 5-3).
- Bei der Weiterverwendung liegt der Fokus auf den vernetzten Eigenschaften, insbesondere von Funktionen einzelner Module oder Komponenten.
- Die Verwertung bezieht sich primär auf Eigenschaften des verwendeten Bauteils, ausgehend vom Merkmal des Werkstoffs, um diesen dem Wirtschaftsprozess erneut zuzuführen.

Beispielsweise kann die Traktionsbatterie für die Weiterverwertung nur bis zu einem bestimmten Leistungsgrad in einem Fahrzeug verwendet werden. Jedoch ist weiterhin die Funktion als Zwischenspeicher, wenn auch in einer verringerten Quantität, z.B. stationär gegeben. Dies entspricht einer erweiterten Ausnutzung von Verbundeffekten (economies of scope vgl. [BDS-2010]). Dafür muss unter Be-

³² In diesem Kontext sind die CKD-Fertigung oder CBU-Fahrzeuge zu nennen, bei denen entsprechende Effekte, der Wiederausammenbau am Zielmarkt, zu berücksichtigen oder auszunutzen sind.

rücksichtigung der Kosten der Logistik und des Aufbaus ein regionaler Bedarf mit einer höheren Wertschätzung der Funktion bestehen, als durch die Erlöse der Verwertung des reinen Werkstoffes erzielt werden kann.

Bei der Entsorgung sind insbesondere die Eigenschaften des Werkstoffs von Relevanz, die bei einer Endlagerung berücksichtigt werden müssen (z.B. Veränderungen mit der Zeit der Lagerung oder Reaktionsfähigkeit mit anderen Stoffen).

Die Beschaffung ist ebenfalls abhängig von der Fertigungstiefe der Produktion. Dabei ist zu differenzieren, ob einzelne Batteriezellen (hohe Fertigungstiefe), Batteriemodule (vgl. Abschnitt 5.1.1.5) oder das Gesamtsystem Traktionsbatterie (geringe Fertigungstiefe) erworben wird. Entsprechend sind die für die Verhandlung nötigen Eigenschaften wie Wh/l (vgl. Abschnitt 5.1.1.5) oder W/kg bzw. Wh/kg (vgl. Abbildung 3-20) zu berücksichtigen.

Der globale Entwickler hat bei einer Baukastenstrategie die technische Aufgabe, die unterschiedlichen Produkte und die damit einhergehenden differenzierten Anforderungen des Kunden bzw. des Vertriebs (vgl. Abschnitt 5.2.1.2) in möglichst wenige Produktelemente zusammenführen. Die Bandbreite der vernetzten Eigenschaften soll mit wenigen Produktelementen und deren resultierenden Eigenschaften durch eine entsprechende Synthese erreicht werden.

5.2.2 Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften auf Basis von Anforderungen und Randbedingungen

Es gibt Fahrzeugeigenschaften, die wesentlich durch Einflüsse von „außen“ geprägt werden (vgl. 4.4.2 *Anforderungen und Randbedingungen in der Konzeptentwicklung*). Dies erfolgt insbesondere über Interessensgruppen und deren Anforderungen bzw. Vorschriften an das Fahrzeug. Beispielsweise sind das Produktionsrandbedingungen oder der Steigungswinkel (vgl. Tabelle 3-1). Der Steigungswinkel müsste auch ohne Vorhandensein einer rechtlichen Norm über die Fahrwiderstände (vgl. 3.2 *Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*) berücksichtigt werden. Jedoch haben in den gängigen Fahrzyklen (vgl. 3.3 *Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsgründen*) Steigungen keine Einfluss und werden bei der Ermittlung von Verbrauchseigenschaften und damit verbundenen Emissionen nicht beachtet. Außerdem ist der spätere Verbrauch bei elektrifizierten Fahrzeugen nicht direkt von den Produktelementen abhängig, sondern zumindest in Europa bedingt durch Verrechnungsformeln wie (3-12) bzw. (3-13). Der Kundenverbrauch kann also von ermittelten Durchschnittsverbrauch in einem Testzyklus stark abweichen (vgl. [BuI-2013] und Anhang *DI9 Kombiniertes Kraftstoffverbrauch aus Kundensicht*). Neben nicht berücksichtigten Einflüssen (z.B. Steigung) und rechtlich basierten Verrechnungsformeln hängt ein abweichender Kundenverbrauch auch davon ab, ob in den Testzyklen Nebenverbraucher betrieben werden. Die elektrische Leistung von HV- und NV-Geräten bzw. deren Verbrauch hat Einfluss auf die elektrische Reichweite der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 5.1.3) und bei Hybriden zusätzlich auf die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens (Funktion steht in Abhängigkeit vom Ladefüllstand der Traktionsbatterie).

Im Folgenden werden am Beispiel der Eigenschaft Geschwindigkeit, Anforderungen der Anspruchsgruppen und deren Auswirkung auf diese Eigenschaft aufgezeigt (Abbildung 5-4).

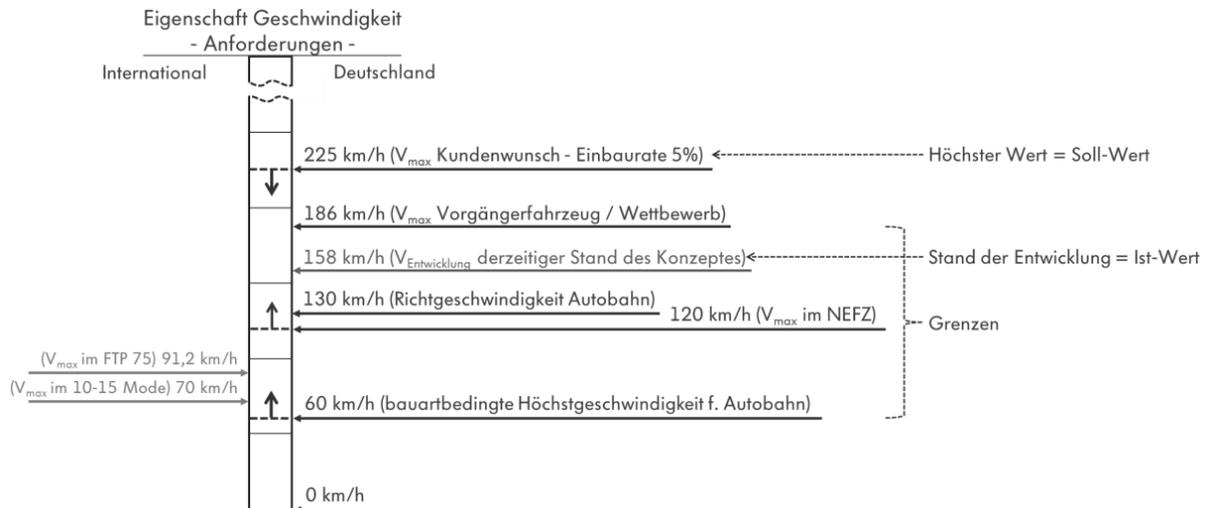


Abbildung 5-4 Anforderungen in Bezug auf die Eigenschaft Geschwindigkeit

Durch die Kombination von Produktelementen wird für das Fahrzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt der Entwicklung eine maximale Geschwindigkeit erzielt (Bsp. 158 km/h). In Deutschland liegt die Grenze der bauartbedingten Mindestgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen für die Autobahn bei größer 60 km/h. Im europäischen Zyklus wird eine maximale Geschwindigkeit von 120 km/h erreicht. Im US-Zyklus FTP 75 (91,2 km/h) und im japanischen 10-15 Mode (70 km/h) sind die maximalen Geschwindigkeiten geringer (vgl. 3.3 Auslegung aus Verbrauchs- und CO₂- Reduktionsgründen). Eine weitere Untergrenze kann die Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen sein (130 km/h). Als obere Grenzen können der am Markt ermittelte Kundenwunsch in Abhängigkeit der späteren Einbaurrate (Bsp. 225 km/h) sowie die Geschwindigkeit eines Vorgängerfahrzeuges oder eines Wettbewerbers (Bsp. 186 km/h) angenommen werden. Aus den Randbedingungen und Anforderungen ergibt sich ein Bereich, in dem Produktlösungen möglich sind. Diese stellen damit einen Teil des Lösungsraumes dar. Die in Abbildung 5-4 aufgezeigte Strukturierung ist für alle Eigenschaften möglich, jedoch differenziert sich diese in Abhängigkeit der Anspruchsgruppen (vgl. Abbildung 4-23).

Hinsichtlich der Lösungsfindung ist die Betrachtung einer einzelnen Eigenschaft (vgl. Abbildung 5-4) sowie, auf das gesamte Produkt bezogen, die Betrachtung aller Eigenschaften einzubeziehen (vgl. Abbildung 5-3). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die quantitative Definition von vernetzten Eigenschaften (im Sinne von Anforderungen an das Produkt vgl. Abschnitt 5.2.1) zu Zwangsbedingungen führen, weil bestimmte Kombinationen von Lösungsmöglichkeiten (Eigenschaften) aus technischen Gründen ausgeschlossen werden müssen. Mit dem Ziel, die bestmögliche technisch-ökonomische Lösung zu finden, sind im Zweifel die Verhältnismäßigkeit zwischen der Forderung an eine vernetzte Eigenschaft in Bezug auf den Aufwand für ein oder mehrere ursächliche Merkmale der entsprechenden Produktelemente zu betrachten.

Bei den vernetzten Eigenschaften ist zu berücksichtigen, dass zu hohe Anforderungen eine wirtschaftliche Lösungsfindung unmöglich machen können³³ (vgl. 4.2.4 *Entwicklungsteams im Produktentstehungsprozess*). Ziel ist es, die Anforderungen und Randbedingungen durch Veränderung der Merkmale in einer Synthese zu vereinen. Wenn dies nicht gelingt, müssen insbesondere die vernetzten Eigenschaften durch Reduzierung der Anforderungen der Anspruchsgruppen (Abbildung 4-23) (z.B. nur eine Zielregion) beschränkt werden (Kompromiss vgl. 4.2.3 *Bewertung von Ergebnissen in den Entwicklungsphasen*).

Die Komplexität der Lösungsfindung wird weiter durch Veränderungen auf der Seite der vernetzten Eigenschaften erhöht. Bei einer Baukastenstrategie müssen die Anforderungen zu Beginn der Entwicklung bekannt sein. Bei einer restriktiven Änderung von Anforderungen mit Einfluss auf die vernetzten Eigenschaften, z.B. durch neue zusätzliche Produkte oder eine geänderte Markenstrategie (vgl. 4.1 *Produktstrategie in der Automobilindustrie*), ist eine wirtschaftlich zielführende Entwicklung nicht mehr gewährleistet. Dies führt entweder zur Neukonstruktion von Modulen, was dem Einsparungseffekt einer Baukastenstrategie widerspricht, oder das Produkt wird nicht umgesetzt, was eine Schwächung der Marktposition zur Folge haben kann.

³³ Bei mehr als einer Zielregion, ist in „Region A“ der Anspruch, ein günstiges Kompaktklasse Fahrzeug zu bekommen, in „Region B“ ist die Anforderung an die Zulassung so hoch, dass kostenintensivere Technologie verbaut werden muss.

6 Anwendung und Umsetzung des Eigenschaftsnetzwerkes

In diesem Kapitel werden wesentliche Eigenschaften zur Auslegung elektrifizierter Fahrzeuge herausgearbeitet sowie ein Beispiel für die Anwendung einer Blackbox bei der Implementierung neuer Produktelemente dargestellt. Dies erfolgt auf Basis des in 5.2 *Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge* aufgezeigten Netzwerkes. Um die Möglichkeiten der Betrachtung von Eigenschaften von Produktelementen sowie deren Optimierung über die entsprechenden Merkmale explizit darzustellen, wird im zweiten Abschnitt dieses Kapitels basierend auf den in Kapitel 5 *Abhängigkeiten in der elektrifizierten Fahrzeugauslegung* erläuterten Bauelemente und deren Eigenschaften eine iterative Optimierung der Traktionsbatterie aus energetischer Sicht innerhalb einer Baukastenstrategie ausgeführt.

6.1 Analyse der Eigenschaften

Wie in 4.2.1 *Entwicklungsphasen und Rahmenbedingungen* aufgezeigt, müssen für die Lösungsentwicklung Anforderungen und Randbedingungen gegeben sein, damit der Entwickler erste Produkteigenschaften ermitteln kann. Mit der Problemstellung sind die benötigten Mittel (vgl. 4.2.4 *Entwicklungsteams im Produktentstehungsprozess*), um das Entwicklungsziel zu erreichen, bereitzustellen. Die Bedeutung der vernetzten Eigenschaften bei der Lösungsfindung wurde in 5.2.2 *Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften auf Basis von Anforderungen und Randbedingungen* aufgezeigt. Wie in 5.2.1 *Fahrzeugeigenschaften aus Sicht der Interessensgruppen* bereits festgestellt, ist die Zielregion eine der wichtigsten vernetzten Eigenschaften, die in der Produktplanungsphase (vgl. Abbildung 4-1) benannt werden muss. Die Zielregion muss zwischen den Interessensgruppen (Abbildung 4-23 bzw. Abbildung 5-3) differenziert werden, z.B. bei der Annahme, dass die Produktion in einem anderen Land erfolgt, als die spätere Nutzung (vgl. 5.2.1 *Fahrzeugeigenschaften aus Sicht der Interessensgruppen*). Demnach kann die Differenzierung in Bezug auf den Markt, in dem das Fahrzeug verkauft wird erfolgen, da von diesen Anforderungen und Randbedingungen der Kunden, Politik, Dienstleister und des Wettbewerbs abhängen. Außerdem kann mit dem Produktionsort eine weitere Zielregion definiert werden, von denen verfügbare Ressourcen und z.B. die Produktionstechnik abhängig sind. Die Zielregion muss demnach in Markt- und Produktionsregion differenziert werden, wobei in der Automobilindustrie und speziell bei einer Baukastenstrategie in beiden Fällen (Markt- und Produktionsregion) von Regionen ausgegangen werden kann.

Eine Erweiterung der Zielregionen hat eine Erhöhung der Anforderungen und Randbedingungen zur Folge, was sich in den Produkteigenschaften widerspiegelt. So ist beispielsweise bei verschiedenen regionalen Fahrzyklen (vgl. Abbildung 5-4 max. Geschwindigkeiten der Fahrzyklen) der anspruchsvollste zu wählen (z.B. NEFZ in Europa). Jedoch können hinsichtlich der Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit (3.4 *Auslegung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit*) aus einer anderen Region (z.B. USA mit den Federal Motor Vehicle Safety Standards) höhere Sicherheits-Ansprüche an das Produkt erhoben werden. Ein Fahrzeug, welches für unterschiedliche Märkte und in verschiedenen Regionen

produziert wird, muss demnach höhere Anforderungen und mehr Randbedingungen erfüllen. Wenn man davon ausgeht, dass mit der Erhöhung der Anforderungen und entsprechenden Auswirkungen auf die Fahrzeugeigenschaften auch die Kosten eines Produktes erhöht werden, folgt daraus, dass für ein günstiges Produkt bzw. einen günstigen Baukasten die Anzahl der Regionen (Markt- und Produktionsregion) minimiert werden muss. Für die Umsetzung einer Baukastenstrategie bedeutet dies, dass die höheren Anforderungen an das Produkt sich durch eine Stückkostendegression (vgl. [ZFH-2003]) amortisieren müssen. In diesem Zusammenhang sind Allokations- und Komplexitätseffekte in der Bewertung mit zu berücksichtigen.

Um für die Entwicklung Anforderungen in messbare Produkteigenschaften zu übersetzen, müssen der Zielregion in der Wichtigkeit folgende vernetzte Eigenschaften weiter aufgeschlüsselt werden. In Bezug auf das in 5.2 *Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge* eingeführte Eigenschaftsnetzwerk ergeben sich neben der Zielregion 21 vernetzte Eigenschaften (in Bezug auf Abbildung 5-3), die eine anfängliche Beschreibung des Produktes ermöglichen (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1 Vernetzte Eigenschaften zur Beschreibung des Produktes

Vernetzte Eigenschaften		Einheiten
Zielregion-	Normzyklus (+ möglichen Kundenzyklus)	NEFZ / FTP72 / 10-15 Mode
-Markt	Geschwindigkeit	max. km/h
-Produktion	Gewicht (Gesamtgewicht Fzg.)	kg
	Akustik	dB (Geräusche Innenraum / Außen)
	Emissionen	gCO ₂ /km; Stickoxide (NO _x)
	Kraftstoff - / Energieverbrauch	l/100 km und Wh/km
	Temperaturen (außen)	max. / min. °C
	Beschleunigungsvermögen	in Sekunden: 0 – 100 km/h; 0-60 km/h; 80-120 km/h
	Steigung / Steigungsfähigkeit	max. Steigungen in %
	Kosten	€ / Fzg.
	Gesamtreichweite	km
	Bremsweg	m (100km/h - 0 km/h)
	Federweg (Raddämpfung)	cm
	Lenkaufwand	Lenkübersetzung i_L bei v_{min} bzw. v_{max}
	NCAP (Crashtestwert)	Sterne (1 bis 5)
	Perzentil (Nutzer – Maßkonzept)	95. Perzentil Männer / 5. Perzentil Frauen
	Steckwinkel Ladestecker	x°
	Kofferraumvolumen	Liter
	Fertigungszeit	Minuten
	Lebensdauer	Jahre
	Demontageaufwand (explizites Bauteil)	Minuten

Die in Tabelle 6-1 aufgezeigten Eigenschaften beziehen sich auf gesetzliche Grundlagen, geographische Bedingungen, Kunden-, Produktions- und Serviceanforderungen. Die in Kapitel 5 *Abhängigkeiten in der elektrifizierten Fahrzeugauslegung* resultierenden Eigenschaften werden aus Konzeptentwicklungssicht eingebracht, eine Erweiterung mit wichtigen Eigenschaften der anderen Phasen des Produktlebenszyklus ist möglich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass qualitative Kriterien nicht direkt

messbar sind und in quantitative, also messbare Kriterien übersetzt werden müssen. Beispielsweise können Kundenanforderungen wie Handhabbarkeit und Wahrnehmung über das Perzentil beim Maßkonzept, den Steckwinkel des Ladesteckers oder das Kofferraumvolumen quantitativ messbar gemacht werden. Auch das Fahrverhalten, kann z.B. über den Bremsweg, den Federweg oder die Lenkkraft quantitativ messbar gemacht werden kann. Je nach Produkt und Markenimage sind diese Eigenschaften hinsichtlich des Produktkerns zu erweitern und zu spezifizieren (vgl. 4.4.2 *Anforderungen und Randbedingungen in der Konzeptentwicklung*).

Um die Folgeabhängigkeiten der in den Vordergrund gestellten vernetzten Eigenschaften darzulegen, wird ein Beispiel zur elektrischen Reichweite ausgeführt. Diese ist Teil der Gesamtreichweite und wird zusätzlich durch den Normzyklus, das Gewicht, den Verbrauch (vgl. Formel (3-13)) und die Kosten beeinflusst (vgl. Eigenschaftsnetzwerk Kapitel 5). Die Bewertung und Optimierung der Eigenschaften von Produktelementen und deren Merkmale ist mit Hilfe verschiedener Techniken ein- oder mehrdimensional möglich (vgl. 2.4.4 *Werkzeuge und Hilfsmittel*). Es sind dazu mathematische Modelle, zum Teil auf Basis von Regressionsmodellen oder Korrelationsanalysen, anwendbar, um eine Zielgröße (Tabelle 6-1) durch eine Funktion bestehend aus Einflussgrößen zu beschreiben (vgl. [SLH-2006] und [SchM-2001]). So besteht zwischen dem Fahrzeuggewicht und dem elektrischen Verbrauch ein Zusammenhang, der es ermöglicht, Reichweiten auf Basis des Gewichts ohne weitere Fahrwiderstände (vgl. 3.2 *Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*) abzuschätzen [MKR-2012] [BuI-2013]. Anschließend kann der Verbrauch aus dem Fahrzeuggewicht und einem Verbrauchs-Faktor³⁴ für elektrifizierte Fahrzeuge abgeschätzt werden [BuI-2013]. Dabei steht die Synthese von Produkteigenschaften in der Konzeptphase im Fokus bzw. soll unterstützt werden.

In 4.5.2 *Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung* wurde aufgezeigt, dass Teile des Modells im Sinne einer Black-Box (z.B. bei einer topologischen Auslegung vgl. 4.4.1.2 *Topologie*) verwendet werden können, um so die Auswirkung einer Änderungen z.B. eines Bauteils auf das Gesamtprodukt besser abschätzen zu können. Im Folgenden werden am Beispiel des Bauteils Batteriezelle deren Eigenschaften, in Bezug auf das Eigenschaftsnetzwerk (vgl. 5.2 *Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge*) aufgezeigt. Im Sinne einer Black-Box mit Stoff-, Energie- und Signalumsatz (vgl. 2.3 *Das Produktgefüge*) sind Spannung und Strom die primären Ein- und Ausgangsgrößen (vgl. Abbildung 6-1). Als Eingangsgröße ist zusätzlich der Einfluss der Umgebungstemperatur (thermische Energie) auf die Leistungsfähigkeit der Zelle zu berücksichtigen.

Der Stoff- und Signalumsatz ist bei der einzelnen Batteriezelle als solches nicht direkt gegeben. In der Batteriezelle können zwar über Sensorik z.B. die chemischen Eigenschaften des Elektrolyts oder der Innendruck erfasst werden (vgl. Abbildung 6-1). Ziel ist es aber, Signale wichtiger Batteriedaten nicht

³⁴ Der Verbrauchsfaktor dient in der frühen Projektphase als Anhaltswert für eine grobe heuristische Abschätzung der elektrischen Reichweite. Für den NEFZ liegt dieser gewichtsbezogene Faktor bei den meisten elektrifizierten Fahrzeugen, mit einem zu konventionellen Fahrzeugdesigns vergleichbaren $cw \cdot A$, zwischen 0,09 und 0,08 Wh/ km*kg (vgl. [BuI-2013]).

explizit durch die Batteriezelle auszugeben, sondern erst durch Messtechnik z.B. ab der Komponenten-Ebene (Batteriemodul) zu erfassen. Dies erfolgt primär aus zwei Gründen:

1. Aus Kostengründen, da in Summe je Zelle mehr Sensoren benötigt werden, als wenn in jedem Modul der Traktionsbatterie entsprechende Sensorik verbaut wird.
2. Aus Bauraumgründen, denn der verfügbare Bauraum der Batteriezelle soll maximal für die Zellchemie bzw. das Aktivmaterial ausgenutzt werden.

Der Stoffumsatz ist bei der heutigen Technologie nicht gegeben, z.B. aber zukünftig bei Lithium-Luft-Akkumulatoren möglich.



Abbildung 6-1 Black-Box Batteriezelle (bezogen auf Lithium-Ionen-Zellen)

Als Energiespeicher sind die elektromagnetische Strahlung und die Wärmeabgabe bei der Nutzung zu berücksichtigen. Des Weiteren kann es durch eine exotherme Reaktion zum thermischen Durchgehen (thermal runaway) innerhalb der Batteriezelle kommen, was den Austritt von Gasen zur Folge haben kann.

Die in Abbildung 6-1 aufgezeigten Attribute der Batteriezelle stellen jedoch in Bezug zu der in Kapitel 2.3 *Das Produktgefüge* eingeführten Sichtweise keine vollständige Auflistung der Eigenschaften der Batteriezelle dar. In Anhang E1 *Eigenschaften der Batteriezelle für eine prismatische Zelle* sind die Eigenschaften einer prismatischen Traktionsbatterie aufgezeigt. Insbesondere die Funktionen des Bauteils müssen Berücksichtigung finden. Dabei gibt es Ziel- und Zwangseigenschaften.

- Zieleigenschaften sind vom Entwickler gewollte Eigenschaften. Bezogen auf die Traktionsbatterie ist die Zieleigenschaft diejenige des chemischen Energiespeichers.
- Zwangseigenschaften sind solche, die gezwungenermaßen mit der Zieleigenschaft einhergehen, jedoch nach Möglichkeit verringert oder vermieden werden sollten.

Bei der Traktionsbatterie gehören zu den Zwangseigenschaften z.B. das Risiko des thermischen Durchgehens oder auch die Kosten für das Bauteil (beispielsweise bei geringen Skaleneffekten der neuen Technologie).

Beim Austausch einer Technologie (Modul, Komponente oder Bauteil), z.B. um Innovationen in das Produkt einzubringen, sind die komplexen Zusammenhänge innerhalb eines Produktes sowie das Ersetzen oder die Übernahme von Funktionen zu prüfen. Wird in einer Modellpflege eine technische Änderung vorgenommen, z.B. eine hinsichtlich der Reichweite (Energieinhalt Wh) optimierte Batte-

riezelle eingesetzt (vgl. 3.6.2 *Elektrische Verschaltung*), welche jedoch physikalisch-chemisch bedingt eine geringere Spannungslage hat, können davon abhängige Produktelemente (z.B. der elektrische Klimakompressor vgl. 5.1.3 *Produktelemente und deren Vernetzung im Segment elektronische und mechatronische Systeme*) möglicherweise nicht mehr dauerhaft betrieben werden (da die Spannungslage des Hochvoltnetz für den Betrieb zu hoch oder zu niedrig ist). Wenn bei der Änderung der Batteriezelle auch der Zelltyp gewechselt wird (prismatisch zu Pouch vgl. 3.6.1 *Elektrischer Energiespeicher*) und die prismatische Zelle aufgrund ihres stabilen Gehäuses bei einem Unfall Kräfte durch einen entstehenden Formschluss³⁵ übertragen sollte, ist diese Funktion bei der Pouch-Zelle nicht mehr gegeben.

Bei Betrachtung der Produktelemente ist darüber hinaus eine Funktionsoptimierung innerhalb eines Bauraumes durch eine funktionale Verknüpfung möglich. Ein Beispiel ist das Gehäuse des Hochvoltbatteriesystem, bestehend aus Trog und Deckel (vgl. Anhang D2 *Verwendete Produktelemente des Modell KEIBPro 11-14*). Diese beiden Komponenten nehmen dabei unterschiedliche Funktionen wahr (vgl. Anhang E2 *Funktionen bezogen auf das Gehäuse des Hochvoltbatteriesystem*). Bezüglich des Deckels können diese Funktionen auf im Bauraum benachbarte Module bzw. Komponenten übertragen werden (mit Ausnahme des Berührungsschutzes für die Produktion und den Servicefall). Wie in Abbildung 6-2 dargestellt, besteht die Möglichkeit, mit Reduktion der Funktionen des Deckels diesen anders auszulegen, z.B. würde eine Folie zur Funktionserfüllung ausreichen (vgl. [BGJ-2012]). Hinsichtlich des Batteriekastens sind weitere Integrationen z.B. hinsichtlich des Fahrwerks denkbar (vgl. [BJO-2013]).

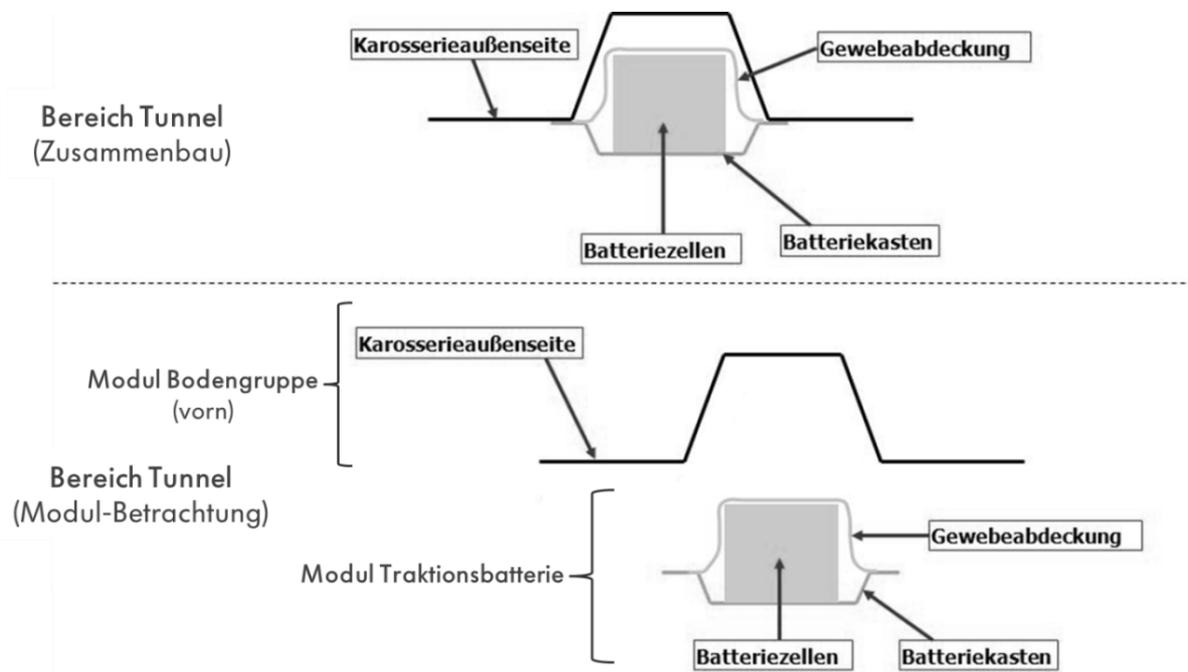


Abbildung 6-2 Batteriekasten ohne Deckel mit Berührungsschutzfolie [BuI-2011] [BGJ-2012]

³⁵ Ein Formschluss entsteht beim Crash, wenn sich Bauteile miteinander verhaken, verkeilen oder verblocken.

6.2 Betrachtung der Traktionsbatterie im produktübergreifenden Kontext

Die Traktionsbatterie wurde in dieser Arbeit mehrfach als beispielhaftes Bauteil angeführt (vgl. 4.4 *Vorgehen in der Konzeptentwicklung*, 5.2 *Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge* und 6.1 *Analyse der Eigenschaften*). Dabei wurde hervorgehoben, dass dieses Modul eine elementare Rolle hinsichtlich Topologie (vgl. 4.4.1.2 *Topologie*) und Package (vgl. 4.4.1.3 *Package*) und damit für die Fahrzeugeigenschaften spielt. Insbesondere unter dem Kostenaspekt (vgl. Anhang E3 *Kosten der Traktionsbatterie je kWh mit und ohne Nachnutzung*) ist eine bestmögliche Auslegung dieses Moduls bzw. dessen Komponenten und Bauteile nötig. Der technische Einfluss der Traktionsbatterie ist vergleichbar zur VKM bei konventionellen Fahrzeugen. Dies liegt daran, dass im rein elektrischen Betrieb des Fahrzeuges Module oder Komponenten mit einem Energiebedarf zur Umsetzung der jeweiligen Funktionen auf die Energie- und Leistungsparametrik der Traktionsbatterie angewiesen sind und sich die mechanische Leistung der E-Maschine im Wesentlichen aus der Leistungsfähigkeit der Traktionsbatterie ergibt. Bei der VKM können Funktionen über die entsprechende Abwärme oder den Betrieb von Nebenaggregaten (Riemenstartergenerator) ergänzt werden. Ein wesentlicher Punkt ist die höhere Energiedichte von fossilen Kraftstoffen (vgl. 5.1.1.6 *Segmentgruppe Ladetechnologie*). Der Energiespeicher mit Lithium-Ionen-Technologie kann zurzeit nur einen Bruchteil der Energiedichte darstellen (vgl. Abbildung 3-20). Der resultierende Bauraumbedarf sowie die Kosten der Batteriezelle sowie des Gesamtsystems Traktionsbatterie führen derzeit zu einer Fokussierung auf diese Bauteile in der Konzeptentwicklung.

Im Sinne einer Baukastenstrategie und einer produktübergreifenden Verwendung einer Batteriezelle bzw. eines Batteriemoduls (vgl. Abbildung 4-28) wird im Folgenden die Energiezelle als Traktionsbatterie für Plug-In Hybride, Range Extender, Elektrofahrzeuge und je nach Topologie (vgl. 4.4.1.2 *Topologie*) auch für die Brennstoffzelle (vgl. Anhang D3 *Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie* und E4 *Technische Überschneidung der Fahrzeugkonzepte in Bezug auf die Traktionsbatterie*) unter Berücksichtigung der für dieses Produktelement zu ermittelnden Eigenschaften (vgl. Anhang E1 *Eigenschaften der Batteriezelle für eine prismatische Zelle*) betrachtet. Bei diesen Fahrzeugen ist es das Ziel, mit der im potentiellen Bauraum mitgeführten Energie maximale elektrische Reichweiten umzusetzen³⁶. Dabei wird die Umsetzung ohne Hoch- oder Tiefsetzsteller angestrebt (vgl. 5.1.1.2 *Segmentgruppe Antriebssteuerung*).

Des Weiteren wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Spannungslage der Zelle sowie das SOC-Fenster, auch bei einer Änderung der Kapazität, gleich bleiben³⁷. Andernfalls würde dies bei den verschiedenen Fahrzeugkonzepten, aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der im Markt verfügbaren Batteriezellen, zu divergenten Ergebnissen führen. Die Komplexität dieses Auslegungsfalles

³⁶ Bei der Leistungszelle steht die Maximierung der Vortriebsleistung (Fahrzeuginnenraum) innerhalb des Bauraums im Vordergrund.

³⁷ Die Spannungslage der hier verwendeten idealen Zelle liegt zwischen 2,8 V – 4,2 V, mit einer Normalspannung von 3,7 V und einem SOC-Fenster von 70%. Diese Werte orientieren sich an im Markt befindlichen Batteriezellen.

wird durch die in Abschnitt 6.1 eingeführten und aus den Eigenschaften des Eigenschaftsnetzwerkes (5.2 *Eigenschaftsnetzwerk für elektrifizierte Fahrzeuge*) analytisch ermittelten Faktoren vereinfacht. Der Lösungsraum ergibt sich demnach aus der fahrzeugseitig mitgeführten elektrischen Energie, dem elektrischen Verbrauch³⁸ des entsprechenden Fahrzeugs (vgl. 3.2 *Auslegung hinsichtlich fahrtechnischer Eigenschaften*) und der jeweilig resultierenden Reichweite (vgl. Anhang E5 *Lösungsraum für elektrische Reichweiten in Abhängigkeit von Fahrzeugverbrauch und fahrzeugseitig mitgeführter Energie*). Der Lösungsraum ist zum einen durch den verfügbaren Bauraum, zum anderen aus der Dimension des Fahrzeuges (meist bezogen auf die Fahrzeugklasse) und dem daraus folgenden Gewicht begrenzt (vgl. Abschnitt 6.1).

Damit die nötigen Energien für ein bestimmtes Fahrzeug (Verbrauch) und eine bestimmte Reichweite energetisch dargestellt werden können, ist dazu eine Traktionsbatterie nötig, die innerhalb der Spannungsgrenzen der Leistungselektronik entsprechend der Formeln (3-17) und (3-18) verschaltet wird. Diese Verschaltung ist als Zwangsbedingung (vgl. 4.5.1 *Bedeutung von technischen Modellen in der Entwicklung*) zu betrachten, durch die Lücken im Lösungsraum entstehen können. Für ein bestimmtes Fahrzeug können dann bestimmte elektrische Reichweiten nicht dargestellt werden (vgl. Anhang E6 *Lösungsraum unter Berücksichtigung der Spannungslage des AC-DC-Inverter und einer spezifischen Zelle*). Diese Lücken sind von Zell- und Strangfaktor³⁹ sowie von der Spannungsbreite⁴⁰ des Inverters abhängig (Abbildung 6-3). Der Zellfaktor gibt dabei, in Abhängigkeit von der Spannungsbreite der Leistungselektronik, die im Lösungsraum nutzbaren Bereiche und damit das Potential zur Verschaltungen der Batteriezellen in einem Strang an. Der Strangfaktor ist ebenfalls in Abhängigkeit der Spannungsbreite der Leistungselektronik zu betrachten. Dieser gibt Aufschluss über die Ausdehnung zwischen den Strängen, in denen keine Lösung technisch umgesetzt werden kann.

³⁸ Es wird hier der Verbrauch in einem Normzyklus (NEFZ) betrachtet. Folglich entfallen kundenspezifische Verbräuche wie Heizen oder Klimatisierung sowie die Nutzung von Infotainment-Umfängen aus 5.1.3 *Produktlemente und deren Vernetzung im Segment elektronische und mechatronische Systeme*

³⁹ Faktor ist in diesem Fall als „Einflussgröße“ zu sehen, mathematisch ist es jeweils ein Quotient. Der Zellfaktor ergibt sich aus der max. Spannung zur min. Spannung der Zelle über dem SOC der Hochvoltbatterie.

Der Strangfaktor ergibt sich aus dem Level des Folgestranges dividiert durch den Level des betrachteten Stranges (wird eine dreisträngige Verschaltung der Batteriezellen betrachtet ergibt sich der Faktor aus dem Quotienten von Strang 4 zu Strang 3). Dieser Faktor konvergiert gegen Eins (vgl. [BuVa-2013]).

⁴⁰ Die Spannungsbreite des Inverters (LE-Faktor, mathematisch ein Quotient) ergibt sich aus max. Spannungslage zu min. Spannungslage des AC/DC-Wandler der Leistungselektronik. Je höher der Faktor ist, desto besser kann eine Verschaltungen der Batteriezellen über die Produktpalette dargestellt werden.

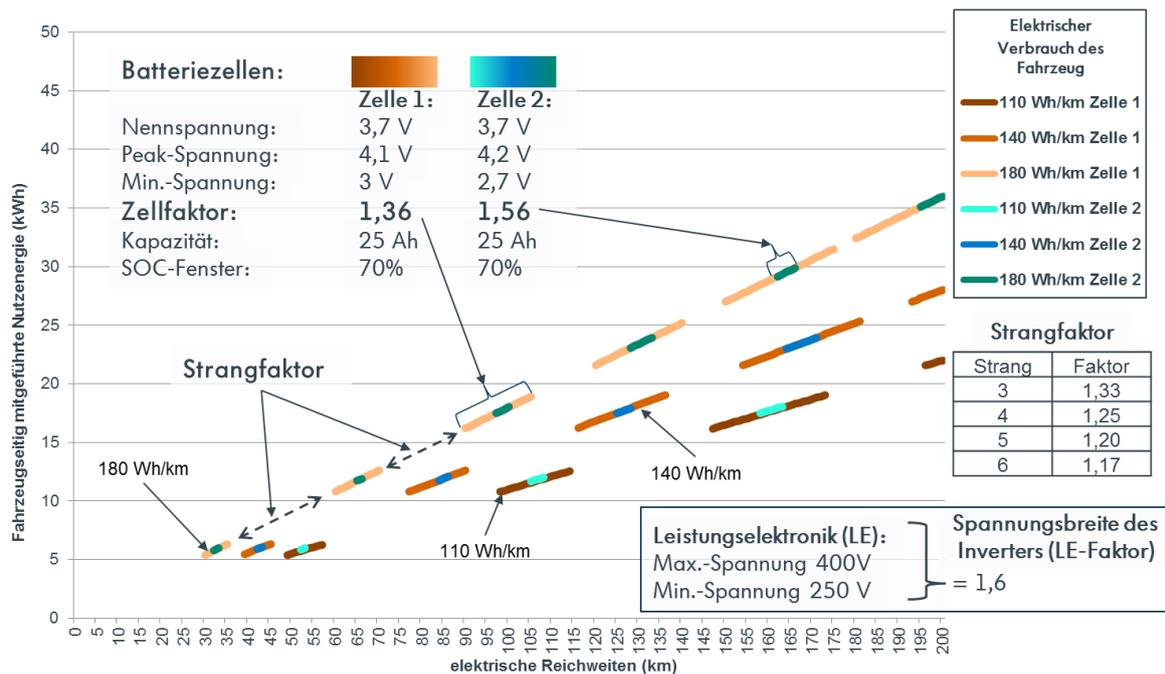


Abbildung 6-3 Elektrischen Reichweite mit Rand- und Zwangsbedingungen [BuVa-2013]

Die in Abbildung 6-3 beschriebenen Auslegungslücken stellen insofern einen Nachteil dar, da bestimmte Fahrzeuge mit entsprechender Kombination von Verbrauch, mitgeführter Energie und Reichweite nicht darstellbar sind. Dies führt dazu, dass bei einer gesetzlich vorgeschriebenen elektrischen Mindestreichweite von z.B. 40 km einzelne Fahrzeuge mit 50 km oder 60 km elektrischer Reichweite aufgebaut werden müssten. Der Vertrieb kann gegenüber dem Kunden aber nur die gesetzlich vorgeschriebene Reichweite preisen. Eine weitere Herausforderung der Lücken im Lösungsraum besteht darin, dass innerhalb einer Baukastenstrategie nur ein Modul „Traktionsbatterie“ entwickelt wird. Fahrzeuge z.B. mit Range Extender und einer einheitlichen Traktionsbatterie würden dann, vor allem durch das Gewicht determiniert, unterschiedliche elektrische Reichweiten erzielen (vgl. Anhang E7 *Unterschiedliche elektrische Reichweiten durch Verschaltung der Traktionsbatterien*). Bedingt durch die vergleichsweise geringen Gesamtreichweiten von elektrifizierten Fahrzeugtypen, kann sich ein Kunde nicht (wie im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen) auf eine ähnliche Reichweite der einzelnen Produkte verlassen. Für jedes Fahrzeug eine individuelle Traktionsbatterie mit individuellen Batteriezellen aufzubauen würde dem Gedanken der Baukastenstrategie widersprechen und für einen Volumenhersteller kostentechnisch nicht zielführend sein.

Im Folgenden werden die Lösungsvarianten für eine 25-Ah-Zelle und einer LE-Spannungsbreite von 200 V bis 400 V zur Verwendung in Plug-In-Hybriden betrachtet, welche eine elektrische Mindestreichweite von 50 km haben sollen (Abbildung 6-4)⁴¹. Es ergeben sich bei geforderten 50 km elektrischer Reichweite Lösungen für Fahrzeuge mit einem Verbrauch von 90 Wh/km bis 120 Wh/km und

⁴¹ Ausgehend vom Ursprung des Graphen soll die gewünschte Reichweite unter den gegebenen Bauraumbedingungen mit Reihen-, ohne Parallelschaltungen der Zellen erreicht werden. Die Batteriezelle mit einer Kapazität von 25 Ah ist als Startwert für die Betrachtung frei gewählt und orientiert sich an derzeit in der Automobilindustrie verwendeten Batteriezellen.

von 180 Wh/km bis 240 Wh/km. Bei Verwendung des Verbrauchsfaktors (vgl. 6.1 Analyse der Eigenschaften) folgt, dass Fahrzeuge mit einem Leergewicht von unter ca. 950 kg, zwischen ca. 1.350 kg bis ca. 1.950 kg und über ca. 2.700 kg unter den gebenden Bedingungen (LE, Batteriezelle, 50 km elektr. Reichweite) nicht darstellbar sind. Jedoch sind auch Fahrzeuge mit 170 Wh/km und 80 Wh/km dann mit 55 km elektrischer Reichweite darstellbar (Abbildung 6-4), unter der Bedingung, dass ein Toleranzfeld mit einer positiven Abweichung von 10 % der Soll-Reichweite akzeptiert ist (vgl. 4.5.3 Produktvarianz).

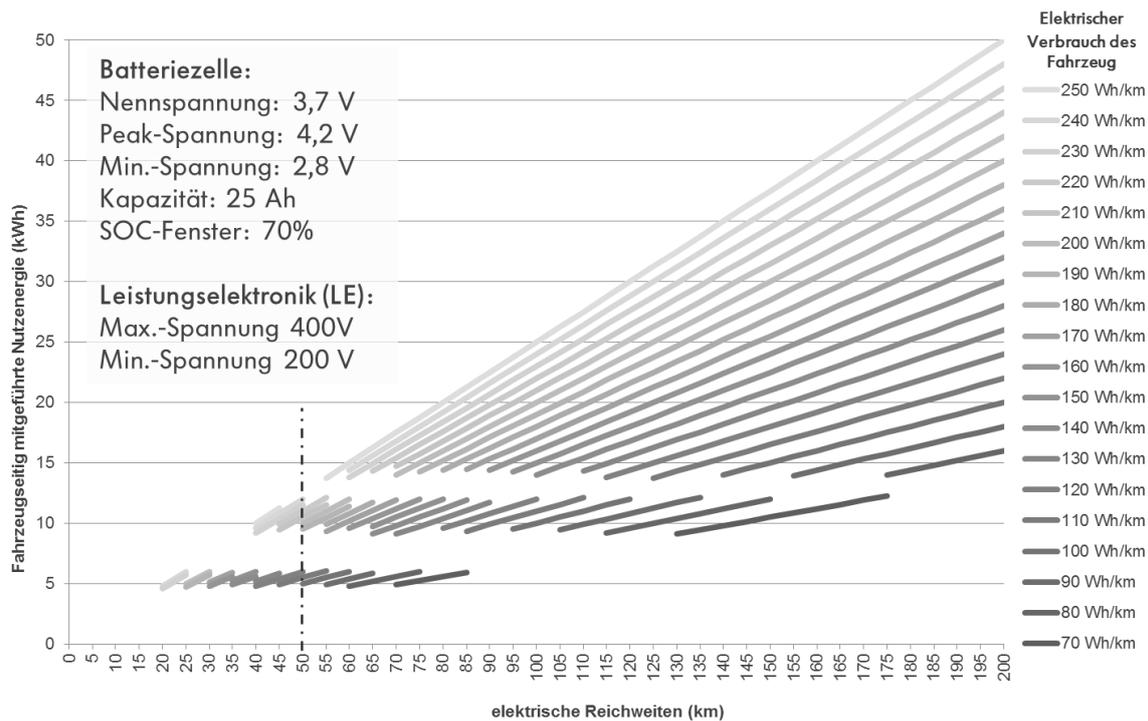


Abbildung 6-4 Lösungsraum mit einer 25-Ah-Zelle

Wenn die Preise in den jeweiligen Fahrzeugklassen (80 Wh/km Kleinwagen und 170 Wh/km mittlere SUV) einbezogen werden, ist die Schlussfolgerung, dass die zusätzlich verbauten Batteriezellen einen Mehrpreis von 12 % (Kleinwagen) bzw. 6 % (mittlere SUV) der Materialeinzelkosten der Traktionsbatterie verursachen. Des Weiteren ist die Traktionsbatterie (in den Fahrzeugen mit einem Verbrauch von 170 Wh/km bis 240 Wh/km in der kleinstmöglichen Zellanzahl in Reihe) zweisträngig parallel verschaltet. Das bedeutet, dass die niedrigste mögliche Spannung im Hochvoltsystem umgesetzt wird. Unter Berücksichtigung der Formel (3-20) für die Leistungsaufnahme der E-Maschine sind demnach nur kleinere Leistungen abrufbar. Dies kann möglicherweise durch eine höhere C-Rate, also mehr Strom, ausgeglichen werden, was jedoch eine negative Auswirkung auf die Lebensdauer der Zelle hat und höhere Anforderungen an Sicherungen etc. (vgl. 5.1.1.5 Segmentgruppe Energiespeicher) bedeutet.

Die bisherige Betrachtung erfolgt auf Basis der beliebigen Reihenschaltung von Batteriezellen im Bereich der Spannungslage der Leistungselektronik. Bei der Nutzung von Batteriemodulen ist die Verschaltung an die Anzahl der Batteriezellen je Batteriemodul bzw. die Gesamtanzahl der Batterie-

zellen in einer Traktionsbatterie gebunden. Wenn in einem Batteriemodul zehn Batteriezellen verbaut werden, sind weiter die in Abbildung 6-4 und in diesem Abschnitt aufgezeigten Bedingungen für die Traktionsbatterie und die LE zu berücksichtigen. Die daraus resultierende Zwangsbedingung ist die Verschaltung von sieben bis neun Batteriemodulen (70, 80 oder 90 Batteriezellen) im ersten Strang. Folge sind diskrete Lösungen für die verschiedenen Fahrzeuge (vgl. Anhang *E8 Lösungsraum bei der Verschaltung von Batteriezellen in 10er Modulen*).

Eine Möglichkeit, die Lücken zwischen den einzelnen Strängen zu schließen, besteht in der Erweiterung der Spannungsbreite des Inverters (LE-Faktor). Der Sprung des LE-Faktors von 1,6 in Abbildung 6-3 auf 2,0 in Abbildung 6-4 schließt die Lücken bei mehr als drei parallelen Verschaltungen. Bei einer Erhöhung der Spannungsbreite auf einen LE-Faktor von 2,5 besteht nur noch eine Lücke zwischen ein und zwei parallelen Verschaltungen (vgl. Anhang *E9 Erhöhung der Spannung der LE*). Damit können im Vergleich zu der in Abbildung 6-4 dargestellten Variante und unter Verwendung des Toleranzfeldes nur Fahrzeuge mit einem elektrischen Verbrauch von 140Wh/km bis 170 Wh/km (1.600 kg bis 1.850 kg) nicht dargestellt werden.

Letztendlich macht dieses Vorgehen nur Sinn, wenn die Spannungsbreite technisch mit einer Leistungselektronik darstellbar ist oder die Kosten mehrerer individueller Leistungselektroniken im Vergleich zu den Mehrkosten bei der Traktionsbatterie geringer sind (bezogen auf die in diesem Abschnitt aufgezeigte Materialeinzelkostenerhöhung der Traktionsbatterie je Fahrzeug von 6 % bzw. 12 %). Die thematisierte Problematik der geringen Leistung bei schweren Fahrzeugen kann dennoch nicht gelöst werden. Dies ist ein mehrdimensionales Problem. Die verfügbare Energie der Traktionsbatterie determiniert die Reichweite. Das Leistungsvermögen der Zelle hängt von deren Leistungseigenschaften bezogen auf die Peakleistung und die variierende Entladerate sowie deren Verschaltung ab (Abbildung 3-21). Ist neben der gewünschten elektrischen Reichweite für verschiedene Produkte auch eine differenzierte Leistung gefordert, ergibt sich ein mehrdimensionales Lösungssystem. Dieses kann bei zusätzlicher Berücksichtigung der Kosten nur noch mittels rechnerunterstützter Simulationen gelöst werden.

6.2.1 Synthese hinsichtlich einer Energiezelle für mehrere Produkte

Um die bisher aufgezeigten Auslegungslücken bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen zu schließen, besteht die Möglichkeit, die Batteriezelle kapazitiv anzupassen. Im Idealfall steht für jedes Produkt eine individuell ausgerichtete Traktionsbatterie zur Verfügung. Um aber Skaleneffekte im Baukasten (economies of scale vgl. [BDS-2010]) und auch Erfahrungseffekte über die Produkte (experience curve) erzielen zu können, sollte die Varianz an Batteriezellen möglichst klein gehalten werden. In Anbetracht der zu erwartenden Absatzahlen elektrifizierter Fahrzeuge muss es demnach das Ziel sein, durch Variantenreduktion der teuersten Bauteile und eine davon ausgehende höhere Stückzahl die Bauteilpreise zu senken (vgl. Stückkostendegression Abschnitt 6.1).

Im Folgenden soll eine Zelle zu identifiziert werden, die zwischen Energie- und Leistungszelle liegt (vgl. Abbildung 3-21) und über die gesamte Produktpalette eines Baukastens verwendet werden kann. Damit ergibt sich hinsichtlich der Traktionsbatterie und im weiteren bezogen auf die Batteriezelle ein synthetisches Problem (vgl. 2.4.3.2 *Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften*) und zwar nicht nur als Synthese eines Produktes, sondern im Sinne eines übergreifenden Betrachtung (vgl. 4.5.2 *Fahrzeugmodell in der Konzeptentwicklung*) auf eine ganze Produktgruppe bezogen (vgl. Baukastenstrategie in 4.1 *Produktstrategie in der Automobilindustrie*). Weiteres Ziel der Synthese ist eine Batteriezelle, die die aufgezeigten Lücken im Lösungsraum schließt und dabei die maximal mögliche Energie mit sich führt. Gleichzeitig ist die Anzahl der im Fahrzeug zu verbauenden Batteriezellen zu minimieren, um im Produktionsprozess so wenig wie möglich Einzelteile verbauen zu müssen (das Zell-Format soll größer sein als eine zylindrische 18650-Zelle).

Für die Synthese gelten die bisher angenommenen Bedingungen zur Spannung der LE und Traktionsbatterie sowie eine Elektrifizierung für minimal 50 km elektrische Reichweite für Fahrzeuge über 1.100 kg. Danach ergibt sich, dass der optimale Energieinhalt einer Zelle zwischen 14 Ah und 16 Ah liegt. Diese Betrachtung erfolgt in Bezug auf eine gleiche volumetrische Energiedichte der einzelnen möglichen, kapazitiv unterschiedlichen Zellen und der daraus resultierenden geometrischen Ausprägung [BuVa-2013]. Die vergleichsweise niedrige Kapazität führt dazu, dass die Verschaltung der Zellen in parallele Stränge erfolgen muss. Zumindest in Bezug auf die Lithium-Ionen Technologie stellt dies kein größeres Problem dar, wenn die Zellen in den Batteriemodulen mit Sensorik abgesichert sind. Im Fall eines Kurzschluss in einer Zelle wird dann die Energie durch Steuerungseingriffe nicht in eine parallel geschaltete Zelle geleitet. In Abbildung 6-5 ist der dann mögliche Lösungsraum mit einer 15Ah-Batteriezelle dargestellt.

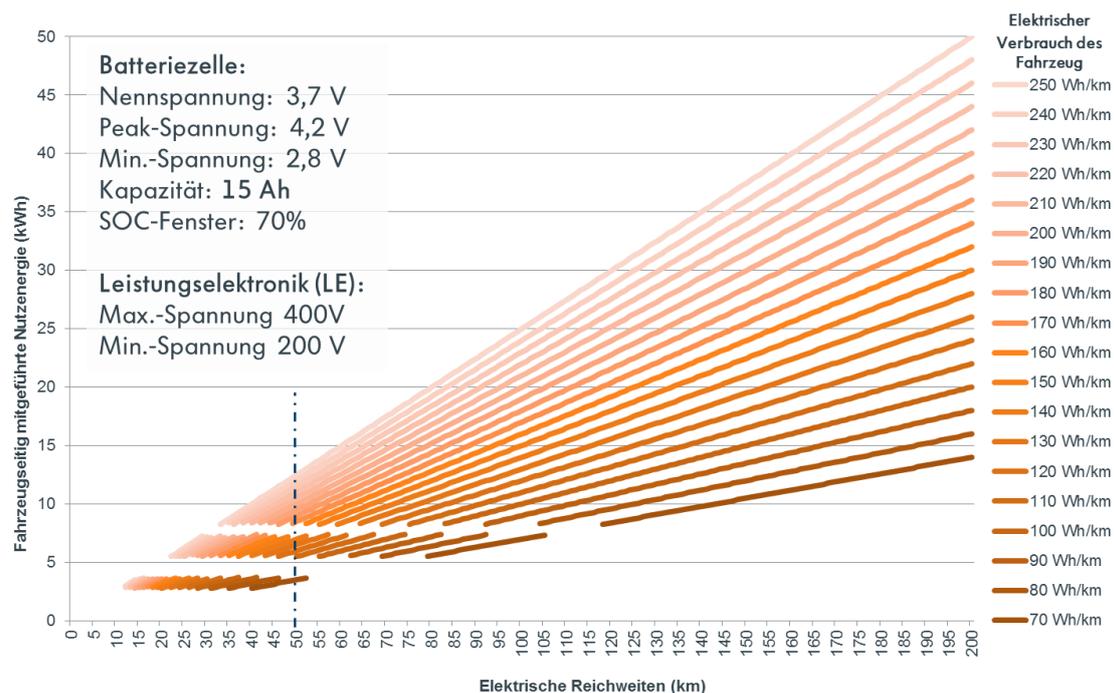


Abbildung 6-5 Lösungsraum mit einer 15 Ah-Zelle

Im Vergleich zu der 25 Ah-Batteriezele in Abbildung 6-4 sind die Lücken zwischen erstem und zweitem sowie zweitem und dritten Strang kleiner geworden. Somit kann unter Berücksichtigung des aufgezeigten Toleranzfeldes (vgl. Abschnitt 6.2), für alle Fahrzeuge mit einem Gewicht größer 1.100 kg eine elektrische Verschaltung in der Traktionsbatterie ermöglicht werden. Diese sieht eine elektrische Reichweite von 50 km und mehr vor. Dabei wurden, wie in Abbildung 6-5 zu sehen ist, noch keine Batteriemodule mit entsprechender Verschaltung berücksichtigt.

Bei einer Nutzung von 10er Batteriemodulen stellt sich heraus, dass eine 14 Ah-Batteriezele die kostengünstigste Variante ist, wenn der Verbrauch einer Produktpalette zwischen 110 Wh/km und 250 Wh/km liegt sowie mindestens 50 km elektrische Reichweite erzielt werden sollen (vgl. Anhang *E10 Mehrkosten für 14 Ah- bis 16 Ah-Batteriezele in 10er Batteriemodulen*). Die Mehrkosten für Traktionsbatterien konnten, unter der Annahme eines gleichen Preis je kWh, von durchschnittlich 4 % für die 25 Ah-Batteriezellen auf durchschnittlich 2 % bei der 14 Ah-Batteriezellen gesenkt werden. Bezogen auf das HV-Batteriesystem bedeutet dies Materialkosteneinsparungen von derzeit ca. 90 € je Fahrzeug im Baukasten. Die Betrachtung erfolgt unter der Bedingung, dass die jeweiligen Fahrzeuge des Baukastens mit einer gleichen Stückzahl im Markt verkauft werden. Außerdem sind abweichende Reichweiten zwischen den Modellen zusätzlich darstellbar, dabei sind insbesondere höhere Reichweiten durch die wachsende Anzahl von Strängen (vgl. Strangfaktor in Abbildung 6-3) besser umsetzbar.

Durch die Optimierung des Materialeinsatzes bzw. der Anzahl der verbauten Zellen im Batterietrog werden nicht nur die Materialkosten reduziert. Zusätzlich wird in die Fahrzeuge des Baukastens das geringstmögliche durch die Elektrifizierung bedingte Mehrgewicht eingebracht, was sich positiv auf den Verbrauch auswirkt. Bei Plug-In-Hybriden können so geringere Emissionen und bei Elektroautos höhere Reichweiten erzielt werden.

6.2.2 Auswirkungen der technologischen Entwicklung

Das Tempo der technischen Entwicklung ist zumindest mittel- und langfristig nicht quantitativ absehbar (vgl. 4.4 *Vorgehen in der Konzeptentwicklung*). Wenn aber bei der Zelltechnologie und insbesondere bei der volumetrischen Energiedichte eine äquivalente Entwicklung wie bei der Prozessortechnologie angenommen wird, steigt im heutigen Bauteilvolumen (z.B. im genormten PHEV2-Format vgl. [DIN 91252]) die Kapazität der Batteriezele exponentiell. Ein Sprung von 25 Ah auf 40 Ah hätte bereits starke Auswirkungen auf den Lösungsraum, es würden, selbst mit Einbeziehung eines Toleranzfeldes (vgl. Abschnitt 6.2), nur noch Fahrzeuge von 1.500 kg bis 2.050 kg in Bezug auf 50 km elektrische Reichweite darstellbar sein (vgl. Anhang *E12 Lösungsraum mit einer 40 Ah Batteriezele*). Bei Berücksichtigung von 10er Batteriemodulen ist durchschnittlich mit zusätzlich 6,5 % Materialmehrkosten für Traktionsbatterien zu rechnen, was umgerechnet Mehrkosten von 220 € je Fahrzeug sind.

Im Hinblick auf niedrige (z. B. zweistellige) elektrische Reichweiten ist eine Erhöhung der Energie in den vorhandenen Zellbauräumen unter dem Aspekt der Materialkosten nicht zielführend (vgl. Anhang *E13 Durchschnittliche Mehrkosten je Fahrzeug bzgl. der Zellkapazität für Fahrzeuge > 1.100 kg*).

Dies ist nur für eine Auswahl von Fahrzeugen in Abhängigkeit der geforderten Reichweite sinnvoll (vgl. Anhang *E14 Mehrkosten nach Fahrzeugverbrauch für 4 Ah bis 20Ah, 40 Ah und 60 Ah Traktionsbatterien*). Die Leistungssteigerung stellt eine weitere Herausforderung dar. Werden Zellen mit mehr Energie verwendet (vgl. Abbildung 3-21), besteht bei gleichbleibender elektrischer Reichweite die Möglichkeit, dass die Zellanzahl im Batteriesystem von einer zur nächsten Generation reduziert wird⁴². In diesem Fall steht durch die Verschaltung der Traktionsbatterie für den elektrische Vortrieb weniger Spannung zur Verfügung (vgl. *3.6.3 Elektrischer Antrieb*). Um die Leistung gleich halten zu können, muss mehr Strom aus der energiereicheren Zelle entnommen werden, was Abbildung 3-21 widerspricht. Die gleiche Zellanzahl und die Wahl energiereicherer Zellen führen nicht zwingend zu Materialmehrkosten⁴³, jedoch wäre es umgekehrt auch nicht möglich, Batteriezellen und damit Materialkosten aus dem Fahrzeug zu entfernen.

Eine technologische Entwicklung zu kapazitiv größeren Batteriezellen wird durch die in *2.2.1 Betriebswirtschaftlich Produktlebenszyklus* beschriebenen Lock-In Effekte und durch das heute genormte und produzierte prismatische Batteriezellenformat begünstigt. Außerdem werden bei kleineren Batteriezellen mehr und neue Batteriemodule benötigt, was zu Lock-Out Effekten führt.

6.2.3 Ableitung einer optimalen Zellgeometrie

Eine Antwort auf die Frage, ob es für die Produktauswahl im Baukasten (z.B. theoretisch angenommene Produkte A bis S in *4.5.3 Produktvarianz*) auch eine geometrisch optimale Traktionsbatterie gibt, steht noch aus. Hierzu ist eine geometrische Analyse des potentiellen Bauraumes (vgl. Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung*) im Sinne der in Kapitel *4.5.3 Produktvarianz* aufgezeigte Abweichungsanalyse vorzunehmen. Da das Bauraumvolumen Auswirkung auf die Energie je Batteriezelle hat, erfolgt die Iteration zwischen Volumen und optimaler Energie je Batteriemodul.

Der Bauraumvergleich (vgl. Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung*) wird anhand der Maße des Batteriemoduls vorgenommen. In einer übergreifenden Produktgruppe muss die verfügbare Energie ausreichend für das schwerste bzw. verbrauchsstärkste Fahrzeug sein. Die geometrische Ausprägung muss aber auch dem kleinsten Bauraum entsprechen (vgl. Auslegungsfälle in Abschnitt 6.2 sowie Abschnitt 6.2.1). Ist dies nicht möglich, wird eine jeweilige fahrzeugspezifische Lösung, bestenfalls als skalierbarer Batterietrog in dem Baukasten benötigt.

Bei den im Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung* aufgeführten Bauräumen sind die Länge unter den Vordersitzen, die Breite des Tunnels oben sowie die Höhe des Schwellers abzüglich der Höhe der Sitzschienen die kritischen Maße für mögliche Batteriemodule. In Tabelle 6-2 sind diese Maße beispielgebend für drei Fahrzeuge im Sinne einer Ähnlichkeitsanalyse (vgl. Abbildung 4-35) genannt.

⁴² Mögliche Optimierungen z.B. hinsichtlich des Gewichts von Bauteilen von einer zur nächsten Generation sind nicht explizit berücksichtigt, würden aber diese Effekt noch verstärken.

⁴³ Die Kosten für Computerprozessoren sind im Volumenmarkt bei steigender Leistungsfähigkeit gefallen.

Tabelle 6-2 Maße für Modulbauraum aus Polo, Golf und Passat

	Maße	Polo (Bj. 2009)	Golf (Bj. 2013)	Passat (Bj. 2010)
L	Länge Sitz (mm) (Sitzfläche)	345	345	345
B	Tunnel (mm) (oben)	150	140	150
H	Schweller (mm) (Ohne Sitzschine)	160	165	175
		(40)	(40)	(40)
		120	125	135

Wenn man davon ausgeht, dass bedingt durch Leitungen, Radien, Produktions- und Bauteiltoleranzen 70 % des Bauraumes nutzbar sind, ergibt sich ein Batteriemodul mit einem Volumen von ca. 4 l (vgl. Anhang *E15 Herleitung der Abmaße für 10er Batteriemodule*). Bei diesem Vorgehen wird das Batteriemodul an einen bestehenden Rohbau angepasst. Bei einer Betrachtung der Batteriemodul-Abmaße ist festzustellen, dass deren Höhe primär vom kleinsten Fahrzeug abhängt, in dem die Batteriemodule eingesetzt werden sollen. Länge und Breite müssen jedoch in einem Verhältnis stehen, insbesondere hinsichtlich der geometrischen Positionierung im Fahrzeug. Unter Einbeziehung möglicher Toleranzen können Länge und Breite des Batteriemoduls im Verhältnis von 2,31 stehen⁴⁴, um das Bauraumvolumen mit mehreren Batteriemodulen bestmöglich ausnutzen zu können. Dementsprechend wird das Volumen um ca. 0,5 l größer (vgl. Anhang *E15 Herleitung der Abmaße für 10er Batteriemodule*). Wenn in diesem Batteriemodulbauraum mit heutigen volumetrischen Energiedichten eine 15 Ah-Zelle untergebracht wird, ergibt dies 20 Zellen je Modul. Es wird angenommen, dass in einem Bauraum unter der zweiten Sitzreihe (vgl. Anhang *D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung*) mindestens 35 l Raum für ein Hochvoltbatteriesystem bestehen. Das bedeutet, dass das Volumen des Batteriemoduls, unter der Annahme einer gleichbleibenden Höhe, geteilt werden muss. Damit ergeben sich bezogen auf das genannte Länge- Breiten Verhältnis Modulabmaße von 220 mm * 100 mm * 100 mm (L*B*H).

Um hinsichtlich der Bauräume ein Optimierungspotential im Fahrzeug erwirken zu können, wie z.B. die singuläre Nutzung der Bauräume unter der ersten Sitzreihe, bedarf es einer Steigerung der volumetrischen Energiedichte auf min. 330 Wh/l bis 350 Wh/l in der Traktionsbatterie. Damit ist, gegenüber den in *5.1.5 Produktelemente und deren Vernetzung im Segment Maßkonzept und Ergonomie* aufgezeigten USABC-Zielen von 230 Wh/l bis 300 Wh/l in der Traktionsbatterie, eine zusätzliche Steigerung verbunden.

⁴⁴ Dieser Wert beruht auf einer Analyse der in Tabelle 6-2 aufgezeigten Fahrzeuge. Um eine allgemeine Aussage treffen zu können, müssen weitere Fahrzeuge und der Aufbau unterschiedlicher HV-Batteriesysteme untersucht werden. Das angenommene Längen – Breiten Verhältnis ist konservativ ermittelt und liegt real zwischen 2,05 und 2,2.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden basierend auf den Fragestellungen der Einleitung die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und die daraus gewonnenen Erkenntnisse dargelegt. In dem sich anschließenden Ausblick werden darauf aufbauend zukünftige Themen für die Entwicklung von Fahrzeugen und daraus resultierende offene Forschungsfragen aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung

Die Produktstrategie in der Automobilindustrie hat wesentliche Auswirkungen auf die Umsetzung der Ziele der Automobilbranche. In dieser Arbeit wurde innerhalb einer Baukastensystematik eine schnelle und zielgerichtete Entwicklung von verbrauchs- und damit emissionsarmen Fahrzeugen untersucht, die den individuellen Bedürfnissen sowie den Wünschen der Kunden entsprechen und wirtschaftlich sind. Für die bestmögliche methodische Umsetzung einer Baukastenstrategie in der Konzeptentwicklung wurde daher ein Vorgehensmodell entwickelt, welches die komplexen Anforderungen in der frühen Phase der Entwicklung berücksichtigt. Dazu wurde auf Grundlage der Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und Eigenschaften die konzeptionelle Entwicklung in Architektur, Topologie und Package gegliedert. Das Ziel, individuelle Modulentwicklungen zu ermöglichen und verschiedene Produktderivate innerhalb einer Baukastenfamilie darstellen zu können, wurde so umgesetzt.

Es wurden der Entwicklungsprozess und das Vorgehen in der Konzeptentwicklung aufgezeigt. Des Weiteren wurden die Interessensgruppen von elektrifizierten Fahrzeugen und ihr Einfluss im Produktlebenszyklus vorgestellt.

Für diese ganzheitliche Betrachtung der Produktpalette wurde ein technisches Modell aufgebaut, durch das die Baukastenarchitektur und eine jeweilige Fahrzeugarchitektur durch Segmente und Segmentgruppen dargestellt werden kann. Dies wurde explizit an Antriebsarten, die mit regenerativer Energie betrieben werden, aufgezeigt und an der konzeptionellen Auslegung der Traktionsbatterie bzw. der geometrischen und energetischen Ausprägung der Batteriezelle umgesetzt. Aus diesem technischen Modell für elektrifizierte Fahrzeuge konnten weitere wichtige Produkteigenschaften für die frühe Phase abgeleitet werden, die nötig sind, um ein optimales Produktkonzept entwickeln zu können. Als wichtigste Zieleigenschaft der frühen Phase wurden die Regionen identifiziert, in denen das Fahrzeug verkauft und produziert wird. Die aufgezeigten Zieleigenschaften wurden weiterführend nach den Belangen der jeweiligen Interessensgruppe zugeordnet.

Bei der konzeptionellen Optimierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen für elektrifizierte Fahrzeuge in einer Baukastensystematik wurde festgestellt, dass eine energetische Ausprägung der Batteriezelle von 14 Ah zielführend ist. Somit wurde das Ziel, nur eine Batteriezelle für verschiedene Fahrzeuge und elektrifizierte Antriebsarten im Baukasten zu verwenden, mit den gegebenen Anforderungen umgesetzt. Wenn innerhalb eines Baukastens mehr als ein Batteriezellentyp eingesetzt werden soll, hat, aufgrund der angenommenen Anforderungen, das hier erzielte Ergebnis für elektrifizierte Fahrzeuge

mit geringeren und mittleren elektrischen Reichweiten (45 km – 250 km) weiter Bestand. Das bedeutet, bei dem Einsatz von mehr als einem Batteriezellentyp wäre für reine Elektrofahrzeuge mit hohen Reichweiten (> 400 km) eine geeignete hoch-energetische Batteriezelle zu ermitteln.

Für die Optimierung der geometrischen Ausprägung des Batteriemoduls wurden Maße für den Bauraum unter der ersten Sitzreihe von Fahrzeugen der Mittelklasse-, Kompaktklasse- und Kleinwagen untersucht. Die optimierte Gestaltung der Bauräume und der Module mit der ermittelten energetischen Ausprägung der Batteriezelle könnte weiterführend untersucht werden. Die Packageoptimierung von Batteriezellen und Modulen im Fahrzeug ist eine mehrdimensionale Herausforderung, die z.B. KUCHENBUCH (vgl. [KuK-2012]) über Paretofronten gelöst hat, was auf eine Baukastenstrategie erweitert werden könnte.

Die monetären Auswirkungen einer konzeptionell optimierten Batteriezelle in Bezug auf die Materialkosten sind unter Berücksichtigung der aktuellen Batteriepreise enorm. Beim Wechsel von einer 25Ah-Batteriezelle auf eine 14Ah-Batteriezelle in dem angenommenen Baukasten ist bei der in dieser Arbeit angenommenen Produktpalette eine Einsparung von 90€ je Traktionsbatterie möglich. Wenn man z.B. die in der Einleitung für Volkswagen angenommenen Stückzahlen elektrifizierter Fahrzeuge (214.000 Deutschland und 2,2 Mio. weltweit) berücksichtigt und den Preisverfall von Lithium-Ionen-Batterien in den Jahren 2014-2020 einkalkuliert, ergibt sich bezogen auf Deutschland ein Sparpotential i.H.v. 11 Mio. €. Im Hinblick auf den weltweiten Absatz sind folglich Materialkosteneinsparungen von rund 112 Mio. € über die angenommene Produktpalette möglich.

Wird zusätzlich durch die technologische Entwicklung ein Wechsel auf kapazitiv höhere Batteriezellen vorgenommen (2014 bis 2015 die bisher verwendete 25Ah-Batteriezelle und 2016 bis 2020 eine Steigerung auf 40Ah), werden in diesem Zeitraum gegenüber der Verwendung einer 14Ah-Batteriezelle Materialmehrkosten in Deutschland i.H.v. ≈22 Mio. € und weltweit i.H.v. ≈220 Mio. € über die Produktpalette generiert.

Diese Zahlen zeigen, dass eine schnelle und zügige Bewertung von Technologien respektive von Innovationen im Kontext einer Baukastenstrategie nötig sind und daraus Entwicklungsziele für Elemente des Produktes hervorgehen müssen.

Ein Risiko innerhalb der Baukastenstrategie besteht darin, dass eine Produktentwicklung per Definition etwas Neues macht. Bei einer Baukastenstrategie ist dies in der Anfangsphase richtig und wichtig. Jedoch ist nach dem Aufbau der nötigen Module für die wesentlichen Fahrzeugprojekte eine Umstellung von der Neukonstruktion zur Variantenkonstruktion nötig, da sonst die erzielte Stückkostendegression geringer ausfällt.

7.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurden Möglichkeiten aufgezeigt, elektrifizierte Mobilität innerhalb einer Baukastenstrategie fahrzeugseitig umzusetzen. Es wurde die inhomogene Differenzierung im Antriebsstrang

dargestellt, wobei jedoch auf gemeinsame Module und Komponenten zurückgegriffen werden konnte. Dieser Gedanke kann weiterentwickelt und auf Nutzungsmöglichkeiten von Modulen und Komponenten außerhalb des Automobils übertragen werden, was ein hohes Potential der Ressourcenschonung birgt. Zum Beispiel können Batteriezellen mit vorhandener Restkapazität nach dem Einsatz im Automobil als stationäre Zwischenspeicher genutzt werden. Diese Nutzung ist dann bereits in der frühen Entwicklungsphase zu berücksichtigen und ein solches Vorgehen methodisch einzuplanen.

Es könnte über die in dieser Arbeit vorgestellten Optimierung der Antriebsarten innerhalb einer Baukastenarchitektur hinausgehend geprüft werden, ob dieses Vorgehen auch zur Optimierung der Auswahl von Karosseriebauformen in einer Baukastenstrategie geeignet ist.

Damit die Baukastenstrategie in der Unternehmenspraxis umgesetzt wird, müssen sich die in dieser Arbeit aufgezeigten möglichen höheren Anforderungen an die Zieleigenschaften der Produkte durch die schon angesprochene Stückkostendegression amortisieren. Es wäre zu ermitteln, inwieweit in der praktischen Umsetzung die höheren Anforderungen tatsächlich zu höheren Kosten, aufgrund von nicht erzielten Degressionen führen und welchen Einfluss Varianten mit geringeren Stückzahlen diesbezüglich haben. Darüber hinaus wurde beider Baukastenstrategie bisher davon ausgegangen, dass ein Großteil der Anforderungen zu Beginn der Entwicklung bestimmt werden kann. In einer längerfristig ausgelegten Baukastenstrategie sollte daher, neben Fahrzeugklasse, Antriebsart und Karosseriebauform, der gesamte Entwicklungszeitraum methodisch berücksichtigt werden, da die einzelnen Produkte eines Baukastens sich in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus befinden. Beispielsweise ist ein Produkt schon im Markt, ein anderes befindet sich in der Serienentwicklung und ein weiteres wird konzeptionelle untersucht.

Das aufgezeigte Vorgehen in der Konzeptentwicklung mit Architektur, Topologie und Package für eine Baukastenstrategie könnte weiterentwickelt werden. Es wäre z.B. zu prüfen, ob Allokationen aus der Architektur weiter in die Strukturierung von Konzepten eingebracht werden können. Zum Beispiel überträgt ein optimales Fachwerk in den Knotenpunkten keine Momente. Kräfte werden in den Stäben vertikal übertragen. Ausgehend von dem Ansatz, dass ein Produktaufbau in Segmenten und Segmentgruppen einer Skelettbauweise entspricht, stellt sich die Frage, ob auf die konzeptionellen Kombinationen von Modulen im Baukasten, die Herangehensweise im Hochbau und die dortigen aufgezeigten physikalische Zusammenhänge abstrakt auf deren Kombinatorik übertragbar sind.

Die Topologie im Verständnis dieser Arbeit könnte weiterentwickelt werden, da die steigenden Anforderungen durch die Vernetzung des Autos mit seinem Umfeld und daraus resultierenden nötigen Veränderungen in der Ausprägung bestehender und neuer Bauteile im Fahrzeugkonzept berücksichtigt werden kann. Dafür sind eine geeignete Implementierung dieser neuen Technologien und insbesondere die zunehmende Signalübermittlung sowie der steigende Energiebedarf im Niederspannungsbordnetz zu berücksichtigen.

Diese neuen Technologien könnten darüber hinaus in dem in dieser Arbeit entwickelte Eigenschaftsnetzwerk ergänzt werden. Damit könnte das Netzwerk in Richtung der hybriden Wertschöpfung (Integration von Produkten und Dienstleistungen) ausgebaut werden. Die Elektromobilität bietet hierfür eine gute Grundlage und eröffnet der Automobilindustrie neue Handlungsfelder.

Des Weiteren könnten in das Eigenschaftsnetzwerk weitere Produktionsanforderungen (Produktionskosten, F-Zeit, Fügefolgen, Automatisierung etc.) und Anforderungen des Service und des Recyclings tiefgehend eingebunden werden, um diese im Entwicklungsprozess stärker berücksichtigen zu können. Insbesondere die Auswirkung der Produktionsanforderungen auf die Produktelemente ist in einer Baukastenstrategie mit weltweiten Produktionsstandorten von zentraler Bedeutung, sodass deren weiterführende Untersuchung vielversprechend erscheint.

Aus dem in dieser Arbeit aufgezeigten Eigenschaftsnetzwerk könnten geeignete Kennzahlen (z.B. €/kWh oder €/kg oder rein technisch Wh/l oder Wh/kg) entwickelt werden, mit deren Hilfe z.B. in Bezug auf den Leichtbau frühzeitig Abschätzungen über spätere Produkteigenschaften oder mehrere technische Lösungsmöglichkeiten geprüft werden könnten. Dabei ist auch zu evaluieren, ob qualitative Eigenschaften wie z.B. das Raumgefühl quantitativ messbar gemacht werden können.

Um die Elektromobilität weiter zu entwickeln, sollten Markterkenntnisse über das Nutzungsverhalten in zukünftige Produkte eingebracht werden. Dabei ist bei der Betrachtung der Fahrzeugkonzepte insbesondere die Optimierung der Betriebsstrategie zu nennen.

Es ist davon auszugehen, dass durch die technologische Weiterentwicklung der Werkstoffe in konventionellen Fahrzeugen das Fahrzeuggewicht und damit der energetische Verbrauch sinkt. Dies führt dazu, dass in einem Plug-In Hybrid beispielsweise bei gleicher elektrischer Reichweite kleinere Energiespeicher verwendet werden können. Mit der Reduzierung der Anzahl der Batteriezellen geht zwar die Reduktion der Materialkosten bei gleicher elektrischer Reichweite einher, jedoch wird bei einsträngigen Verschaltungen auch die Spannungslage gesenkt und damit die Leistung reduziert. Soll, wie bei heutigen Verbrennern eine Leistungsdifferenzierung möglich sein, muss neben der Energie je Batteriezelle auch die elektrische Systemleistung optimiert werden. Dies muss insbesondere über die Verschaltung der Batteriezellen in Stränge umgesetzt werden. Womit die ideale Anzahl an Batteriezellen je Batteriemodul bei mehrsträngiger Verschaltung dieser Module ermittelt werden muss. Dabei sind die 10 Zellen je Batteriemodul, die in dieser Arbeit angenommenen wurden, nur eine Lösung und Module mit 3, 4, 6 oder 12 Batteriezellen möglicherweise besser geeignet. Diese leistungsorientierte Optimierung von Batteriezellen und Modulen für Fahrzeuge in einem Baukasten könnte somit ergänzend durchgeführt werden.

Die Brennstoffzelle als eine der elektrifizierten Antriebsarten hat zurzeit den höchsten Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Im Fokus stehen dabei die hohen Kosten für die verwendeten Werkstoffe des Zell-Stack sowie die uneingeschränkte Nutzung durch den Kunden. In Bezug auf die Entwicklung der Preise für automotivfähige Batteriezellen, welche mit Erhöhung der Produktionsmenge sinken sollen,

ist die konzeptionelle Ausrichtung der Fahrzeuge insbesondere von der Kostenentwicklung der Zell-Stacks abhängig. Bei gleichbleibend hohen Kosten für den Zell-Stack der Brennstoffzelle, jedoch sinkenden Kosten für Batteriezellen, wäre zu prüfen, ob eine Brennstoffzelle z.B. mit kleinerer Leistung als Range Extender eingesetzt werden kann. Dabei ist der break even-point in der Dimensionierung zwischen elektrischem Energiespeicher und Zell-Stack der Brennstoffzelle zu ermitteln.

Neben der Elektrifizierung der Fahrzeuge stehen in der Automobilindustrie die Entwicklung neuer Technologien im Vordergrund, die in zukünftige Konzepte eingebunden werden müssen. Für urbane Räume stellen die Notwendigkeit der Geräuschreduktion und das (teil-) autonome Fahren eine Herausforderung dar. Außerdem eröffnen sich im Bereich der Dienstleistungen auch für konventionelle Fahrzeuge neue Ertragsquellen, was mit der Thematik der hybriden Wertschöpfung (vgl. [TLN-2010]) einhergeht. Die Vision des vernetzten Automobils bedeutet für die Entwicklung, dass das Umfeld und dort insbesondere die Dienstleister (Mobiltelefon-App) sowie im Straßenverkehr beteiligte Dritte (Schwarmintelligenz von Verkehrsteilnehmern) stärker berücksichtigt werden müssen.

Literaturverzeichnis

- [AHM-2005] Abrams, D., Hogg, M. A., Marques, J. M.: The social Psychology of Inclusion an Exclusion, Psychology Press, Taylor & Francis Books, New York, 2005
- [AJJ-2013] Andrews, J., Jelly, N.: Energy Science, Principles, technologies, and impacts, 2. Auflage, Oxford University Press, Oxford, 2013
- [AnHe-1987] Andreasen, M. M., Hein, L.: Integrated Product Development, IFS (Publications), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Tokyo, 1987
- [AnT-2005] Andreßen, Th.: System Sourcing – Erfolgspotenziale der Systembeschaffung, Management und Controlling von Kooperationen, Dissertation Universität Kiel 2005, Deutscher Universitäts-Verlag, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2006
- [AsM-2007] Astier, M., Mitchell, N.: Package Drawing Exchanges, Model Year 2008, Global Cars Manufactures Information Exchange Group, Weissach, 2007
- [AWA-2008] Aronson, E., Wilson, T., Akert, R. M.: Sozialpsychologie, 6. Aktualisierte Auflage, Pearson Education Deutschland, München, 2008
- [AWB-1989] Arthur, W. B.: Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events, The Economic Journal, Vol. 99, Heft 394, S. 116-131, March 1989
- [AWB-1994] Arthur, W.B.: Increasing returns and path dependence in the economy, Economics, Cognition, an Society, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1994
- [BaG-2009] Babel, G.: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik, 2., verbesserte und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [BaH-2003] Bauer, H.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Herausgeber Robert Bosch GmbH, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2003
- [BaS-2010] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, 5. Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [BaS-2011] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Hybridfahrzeuge- Energiespeichersysteme- Batteriemangement, motorlexikon.de, URL: <http://www.motorlexikon.de/?I=9508>, Stand 07.02.2011
- [BAS-2012] Bundesamt für Strahlenschutz: Basiswissen Hochspannungsleitungen,2012, URL: <http://www.bfs.de/de/elektro/netzausbau/grundlagen/leitungen.html>, Stand vom 25.01.2013
- [BBP-2012] Böhle, F., Bürgermeister, M., Porschen, S.: Innovation durch Management des Informellen, künstlerisch, erfahrungsgeleitet, spielerisch, Springer-Gabler, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [BDS-2010] Besanko, D., Dranove, D., Shanley, M., Schaefer, S.: Economics of Strategy, fifth Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2010
- [BeB-2009] Beck, B.: Volkswirtschaftslehre, Grundlagen mit Beispielen und Repetitionsfragen mit Lösungen, 4. überarbeitete Auflage, Compendio Bildungsmedien AG, Zürich, 2009
- [BeBu-2007] Bertsche, B., Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping, Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [BeK-2013] Becker, K.: Unikat contra Uniform, Porsche Consulting, Das Magazin, Heft Nr. 13, S. 28-35, September 2013

-
- [BeV-1994] Bercsey, T., Vajna, S.: Ein Autogenetischer Ansatz für die Konstruktionstheorie, Teil 1, CAD-CAM-Report, engineering, Heft 13, Nr. 2, S. 66-71, 1994
- [BGJ-2012] Busche, I., Gildemann, D., Jäschke, D.: Offenlegungsschrift, Kraftfahrzeug, insbesondere Elektro- oder Hybridfahrzeuge, DE 10 2011 017 459 A1, Volkswagen AG, Wolfsburg, 25.10.2012
- [BiH-1971] Biegert, H.: Die Baukastenbauweise als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip, Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe 1971
- [BiW-2011] Biffar, F., Wiegand, B.: Entwicklungsziele und Fahrzeugkonzept, ATZ extra, Der neue Audi A6, S. 16-21. Januar 2011
- [BJO-2013] Busche, I., Jäschke, D., Otte, S.: Patentschrift, Batteriekasten sowie Fahrzeug umfassend einen Batteriekasten, DE 10 2012 010 897 B3, Volkswagen AG, Wolfsburg, 07.11.2013
- [BIU-2012] Blessing, U. Chr.: Hybrid-Autos.info, die Plattform für alternative Antriebskonzepte URL: <http://www.hybrid-autos.info/en/Technik/E-Machines/>, Stand 13.03.2012
- [BIZ-2005] Blythe, J., Zimmermann, A.: Business to Business, Marketing Management, a Global Perspective, Thomson Learning, London, 2005
- [BoA-2007] Böge, A. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 18., überarbeitet u. erweiterte Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [BoS-2001] Bodenstern, G., Spiller, A.: Marketing, Strategien, Instrumente und Organisation, Verlag moderne Industrie, Landsberg, 2001
- [BPK-2008] Brand-Pook, H., Kollmeier, R.: Softwareentwicklung kompakt und verständlich, wie Softwaresysteme entstehen, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2008
- [BrK-1998] Brockhoff, K.: Forschung und Entwicklung, Planung und Kontrolle, 4. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 1998
- [BrS-2013] Braess, H.-H., Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2013
- [BrS-2007] Braess, H.-H., Seiffert, U.: Automobildesign und Technik, Formgebung, Funktionalität, Technik, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [BSF-2004] Badke-Schaub, P., Frankenberger, E.: Management kritischer Situationen, Produktentwicklung erfolgreich gestalten, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
- [BSW-2009] Bullinger, H.-J., Spath, D., Warnecke, H.J., Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation, Strategien, Planung, Umsetzung, 3. Neubearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [BuI-2011] Busche, I.: Konzeptentwicklung eines Hochvoltbatteriekastens für Elektrofahrzeuge auf Basis des Modularen Querbaukastens, Diplomarbeit, Volkswagen AG, Universität Magdeburg, Lehrstuhl Maschinenbauinformatik, 2011
- [BuI-2013] Busche, I.: Analysis of the vehicle architecture in the development of electrified vehicle concepts during the early concept decision phase, 10th. Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), Braunschweig, 13.-14. Februar 2013

-
- [BuIn-2013] Busche, I.: Technische und konzeptionelle Herausforderungen bei der Entwicklung elektrifizierter Fahrzeugen, Gastvortrag an der HAW Hamburg, Hamburg, Mai 2013
- [BuR-2011] Busch, R.: Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker, 6. erweiterte und überarbeitete Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [BuS-2006] Burr, W., Stephan, M.: Dienstleistungsmanagement, Innovative Wertschöpfungskonzepte für Dienstleistungsunternehmen, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2006
- [BuV-2005] Burmester, R., Vahs, D.: Innovationsmanagement, Von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung, 3. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2005
- [BuVa-2013] Busche, I., Vajna, S.: Factors influencing vehicle architecture in the development of electrified vehicles, 13th. Stuttgart International Symposium, ATZlive Automotive and Engine Technology, 26. and 27. February 2013, Documentation, Volume 1, Springer-Vieweg Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [BVK-2011] Birkhofer H. (Hrsg.), Vajna, S., Kittel, K., Bercsey, T.: The Future of Design Methodology, Chapter 15 The Autogenetic Design Theory, Springer-Verlag, London, Dordrecht, Heidelberg, New York, 2011
- [CAB-2001] California Air Resources Board: Staff Paper on the Standardization of Electric Vehicle Charging Infrastructure, California Environmental Protection Agency, 2001
- [CCR-2010] California Code of Regulations (CCR): The California Low-Emission Vehicle Regulations, California Environmental Protection Agency, California Air Resources Board, URL: http://www.arb.ca.gov/msprog/levprog/cleandoc/cleancomplete_lev-ghg_regs_12-10.pdf, 2010, Stand 02.04.2012
- [CFR 49-2006] Code of Federal Regulations Part 49 – Transportation, Parts 400 to 599, Volume 1, Part 523 – Vehicle Classification, Revised as of October 1, 2006
- [CFR 86-2004] Code of Federal Regulations Part 86 – Control of emissions from new and in use highway vehicles and engines, Subpart S - General Compliance Provisions for Control of Air Pollution From New and In-Use Light-Duty Vehicles, Light-Duty Trucks, and Complete Otto-Cycle Heavy-Duty Vehicles, 2004
- [CJS-2004] Clement, S., Jordan, A., Sartiono, R., Vajna, S., Kellner, P.: Prototypeneinsatz evolutionärer Algorithmen, in der Motorenentwicklung bei Volkswagen, MTZ, Jahrgang 65, S. 220-226, 3/2004
- [CIS-2006] Clement, S.: Erweiterung und Verifikation der Autogenetischen Konstruktionstheorie mit Hilfe einer evolutionsbasierten und systematisch- opportunistischen Vorgehensweise, Dissertation Universität Magdeburg 2005, Integrierte Produktentwicklung, Vajna, S. (Hrsg.), Band 7, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2006
- [CWE-1967] Cox, W. E. Jr.: Product Life Cycles as Marketing Models, The Journal of Business, The Graduate School of Business of the University of Chicago, Vol. 40, Heft 4, S. 375-384, October 1967
- [DaW-2009] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und –steuerung, im Sommer keine Kirschkralinen?, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

-
- [DIN 14040] Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN, DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [DIN 33402-2] Normenausschuss Ergonomie (FNERG) im DIN, DIN 33402-2, Teil 2, Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil 2 Werte, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005
- [DIN-4130] Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) im DIN, DIN ISO 4130 Straßenfahrzeuge, 3-dimensionales Bezugssystem und primäre Bezugspunkte, Definition, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1979
- [DIN 69901-5] Projektmanagement, Projektmanagementsysteme, Teil 5: Begriffe, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen im DIN, DIN 69901-5, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [DIN-70 020] Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) im DIN, DIN 70 020, Teil 1 und 2, Straßenfahrzeuge, Kraftfahrzeugbau, Begriffe von Abmessungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1993
- [DIN 9000] Qualitätsmanagementsysteme, Grundlagen und Begriffe, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen im DIN, DIN EN ISO 9000:2005-12, Deutsches Institut für Normung e.V. & Europäische Komitee für Normung, Brüssel, 2005
- [DIN 9001] Qualitätsmanagementsysteme, Anforderungen (ISO 9001:2008), Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen im DIN, DIN EN ISO 9001:2000-12, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2008
- [DIN 91252] Normenausschuss Automobiltechnik (NAAutomobil) im DIN, DIN SPEC 91252, Elektrische Straßenfahrzeuge- Batteriesysteme- Abmessungen für Lithium-Ionen-Zellen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011
- [DiW-2006] Diez, W.: Automobilmarketing, Navigationssystem für neue Absatzstrategien, 5. Aktualisierte und erweiterte Auflage, mi-Fachverlag, Redline GmbH, Landsberg am Lech, 2006
- [DoD-1987] Dörner, D.: Problemlösen als Informationsverarbeitung, 3. Auflage, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1987
- [Duden-2014] Duden: Wörterbuch, Rechtschreibung, deutsche Sprache, URL <https://www.duden.de/rechtschreibung>, 2014, Stand 01.03.2014
- [ECE 101] ECE-Norm, Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen, die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, hinsichtlich der Messung der Kohlendioxidemission und des Kraftstoffverbrauchs und/oder der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite sowie der nur mit Elektroantrieb betriebenen Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 hinsichtlich der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite, 2007
- [ECJ-1988] Easingwood, C. J.: Product Recycle patterns for new industrial products, R&D Management, Vol. 18, Heft 1, S. 23-32, January 1988
- [EFR-2013] Esch, F.-R. (Hrsg.): Strategie und Technik des Automobilmarketing, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2013

-
- [EiS-2009] Eigner, M., Stelzer, R.: Product Lifecycle Management, Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, 2. neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [EKL-2005] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 5. bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [EKM-2013] Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [EmA-2005] Emadi, A.: Handbook of Automotiv Power Electronics and Motor Drives, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (USA), 2005
- [EnW-2006] Engeln, W.: Methoden der Produktentwicklung, Skripten Automatisierungstechnik, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2006
- [EsM-2009] Espig, M.: Fuel Cell Hybrid Vehicle System Component Development, Synergies and commonly used hybrid components, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, 2009
- [EUG-1970] Richtlinie des Rates der europäischen Gemeinschaften: 70/220/EWG, zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen, letzte Änderung 2007, 1970
- [EUK-2013] Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles, Europäische Kommission, URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm, Stand 15.07.2013
- [EvW-1998] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 2, Konstruktion, 3. Vollständig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [FaS-2002] Fassbender, S.: Elektrische Antriebe autonomer Straßenfahrzeuge, GRIN Verlag GmbH, München, 2002
- [FDF-2002] Franke, L. (Hrsg.), Deckelmann, G. (Hrsg.), Franke, M., Henninger, D., Stehr, H.: Baukonstruktion im Planungsprozess, vom Entwurf zur Detailplanung, Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 2002
- [FFS-2013] Felsch, C., Fugel, M., Scholz, N., Zillmer, M.: Vergleich der Kraftstoffeffizienz und der Fahrleistung unterschiedlicher Hybridantriebstrangtopologien, 10th. Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), Braunschweig, Februar 2013
- [FiM-2001] Fischer, M.: Produktlebenszyklus und Wettbewerbsdynamik, Grundlage für die ökonomische Bewertung von Markteintrittsstrategien, Dissertation Universität Mannheim 2001, Schriftenreihe des Instituts für marktorientierte Unternehmensführung, Universität Mannheim, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2001
- [FJG-2013] Feldhusen, J., Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. vollständig überarbeitete Auflage 2013, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013
- [FJL-2013] Fuchs, J., Lienkamp, M.: Technologie und Architektur für elektrifizierte Fahrzeuge, ATZ, 115. Jahrgang, Heft 3, S. 164-170, März 2013

-
- [FrC-1986] Freeman, C.: Design, Innovation and Long Cycles in Economic Development, palgrave macmillan, Basingstoke (Hampshire), 1986
- [FrD-2001] Freisleben, D.: Gestaltung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen mit einem wissensbasierten Vorgehensmodell, Dissertation Universität Magdeburg 2001, Integrierte Produktentwicklung, Vajna, S. (Hrsg.), Band 2, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2001
- [FuA-2012] Fuchs, A.: Elektrisches Abfallsammelfahrzeug mit Range Extender, ATZ offhighway, S. 4-7, Oktober 2012
- [FuL-2013] Fuchs, St., Lienkamp, M.: Parametrische Gewichts- und Effizienzmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte, ATZ, Forschung Leichtbau, 115. Jahrgang, Heft 3, S. 232-239, 2013
- [FVS-2013] Center for Climate and Energy solutions (C2ES): Federal Vehicle Standards, URL: <http://www.c2es.org/federal/executive/vehicle-standards>, Stand 19.08.2013
- [GaS-2013] Gassmann, O., Sutter, Ph.: Praxiswissen Innovationsmanagement, von der Idee zum Markterfolg, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [GaK-2006] Gassmann, O., Kobe, C (Hrsg.): Management von Innovation und Risiko, Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [GeH-2008] Gembrys, S., Herrmann, J.: Qualitätsmanagement, 2. aktualisierte Auflage, Haufe-Lexware, Freiburg im Breisgau, 2008
- [GeK-2008] Geiger, W., Kotte, W.: Handbuch Qualität, Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven, 5. Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2008
- [GEM-2009] Göschel, B., Erjawetz, K., Motsching, M.: Range Extender, Anforderungen und Konzepte, 12. Tagung der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Technische Universität Graz, 24.-25. September 2009
- [GfU-2013] Gesellschaft für Unternehmenslogistik mbH, MEPORT – Das Methodenmanagement-System, das die Arbeit erleichtert, URL: <http://www.gfuhamburg.de/>, Stand 03.06.2013
- [GGG-2010] Gundlach, C., Glanz, A., Gutsche, J.: Die frühe Innovationsphase, Methoden und Strategien für die Vorentwicklung, Symposium Publishing, Düsseldorf, 2010
- [GiS-2008] Gies, S.: Unkonventionelle Fahrzeugantriebe, Schriftenreihe Automobiltechnik, Vorlesungsumdruck, Version 4.0, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Aachen, 2008
- [GJN-2006] Grabner, J., Nothhaft, R.: Konstruieren von Pkw-Karosserien, Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftübersicht, Beispiele mit Catia V4 und V5, 3. erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [GPW-2009] Gausemeier, J., Plass, Ch., Wenzelmann, Ch.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2009
- [GrA-2000] Grundwald, A.: Technik für die Gesellschaft von morgen, Möglichkeiten und Grenzen gesellschaftlicher Technikgestaltung, Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2000
- [GrF-2011] Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [GrR-2001] Graaf, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge, Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 2001

-
- [GuJ-1998] Günther, J.: Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess, eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis, Dissertation TU München 1998, Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [GVL-2013] Garcia-Valle, R., Peças Lopes, J. A.: Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Springer Science + Business Media, New York, 2013
- [GWD-2001] Grossmann, W. D., Entwicklungsstrategien in der Informationsgesellschaft, Mensch, Wirtschaft und Umwelt, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001
- [HaI-2013] Haider, I.: Straight to yes, asking with confidence and getting what you want, Capstone Publishing Ltd., Chichester, West Sussex, 2013
- [HaR-2001] Halaczek, T. L., Radecke, H. D.: Batterien und Ladekonzepte, Lithium-Ionen, Nickel-Cadmium, Nickel- Metall-Hybrid-Akkus, Goldkondensatoren, Ladetechnik, Herstellerübersicht, mit 20 Tabellen, 2. verb. Aufl., Franzis Verlag, München, 2001
- [HaU-2011] Hackenberg, U.: Der Volkswagen für das 21. Jahrhundert, ATZ extra, 125 Jahre Automobil, S. 44-50, April 2011
- [HaUh-2007] Harges, H.-D., Uhly, A.: Grundzüge der Volkswirtschaftslehre, 9. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2007
- [HaS-2010] Hauschildt, J., Salomo, S.: Innovationsmanagement, 5. Auflage, Vahlen Verlag, München, 2010
- [HaW-2013] Hab, G., Wagner, R.: Projektmanagement in der Automobilindustrie, Effizientes Management von Fahrzeugen entlang der Wertschöpfungskette, 4. Auflage, Springer Gabler, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [HaWe-2003] Hatchuel, A., Weil, B.: A New Approach of Innovativ Design, an Introduction to C-K Theory, 14th International Conference on Engineering Design 2003 (ICED), The Design Society and the Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003
- [HBB-2012] Høyrup, S., Bonnafous-Boucher, M., Hasse, C., Lotz, M., Møller, K.: Employee-Driven Innovation, a new approach, Palgrave Macmillan, Hampshire, 2012
- [HBG-2005] Hering, E., Bressler, K., Gutekunst, J.: Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [HCh-2010] Herrmann, Ch.: Ganzheitliches Life Cycle Management, Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [HeF-2012] Hecker, F.: Management-Philosophie, Strategien für die Unternehmensführung, Grundregeln für ein erfolgreiches Management, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
- [HEG-2011] Heißing, B., Ersoy, M., Gies, St.: Fahrwerkhandbuch, Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [HeL-2005] Heinrich, L. J., Lehner, F.: Informationsmanagement, Planung, Überwachung und Steuerung der Informationsinfrastruktur, 8. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2005
- [HJL-2012] Hilty, R. M., Jaeger, T., Lamping, M. (alle Hrsg.): Herausforderung Innovation, eine interdisziplinäre Debatte, MPI Studies on Intellectual Property an Competition Law 17, Springer-Verlag, Heidelberg Dordrecht London New York, 2012

-
- [HKN-2009] Hofbauer, G., Körner, R., Nikolaus, U., Poost, A.: Marketing von Innovationen, Strategien und Mechanismen zur Durchsetzung von Innovationen, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2009
- [HoP-2010] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge, Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft, Springer Verlag, Wien, 2010
- [HoR-2012] Hollmig, R.: Baukastenstrategie, Audi AG Ingolstadt, 28. Juni 2012, URL: http://www.bwl.wi-tum.de/contento/cms/upload/pdf/lehre/download/2012s/Vorlesung_SWM/Audi_Baukastenstrategie.pdf, Stand 12.04.2014
- [HoU-1992] Höft, U.: Lebenszykluskonzepte, Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement, Dissertation Freie Universität Berlin 1992, technological economics, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1992
- [HPS-2010] Hüttl, R. F., Pischetsrieder, B., Spath, D.: Elektromobilität, Potentiale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen, Springer-Verlag, 2010
- [HSE-2010] Hussy, W., Schreier, M., Echterhoff, G.: Forschungsmethoden, in Psychologie und Sozialwissenschaften, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [HSG-2013] Human Solutions Gruppe, Effiziente Innenraumentwicklung – ohne Nachbessern, Das 3D-CAD-Menschmodell RAMSIS, URL: http://www.human-solutions.com/mobility/front_content.php?idcat=252, Stand 20.08.2013
- [HTB-2003] Hering, E., Triemel, J., Blang, H.-P. (alle Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure, 5. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003
- [HuBa-2008] Hüttenrauch, M., Baum, M.: Effiziente Vielfalt, Die dritte Revolution in der Automobilindustrie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [HuEd-1992] Hubka, V., Eder, W. E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaften, Übersicht, Modell, Ableitungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- [HuW-2006] Hungenberg, H., Wulf, T.: Grundlagen der Unternehmensführung, 2. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [INEES-2013] INEES - Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen, URL: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-imbereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/kopplung-der-elektromobilitaet-an-erneuerbare-energien-und-deren-netzintegration/inees>, Stand 11.05.2014
- [JaM-2010] Jammal, M.: Stand der Technik und Anwendung von Superkondensatoren, Grin Verlag, München, 2010
- [JaK-2008] Jähnich, K.: Topologie, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [JIL-1972] Janis, I. L.: Victims of Groupthink, A Psychological Study of Foreign-Policy Decisions and Fiascoes, Houghton Mifflin Publishing, Boston, 1972
- [JoB-2011] Jöhnk, B.: Das Konzept des up!, ATZ-extra, Der neue VW up!, S. 16-21, Oktober 2011
- [JSW-2011] Johnson, G., Scholes, K., Whittington, R.: Strategisches Management, eine Einführung, Analyse, Entscheidung und Umsetzung, 9. aktualisierte Auflage, Pearson Studium Education, München, 2011
- [KAW-2011] Kotler, P., Armstrong, G., Wong, V., Saunders, J.: Grundlagen des Marketing, 5. aktualisierte Auflage, Pearson Studium Education, München, 2011

-
- [KeM-2003] Keklik, M.: Schumpeter, Innovation and Growth, Long-cycle dynamics in the post-WWII American manufacturing industries, Ashgate Publishing Limited, Hampshire, 2003
- [KEM-2004] Kist, A., Ersing, R., Müller, W.: Die neue Mercedes-Benz A-Klasse, Das Konzept, Definition der Raumökonomie, Sonderheft ATZ/MTZ, S. 16-23, Oktober 2004
- [KHV-2012] Kittel, K., Hehenberger, P., Vajna, S., Zeman, K.: Modelling and Optimisation of Mechatronic Systems Using the Autogenetic Design Theory, 13th international Conference, Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [KJN-2008] Kapferer, J.-N.: The New Strategic Brand Management, Creating and Sustaining Brand Equity Long Term, 4. überarbeitete Auflage, Kogan Page, London, 2008
- [KKP-1999] Kaas, K. P.: Diffusion und Marketing, Das Konsumentenverhalten bei der Einführung neuer Produkte, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1999
- [KKV-2009] Kittel, K., Vajna, S.: Development of an Evolutionary Based Design Method, International Conference on Engineering Design ICED'09, Stanford University USA, 24- 27. August 2009
- [KIF-2010] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie, Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [KleF-2011] Kley, F.: Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge, Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens, Dissertation Universität Karlsruhe 2011, Fraunhofer- Institut für System- und Innovationsforschung, ISI-Schriftenreihe, Fraunhofer Verlag, 2011
- [KIP-2002] Kleinaltenkamp, M., Plinke, W.: Strategisches Business- to- Business- Marketing, 2. Auflage, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [KoB-1996] Koslowski, B.: Theory and Evidence, the Development of Scientific Reasoning, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge (Massachusetts), 1996
- [KoF-2011] Köhler, E., Flierl, R.: Verbrennungsmotoren, Motorenmechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors, 6. erweiterte Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [KoH-2012] Kohler, H., Perspektiven der Elektromobilität für die Automobilindustrie, Daimler AG, Vortrag Elektro:mobilia, Köln, 22.02.2012
- [KoK-1998] Koller, R., Kastrup, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte, 2. Auflage, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- [KoN-2010] Kondratieff, N. D.: The Long Waves in Economic Life (1935), Neuauflage, Kissinger Legacy Reprints, Kissinger Publishing, Whitefish (Montana), 2010
- [KrF-2009] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik - Simulation - Sicherheit im Entwicklungsprozess, 3. Überarbeitete Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [KrM-2011] Kruft, M.: Recent Advances in Cathode Materials for Automotive Applications, Toda Kogyo Europe GmbH, Advanced Automotive Battery Conference Europe (AABC), Mainz, 2011
- [KroM-2009] Kropik, M.: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [KuK-2012] Kuchenbuch, K.: Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge, Dissertation Technische Universität Braunschweig 2012, AutoUni- Schriftenreihe, Band 25, Logos Verlag, Berlin, 2012

-
- [LeH-2013] Lemke, H.: Die Modul-Baukastenstrategie des VW-Konzerns im Zusammenspiel mit globalen Systemlieferanten, Volkswagen AG, Vortrag Zulieferertag Automobil Baden-Württemberg, Stuttgart, 12. November 2013
- [LGS-2012] Laux, H., Gillenkirch, R. M., Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie, 8. erweiterte und vollständig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [LiG-2005] Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure, mit Handbuch, 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005
- [LiR-2007] List, R.: CATIA V5, Grundkurs für Maschinenbauer, Bauteil- und Baugruppenkonstruktion Zeichnungsableitung, 3. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2007
- [LRS-2006] Lossack, R.-St.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006
- [LuM-2009] Lunanova, M.: Optimierung von Nebenaggregaten, Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen, Vieweg+Teubner Verlag GmbH, Wiesbaden, 2009
- [MaC-2008] Maaß, Ch.: E-Business Management, Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 2008
- [MaE-2011] Matys, E.: Praxishandbuch Produktmanagement, Grundlagen und Instrumente, 5. Auflage, Campus Verlag GmbH, Frankfurt/Main, 2011
- [MAH-1981] Maslow, A. H.: Motivation und Persönlichkeit, 12. Auflage,rororo - Rowohlt Verlag, Reinbek, 1981
- [MaO-2009] Mauroner, O.: Vermarktung von Innovationen durch Spin-offs, Dissertation Universität Jena 2009, Gierl, H, Helm, R., Huber, F. Sattler, H. (alle Hrsg.), Band 41, Reihe Marketing, Josef Eul Verlag GmbH, Lohmar Köln, 2009
- [MaW-2010] Macharzina, K., Wolf, J.: Unternehmensführung, das international Managementwissen, Konzepte, Methoden, Praxis, 7. Auflage, Gabler Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010
- [MBL-1995] Michaeli, W., Brinkmann, Th., Lessenich-Henkys, V. (alle Hrsg.): Kunststoff- Bauteile werkstoffgerecht konstruieren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995
- [MBW-2008] Meyer-Bohe, W.: Baukonstruktion, ein Kompendium, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2008
- [MeG-1982] Mensch, G.: Das technologische Patt, Innovation überwindet die Depression, Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main, 1982
- [MeLe-1997] Meyer, M. H., Lehnerd, A.P.: The Power of Product Platforms, Building Value and Cost Leadership, The Free Press, New York, 1997
- [MeM-2013] Meyer, M.: Future concepts for electrically driven axles, 10th. Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Intelligente Transport- und Verkehrssystem und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), Braunschweig, 13.-14. Februar 2013
- [MGP-1960] Miller, G. A., Galanter, E., Pribram, K. H.: Plans and the structure of Behavior, Holt, Reinhart and Winston Inc., New York City, 1960
- [MiW-2004] Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 4. neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2004
- [MKR-2012] Moawad, A., Kim, N. Rousseau, A.: Impact of Technology on Electric Drive Fuel Consumption and Cost, SAE International 2012-01-1011, SAE 2012 World Congress & Exhibition, Detroit, 24.-26. April 2012

-
- [NaD-2006] Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen, 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2006
- [NCAP-2012] New Car Assessment Programme: European New Car Assessment Programme, Tests und Bewertung, URL: <http://de.euroncap.com/de/tests.aspx>, Stand 04.04.2012
- [NKE-2013] Noreikat, K. E.: 10. Brennstoffzelle, Einführung und Grundlagen, MTZ, Jahrgang 74, S. 246-251, 3/2013
- [NPE-2011] Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (Hrsg.): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin, 2011
- [OBR-2011] Oertel, H. jr., Böhle, M., Reviol, T.: Strömungsmechanik Grundlagen – Grundgleichungen - Lösungsmethoden – Softwarebeispiele, 6., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [OpR-2012] Opresnik, M. O., Rennhak, C.: Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre, Eine Einführung aus marketingorientierter Sicht, Gabler Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012
- [OsR-2008] Ostertag, Ralph: Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie, Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung, Dissertation Universität Augsburg 2008, Gabler, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2008
- [PaA-1959] Patton, A.: Top Managements Stake in the Product Life Cycle, The Management Review, Vol. 58, Heft 6, S. 9-14 u. 67-79, June 1959
- [PAG-2014] Porsche Museum: „Porsche-Teamspirit Automobildesign“, URL: <http://www.porsche.com/museum/-/de/angebotefuerschulklassen/> Stand 14.02.2014
- [PBF-2007] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007
- [PeM-2004] Perlitiz, M.: Internationales Management, 5. Auflage, Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 2004
- [PfH-2011] Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.): Lenkungshandbuch, Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [PiF-2013] Braunschweiger Zeitung, Modern und der Tradition bewusst, VW-Aufsichtsratschef Ferdinand Piëch über die Parallelen unserer Zeitung zum Golf, Online Artikel vom 31.01.2013, URL: <http://www.braunschweiger-zeitung.de/incoming/modern-und-der-tradition-bewusst-id880499.html>, Stand 15.07.2013
- [PoL-2011] Ponn, J., Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011
- [PWV-1997] Pfeiffer, W. (Hrsg.), Weiß, E., Volz, Th., Wettengl, St.: Funktionalmarkt-Konzept zum strategischen Management prinzipieller technologischer Innovationen, Innovative Unternehmensführung, Planung, Durchführung und Kontrolle von Innovationen, Band 28, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1997

-
- [ReB-2006] Regius, B. v.: Qualität in der Produktentwicklung, vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006
- [ReK-2011] Reif, K.: Bosch Grundlagen Fahrzeug und Motorentechnik, Konventioneller Antrieb, Hybridantriebe, Bremsen, Elektronik, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [REM-2003] Rogers, E. M.: Diffusion of Innovations, 5. Auflage, Simon & Schuster Inc., New York, 2003
- [ReM-2007] Reisch, M.: Elektronische Bauelemente, Funktion, Grundsaltungen, Modellierung mit SPICE, 2. Vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlage, Berlin Heidelberg, 2007
- [RenM-2012] Renz, M.: Reinraumanlagen für Mikroelektronik und Pharma, aus Reinraumtechnik, 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Gail, L., Gommel, U., Hortig, H.-P. (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [RiA-2008] Rief, A.: Entwicklungsorientierte Steuerung strategischer Unternehmensnetzwerke, Dissertation Universität Hohenheim 2008, Gabler GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2008
- [RNB-2012] Reif, K., Noreikat, K. E., Borgeest, K. (alle Hrsg.): Kraftfahrzeuge- Hybridantrieb, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [RoK-2000] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 1, Konstruktionslehre, 3. Erweiterte und neu gestaltete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000
- [RoK-2001] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 2, Konstruktionskataloge, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001
- [RSD-2011] Rudolph, H.-J., Soppa, Th., Dahlems, C., Meurle, J.: Fahrzeugkonzept, ATZ-extra, Der neue Audi Q3, S. 18-23, Juli 2011
- [RuA-2003] Ruff, A.: Vertriebsrecht im Internet, Der Vertrieb und Fernabsatz von Waren und Dienstleistungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003
- [RWG-1991] Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren, Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele, Konstruktionsbücher, Band 27, 4. überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991
- [SAK-2005] Schächli, B., Andreasen, M. M., Kirchgeorg, M., Radermacher, F.-J.: Handbuch Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005
- [ScB-2005] Schwart, B.: The Paradox of Choice, why more is less, how the culture of abundance robs us of satisfaction, Harper Perennial, New York, 2005
- [ScG-2006] Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung, Grundlagen, Gestaltung und Konzepte, 3. Völlig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- [ScG-2012] Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement, Handbuch Produktion und Management 3, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [ScH-2009] Schäfer, H.: Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Expert Verlag, Renningen, 2009
- [SchM-2001] Schabacker, M.: Bewertung der Nutzen neuer Technologien in der Produktentwicklung, Dissertation Universität Magdeburg 2001, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Integrierte Produktentwicklung, Band 1, Magdeburg, 2001
- [ScK-2011] Schuh, G., Klappert, S. (beide Hrsg.): Technologiemanagement, Handbuch Produktion und Management 2, 2. Vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, 2011

-
- [SchK-2011] Schneider, K.: Modernes Sourcing in der Automobilindustrie, Dissertation Technische Universität München 2010, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011
- [ScM-2012] Schallehn, M.: Marken-Authentizität, Konstrukt, Determinanten und Wirkung auch Sicht der identitätsbasierten Markenführung, Dissertation Universität Bremen 2011, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
- [ScP-2011] Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend, 6. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 2011
- [ScT-2013] Schütz, Th.: Hucho- Aerodynamik des Automobils, Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, 6. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013
- [SeS-2002] Sell, R., Schimweg, R.: Probleme lösen, in komplexen Zusammenhängen denken, 6. korrigierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [SGK-2010] Stummer, Ch., Günther, M., Köck, A. M.: Grundzüge des Innovations- und Technologiemanagements, 3. aktualisierte Auflage, Facultas- Buchhandels AG WUV, Wien, 2010
- [SHB-2010] Schramm, D., Hiller, M., Bardini, R.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2010
- [Sinus-2013] SINUS Markt- und Sozialforschung: Die Sinus-Milieus ® in Deutschland 2010, URL: <http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html>, Stand 05.03.2013
- [SJH-2002] Stroebe, W., Jonas, K., Hewstone, M.: Sozialpsychologie, eine Einführung, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [SJN-2005] Stelling, J. N.: Kostenmanagement und Controlling, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2005
- [SLH-2006] Sachs, L., Hedderich, J.: Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R, 12. Vollständig neubearbeitete Auflage, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [SMS-2002] Marzian, S. H., Smidt, W.: Vom Vertriebsingenieur zum Market-Ing., Kunden gewinnen mit System, 2. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [SNP-2001] Suh, N. P.: Axiomatic Design, Advances and Applications, Oxford University Press, Oxford, 2001
- [SOS-2012] Schömann, S. O.: Produktentwicklung in der Automobilindustrie, Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen, Dissertation Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt 2011, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
- [StC-2012] Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile, Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [StR-2013] Straßer, R.: Auf die Topologie kommt es an, Titelthema Interview, ATZ elektronik, 8. Jahrgang, Heft 2, S. 94-96, 2013
- [SUR-2008] Seiffert, U., Rainer, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz, Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [SWM-2014] Schenk, M., Wirth, S., Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014

-
- [SyC-2008] Synwoldt, Chr.: Mehr als Sonne, Wind und Wasser, Energie für eine neue Ära, 1. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 2008
- [StH-2007] Strebel, H. (Hrsg.): Innovations- und Technologiemanagement, 2. Auflage, Facultas- Buchhandels AG WUV, Wien, 2007
- [ThK-2012] Thyssen Krupp Tailored Blanks: Herstellung von Tailored Blanks, Schneiden und Schweißen, URL: <http://www.tailored-blanks.com/de/produkte/tailored-products/thyssenkrupp-tailored-blanks/verfahren.html>, 2012, Stand 02.05.2012
- [TiT-2006] Tiefel, T. (Herausgeber): Strategische Aktionsfelder des Patentmanagements, alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge - Innovation im Fahrzeugbereich mit neuen Antriebskonzepten, Kurzweil, P., Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2006
- [TLN-2010] Thomas, O., Loos, P., Nüttgens, M.: Hybride Wertschöpfung, Mobile Anwendungssysteme für effiziente Dienstleistungsprozesse im technischen Kundendienst, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [TPr-2012] Toyota, Prius III, Toyota Internetauftritt, URL: http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/index.tmx?WT.mc_id=AdGroup_Modell_Prius&WT.adsite=google&WT.srch=1, Stand 03.04.2012
- [UJM-1994] Utterback, J.M.: Mastering the Dynamics of Innovation, Harvard Business School Press, Waretown (Massachusetts), 1994
- [VaB-1995] Vajna, S., Bercsey, T.: Anwendung genetischer Algorithmen in der Konstruktion, International Conference on Engineering Design ICED 95, Heft 23/2, S. 535-540, Praha, 22. – 24. August, 1995
- [VaBu-1998] Vajna, S., Burchardt, C.: Integrierte Produktentwicklung, Produktentwicklung, Konstruktionsmethodik, aus Forschung und Praxis, Konstruktion 50, Heft 04/1998, S. 45-50,
- [VaP-1998] Vajna, S., Podehl, G.: Durchgängige Produktmodellierung mit Features, CAD-CAM-Report, Nr. 3, S. 48-53, 1998
- [VaS-1982] Vajna, S.: Rechnerunterstützte Anpassungskonstruktion, Dissertation Universität Karlsruhe 1982, Fortschrittberichte der VDI-Z, Reihe 10, Nr. 16, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982
- [VaS-2014] Vajna, S.: Integrated Design Engineering, Interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung, Springer- Vieweg Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [VBC-2004] Vajna, S., Bercsey, T., Clement, S., Jordan, A., Mack, P.: Autogenetische Konstruktionstheorie, Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie, VDI Konstruktion, Heft 03/2004, S. 71-77,
- [VCJ-2005] Vajna, S., Clement, St., Jordan, A., Bercsey, T.: The Autogenetic Design Theory: An evolutionary view of the design process, Journal of Engineering Design, Volume 16, Heft 4, S. 423-440, 2005
- [VDI 2217] VDI-Richtlinie 2217, Datenverarbeitung in der Konstruktion, Begriffserläuterungen, VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Ausschuss Datenverarbeitung in der Konstruktion, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1979
- [VDI 2221] VDI-Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuss methodisches Konstruieren, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1993

-
- [VDI 2222] VDI-Richtlinie 2222, Methodische Entwicklung von Lösungsprinzipien, VDI-Handbuch Konstruktion VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuss Konstruktionsmethodik, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997
- [VDI 2223] VDI-Richtlinie 2223, Methodisches Entwerfen technischer Produkte, VDI-Handbuch Konstruktion VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuss Methodisches Gestalten, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004
- [VDI 2225] VDI-Richtlinie 2225, Konstruktionsmethodik, technisch- wirtschaftliches Konstruieren, technisch- wirtschaftliche Bewertung, insbesondere Blatt 3, VDI-Handbuch Konstruktion VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuss Technisch- wirtschaftliches Konstruieren, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1998
- [VKI-2008] Voigt, K.-I.: Industrielles Management, Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [VWB-2009] Vajna, S., Weber, C., Bley, H., Zeman, K.: CAx für Ingenieure, ein praxisbezogene Einführung, 2. Völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [VWK-2014] Volkswagen Konzern: Modulare Baukastenstrategie, Revolution aus dem Baukasten, Volkswagen Internetauftritt, URL: http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/investor_relations/Warum_Volkswagen/MQB.html, Stand: 19.05.2014
- [WaF-2011] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, Technologien, Märkte und Implikationen, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [WaG-2010] Walther, G.: Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke, Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus, Gabler Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010
- [WaH-2005] Wallentowitz, H.: Unkonventionelle Fahrzeugantriebe, Schriftenreihe Automobiltechnik, Vorlesungsumdruck, Version 3.1. Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, Aachen, 2005
- [WanH-2005] Wannowetsch, H.: Vernetztes Supply Chain Management, SCM-Integration über die gesamte Wertschöpfungskette, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [WanH-2010] Wannowetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik, Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion, 4. aktualisierte Auflage, Springer- Verlag, Heidelberg, Dodrecht, London, New York, 2010
- [WaR-2006] Wallentowitz, H., Reif, K. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2006
- [WaS-2001] Wartzack, S.: Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte, Dissertation Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Fortschritt-Berichte, VDI-Verlag, 2001
- [WeB-1999] Wegner, B.: Autogenetische Konstruktionstheorie – Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie auf der Basis Evolutionärer Algorithmen, Dissertation Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 1999
- [WeC-2014] Westphal, Ch.: Ein Beitrag zur semantischen Modellierung und Analyse von Informationsflüssen in der Produkteigenschaftsabsicherung, Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 2013, Fortschritt-Berichte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2014

-
- [WeE-2006] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [WeW-2001] Weber, Ch., Werner, H.: Schlussfolgerungen für „Design for X“ (DfX) aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen, 12. Symposium Design for X, S. 37-48, Neukirchen, Oktober, 2001
- [WFO-2009] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie, Technologietrends und Marktentwicklungen, 1. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009
- [WHW-2012] Winner, H., Hakuli, St., Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [WiM-2013] Winterkorn, M.: Die Zukunft fest im Blick: Nachhaltige Mobilitätskonzepte im Volkswagen Konzern, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, April 2013
- [WiM-2014] Winterkorn, M.: Rede Hauptversammlung 2014, Redemanuskript anlässlich der Hauptversammlung am 13. Mai 2014, Hannover, 2014
- [WJP-2011] Wulfsberg, J. P. (Hrsg.), Redlich, T.: Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie, Springer-Verlag, Heidelberg, 2011
- [WoH-2012] Wosnitza, F.; Hilgers, H. G.: Energieeffizienz und Energiemanagement, Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten, Springer Spektrum, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [WRC-2008] Wentz, R.Ch.: Die Innovationsmaschine, wie die weltbesten Unternehmen Innovationen managen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [WRM-2012] Weissinger, J., Rosen, W., Mack, S., Carstens, E.: Umsetzung des Fahrzeugkonzepts, ATZ-extra, Der neue SL von Mercedes-Benz, S. 40-49, April 2012
- [WWB-2011] Wahrig, G., Wahrig- Burfeind, R.: Brockhaus, Wahrig Deutsches Wörterbuch, 9. Auflage, Brockhaus in der Wissenmedia, Gütersloh, 2011
- [ZaC-1976] Zangemeister, Ch.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, 4. Auflage, Wittemannsche Buchhandlung, München, 1976
- [ZaM-2006] Zagel, M.: Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung, Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2006
- [ZCZ-2006] Zerres, C., Zerres, M. P.: Handbuch Marketing- Controlling, dritte überarbeitete Auflage, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [ZeD-2012] Zechmair, D.: Development of competitive drive train components for electric vehicles, Siemens AG, Vortrag Elektro:mobilia, Köln, 22.02.2012
- [ZFH-2003] Zimmermann, W., Fries, H.-P., Hoch, G.: Betriebliches Rechnungswesen, 8. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2003
- [ZRW-1984] Zmud, R. W.: An Examination of “Push-Pull” Theory Applied to Process Innovation in Knowledge Work, Management Science, Volume 30, Ausgabe 6, S. 727 – 738, Juni 1984
- [ZSM-2009] Zrzavý, J., Stoch, D., Mihulka, S.: Evolution, eine Lese-Lehrbuch, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2009

- [ZwF-1966] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild, Droemersche Verlagsanstalt Th. Knaur, München, Zürich, 1966

Glossar

Akkumulator:

Akkumulatoren sind sekundäre Zellen bzw. galvanische Elemente, die Energie abgeben, speichern und wieder aufnehmen können. Bei diesen Elementen ist der elektrochemische Prozess zur Erzeugung elektrischer Energie umkehrbar. Akkumulatoren, die heute in elektrifizierten Fahrzeugen zum Einsatz kommen, bestehen chemisch zumeist aus einer Lithium Ionen Verbindung.

Anforderungsliste (auch Lastenheft):

Zu realisierende am Anfang des Projektes vorgegebene Zieleigenschaften an das Produkt. Diese ergeben sich aus den allgemein formulierten Produkthanforderungen, welche in der Anforderungsliste in technische Anforderungen und -merkmale übersetzt werden [SAK-2005]. Die Anforderungsliste erhebt dabei kein Anspruch auf einen hohen Detaillierungsgrad des Produktes, sondern setzt die nötigen Ausgangsbedingungen für eine umfangreiche Ausarbeitung des zukünftigen Produktes. Aus den Anforderungen kann auch ein Lastenheft abgeleitet werden [DIN 69901-5]

Aufgabenklärung:

Die Aufgabenklärung dient zur Aufschlüsselung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen zu Beginn eines Projektes [WeB-1999]. Die Informationen können aus den Lastenheften, Entscheidungen des Managements oder sonstigen Informationsflüssen in einem Unternehmen (z.B. Steckbriefe, Anforderungslisten, etc.) stammen (vgl. Aufgabenstellung). Im Laufe des Projektes können neue oder fehlende Daten ergänzt werden bzw. Änderungen vorgenommen werden.

Barrieren (in Bezug auf Problemtypen):

Barrieren sind als Hindernisse bei der Transformation des Anfangs- in den Endzustand zu verstehen. Die Barrieren stehen im Zusammenspiel von Anfangs- und Endzustand (Soll- / Istzustand), den möglichen Operatoren sowie bei dialektischen Barrieren in inneren und äußeren Widersprüchen. Es muss durch Interpolation, in zeitlicher und räumlicher Reihenfolge die nötige Transformation umgesetzt werden [DoD-1987].

Baubarkeitsregeln:

Baubarkeitsregeln ergeben sich aus der Kombination von Produktelementen innerhalb eines Produktes, die bestimmte Varianten ausschließen. Ein Beispiel ist, dass ein Fahrzeug mit Anhängerkupplung keine elektronische Einparkhilfe bekommt [WanH-2010].

Baugruppe:

Baugruppen bestehen aus Unterbaugruppen, die wiederum aus Bauteilen bestehen. Aufgrund der hohen Komplexität von Kraftfahrzeugen sind die Unterbaugruppen in übergeordnete Systembaugruppen

zusammenzufassen. Eine Baugruppe kann auch als Modul beschrieben werden, die Unterbaugruppe entspräche dann einer Komponente, die letztendlich wieder aus weiteren Bauteilen besteht. Baugruppen können nach ihrer Art (Ausprägung) organisatorisch zusammengefasst werden (z.B. die Baugruppen Kraftstofftank, Wasserstofftank und Traktionsbatterie zu einer übergeordneten Segmentgruppe Energiespeicher). Mehrere Segmentgruppen bilden wiederum ein Segment.

Baukasten

Ein Baukasten versucht eine möglichst große Anzahl an Produktvarianten mit einem möglichst geringen Einsatz unterschiedlicher Produktelemente (Baugruppen, Unterbaugruppen, Bauteilen) mit unterschiedlichen Funktionen und Designs darzustellen [BiH-1971].

Bauteil- Dummy:

Ein Bauteil- Dummy ist ein in einer CAx-Konstruktion vorgesehener geometrische Raum für ein zu einem späteren Zeitpunkt zu konstruierendes Modul oder eine Komponente. Als Dummy kann ein Vorgängermodell oder einfache Flächen gewählt werden.

Conversion Design:

Auf einem bestehenden Fahrzeugdesign mit Verbrenner wird ein elektrischer Antrieb integriert bzw. umgerüstet.

Deduktiv:

Wissenschaftlicher Ausdruck für die Folgerung vom Allgemeinen auf das Spezielle.

Energiedichte:

Die Energiedichte, z.B. einer Zelle, wird gravimetrisch in Wh/kg und volumetrisch in Wh/l angegeben und stellt das Maß für den elektrischen Energieinhalt dar.

Funktionsfindung:

Die Lösungsfindung soll die angestrebte Produktfunktionalität, z.B. aus der Aufgabenstellung in einem Funktionsmodell, widerspiegeln. Die Gesamtfunktion wird dabei sukzessive durch Entwicklung von Teilfunktionen immer detaillierter beschrieben. Die Funktionen sollten in einer technischen Struktur abgebildet werden, damit mögliche Ergänzungen und Änderungen einfacher eingebracht werden können [WeB-1999].

Hochvolt:

Bei Fahrzeugherstellern wird im Zusammenhang mit Bauteilen, die zum elektrifizierten Teil des Antriebsstranges gehören, von Hochvoltkomponenten gesprochen (Hochvoltbatteriezelle, Hochvoltbord-

netz, usw.). Nach VDE-Vorschriften werden einheitlich Spannungen bis 1000 V als Niederspannung, darüber als Hochspannung definiert. Die Systemspannungen der Automobilhersteller liegen unterhalb von 1000 V, so dass eigentlich von Niedervoltkomponenten zu sprechen wäre. Aufgrund des allgemeinen Duktus, Fahrzeugkomponenten des elektrifizierten Antriebsstranges als Hochvoltkomponenten zu beschreiben, wird dies in dieser Arbeit auch übernommen.

Hybride:

Hybrid bedeutet aus technischer Sicht, dass zwei Dinge mit einander verbunden werden. Werkstoffseitig ist dies der Fall, wenn ein Bauteil aus mehr als einem Werkstoff hergestellt wird. Bei Fahrzeugen ist ein Hybrid eine Kombination von mindestens zwei Antriebsformen, zumeist die Kombination von Elektromotor und Verbrennungskraftmaschine.

Induktiv:

Wissenschaftlicher Ausdruck für die Folgerung vom Speziellen auf das Allgemeine (Gegenteil zu deduktiv).

Kapazität:

Die Kapazität der Batteriezelle beschreibt deren Elektrizitätsmenge bzw. die Bemessungskapazität, im Automobilssektor zumeist in Amperestunden (Ah) angegeben. Dieser Wert wird durch den Zell-Hersteller angegeben.

Koaxialmotor:

Ein Koaxialmotor kann innerhalb des Bauraums des Hilfsrahmens der Achse bedingt durch die kompakten Abmaße und die zylindrische Bauform aufgebaut werden. Bei Verwendung eines Differentials ist in dem Bauraum eine Planetenbauweise umzusetzen (vgl. [MeM-2013]).

Konzept (Fahrzeugkonzept):

Ein Konzept in der Automobilindustrie umfasst nach aktueller Literatur der Hersteller (vgl. beispielsweise [BiW-2011] [RSD-2011] [WRM-2012] [JoB-2011]) das Umsetzen von Zieleigenschaften, basierend auf Projektzielen oder Konzeptschwerpunkten im Fahrzeug. Je nach Hersteller wird die Konzeptentwicklung technisch oberflächlicher oder tiefergehend betrachtet.

Leistungsdichte:

Die Leistungsdichte, z.B. einer Zelle, wird in W/kg angegeben und stellt ein Maß für das elektrische Leistungsvermögen dar.

Leistungselektronik:

Die Leistungselektronik (LE) umfasst alle Bauteile, die für die Verschaltung oder Steuerung des Hochvoltbordnetzes eines Fahrzeuges benötigt werden. Dazu zählt insbesondere die Verbindung zwischen Traktionsbatterien, elektrischem Motor, aber auch Wandler für kleinere Spannungslagen (12 V Bordnetz). Zusätzlich beinhaltet die LE ein Energiemanagement und überwacht bzw. steuert das Hochvoltsystem. Die Leistungselektronik ist somit quasi ein erweitertes Motorsteuergerät der E-Maschine (vgl. [BaS-2010]). Bei der Umwandlung entstehen vor allem Wärmeverluste, weswegen eine Kühlung vorgesehen werden muss. Der Wechsel von Gleichstrom zu Wechselstrom ist nötig, wenn der Motor mit mehrphasigem Wechselstrom betrieben wird, da die Akkumulatoren Gleichstrom abgeben. Umgekehrt läuft der Prozess, wenn über den Motor rekuperiert wird, d.h. der Wechselstrom in Gleichstrom gewandelt werden muss, um diesen in der Traktionsbatterie zu speichern.

Nennspannung:

Bei der Nennspannung oder auch Bemessungsspannung der Batteriezelle handelt es sich um einen spezifizierten Wert der elektrischen Spannung der Zelle, deren Wert durch den Hersteller durch Testmessungen ermittelt wird. Es handelt sich um eine mittlere Spannung im Normalbetrieb zur Kennzeichnung einer Zelle (nach DIN EN 60050). Die physikalische Einheit ist Volt (V).

Obere-Spannungsgrenze oder Peakspannung der Batteriezelle:

Die obere Spannungsgrenze ist eine Angabe des Herstellers der Batteriezelle. Diese Spannungslage wird vor allem in der frühen Phase des Produktlebenszyklus und nur bei voll aufgeladener Batterie erzielt. Die physikalische Einheit ist Volt (V).

Perzentil:

Perzentil umschreibt einen Anteil an der Bevölkerung hinsichtlich einer bestimmten Eigenschaft. Zur Charakterisierung ergonomischer Eigenschaften sind in der DIN 33402-2 unterschiedliche Perzentile der Bevölkerung, z.B. gemessen an der Körperhöhe, einbezogen. Da sind neben dem Median (50. Perzentil) jeweils auch das 5. Perzentil und 95. Perzentil angegeben, d. h., Personen, die zu den kleinsten 5 % bzw. den größten 5 % der Bevölkerung gehören.

Purpose Design:

Es wird ein neues Design, speziell auf die elektrischen Komponenten des Antriebsstranges, entwickelt. Die meisten Freiheitsgrade bieten hier reine Elektrofahrzeuge.

SCR:

Steht für Selective catalytic reduction (SCR) und umschreibt einen Prozess zur Reduzierung von Stickoxiden (NO_x) im Abgas von Dieselmotoren. Bei Dieselmotoren mit magerer Mischung (Mager-

motor) ist Sauerstoff im Abgas was eine hohe NO_x -Produktion zur Folge hat. Mit Hilfe der Zuführung von hochreinem Harnstoff in demineralisiertem Wasser können die Stickoxide im Abgasstrang unter bestimmten thermischen Bedingungen gebunden, der NO_x -Ausstoß verringert werden.

SOC:

Kurzfassung für State of Charge (Ladezustand), ein prozentualer Wert, der die verfügbare Kapazität des Akkumulator oder des gesamten Energiespeichers bezogen auf die Nennkapazität beschreibt. Bei der Entnahme von Energie aus dem Speicher zeigt der SOC die restliche noch entnehmbare Energie an. Im Gegensatz zum SOC steht der DOD, der Depth of Discharge, welcher den Entladezustand angibt.

Systembaugruppe:

Bei höherer Komplexität einer Baugruppe (Modul) können Unterbaugruppen (Komponenten) einer übergeordneten Systembaugruppe (Systemkomponente) zugeordnet sein. Die Systembaugruppen entstehen, wenn z.B. die Unterbaugruppen von unterschiedlichen Herstellern gefertigt und vor der Implementierung in der Baugruppe gesondert, in einem eigenen, der Produktionslinie ausgeschleusten Arbeitsschritt zusammengebaut werden oder wenn die Komponenten einer Systembaugruppe erst über verschiedene Zählpunkte (vgl. Zählpunkteprinzip der Produktion zu einem funktionierenden System verbunden werden (Beispielsweise Lautsprechersystem).

Targets:

Targets sind an den Entwickler gestellte Anforderungen, die das Produkt erreichen soll (Zieleigenschaften).

Traktionsbatterie:

Die Traktionsbatterie ist ein zum Fahrzeugvortrieb vorgesehener elektrischer Speicher. Eine Traktionsbatterie beinhaltet mehrere Batteriezellen die wiederum in Batteriemodulen zusammengefasst werden können.

Untere Spannungsgrenze der Batteriezelle:

Die untere Spannungsgrenze ist eine Angabe vom Zell- Hersteller, bis zu der die Zelle eingesetzt werden kann. Die physikalische Einheit ist Volt (V).

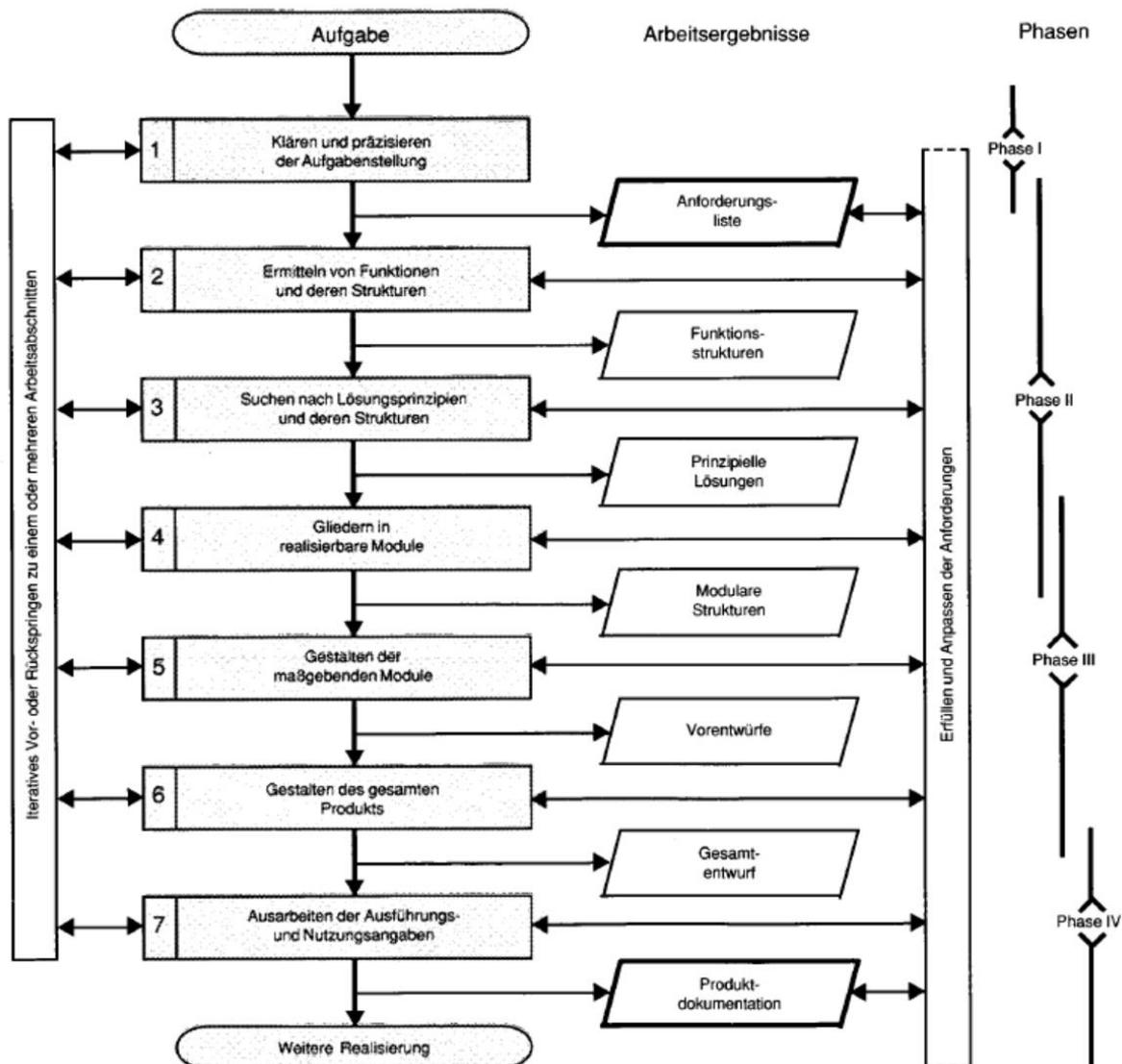
Volllast:

Ist der Zustand der VKM, wenn diese bei gegebener Drehzahl das maximale Drehmoment für den Vortrieb zur Verfügung stellt. Betriebspunkte die außerhalb dieser Leistungskurve liegen sind dann im Teillastbereich.

Anhang

A Vorgehensmodelle im Entwicklungsprozess

A1 Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren



Anhang 1 Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren aus [VDI 2221]

A2 Beschreibung der Analyse und Synthese in der Produktentwicklung nach WEBER

Eigenschaften (P_j) und Merkmale (C_j) sind über Beziehungen (R_j) verbunden, die wiederum von äußeren Bedingungen (EC_j) beeinflusst werden können. Eine Eigenschaft kann dabei abhängig von mehreren Merkmalen sein (analytische Sicht) oder ein Merkmal kann mehr als eine Eigenschaft beeinflussen (synthetische Sichtweise). Die Herausforderung der Analyse liegt zumeist in nicht sauber quantifizierten Eigenschaften. Wenn diese vorliegen, ist auf Basis detaillierter Produktmodelle eine Simulationen möglich. Eine weitere Problematik ergibt sich aus nicht quantifizierbaren Eigenschaften. Diese muss man in Regeln überführen, um eine Optimierungsansatz zu finden. Bei der synthetischen Sichtweise sind Zielkonflikte unvermeidlich, da Merkmale durch mehrere Eigenschaften unterschiedlich beeinflusst werden. Die Synthese ist weiter in die Synthese des Produktes und in die Synthese von Produkt

und äußeren Bedingungen zu differenzieren. Bei der Synthese des Produktes werden auf Basis der Produkteigenschaften und unter Berücksichtigung der äußeren Einflüsse die relevanten Merkmale des Produktes festgelegt. Bei der Synthese von Produkt und äußeren Bedingungen werden auf Basis der Eigenschaften nicht nur Produktmerkmale, sondern auch in einem bestimmten Maße die äußeren Bedingungen festgelegt. In der Synthese besteht die Herausforderung in der Festlegung der Produkteigenschaften und qualitativen Produktmerkmalen. Damit lassen sich für den Entwickler die vorhandenen Merkmale nur noch quantitativ ändern. Der Lösungsraum wird stark eingeschränkt. Die äußeren Bedingungen (EC_j) ermöglichen es, die einzelnen Eigenschaften in einem funktionalen Kontext zu sehen. Dies betrifft z.B. Nutzungs- und Nutzerprofile. Eine weitere Einschränkung der möglichen Lösungen besteht in der Vorgabe von Teillösungen in Form von Merkmalen über die Produkteigenschaften. Diese können sowohl aus Eigenschaften wie auch aus Merkmalen bestehen [VWB-2009] [WeW-2001].

Nach Durchführung von Analyse und Synthese ergeben sich Lösungselemente und –muster. Diese bestehen aus dem Zusammenhang von Merkmalen, Eigenschaften und bekannten Beziehungen untereinander. Wenn diese Gesamtheit einer Beziehung bekannt ist, entsteht Konstruktionswissen. Dies kann in beiden Richtungen (Synthese und Analyse) der Entwicklung genutzt werden [VWB-2009].

B Grundlegende Auslegungsmaßnahmen von elektrifizierten Fahrzeugen

B1 Definition der Maße des Maßkonzeptes für Fahrzeuge

Anhang Tabelle B1 Definition der Maße des Maßkonzeptes aus [DIN-70 020] und [AsM-2007]

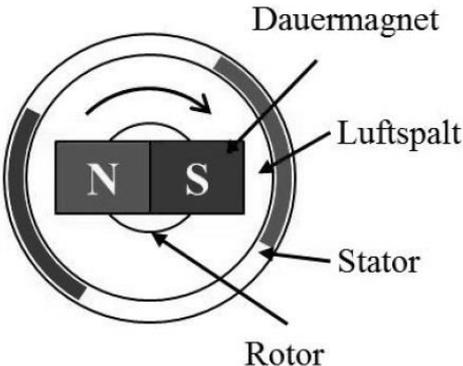
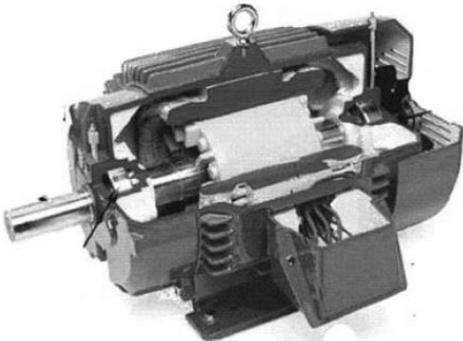
Kurzzeichen	Definition	Abbildung
L9	Sitztiefe – vorn Waagerechtes Maß in der Y-Ebene des R-Punktes, gemessen von der Sitzvorderkante bis zu einer X-Ebene, die die unbelastete Sitzlehne in der Höhe der unbelasteten, hinteren Sitzpolsterung tangiert.	Abbildung 3-4
L16	Sitztiefe – 2. Sitzreihe Waagerechtes Maß in der Y-Ebene des hinteren, äußeren R-Punktes zwischen der Sitzvorderkante und einer X-Ebene, die die unbelastete Sitzlehne in der Höhe der unbelasteten Sitzpolsterung tangiert.	Abbildung 3-4
L53	R-Punkt bis Fersenpunkt – vorn Waagerechtes Maß zwischen dem R-Punkt und dem Fahrpedal-Fersenpunkt. Für zweite und dritte Sitzreihe L53-2 bzw. -3, dann Abstand R-Punkt zum Fersenpunkt.	Abbildung 3-2
L101	Radstand Geometrischer Abstand zwischen den Radmitten der Vorder-	Abbildung 3-3

	<p>und Hinterräder.</p> <p>Falls ein Fahrzeug links und rechts unterschiedliche Radstände hat, ist nur die linke Seite anzugeben.</p>	
L103	<p>Fahrzeuglänge</p> <p>Länge des Fahrzeuges über alles, gemessen einschließlich Stoßfänger usw.</p>	Abbildung 3-3
L104	<p>Überhanglänge – vorn</p> <p>Abstand des vordersten Punktes des Fahrzeuges von der Radmitte der Vorderachse.</p> <p>Falls ein Fahrzeug links und rechts unterschiedliche Radstände hat, ist nur die linke Seite anzugeben.</p>	Abbildung 3-3
L105	<p>Überhanglänge – hinten</p> <p>Abstand des hintersten Punktes des Fahrzeuges von der Radmitte der letzten Achse.</p> <p>Falls ein Fahrzeug links und rechts unterschiedliche Radstände hat, ist nur die linke Seite anzugeben.</p>	Abbildung 3-3
L210	<p>Gepäckraumlänge in Höhe der Sitzlehnen der 2. Sitzreihe – 2 (für Limousine mit Schrägheck)</p> <p>Kleinste paralleles Maß zum Gepäckraumboden in der Null-Y-Ebene zwischen der X-Ebene an den Rückseiten der Lehnen der 2. Sitzreihe und der Innenseite der geschlossenen Heckklappe, gemessen in der Höhe der Lehnen der 2. Sitzreihe. (Für Kombi Maß L205, gleiche Messung nur auf Höhe der Gürtellinie.)</p>	Abbildung 3-3
W10	<p>Ellenbogenbreite – vorn</p> <p>Größtes Maß in der X-Ebene durch den R-Punkt. Gemessen mit der Schablone nach Bild 5[DIN-70 020] auf den Armlehnen. Falls das nicht möglich ist, muss das Maß so nah wie möglich an der X-Ebene durch den R-Punkt gemessen werden. Bei Fahrzeugen ohne Armlehnen soll das Maß 100 mm über dem R-Punkt gemessen werden.</p>	Abbildung 3-4
W11	<p>Ellenbogen – 2.Sitzreihe</p> <p>Wie W10.</p>	Abbildung 3-4
W16	<p>Sitzpolsterbreite – Fahrersitz</p> <p>Größte Maß in der X-Ebene, gemessen über die gesamte Breite des unbelasteten Fahrersitzpolster.</p>	Abbildung 3-4
W20	Y- Koordinate des R-Punktes - vorn	Abbildung 3-4
W25	Y- Koordinate des R-Punktes – 2. Sitzreihe	Abbildung 3-4
W26	Y- Koordinate des R-Punktes – 3. Sitzreihe	-
W101	Spurweite – vorn	Abbildung 3-2

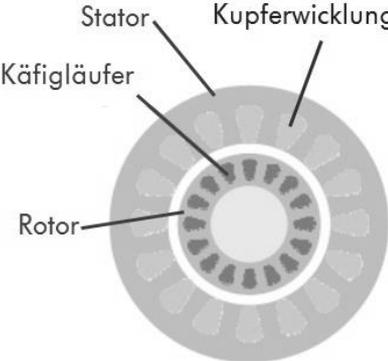
	Abstand der Reifenmittellinien, gemessen auf der Standebene	
W102	Spurweite – hinten Wie W101.	Abbildung 3-2
W103	Fahrzeugbreite Breite des Fahrzeuges über alles gemessen. Über die Fahrzeugbreite hinausragen dürfen Außenspiegel, flexible Schmutzfänger, Begrenzungsleuchten, herablaßbare Trittstufen, Einrichtungen für Zollverschlüsse, Reifen im Berührungsbereich der Fahrbahn und Schneeketten.	Abbildung 3-2
W202	Kleinste Breite zwischen den Radhäusern Kleinste Maß in der X-Ebene zwischen den verkleideten Radhäusern. Bei Fahrzeugen ohne Verkleidung ist bis zum Blech zu messen.	Abbildung 3-2
H5	R-Punkt bis Standebene – vorn Senkrechtes Maß zwischen dem R-Punkt und der Standebene.	Abbildung 3-3
H30	R-Punkt bis Fersenpunkt – vorn Senkrechtes Maß zwischen dem R-Punkt und dem Fersenpunkt. Für zweite und dritte Sitzreihe H30-2 bzw. -3 Maß.	Abbildung 3-2
H61	Effektiver Kopfraum – vorn Maß zwischen dem R-Punkt und der Dachverkleidung, gemessen entlang einer um 8° von der Senkrechten nach hinten geneigten Linie, zuzüglich 102 mm. Für zweite und dritte Sitzreihe H61-2 bzw. -3 Maß.	Abbildung 3-2
H100	Fahrzeughöhe Senkrechtes Maß zwischen dem höchsten Punkt der Karosserie und der Standebene (einschließlich Verdeck, Dachreling usw.).	Abbildung 3-3
H106	Überhangwinkel – vorn Winkel zwischen der Standebene des Fahrzeuges und einer Ebene, die die statischen Rollradien der Reifen der ersten Achse tangiert und die den äußersten, tiefsten, festen Punkt des Fahrzeuges vor der Achse berührt.	Abbildung 3-5
H107	Überhangwinkel – hinten Winkel zwischen der Standebene des Fahrzeuges und einer Ebene, die die statischen Rollradien der Reifen der letzten Achse tangiert und die den äußersten, tiefsten, festen Punkt des Fahrzeuges hinter der Achse berührt.	Abbildung 3-5
H114	Windlaufpunkt bis Standebene Senkrechtes Maß zwischen dem Windlaufpunkt und der Standebene	Abbildung 3-3

H117	Überhangwinkel – vorn – Messlast 3 Wie bei Winkel H 106, jedoch Messlast 3.	Abbildung 3-5
H118	Überhangwinkel – hinten – Messlast 3 Wie bei Winkel H 107, jedoch Messlast 3.	Abbildung 3-5
H147	Rampenwinkel Komplementärwinkel des Winkels, gemessen zwischen den Ebenen, die die statischen Rollradien der Vorder- und Hinterräder tangieren und einen Punkt an der Unterseite des Fahrzeuges berühren, bei dem sich der größte Rampenwinkel ergibt, den das Fahrzeug befahren kann.	Abbildung 3-5
H156	Bodenfreiheit Kleinstes senkrechtes Maß zwischen dem Fahrzeug und der Standebene. Die Lage des Meßpunktes ist anzugeben	Abbildung 3-3
H194	Closed Endgate Height The maximum distance (normal to ground) between the top of the closed endgate and the ground, at the vehicle centerline. For vehicles equipped with more than one horizontally hinged closure, measure with the lift-gate/glass in the open position.	Abbildung 3-3
H195	Höhe zwischen Heckklappen-/ Hecktüröffnung und Standebene Senkrechtes Maß in der Null-Y-Ebene zwischen der Oberkante der unteren Begrenzung der Hecktür-/ Heckklappenöffnung und der Standebene. Anmerkung: Ist der nicht eingedrückte Belag des Gepäckraumbodens über der unteren Begrenzung der Hecktür-/ Heckklappenöffnung, wird vom Bodenbelag des Gepäckraumes aus gemessen.	Abbildung 3-3
H250	Höhe des Gepäckraumbodens bis Standebene Senkrechtes Maß in der Null-Y-Ebene zwischen dem tiefsten Punkt des nicht eingedrückten Belages des Gepäckraumbodens und der Standebene. (nach [AsM-2007] das Maß H253)	Abbildung 3-3
H252	Höhe des Gepäckraums Kleinstes, senkrechtes Maß in der Null-Y-Ebene zwischen dem Bodenbelag und der oberen Begrenzung des Gepäckraumes, gemessen im Bereich zwischen der Gepäckraumöffnung und der Hintersitzlehne (die Meßstelle ist anzugeben). Für Kombis gilt das Maß H298, von tiefsten Punkt des Gepäckraumbodens bis zur Lehne der 2. Sitzreihe. Für Pick-Ups das Maß H194, als höchsten Punkt der Heckklappe bzw. die Höhe bis zur Fenster-scheibe der Kofferraumklappe.	Abbildung 3-3

B2 Aufbauarten von E-Maschinen



Anhang 2 Gleichstrommotor [StC-2012]

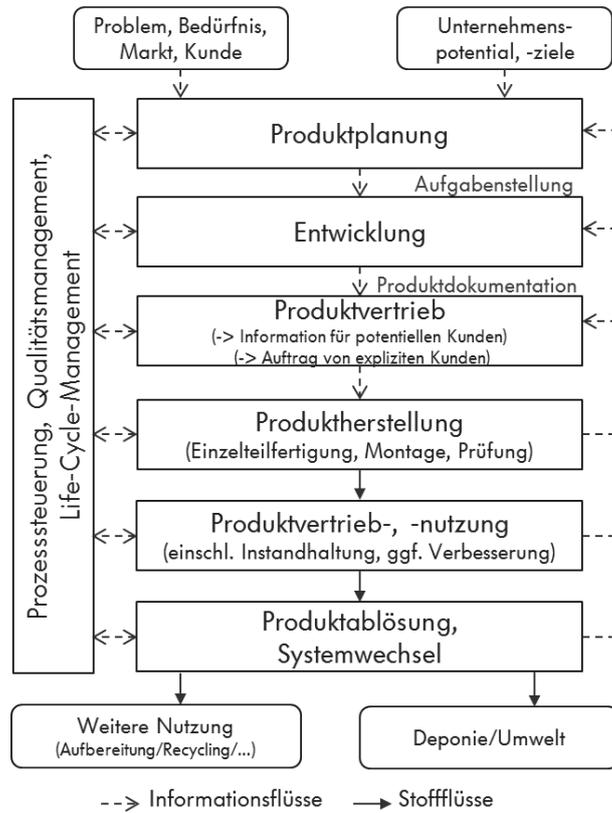


Asynchronmaschine

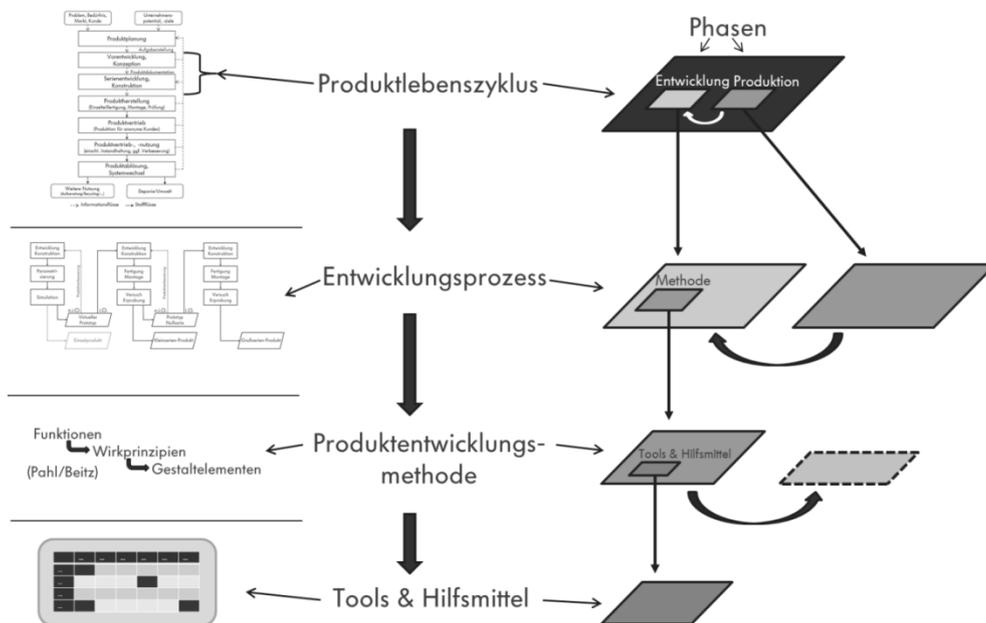
Anhang 3 Asynchronmaschine nach [ZeD-2012]

C Entwicklungsprozess für Automobile, insbesondere für elektrifizierte Antriebe

C1 Produktlebenszyklus Automobilindustrie



Anhang 4 Produktlebenszyklus Automobilindustrie



Anhang 5 Die Entwicklungsphase im Produktlebenszyklus

C2 Unterschiede zwischen Modul, Komponente und System

Anhang Tabelle C2 Unterschiede zwischen Komponente, Modul und System in betriebswirtschaftlicher und technischer Literatur

	Komponente	Modul	System
KLUG vgl. [KIF-2010] (betriebswirtschaftlich)	-	Ein Modul kann und komplett in das Fahrzeug montiert werden und ist ein Zusammenbau von mehrere Bauteilen und/oder Baugruppen, welche verschiedene Funktionen beinhalten.	Systeme sind bauraumübergreifend angeordnet sowie auf eine Hauptfunktion ausgerichtet und stellen eine stellen eine funktionale Einheit dar, bei der die Elemente in Relation zueinander stehen. Dabei müssen Systeme nicht als eine Montageeinheit darstellbar sein.
SCHUH vgl. [ScG-2012] (technisch)	Abgeschlossene Einheit, in funktionaler und in physischer Hinsicht (Physische Unabhängigkeit= Grad der Trennbarkeit von Komponenten in der Nutzungsphase)	(individuelle Komponenten) haben eine hohe funktionale wie auch physische Unabhängigkeit	-
OSTERTAG vgl. [OsR-2008] (betriebswirtschaftlich)	-	Sind physisch miteinander verbundene Bauteile und stellen aus Produktionssicht eine abgrenzbare und einbaufertige Einheit dar.	Systeme und Module befinden sich auf ähnlicher Ebene. Sie verbinden unterschiedliche Bauteile zu einer funktionalen Einheit. Dabei müssen, im Gegensatz zum Modul, die Elemente eines Systems nicht notwendigerweise physisch zusammenhängen (nach PILLER und WARINGER vgl. [PiW-1999]).
REICHHUBER vgl. [RAW-2010] (betriebswirtschaftlich)	-	Ist eine Kombination mehrerer Teile zu einer standardisierten unabhängigen Baugruppe	-
ANDREBEN vgl. [AnT-2005] (betriebswirtschaftlich)	-	Funktional und physikalische unabhängige Elemente mit standardisierte Schnittstellen zwischen den Elementen, die ermöglichen, dass Module untereinander ausgetauscht und kombiniert werden können.	Die wissenschaftliche Diskussion zur Modularisierung führt demnach zu Abgrenzungsschwierigkeiten. Ziel der Modulbildung ist die Komplexitätsreduktion im Sinne eines Standardisierungs- oder Gruppierungsaspektes <ul style="list-style-type: none"> • Standardisierung = Schnittstellen • Gruppierung = Zerlegung i.S.v. Komponente, Module und Systeme
WALLENTOWITZ FREIALDENHOVEN OLSCHEWSKI vgl. [WFO-2009] (technisch)	Elemente die in Systeme oder Module integriert werden können werden als Komponenten bezeichnet. Komponenten müssen nicht zwingend physisch zusammen montiert werden und können in mehrere Modulen zum Einsatz kommen.	Vormontierte Einheiten die aus Komponenten bestehen und komplett ins Fahrzeug verbaut werden.	In einem System wird eine übergeordnete Gesamtfunktion durch das zusammenfassen verschiedener Teilfunktionen geschaffen. Es gibt teilweise eine Kongruenz zwischen Modulen und Systemen. So können z.B. Abgasanlagen oder Komplettsitze sowohl als System als auch als Module aufgefasst werden.
Duden vgl. [Duden-2014] (Terminus)	Bestandteil bzw. Element eines Ganzen.	austauschbares, komplexes Element innerhalb eines Gesamtsystems eines Produktes, welches eine geschlossene Funktionseinheit bildet.	Zum einen ein Prinzip, nach dem etwas gegliedert, geordnet wird, zum Anderen eine Einheit aus technischen Bauelementen, die eine gemeinsame Funktion haben.

C3 Ansprüche an ein Produkt

Aus den Ansprüchen an das Produkt lassen sich die Anforderungen an das Fahrzeug ableiten und neben den technisch funktionellen Anforderungen in weitere unterteilen (aus [BrS-2013]):

- kundenrelevante
- gesetzliche
- umwelttechnische
- sicherheitstechnische
- stilistische
- wirtschaftliche
- produktionstechnische

- wartungstechnische
- qualitätstechnische Ansprüche

Die Ansprüche schlüsseln sich in Rand und Zwangsbedingungen des Produktes auf.

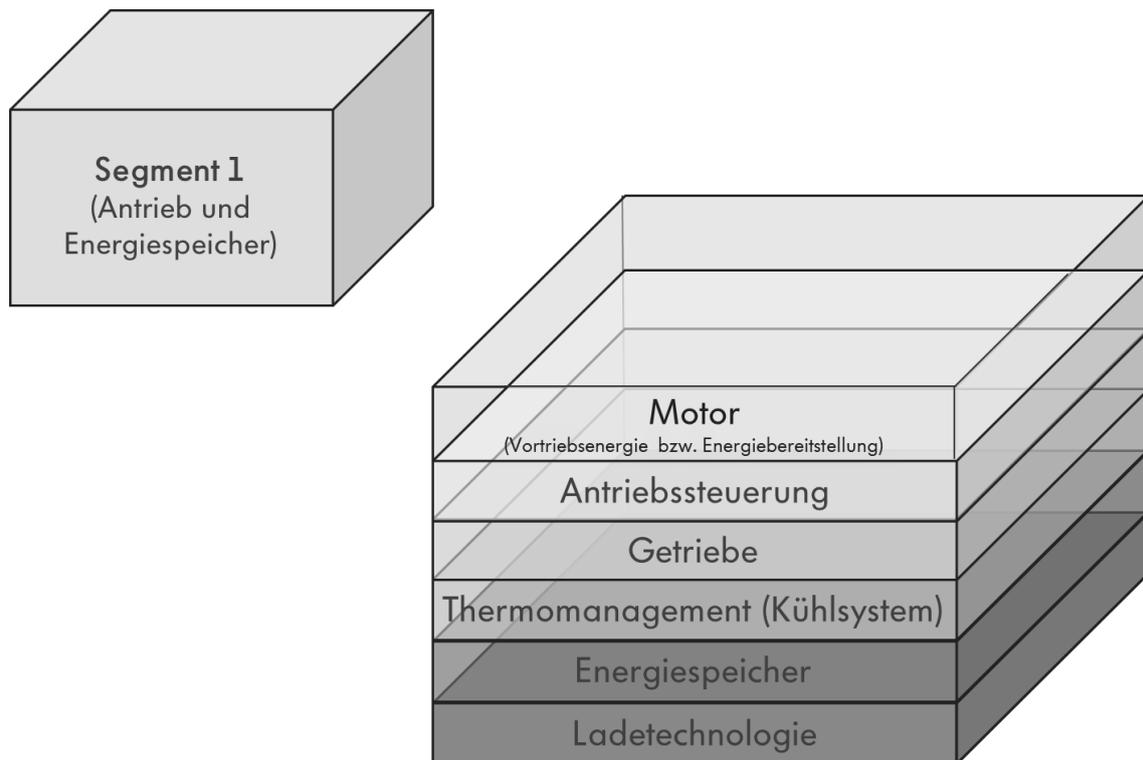
D Abhängigkeiten in der elektrifizierten Fahrzeugauslegung

D1 Segmente des Konzeptfahrzeugs

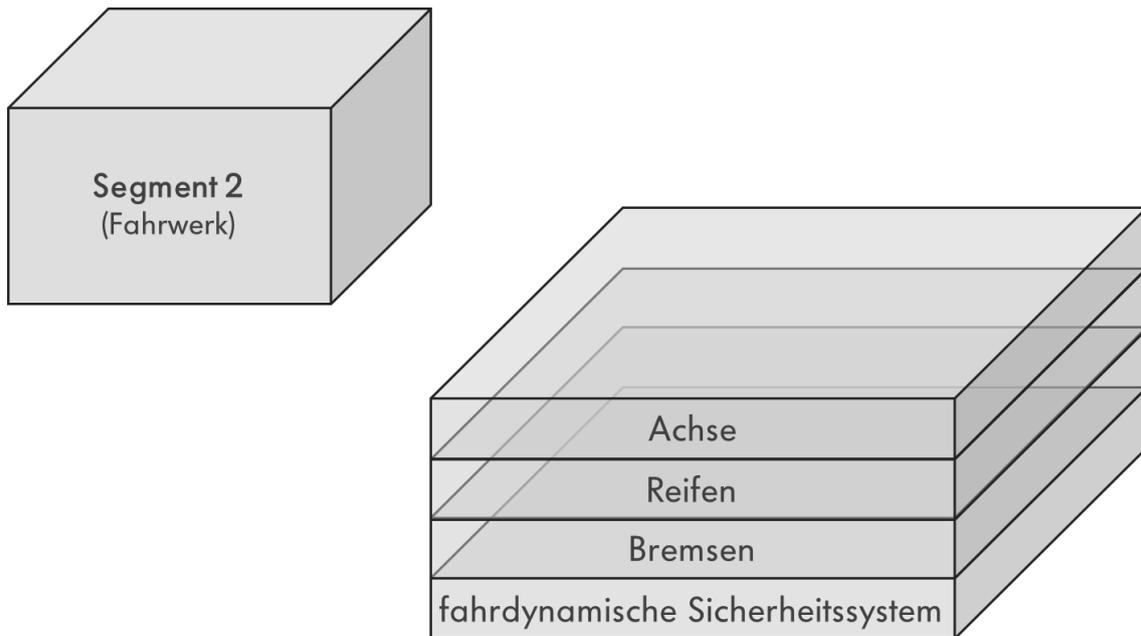
Im Folgenden sind die Segmente, in die das Fahrzeug in dieser Arbeit unterteilt wird, aufgeführt.

In diesem Zusammenhang ist eine Ausnahme der in 5.1 *Vernetzungsdiagramme* aufgeführte Aufteilung der Segmente in Segmentgruppen zu nennen, die auf ein beliebiges Fahrzeugkonzept passt. Im Segment 1 (Antrieb und Energiespeicher) kann bei der Verwendung von elektrischen Radnabenantrieben (Baugruppe E-Maschine) in einem reinen Elektrofahrzeug theoretisch auf jede Art von Getriebe oder Differenzial verzichtet werden, praktisch ist das Einsatzszenario solcher Antriebe noch eingeschränkt.

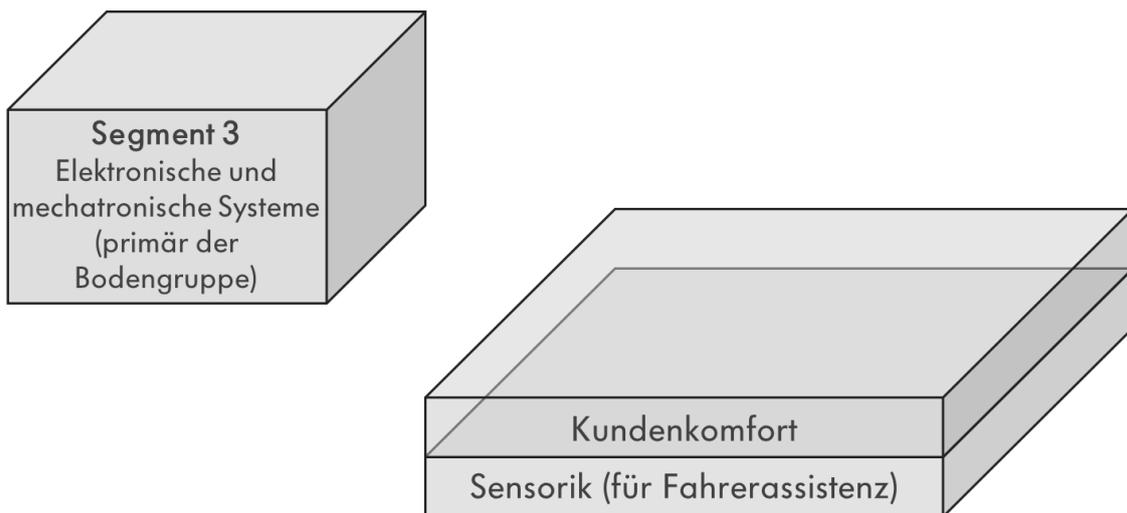
Des Weiteren besteht die Möglichkeit Unterbaugruppen auch auf eine Hierarchieebene nach oben und als Baugruppe im jeweiligen Segment zu setzen. Dies obliegt der Freiheit des Gestalters des Konzeptmodells.



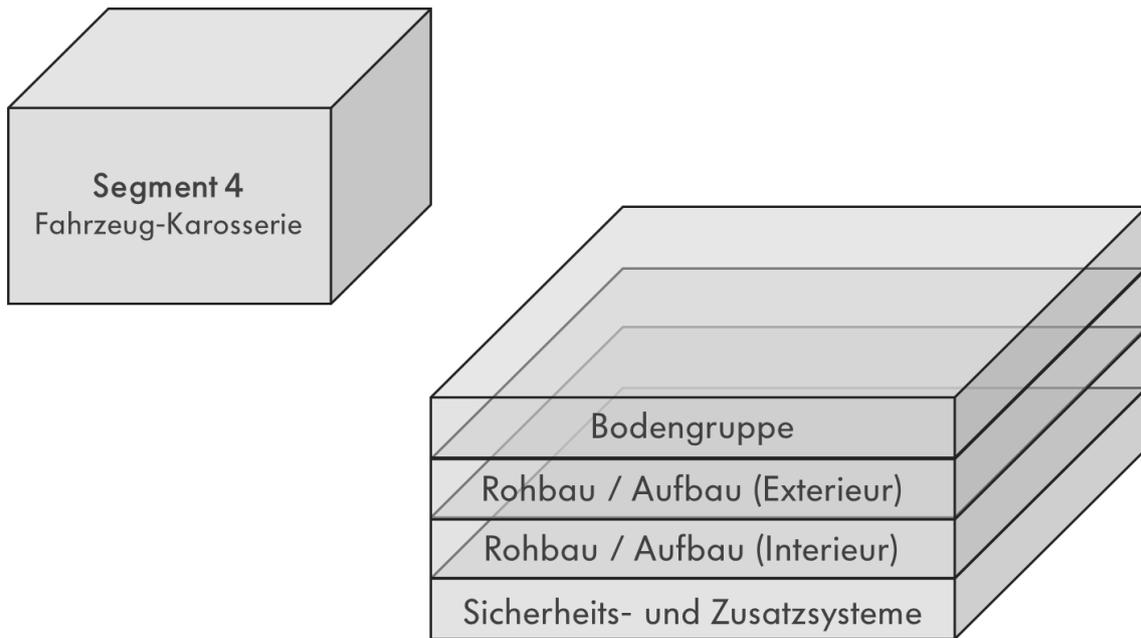
Anhang 6 Segment 1 Antrieb und Energiespeicher



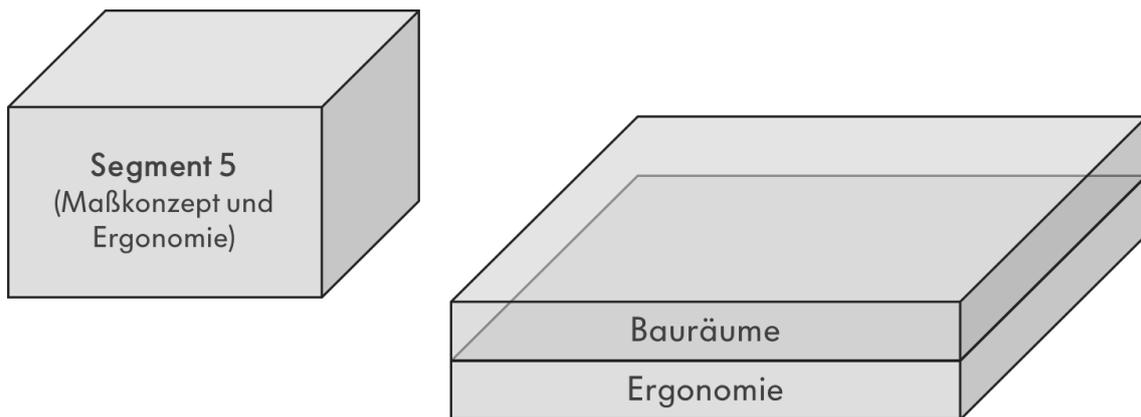
Anhang 7 Segment 2 Fahrwerk



Anhang 8 Segment 3 Elektronische und mechatronische Systeme primär der Bodengruppe



Anhang 9 Segment 4 Fahrzeug Karosserie mit elektronischen und mechatronischen Systemen



Anhang 10 Segment 5 Maßkonzept und Ergonomie

D2 Verwendete Produktelemente des Modell KEIBPro 11-14

Modell KEIBPro 11-14

Segment	Segmentgruppe	Baugruppe	Systembaugruppe	Unterbaugruppe	Bauteil		
Segment Antrieb und Energiespeicher	Segmentgruppe Motor	Verbrennungsmotor	Motorsteuerung (mechanischer Aufbau)	Ventile			
				Zahnriemen			
				Gemischbildung	Vergaser		
					Einspritzanlage		
				Hilfs- und Betriebsstoffe	Betriebsstoffe	Kraftstoff	
					Hilfsstoffe	Schmieröl	
						Luft (Umgebung)	
				Motorgehäuse VKM	Zylinderkopfhäube		
					Zylinderkopf		
					Kurbelgehäuse		
					Ölwanne		
					Kurbetrieb	Kolben	
						Pleuelstange	
						Kurbelwelle	
				Aufladung	Ladeluftkühler (Abgaswärmenutzung)		
				Kompressoren			
				Abgasturbolader			
			Abgasanlage	Katalysator			
				Verrohrung			
				Schalldämpfer			
				Partikelfilter			
			Hilfseinrichtungen VKM	Zündanlage			
				Motorschmierng			
				Motor Kühlung			
				Schwungrad			
	E-Maschine	Motorgehäuse EM	Stator (Ständer)	Polschuh			
				Permanentmagnet			
				Erregerspule			
			Rotor	Läuferwicklungen / Leiterschleife(n)			
				Antriebswelle			
			Ständer aus Eisen				
	Hilfseinrichtungen EM	Kollektor (mit / ohne) Lamellen					
		Kugellager					
		Klemmenkasten					
		Motor Kühlung		Flüssigkeitskühlung			
				Kühlungsrippen			
				Eigenlüfter			
	Brennstoffzelle	Stack	Endplatten				
			Bipolarplatten				
				Katalysator			
				Membran			
		Hilfs- und Betriebsstoffe	Betriebsstoffe	Methan/ Methanol/ Wasserstoff			
				Sauerstoff (Umgebung) reiner Sauerstoff			
				Elektrolyt			
		Hilfseinrichtungen	Dichtungen				
			Verrohrung				
			Aufbau/Gehäuse				
	Segmentgruppe Antriebssteuerung	Leistungselektronik (Inverter)	AC/DC-Wandler				
			DC/DC-Wandler HV				
			DC/DC-Wandler NV				
			Steuerungseinheit	Kondensatoren			
				MOSFETs oder IGBTs			
			Kühlungssystem	Kühlplatte			
				Schirmung			
			Motorsteuergerät				
			Getriebesteuerung				
			Hochsetzsteller				
	Segmentgruppe Getriebe	Getriebe/Übersetzung	Zahnräder				
			Getriebewelle(n)				
			Getriebegehäuse				
		Kupplungen	Kupplungsscheibe				
			Kupplungsaktor				
	Segmentgruppe Thermomanagementsystem (Kühlungssystem)	Kühler (Flüssigkeitskühlung)	Kondensator				
			Kühlmittelpumpe				
			Rohrleitung (Flüssigkeit)				
			Kühlmittelkühler	Kühlmittel			
				Weilrippen			
				Kühlfüssigkeitsröhren			
				Rohrböden			
				Ladeluftkühler			
			Lüfter	Lüftermotoren			
			Wärmetauscher				
	Kühlung (Luftkühlung)	Luftstromführung	Luftidelemente				
		Lüfter	Lüftermotoren				

Segmentgruppe Energiespeicher									
(elektrisch und chemisch)	Niedervoltbatteriesystem	12 V - 48V - Batterie	Kraftstofftank	Behälter (System)	Tankblase Aktivkohlefilter Ausgleichbehälter Isolation				
			Hilfsbauteile		Füllstandsanzeige Schwimmer Drucktanksystem Füllstandsventil Rückschlagklappe Aktivkohlefilter				
	Hochvoltbatteriesystem	Sicherungselemente	Schütze	Gehäuse	Deckel Trog				
				Hilfseinrichtungen	Kühlungssystem	Flüssigkeitskühlung Luftkühlung			
		Befestigungssystem			Sensorik (Überwachung)				
		HV-Batteriemodul	Elektrische Verbinder	Traktionsbatterie	Kathode Anode Elektrolyt Gehäuse				
				Gehäuse					
		Segmentgruppe Ladetechnologie							
		Kraftstoffsystem (konventionell)	Einfüllstützen (Kraftstoffe)	Sicherheits-Einfüllstützen	Rohr				
				Kraftstoffpumpe					
Ladesystem (andere Fluide)		Einfüllstützen Pumpe Druckminderer							
			Ladesystem (elektrisch)	Kühlsystem	Wärmetauscher Kühlfläche Kühlkörper				
EMV		Gehäuse	Schirmung	Kondensator AC/DC - Wandler	Spulensystem (induktiv)	Fahrzeugschule			
							Ladedose/Stecker	Steckerart	CHAdeMO CCS Schuko- Typ F Stecker nach CEE 7/4
							Kommunikationssystem	CAN-Bus- Leitungen RFID-Chip	
							Batteriewechselsystem		
Segment Fahrwerk		Segmentgruppe Achse(n)	Vorderachse	Achsträger (Hilfsrahmen)	Antriebsachse (Achswelle)	Antriebswelle Radnabenmotor (Vorbereitung)			
					Radträger	Radnabe Radlager			
	Lenkung			Lenksäule Lenkrad Spurstange Lenkgetriebe	Servopumpe	Aggregatelagerung			
						Hinterachse	Achsträger (Hilfsrahmen)	Radträger	Radnabe Radlager
	Federung u. Dämpfung		Dämpfer Aufbaufeder (Stabilisator)	Reifen	Felge Radialreifen	Wulst Karkasse			
							Segmentgruppe Bremse		
	Betriebsbremse		Vorderradbremse	Bremsscheibe	Bremssattel	Trommelbremse Bremsrohrlleitung Bremszylinder			
						Hinterradbremse	Bremsscheibe	Bremssattel	Trommelbremse Bremsrohrlleitung Bremszylinder
			Feststellbremse						
Bremskraftverstärker		hydraulische Verstärkung Unterdruck Verstärkung	Vakuumpumpe (elektrisch)						
	Segmentgruppe fahrdynamische Sicherheitssysteme								
ABS	Steuerungsplatine	ESP	Steuerungsplatine	ASR	Steuerungsplatine				
						RSC	Steuerungsplatine		
								Berganfahrhilfe	Steuerungsplatine

Segment Elektronische und mechatronische Systeme der Fahrzeugplattform						
Segmentgruppe Kundenkomfort	Klimakompressor	mechanisches System				
		Elektromotor				
		Innenraumgebläse	Lüfter			
		Infotainment	Radio			
			Lautsprecher Navigation			
		Standheizung	brennstoffbetrieben elektrisch			
		Heizung (elektrisch)	Heizlüfter			
			Widerstandsheizten			
			Wärmetauscher	Chiller (Kältemaschine) Wärmepumpe		
				Verdichter Expansionsventil		
			Lenkradheizung Frontscheibenheizung Heckscheibenheizung Heizbare Außenspiegel			
		Segmentgruppe Sensorik (für Fahrerassistenz und Fahrdiagnose)	Ultraschallsensoren	Einparkhilfe		
			Radar	Spurwechselassistent ACC		
			Kamera	Verkehrszzeichenerkennung Müdigkeitserkennung Regensensor		
Segment Fahrzeugkarosserie (mit Aufbau, Bodengruppe und Rohbau)	Segmentgruppe Bodengruppe	Vorderwagen (Motorraum)	Längsträger (vorn)			
			Querträger (Stoßstange) Kühlerträger (Montageträger) Unterfahrschutz			
			Bodengruppe vorn	Querträger (Sitz e) Tunnel (Längsträger) Tunnelverstärkung Schweller (Längsträger) Schwellerverstärkung Bodenblech Unterbodenverkleidung		
		Bodengruppe hinten	Querträger (Stoßstange) Anhängerkupplung			
			Querträger (Fondsitze/Fersenblech) Querträger (Kofferraum) Längsträger (hinten) Unterbodenverkleidung			
		Segmentgruppe Rohbau / Aufbau (Exterieur)	Dach	Dachstreben (Dachrahmen)		
				Verdecke		
				Dämmmaterialien		
				Scheiben		
				Türen	Türverkleidung	Dämmmaterialien
					Außenspiegel	
					Scheibenrahmen	Halterung Gummidichtung
					Öffnungssystem	Schloss Griff
					Klappen	Motorraum (Klappe)
Kofferraum (Klappe)	Dämmmaterialien					
Kofflügel	Radkasten			Luftführungsöffnungen		
Seitenwand	Säulenträger (Verstärkungen)					
	Seitenverkleidung			Dämmmaterialien		
Stirnwand (Spritzwand)	Dämmmaterialien					
Heckabschluss						
Stoßstangen (inkl. Kühlergrill)	Kühlergrill Stoßstange					
Segmentgruppe Rohbau / Aufbau (Interieur)	Mittelkonsole					
		Instrumententafel				
		Sitz e	Vordersitz e	Sitzschiene Polsterung		
			Fondsitze	Sitzbank Einzelsitz e Polsterung		
		Verkleidungen (Innenraum)	Türverkleidung	Dämmmaterialien		
			Teppich u. Dachhimmel	Sonnenblenden Dämmmaterialien		
			Kofferraum	Ladeboden Hutablage Kofferraumtrennwand Dämmmaterialien		

Segmentgruppe Sicherheits- und Zusatzsysteme		Bildschirme (Fond)		
Airbags		Lenkrad		
		Beifahrer		
		Kopf		
		Seiten		
		Knie		
		Motorhaube		
Gurtsystem				
Fensterheber		Fensterheber (mechanisch)		
		Fensterheber (elektrisch)	E-Motor	
Panoramadach (Schiebedach)				
Scheibenwischer				
Kühlschrank				
Innenspiegel				
Beleuchtung		Kennzeichenbeleuchtung		
		Fahrtrichtungsanzeiger		
		Frontlicht	Fernlicht	
			Tagfahrlicht	
			Nebelscheinwerfer	
			Abblendlicht	
		Hecklicht	Bremsleuchten	
			Rücklicht	
			Rückfahrlicht	
		Innenraumbelichtung		
Segment Maßkonzept und Ergonomie	Segmentgruppe Bauräume	Plattform-Aufbau-Bauräume	Sandwichboden	W11
				W10
				H156
				L10Y
		1. Sitzreihe		L9
				H30
				W10
		2. Sitzreihe		H31
				L16
				W11
		Motorraum		H1X
				W101
				L10X
				H156
		Tunnel		H3B
				H3C
				H156
				W10D
				L10A
		Kofferraum		L210
				L213
				W202
				H156
				H212
		Sicherheitsbauräume	Bodengrenzfläche	Böschungswinkel hinten (H107/H118)
				Böschungswinkel vom (H106/H117)
				Bodenfreiheit (Fahrzeug / H156)
				Bodenfreiheit (Achsen)
				Rampenwinkel (H147)
			Deformationszonen	
			Rundumsicht	Frontscheibe (Sichtfeld)
				Schulterblick (Sichtfeld)
Segmentgruppe Ergonomie	Bedienkonzept (im Fahrzeug/ Anwender)	Bedienelemente (Anordnung)		
		Infotainment (Anordnung - Sicht)		
		Infotainmentsystem (Menüstruktur)		
	Ergonomie-Maße (Insassen / Nutzer)	Steckverbindung (Ladestecker)	H1C	
		RAMSIS (Puppen)	H31	
			H30	
			L5D	
			H5	
			L53	
			H61	

Anhang 14 Modell KEIBPro Abschnitt 4

D3 Schematische Beispiele für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und die Betriebsstrategie

Im Folgenden sind topologische Ausprägungen unterschiedlicher elektrifizierte Fahrzeugarchitekturen (vertiefend für BEV, PHEV, HEV und F-Cell) aufgeführt. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten Elemente in den Architekturen, je nach Anforderungen und Betriebsstrategie geometrisch aufzubauen. Vertiefende Literatur dazu ist in [HoP-2010], [ReK-2011] und [RNB-2012] zu finden. Außerdem sind die in 3.6 *Auslegung aus elektrotechnischen Gesichtspunkten* aufgezeigten Kriterien der Elektrifizie-

rung und dort insbesondere die unter *3.6.2 Elektrische Verschaltung* genannten Charakteristika für elektrifizierte Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Betriebsstrategie elektrifizierter Antriebsstränge

Der Wirkungsgrad von Benzinern kann im Teillastbereich bei weniger als 20% liegen. Genauer gibt es im Teillast- bzw. Niederlastbetrieb relativ geringe Verbrauchswerte. Jedoch steigt die Reibleistung im Motor in diesem Fall, so dass der spezifische Verbrauch vergleichsweise hoch ist. Hinzu können bei entsprechend niedrigen Verbrennungstemperaturen hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff-Emissionen entstehen [ReK-2011]. Bei Hybriden kann die E-Maschine den Fahrantrieb in den niedrigen Lastbereichen alleine übernehmen (Betriebsstrategie: rein elektrisches Fahren).

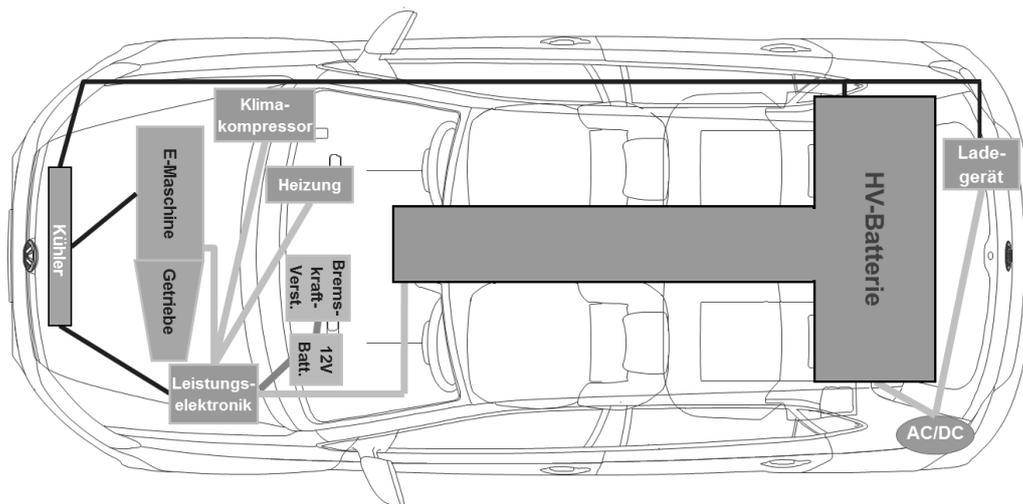
Bei hohen Lastanforderungen, z.B. beim Überholen auf der Landstraße oder der Autobahn, kann die E-Maschine den Verbrenner unterstützen und somit zur Verbrauchsreduktion bei hohen Lastanforderungen beitragen (Betriebsstrategie: Boosten).

Beim Rekuperieren von aufgebrachtener Antriebsenergie durch regeneratives Bremsen kann durch den Elektromotor Energie zurückgewonnen werden (alternativ geht diese durch die Betriebsbremse in Form von Wärme verloren) [ReK-2011]. Bei Fahrprofilen mit vielen Reduktionen der Vortriebsleistung und bei geringen Gesamtgeschwindigkeiten (*3.2.5 Gesamtfahrwiderstand*) ist ein Teil der schon aufgetragenen Energie wieder für den weiteren Vortrieb des Fahrzeuges einsetzbar (Betriebsstrategie: Rekuperation der Bremsenergie).

Eine weitere Betriebsstrategie des Antriebs ist der generatorische Betrieb, bei dem mehr Energie in der Verbrennungskraftmaschine (VKM) produziert wird, als für den Fahrzeugvortrieb benötigt wird. Die überschüssige Energie wird über den E-Motor in die Batterie gespeist (Betriebsstrategie: Generatorbetrieb). Dieses Verfahren ist wegen des Wirkungsgradverlustes durch die mehrfache Energieumwandlung nicht zu präferieren, kann aber bei bestimmten Antriebskonstellationen im Betrieb vorkommen.

Architektur eines Elektrofahrzeugs

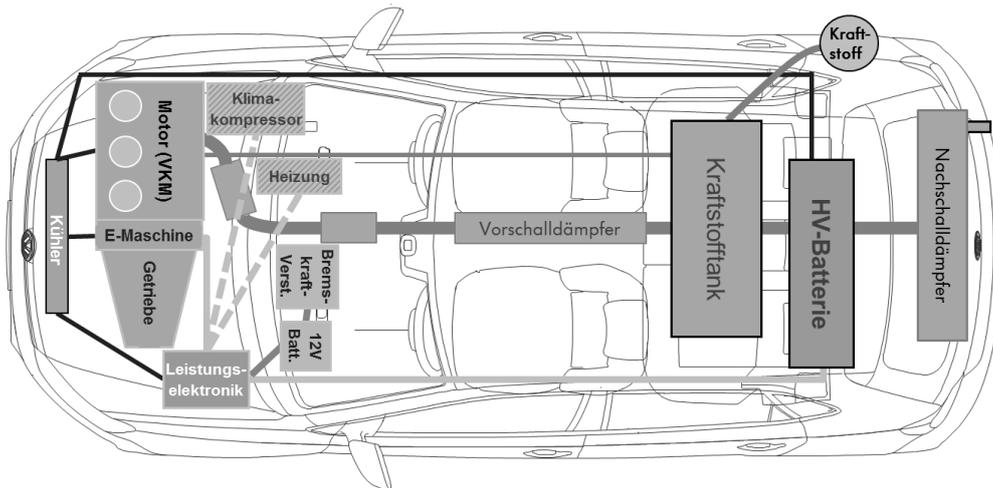
Das reine Elektrofahrzeug (BEV) hat eine Architektur, die aus einem oder mehreren Elektromotoren besteht die über eine Leistungselektronik mit Energie versorgt werden. Die Energie kommt aus einem Energiespeicher (Traktionsbatterie) im Fahrzeug, der wiederum über eine Ladeeinrichtung (AC) oder direkt (DC) geladen werden kann (*3.6.4 Elektrisches Laden*). Bei Bedarf kann die Kraft aus dem Elektromotor mit einer Übersetzung auf die Antriebswelle übersetzt werden. Um Motor, Ladegerät, Leistungselektronik und Energiespeicher zu kühlen, ist ein Kühlerpaket zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen (Verbrenner) besteht nicht die Möglichkeit Abwärme des Aggregates zum Beheizen des Innenraumes zu verwenden. Heizung wie auch Klimatisierung müssen elektrisch oder über Zusatzkraftstoffe erfolgen. Ansonsten besteht kein nennenswerter Unterschied zu konventionellen Fahrzeugen in den anderen Bereichen. Bedingt durch kleinere E-Motoren besteht aber die Möglichkeit Überhänge (vorn und hinten) zu verringern.



Anhang 15 Beispiele für Elemente eines Elektrofahrzeuges (BEV)

Architektur eines Full- Hybriden

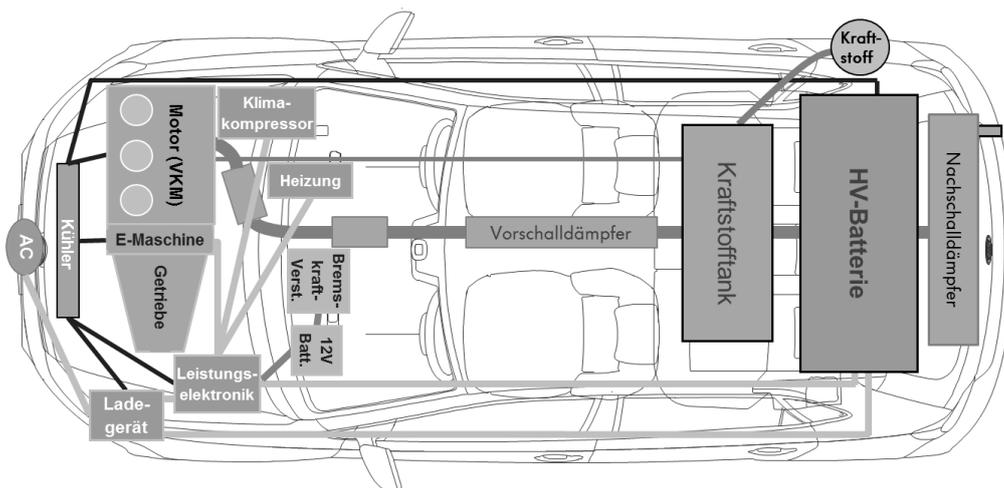
Ein Full-Hybrid hat vom Aufbau her die Architektur eines normalen (konventionellen) Verbrenners mit VKM, Abgasstrang, Kühler und Kraftstofftank. Dieser wird durch einen oder mehrere E-Maschinen und eine Traktionsbatterie ergänzt. Dies soll zum einen zu Kraftstoff-einsparung und damit zur Emissionsreduktion führen, zum andere kann der „Fahrspaß“ durch Erhöhung von Drehmoment und damit Leistung gesteigert werden. Im Vordergrund eines Full-Hybriden steht die Rückgewinnung der Bremsenergie durch Rekuperation. Daran orientiert sich bei einem Full-Hybriden auch die topologische Dimensionierung des Energiespeichers (Traktionsbatterie). Es wird in einem Full-Hybrid in der Architektur keine elektrische Ladeschnittstelle vorgehalten. Bedingt durch die Traktionsbatterie und die E-Maschine kann der Startergenerator am Motor entfallen, wenn dies von der E-Maschine übernommen wird. Gegenüber kleineren Hybridsystemen (z.B. Mild- Hybrid), kann ein Full-Hybrid kleinere Strecken bei geringen Geschwindigkeiten rein elektrisch zurücklegen. Daraus bedingt sich, dass Komforteinrichtungen wie Heizung oder Klimakompressor elektrisch über das Hochvoltnetz betrieben werden müssen oder der Kunde beim elektrischen Fahren diese Systeme nicht nutzen kann. Insbesondere für Bedienelemente und weitere Systeme im Fahrzeug ist neben dem Hochspannungsnetz des Antriebes auch ein 12 V Bordnetz nötig. Dieses kann über den DC-DC-Inverter auch über die Traktionsbatterie gespeist werden. Für Geräte des 12V-Bornetz kann weiter eine 12 V Batterie vorgehalten werden, die diese unabhängig von der Traktionsbatterie versorgt.



Anhang 16 Beispiele für Elemente eines Full-Hybriden (HEV) mit zwei topologisch bedingten Antriebsaufbauten

Architektur eines Plug-In Hybriden

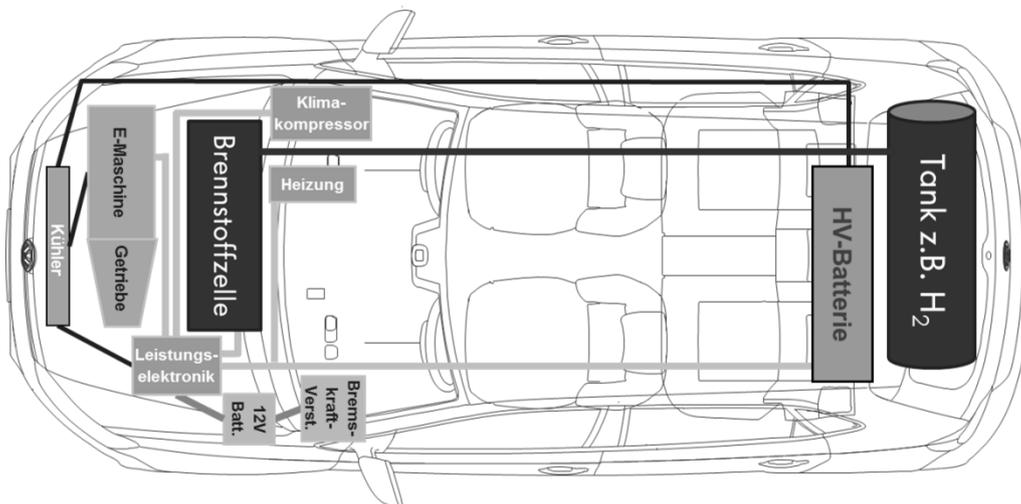
Die Architektur des Plug-In Hybriden orientiert sich an der des HEV (Architektur eines Full-Hybriden). Der Unterschied besteht primär im topologischen Aufbau des Antriebstranges, da ein Plug-In Hybrid weitere Strecken bei höheren Geschwindigkeiten rein elektrisch fahren kann. Dazu muss eine größere Traktionsbatterie eingesetzt werden, die sich ausschließlich aus der reinen Rekuperation der Bremsenergie nicht wieder laden lässt. Die Unterschiede in der Architektur zum HEV sind demnach die in einem Plug-In Hybriden zusätzlich benötigte Ladeeinrichtung z.B. Ladegerät (AC) und Ladedose (vgl. 3.6.4 Elektrisches Laden) sowie Komfort- und Sicherheitseinrichtungen für das rein elektrische Fahren.



Anhang 17 Beispiele für Elemente eines Plug-In-Hybriden (PHEV) mit zwei topologisch bedingten Antriebsaufbauten

Architektur eines Brennstoffzellenfahrzeuges

Ein Brennstoffzellenfahrzeug ist vom Aufbau her wie ein paralleler Hybrid zu sehen, nur das Brennstoffzelle, E-Maschine und möglicherweise ein Getriebe nicht mechanisch sondern elektrisch in Reihe geschaltet sind. Die Brennstoffzelle ist ein Energiewandler, die im Niedertemperatur- ($< 300\text{ °C}$) oder Hochtemperaturbereich ($> 500\text{ °C}$) einen Brennstoff (Wasserstoff, Erdgas oder Methanol) direkt in elektrische Energie umwandelt. Dadurch bedingt muss für den chemischen Energieträger ein Speicher (Tank) im Fahrzeug vorgehalten werden. Das Oxidationsmittel im Elektrolyseprozess ist Sauerstoff, welcher aus der Umgebung entnommen oder in Reinform dem Prozess zugeführt werden. Bei letzterer Variante wäre ein zusätzlicher Speicher im Fahrzeug nötig. Da eine Brennstoffzelle schlecht reversibel arbeitet, ist eine Zusatzbatterie, um Bremsenergie wie im Full-Hybriden rekuperieren zu können, vorzuhalten [NKE-2013]. In Bezug auf höhere Lastanforderungen kann in der topologischen Ausgestaltung des Produktes auch eine Energie-Zelle, wie diese im BEV oder PHEV genutzt wird, verwendet werden.



Anhang 18 Beispiele für Elemente eines Brennstoffzellenfahrzeuges (F-Cell)

Differenzierung von Hybriden

Auf Basis der Architektur von Full- und Plug-In Hybride gibt es topologisch drei mögliche Varianten des Aufbaues des Antriebsstranges (Abbildung Anhang 19), wobei sich diese, bedingt durch Kupplungen und unterschiedliche elektrische wie auch mechanische Kraftflüsse, differenziert aufbauen lassen. In diesem Zusammenhang ist auch die E-Maschinen Auslegung in 3.6.3 *Elektrischer Antrieb* zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die drei Varianten in einem grundlegenden Aufbau des Antriebsstranges dargelegt:

1. paralleler Hybridantriebsstrang
2. leistungsverzweigender Hybrid
3. serieller Hybrid

Der parallel Hybrid setzt sich aus VKM und einer E-Maschine zusammen, welche sowohl motorisch wie auch generatorisch betrieben werden kann. VKM und E-Maschine sind auf einer Welle (Kurbel-

welle) positioniert, womit sich eine Drehmomenten Addition der beiden Maschinen ergibt. Jedoch stehen dadurch die Drehzahlen der beiden Maschinen in einem festen Verhältnis zueinander. Bedingt durch den Einsatz von einer Kupplung ist auch der reine Betrieb der VKM möglich. Durch Positionierung der E-Maschine und Kupplungen sind weitere Unterteilungen des parallelen Hybridstranges möglich (P1-, P2-, P3- oder P4-Hybrid).

- P1: Die E-Maschine ist drehfest mit der VKM verbunden.
- P2: die E-Maschine ist am Getriebeeingang durch eine Kupplung von der VKM getrennt.
- P3: Die E-Maschine ist hinter dem Getriebe angebracht.
- P4: Die E-Maschine ist an der nicht verbrennungsmotorisch betriebenen Achse angebracht (elektrischer Allrad).

Der Vorteil des parallelen Hybridstranges liegt, bedingt durch den Aufbau auf einer Welle, in dem guten Gesamtwirkungsgrad (höher als bei den anderen beiden Varianten). Nachteilig ist, dass der Betriebspunkt der VKM nicht frei wählbar ist, da die Drehzahl beider Maschinen von der Getriebeübersetzung und der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit abhängig ist. Dies führt zu schlechteren Verbräuchen.

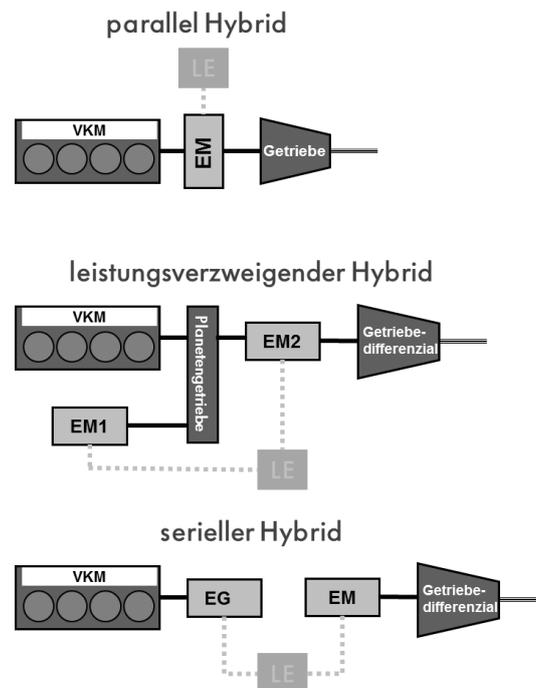
Der leistungsverzweigte Hybrid hat als wesentlichen Bestandteil ein Planetengetriebe. An das Planetengetriebe sind auf den drei jeweiligen Wellen die VKM sowie zwei E-Maschinen, die beide jeweilig als Motor oder Generator eingesetzt werden können (zur Umsetzung überschüssiger Energie der VKM oder zur Rekuperation von Bremsenergie), angebracht. Die Leistung der VKM wird in dem Getriebe in zwei Pfade geteilt, einen mechanischen Teil, der direkt auf die Antriebswelle wirkt, und einen elektrischen Teil. Dieser „elektrische“ Teil steht beim Betrieb des Verbrenners immer zur Verfügung und wird durch die eine E-Maschine (in diesem Fall ein Generator) mechanisch aufgenommen und elektrisch (deswegen elektrischer Pfad) an die zweite E-Maschine auf der Antriebsachse übertragen, die diese Energie wiederum an die Antriebswelle abgibt. Die E-Maschine (auch Generator) auf der dritten Welle des Planetengetriebes dient dazu, Drehzahl und Last der VKM entsprechend der Radrehzahl und Antriebsmomenten der jeweiligen Fahranforderung abzufangen bzw. zu übersetzen (In einem Planetengetriebe wird durch die Drehzahl zweier Wellen immer die Drehzahl der dritten Welle festgelegt, dies gilt analog auch für die Momentenverhältnisse). Schlechte Wirkungsgradbereiche können mit Hilfe der Traktionsbatterie im rein elektrischen Betrieb überbrückt werden. Ansonsten wird versucht die VKM immer bei einer lastabhängigen optimalen Drehzahl, d.h. bei geringem Verbrauch, zu betreiben. Der Vorteil der Leistungsverzweigung liegt in der stufenlos einstellbaren Übersetzung durch das Planetengetriebe (keine Zugkraftunterbrechung) sowie den dadurch bedingten Entfall von weiteren Getriebebauteilen und die optimale Wahl des Betriebspunktes der VKM. Der Nachteil liegt in der Entkoppelung von Motordrehzahl und Fahrgeschwindigkeit, was zu Einbußen bei der Fahrdynamik führt (weniger „Fahrspaß“ bzw. Sportlichkeit) [ReK-2011].

Hinsichtlich des Wirkungsgrades ist z.B. gegenüber dem parallelen Hybridantriebsstrang im Stadtverkehr ein besserer zu erwarten. Bei höheren Geschwindigkeiten (Überland- und Autobahnfahrten) müs-

sen die E-Maschinen des leistungsverzweigten Hybriden entsprechend groß dimensioniert werden, damit der Wirkungsgrad des parallelen Hybridantriebsstrangs besser ist [FFS-2013].

Der serielle Hybrid ist in seinem Aufbau durch eine Reihenschaltung von E-Maschinen und VKM gekennzeichnet. In der in Abbildung Anhang 19 dargestellten Form, gibt es keinen mechanischen Durchtrieb zur Antriebsachse, womit dieser Aufbau auch für den Betrieb eines Range Extender (RE) geeignet ist. Die E-Maschinen arbeiten in diesem Aufbau zum einen im generatorischen Betrieb (EG), zum anderen als E-Maschine (EM) für den Vortrieb der Antriebsachse.

Der Vorteil dieses Aufbaus liegt darin, dass der Betriebspunkt des Verbrenners frei und damit optimal gewählt werden kann, so lang für die Fahranforderung genügend elektrische Energie bereitgestellt wird. Dieser Aufbau, insbesondere aus diesel-elektrischen Lokomotiven bekannt, ist besonders gut beim Betrieb mit großem Stop-and-Go Anteilen. Nachteil des seriellen Hybriden sind die mehrfache Energieumwandlung und der damit verbundene schlechte Wirkungsgrad (Gesamtverlust bis zu 30%) [ReK-2011].



Anhang 19 Topologische Antriebskonfiguration von Hybriden

D4 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe E-Maschine

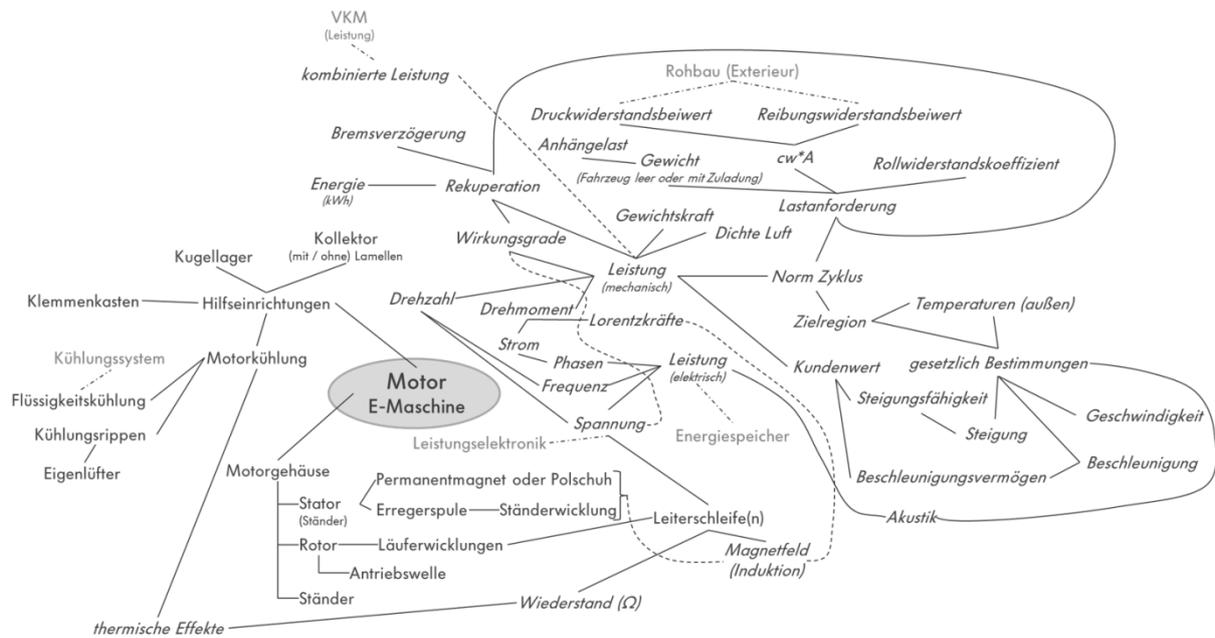
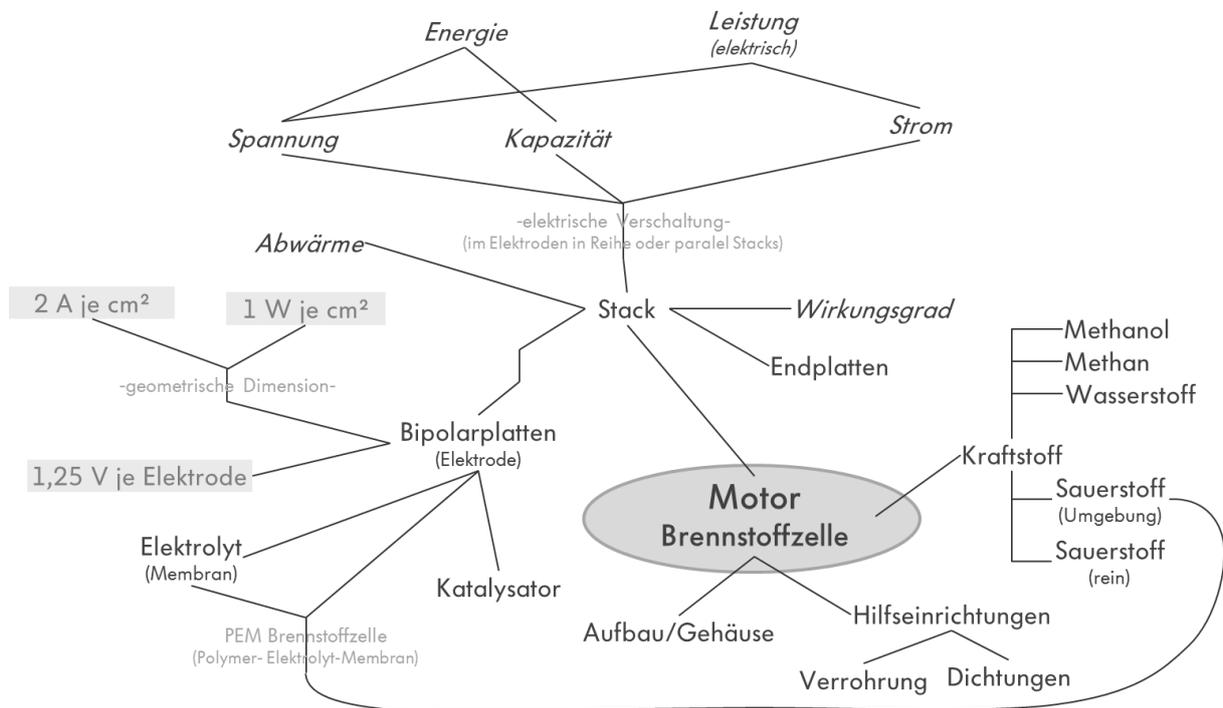


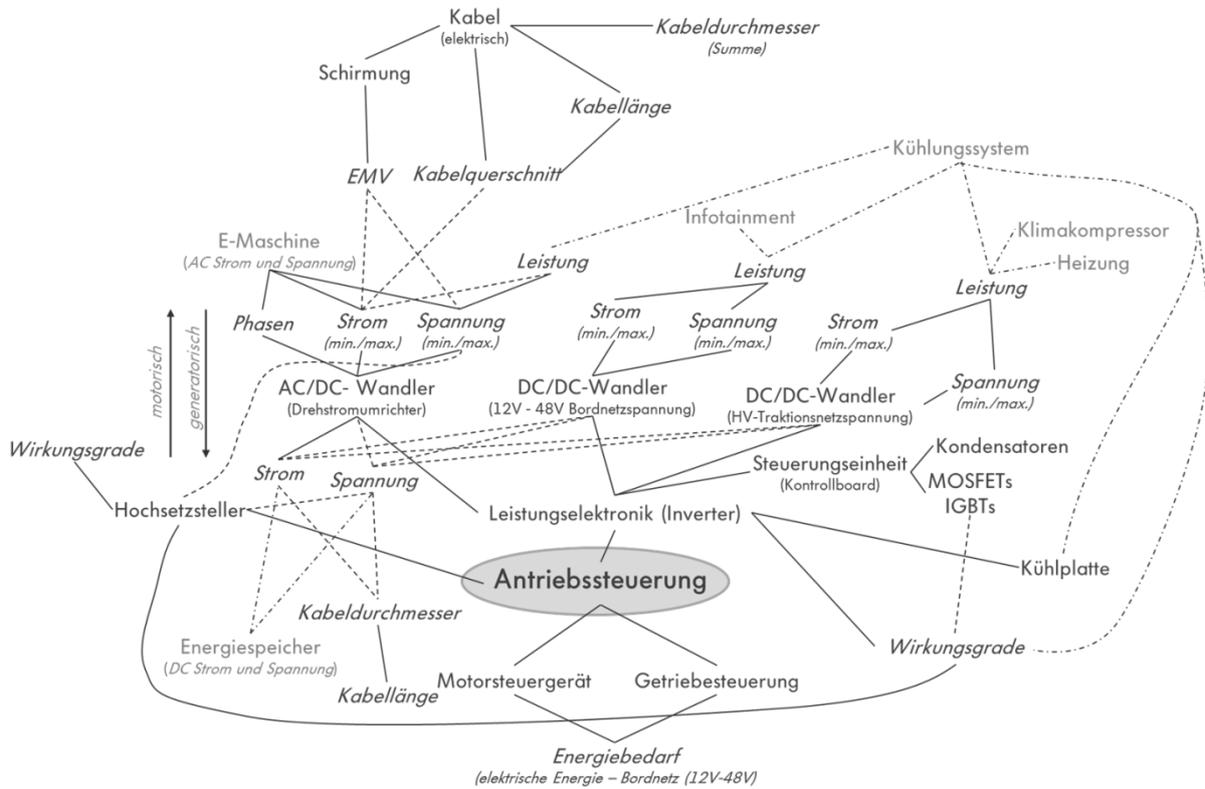
Abbildung 20 Vernetzungsdiagramm der Baugruppe E-Maschine

D5 Segment 1 – Segmentgruppe Motor – Baugruppe Brennstoffzelle



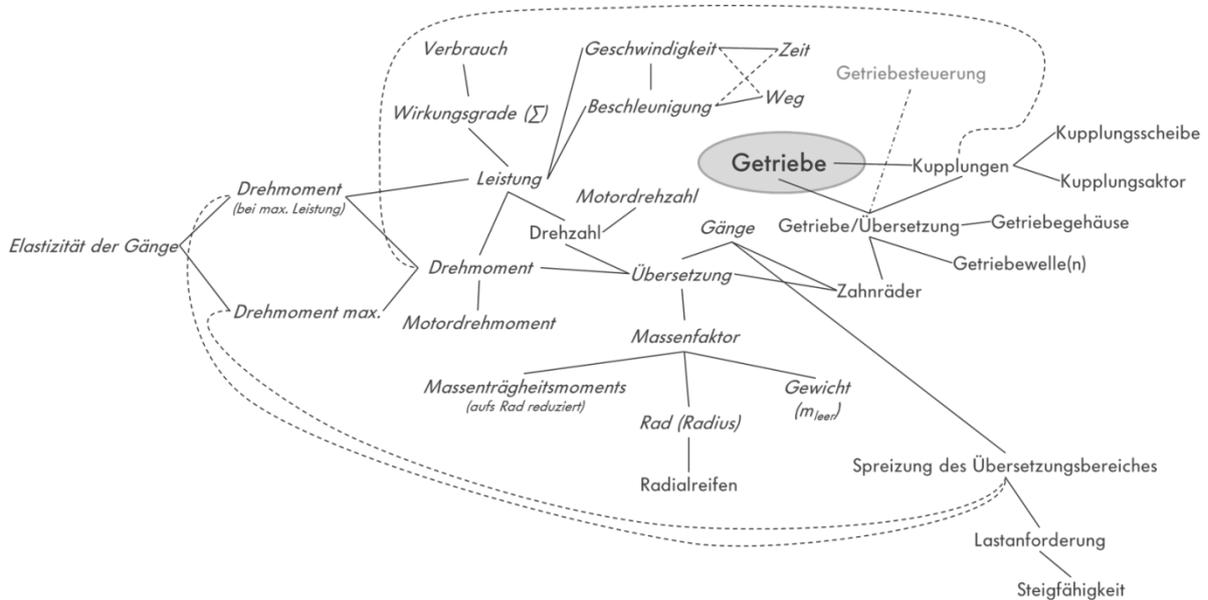
Anhang 21 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Motor – Baugruppe Brennstoffzelle

D6 Segment 1 – Segmentgruppe Antriebssteuerung



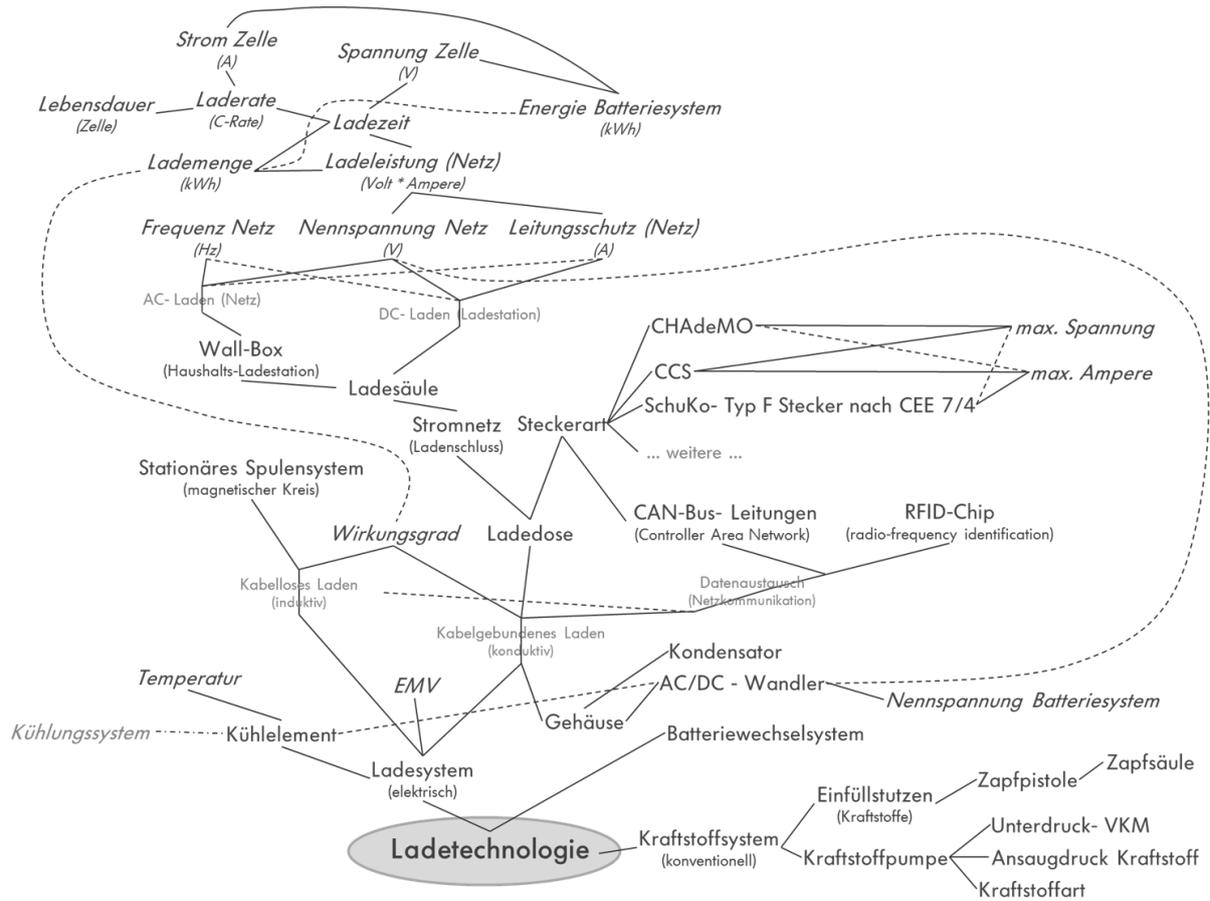
Anhang 22 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Antriebssteuerung

D7 Segment 1 - Segmentgruppe Getriebe



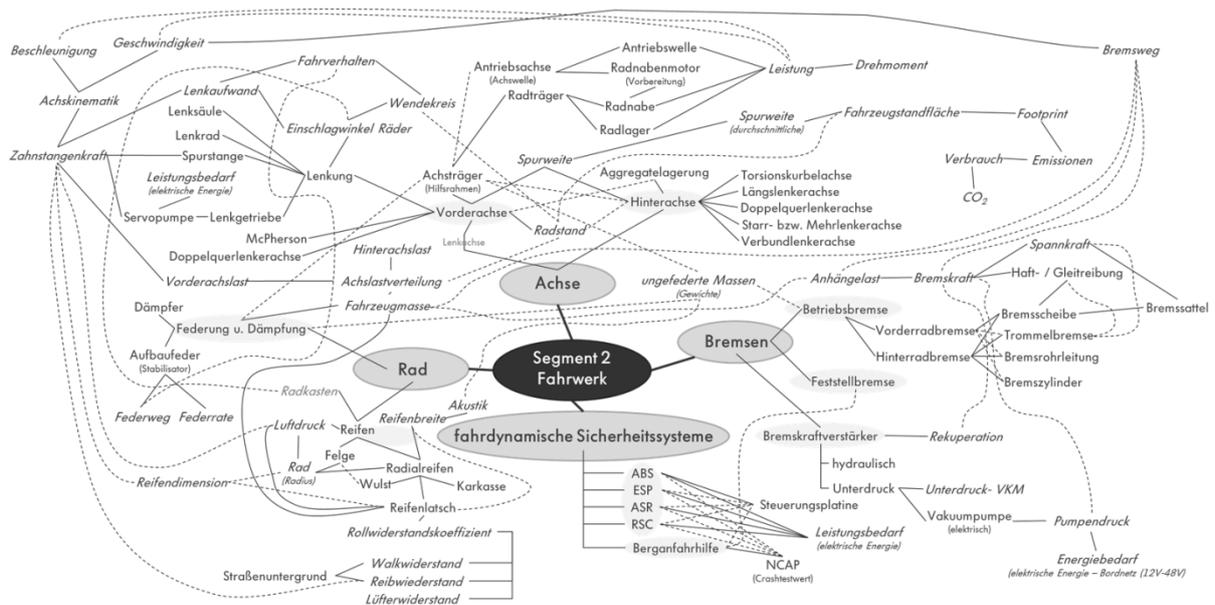
Anhang 23 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Getriebe

D10 Segment 1 – Segmentgruppe Ladetechnologie



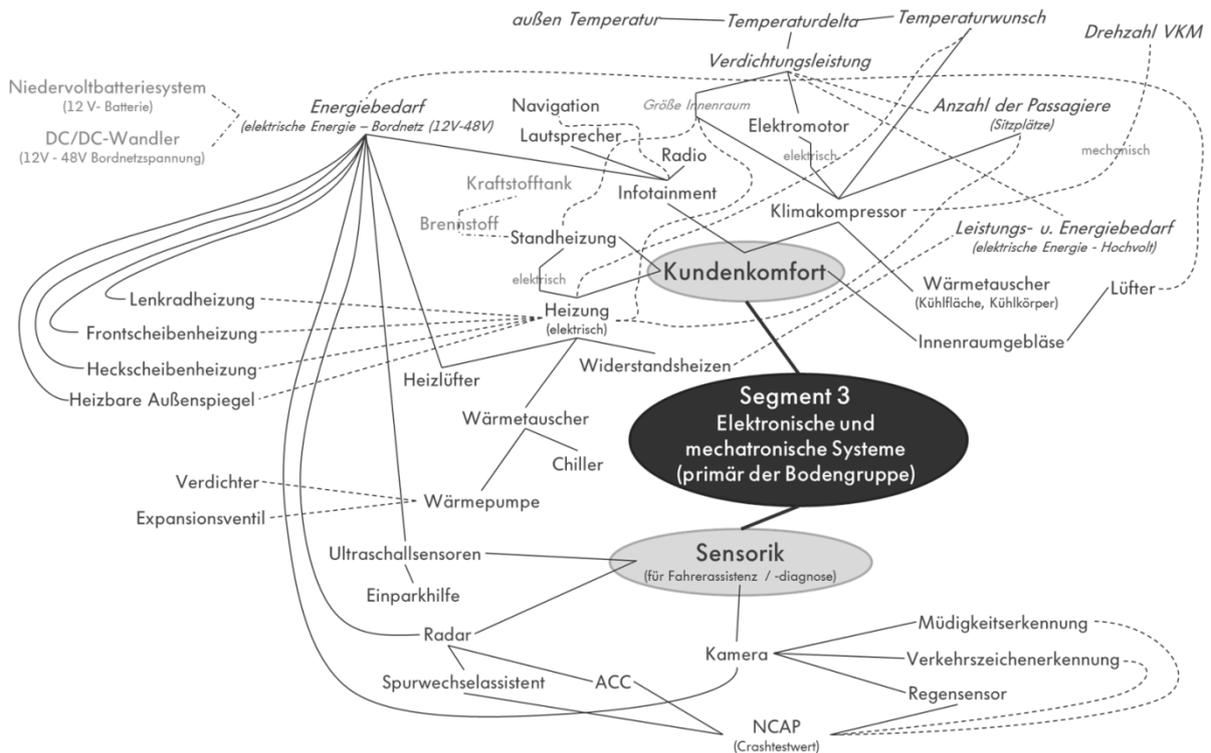
Anhang 26 Vernetzungsdiagramm Segmentgruppe Ladetechnologie

D11 Segment 2 – Fahrwerk



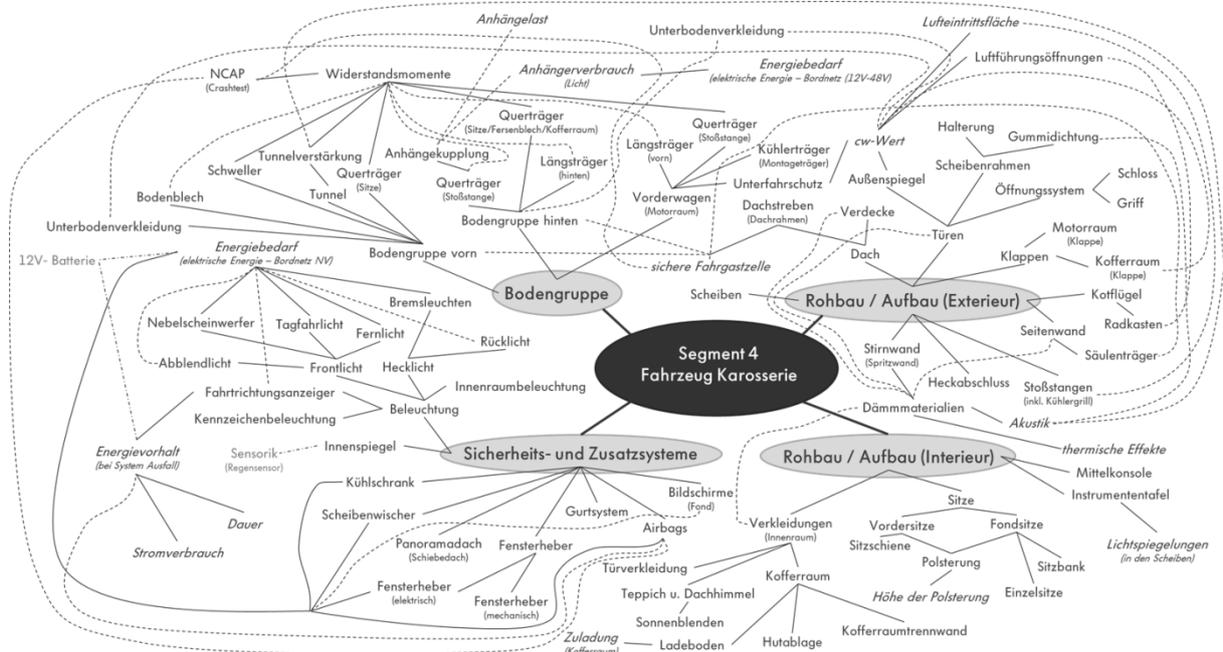
Anhang 27 Vernetzungsdiagramm des Segment Fahrwerk

D12 Segment 3 – Elektronische und mechatronische Systeme für Sensorik und Kundenkomfort



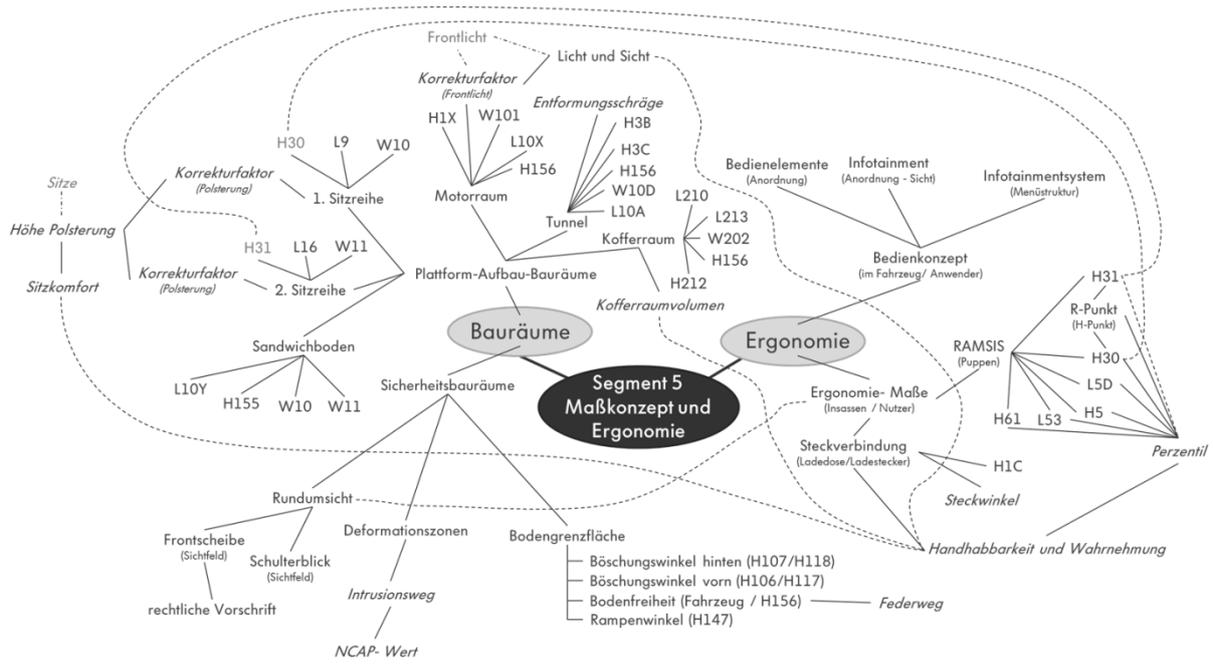
Anhang 28 Vernetzungsdiagramm des Segment Elektronische und mechatronische Systeme

D13 Segment 4 – Fahrzeugkarosserie



Anhang 29 Vernetzungsdiagramm des Segment Fahrzeugkarosserie mit elektronischen und mechatronischen Systemen

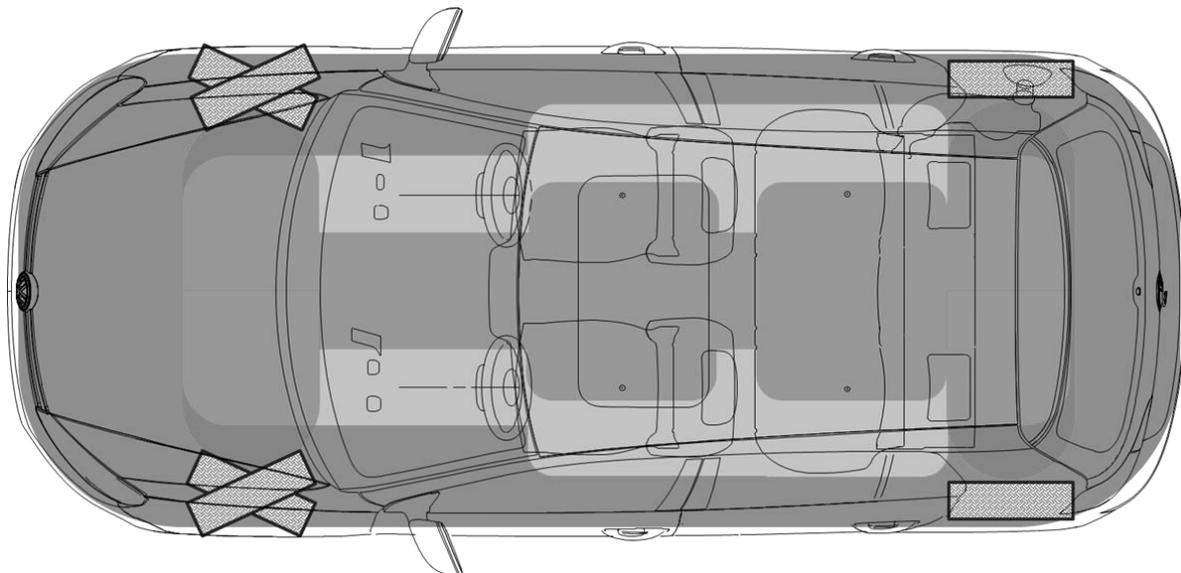
D14 Segment 5 – Maßkonzept und Ergonomie



Anhang 30 Vernetzungsdiagramm des Segment Maßkonzept und Ergonomie

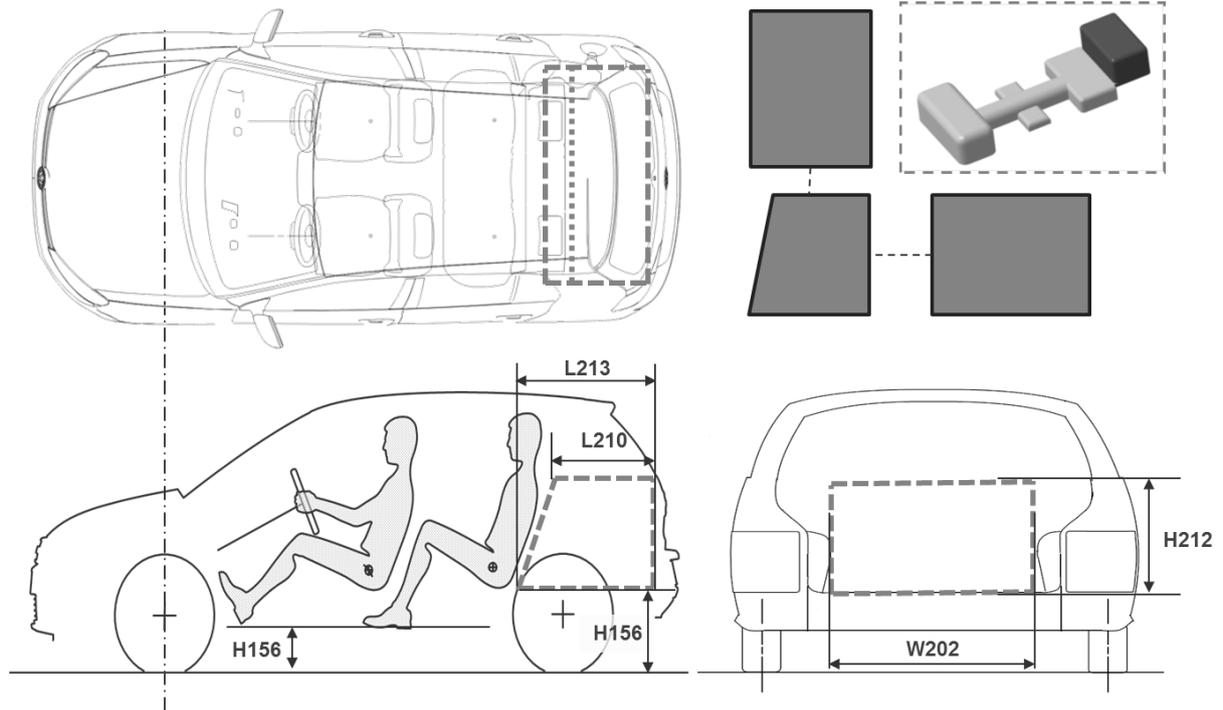
D15 Deformationszonen im Fahrzeug

Der innere Bereich eines Fahrzeuges (Fahrgastzelle und Achse) kann als sicher betrachtet werden, wenn Quer- und Längsträger entsprechend ausgelegt sind (Achsen sind mit stabilen Rahmen versehen und können Kräfte gut aufnehmen). Der dann nach außen folgende Bereich erfordert zusätzliche Maßnahmen der Sicherung, der äußere Bereich im Fahrzeug ist der primäre Deformationsbereich zur passiven Sicherheit.

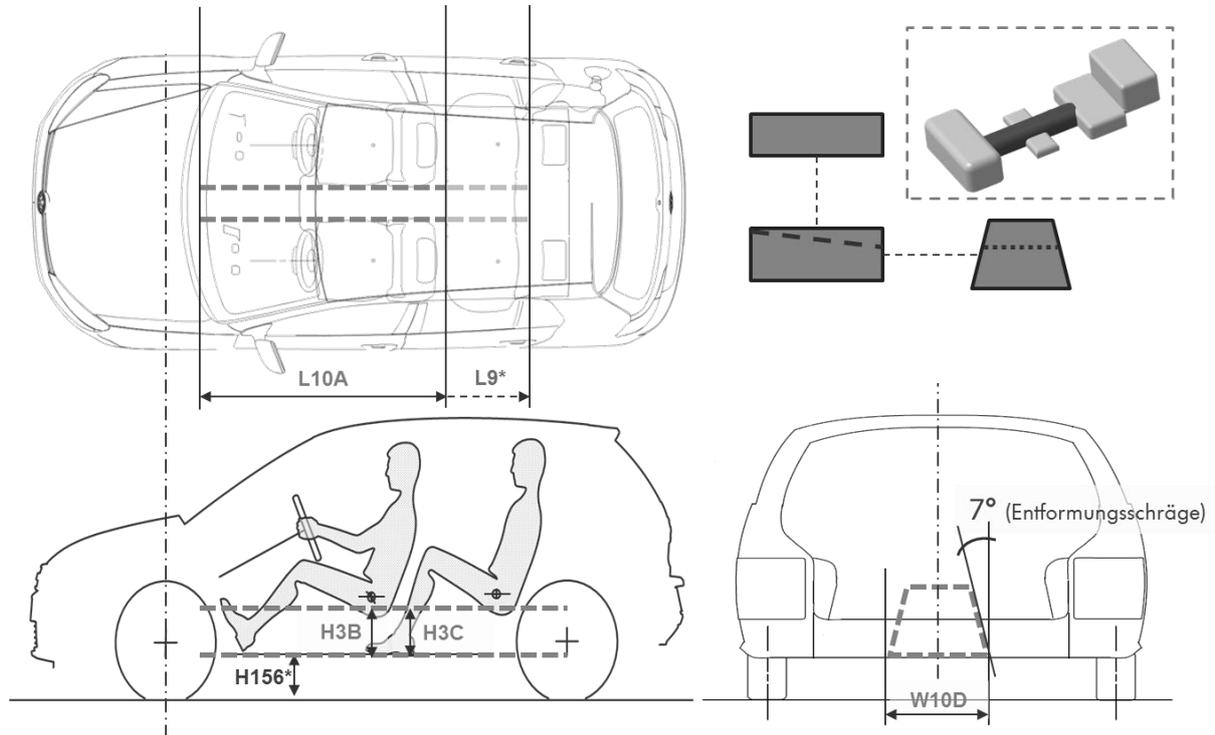


Anhang 31 Deformationsbereiche im Fahrzeug aus [BuI-2013]

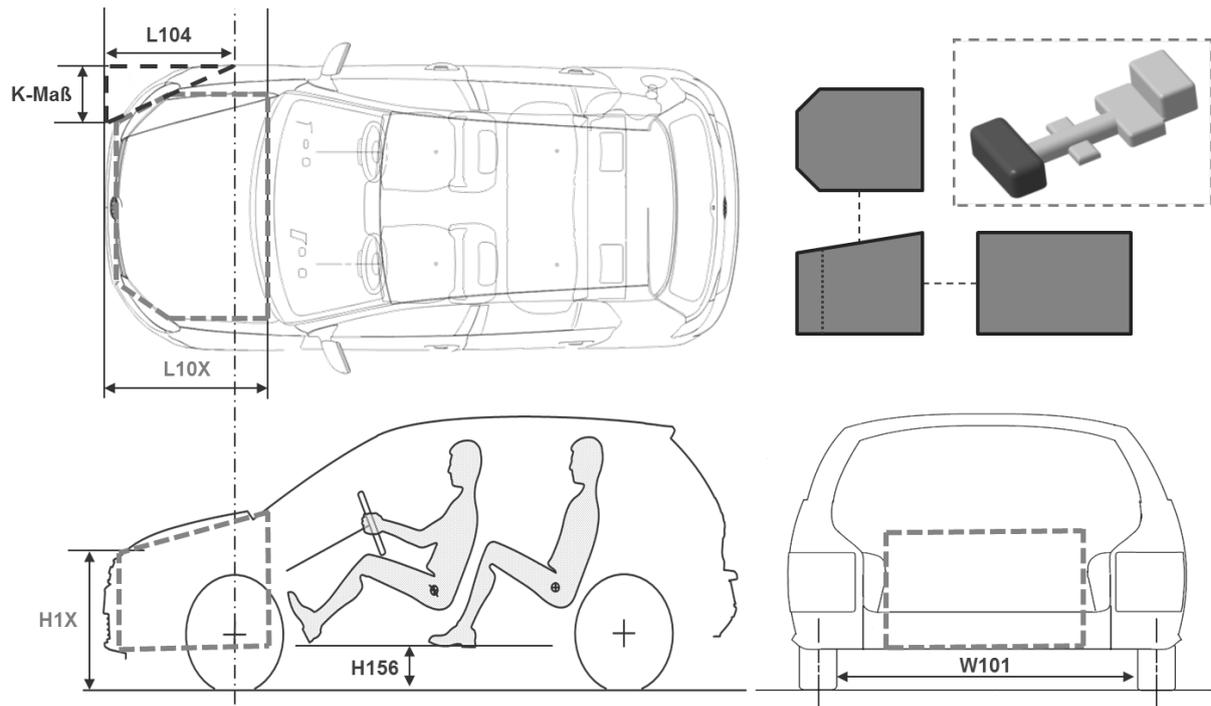
D16 Bauräume im Fahrzeug zur Elektrifizierung



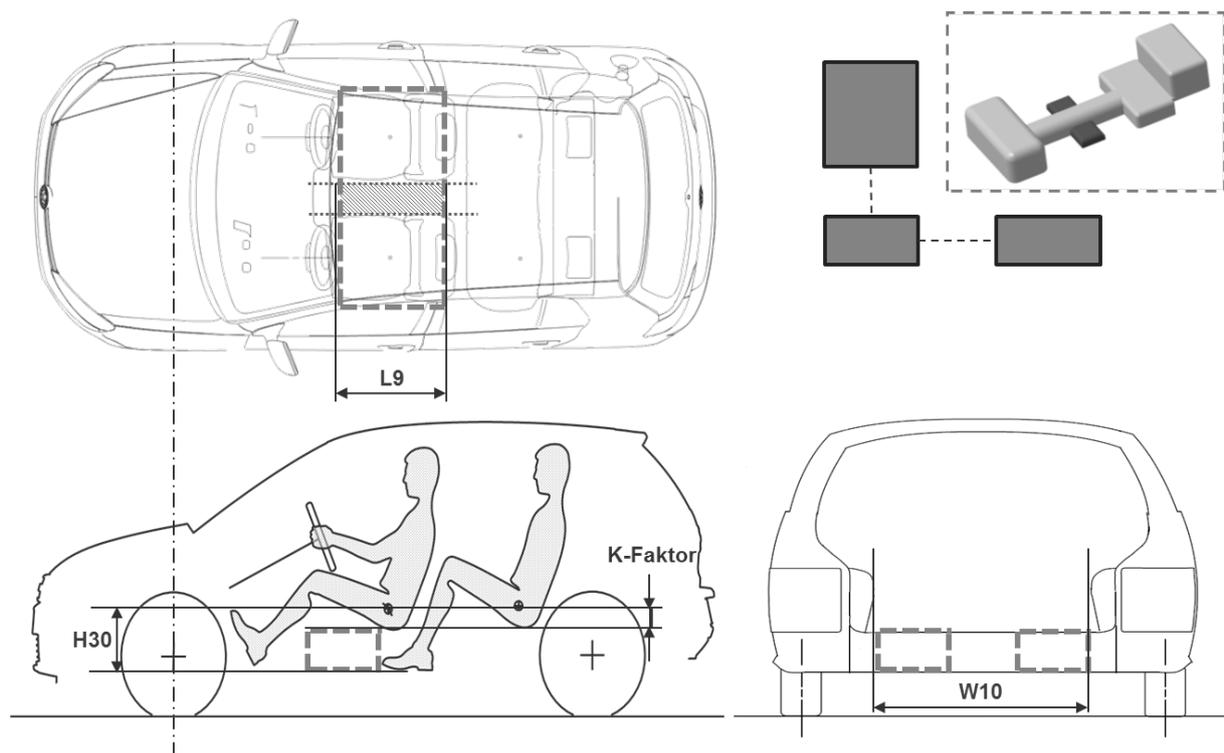
Anhang 32 Bauraum Kofferraum aus [BuI-2013]



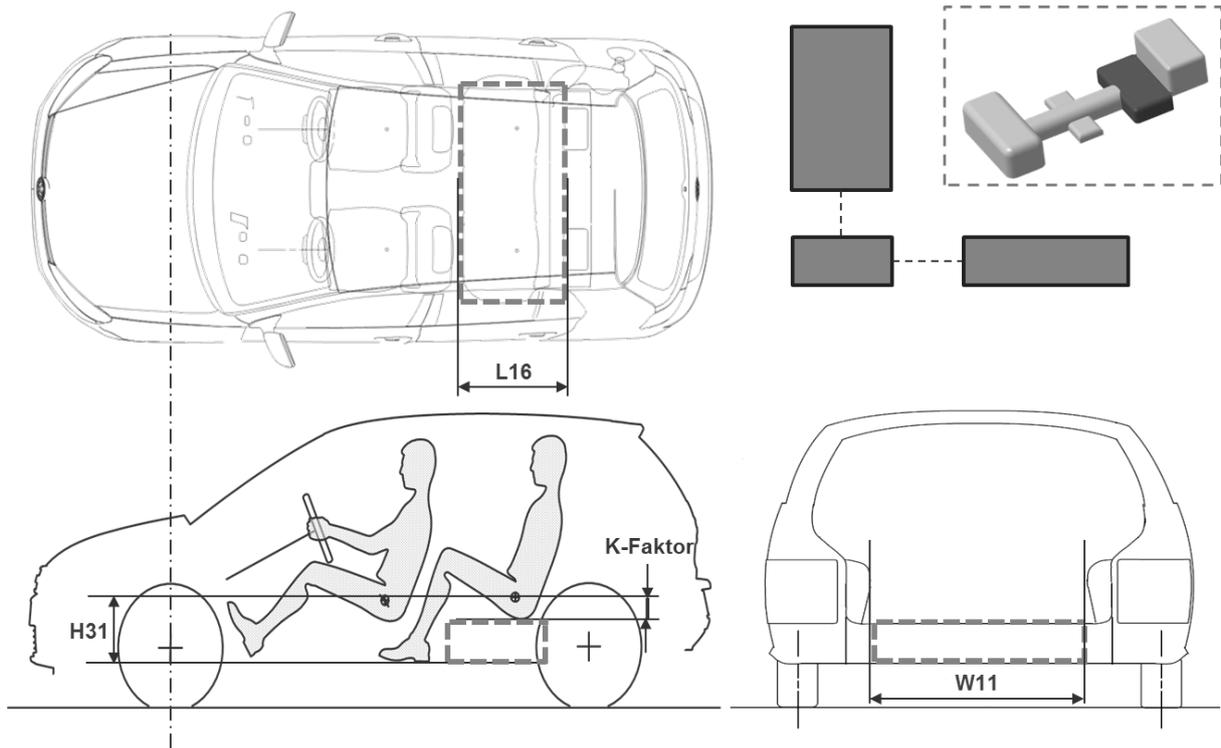
Anhang 33 Bauraum Tunnel aus [BuI-2013]



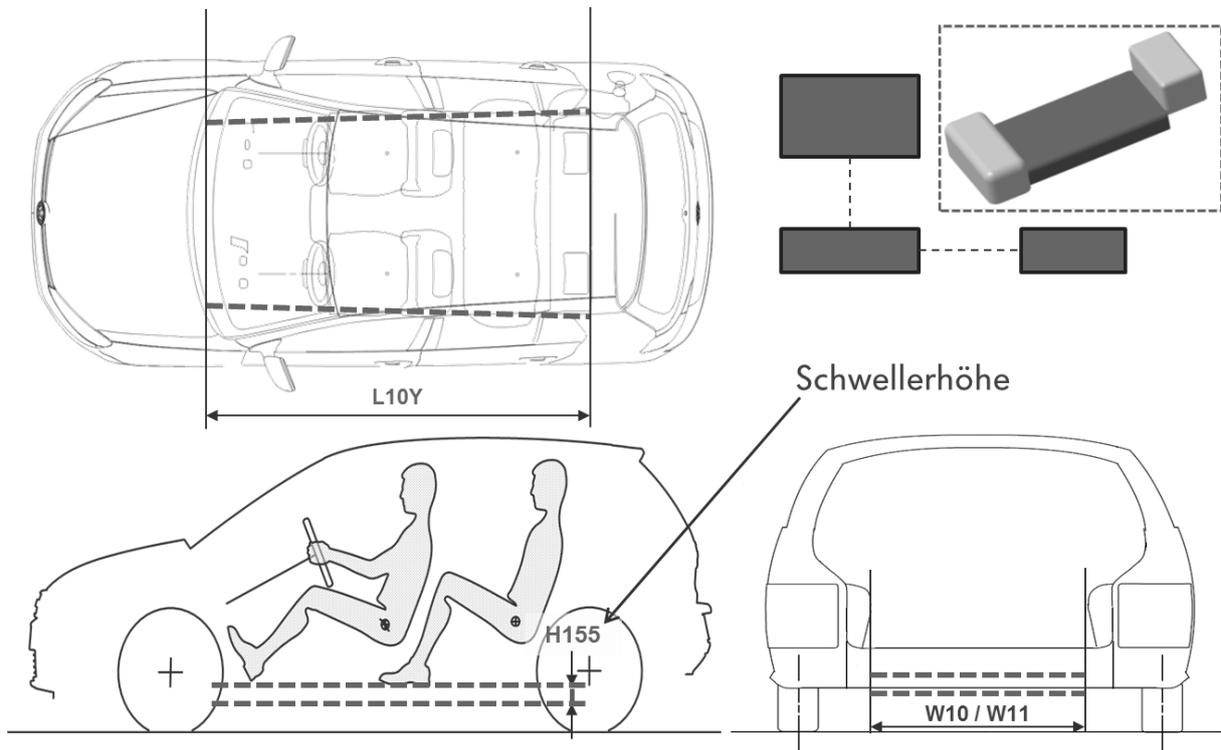
Anhang 34 Bauraum Motorraum aus [BuI-2013]



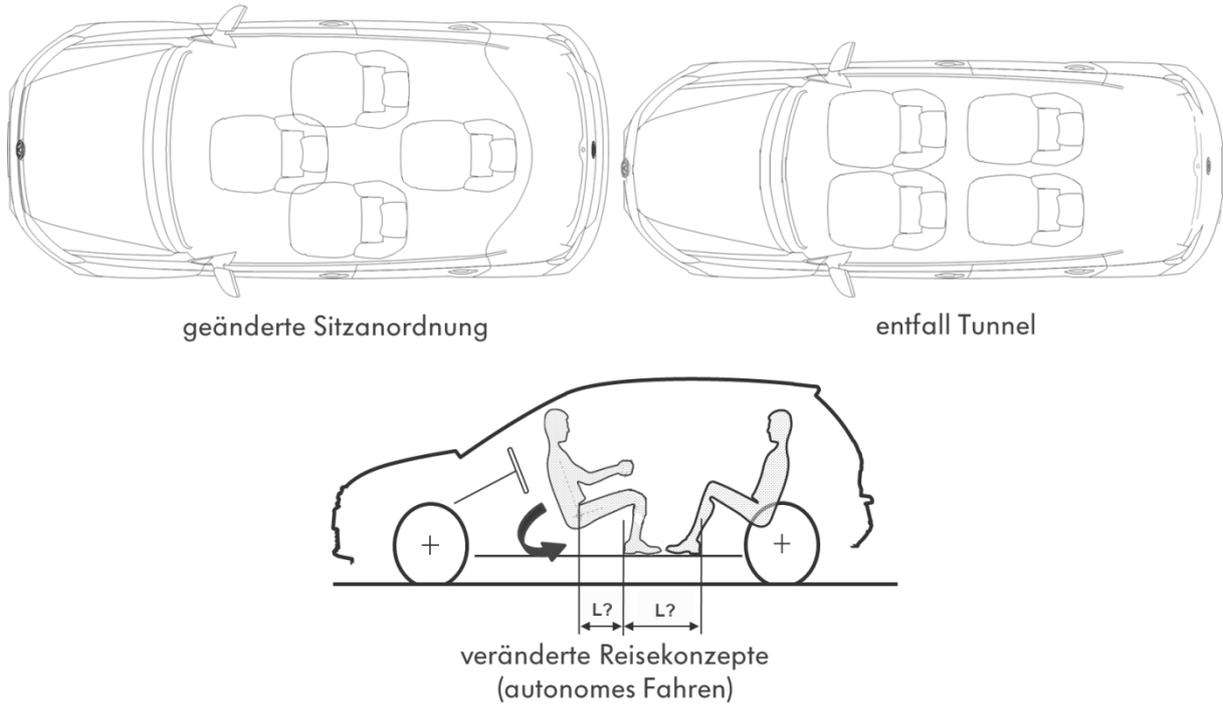
Anhang 35 Bauraum 1. Sitzreihe aus [BuI-2013]



Anhang 36 Bauraum 2. Sitzreihe aus [BuI-2013]

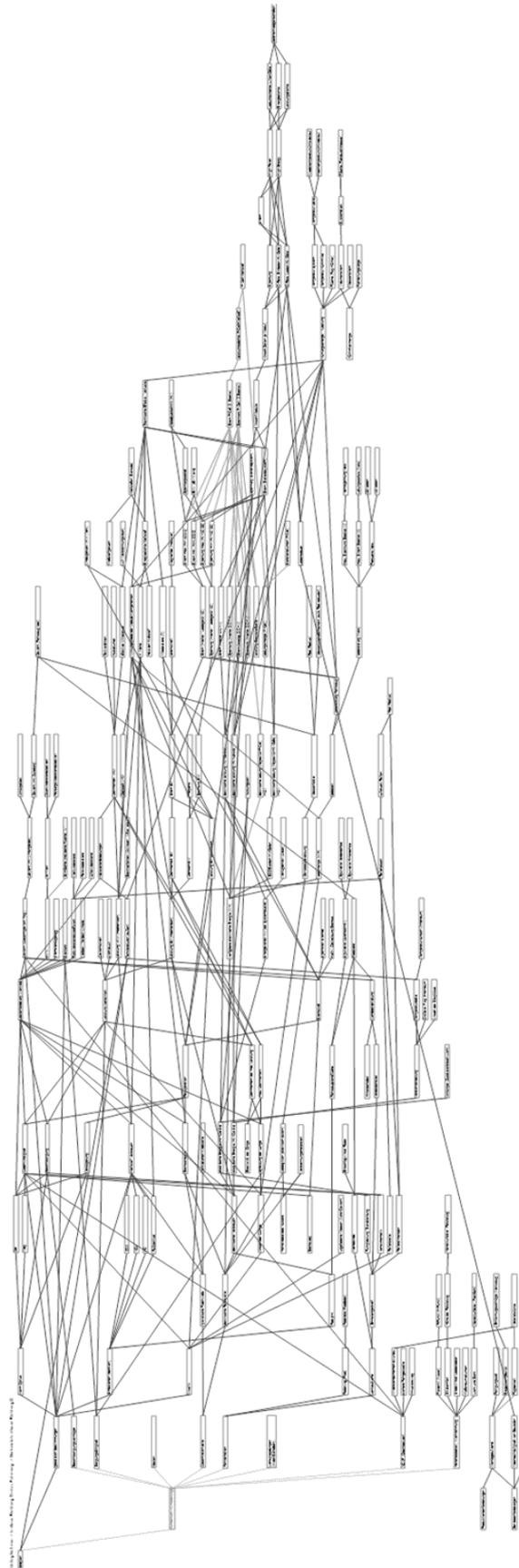


Anhang 37 Bauraum „Sandwich“- Boden aus [BuI-2013]

D17 Auswirkung des Maßkonzepts

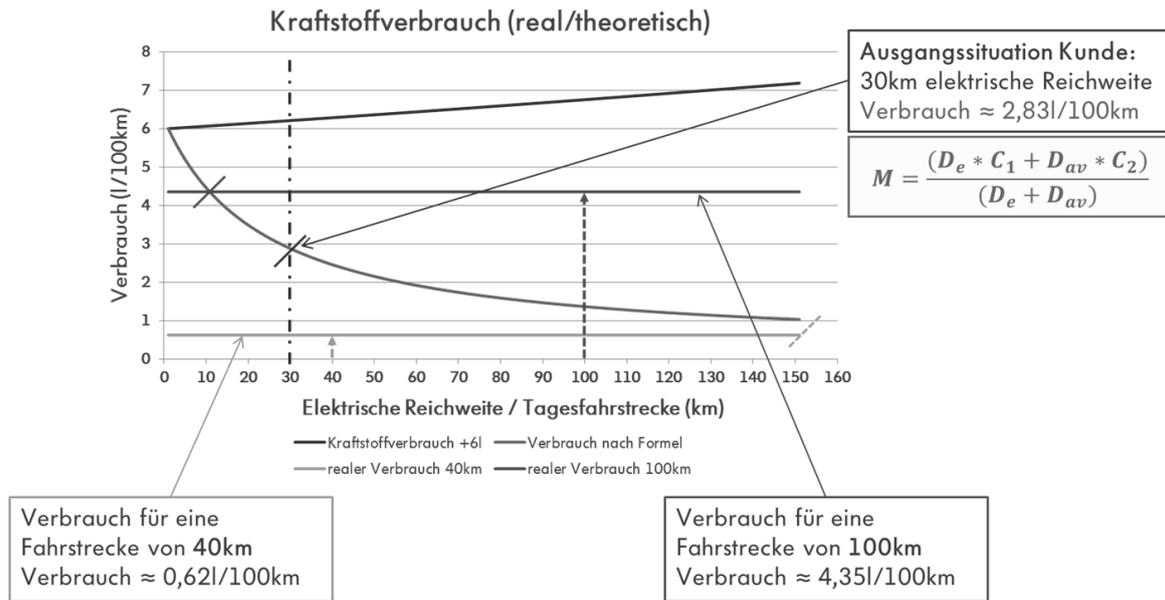
Anhang 38 Veränderungen im Fahrzeugaufbau durch Anpassung der Orientierung der Sitze

D18 Fahrzeugeigenschaften die aus den Merkmalen der Produktelemente resultieren



Anhang 39 Übersicht der aus den Produktelementen und deren Merkmalen entstehenden Eigenschaften

D19 Kombiniertes Kraftstoffverbrauch aus Kundensicht



Bis 40 km Tages-Fahrleistung
verbrauchen

- 63% der Deutschen
- 50% der US-Amerikaner
- 2% der Firmenwagen

weniger als im NEFZ vorausgesagt

Bis 100 km Tages-Fahrleistung verbrauchen

- 6% der Deutschen
- 9% der US-Amerikaner
- 12% der Firmenwagen

mehr als im NEFZ vorausgesagt

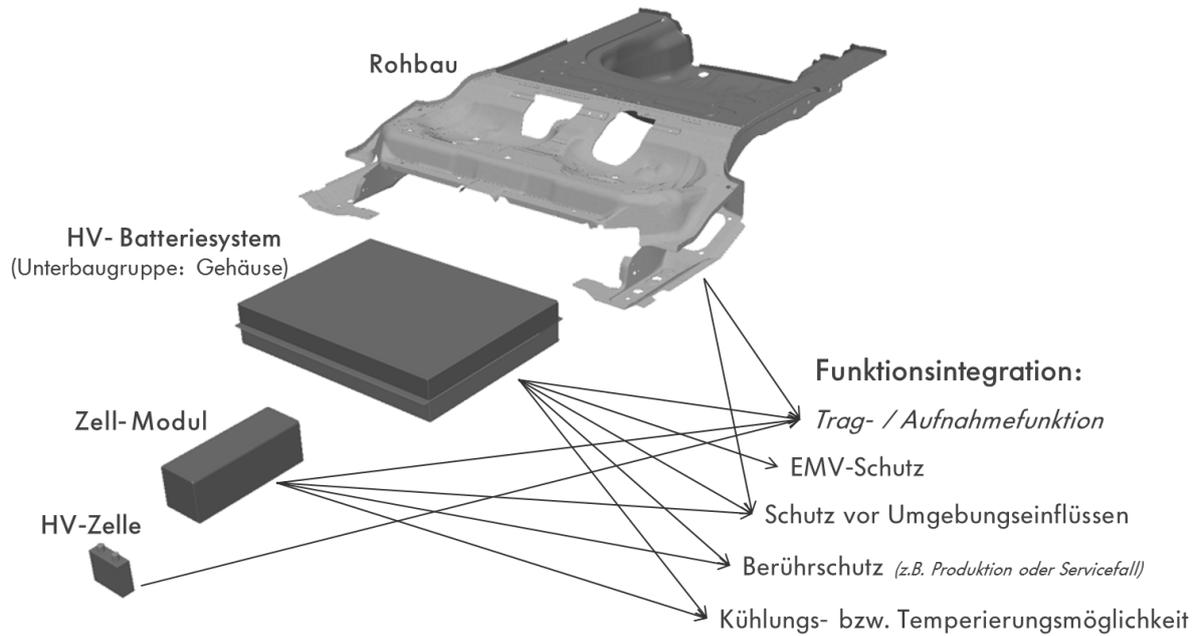
E Anwendung und Umsetzung des Eigenschaftsnetzwerkes

E1 Eigenschaften der Batteriezelle für eine prismatische Zelle

Klassifizierung	Eigenschaften der Hochvoltbatterie (Prismatische Zelle)
Funktion	Chemischer Energiespeicher (Energiebereitstellung), Aufnahmebehälter Sicherungsfunktion des Behälter, Leistungsbereitstellung, Wiederaufladbarkeit
Effizienz	Energetisch-volumetrische Ausnutzung (Wh/l), Energiedichte (Wh/kg), Wirkungsgrad (Verhältnis der Ladungsmengen Laden/Entladen), Leistungsdichte (W/kg)
Festigkeit, Stabilität	Festigkeit gegen Verformung, Beschleunigungsvermögen (bis Zellschädigung)
Lebensdauer	In Jahren bis max. SOC 60%,
Sicherheit, Zuverlässigkeit	Risiko für thermische Durchgehen (exotherme chemische Reaktion), Reliabilität der physikalischen Eigenschaften, Löschbarkeit, Memory-Effekt, thermische Belastbarkeit, mechanische Belastbarkeit, Verhalten bei Überladung, Selbstentladungsrate pro Monat
Gewicht	Gewicht, Bauteilbezogene Dimension
Ästhetische Eigenschaften	-
Ergonomische Eigenschaften	-
Fertigungs-/Montage-/ Prüfeigenschaften	Handhabbarkeit für die Produktion (Mensch oder Maschine), Lagerbedingungen (Brandschutz/ Brandlast, Temperatur, Feuchtigkeit)
Transporteigenschaften	Gefahrgut (UN 38.3)
Instandhaltungseigenschaften	Zugänglichkeit der Pole
Erfüllung Gesetze, Normen	Arbeitsschutzgesetz, Betriebssicherheitsverordnung, Richtlinie 2006/66/EG
Umwelteigenschaften	Wiederverwendbarkeit der Rohstoffe
Ressourcenverbrauch	Anteil der zu entsorgenden Werkstoffe
Kosten	Kosten je kWh
Physikalische Eigenschaften	C-Rate (Lade- und Entladerate), Mittlerespannung (V), Peak-Spannung (V), min-Spannung (V), Strom (A), Peak-leistung (W), Innenwiderstand (Ω), Kapazität (Ah), Betriebstemperaturbereich ($^{\circ}\text{C}$)

Anhang 41 Eigenschaften der prismatischen Traktionsbatterie

E2 Funktionen bezogen auf das Gehäuse des Hochvoltbatteriesystem und umliegende Merkmale



Anhang 42 Funktionsintegration HV- Batteriegehäuse mit umliegenden Komponenten [BuIn-2013]

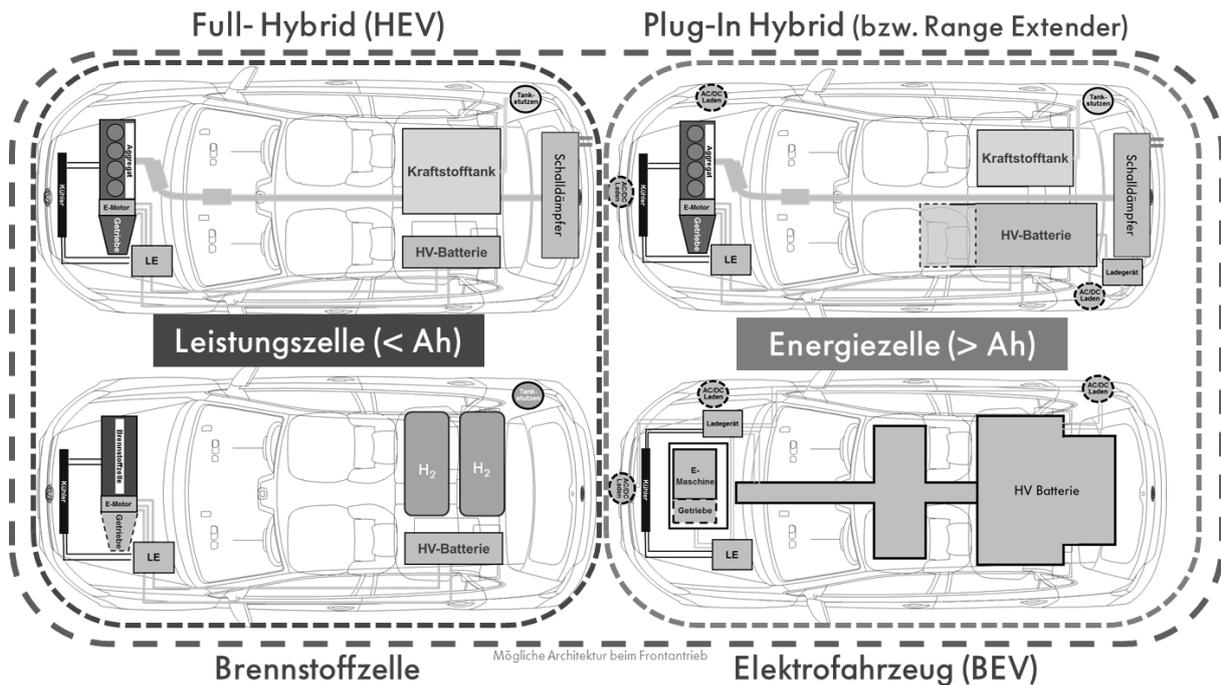
E3 Kosten der Traktionsbatterie je kWh mit und ohne Nachnutzung

Veranschlagte Kosten je kWh					Kosten je kWh mit Nachnutzung* (50€/kWh)					
2014 ≈405€	2015 295€	2020 155€	2025 125€	kWh		2014 ≈370€	2015 ≈260€	2020 ≈120€	2025 ≈90€	kWh
20.250 €	14.750 €	7.750 €	6.250 €	50		18.500 €	13.000 €	6.000 €	4.500 €	50
18.225 €	13.275 €	6.975 €	5.625 €	45		16.650 €	11.700 €	5.400 €	4.050 €	45
16.200 €	11.800 €	6.200 €	5.000 €	40	BEV II	14.800 €	10.400 €	4.800 €	3.600 €	40
14.175 €	10.325 €	5.425 €	4.375 €	35		12.950 €	9.100 €	4.200 €	3.150 €	35
12.150 €	8.850 €	4.650 €	3.750 €	30		11.100 €	7.800 €	3.600 €	2.700 €	30
10.125 €	7.375 €	3.875 €	3.125 €	25		9.250 €	6.500 €	3.000 €	2.250 €	25
8.100 €	5.900 €	3.100 €	2.500 €	20	BEV I	7.400 €	5.200 €	2.400 €	1.800 €	20
6.075 €	4.425 €	2.325 €	1.875 €	15		5.550 €	3.900 €	1.800 €	1.350 €	15
4.050 €	2.950 €	1.550 €	1.250 €	10	PHEV	3.700 €	2.600 €	1.200 €	900 €	10
2.025 €	1.475 €	775 €	625 €	5		1.850 €	1.300 €	600 €	450 €	5

*Nachnutzung ab SOC_{max} von 70%

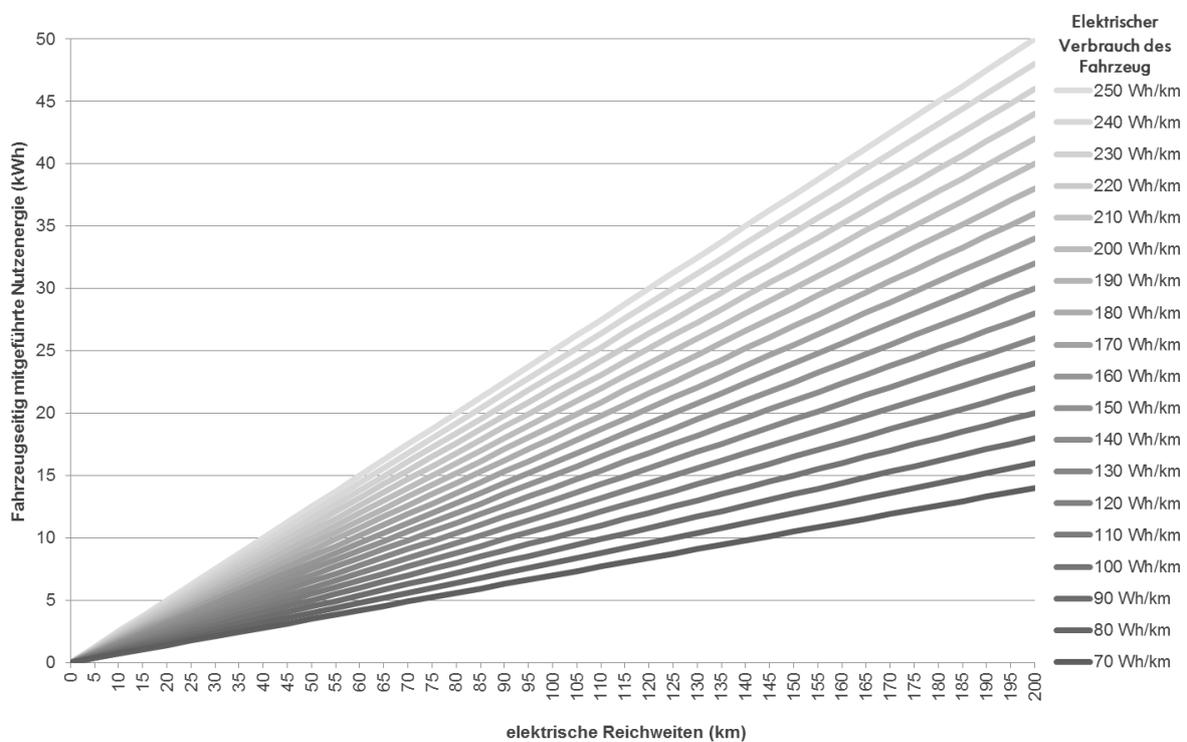
Anhang 43 Kosten je kWh mit und ohne Nachnutzung in Anlehnung an [BuI-2013] [BuIn-2013]

E4 Technische Überschneidung der Fahrzeugkonzepte in Bezug auf die Traktionsbatterie



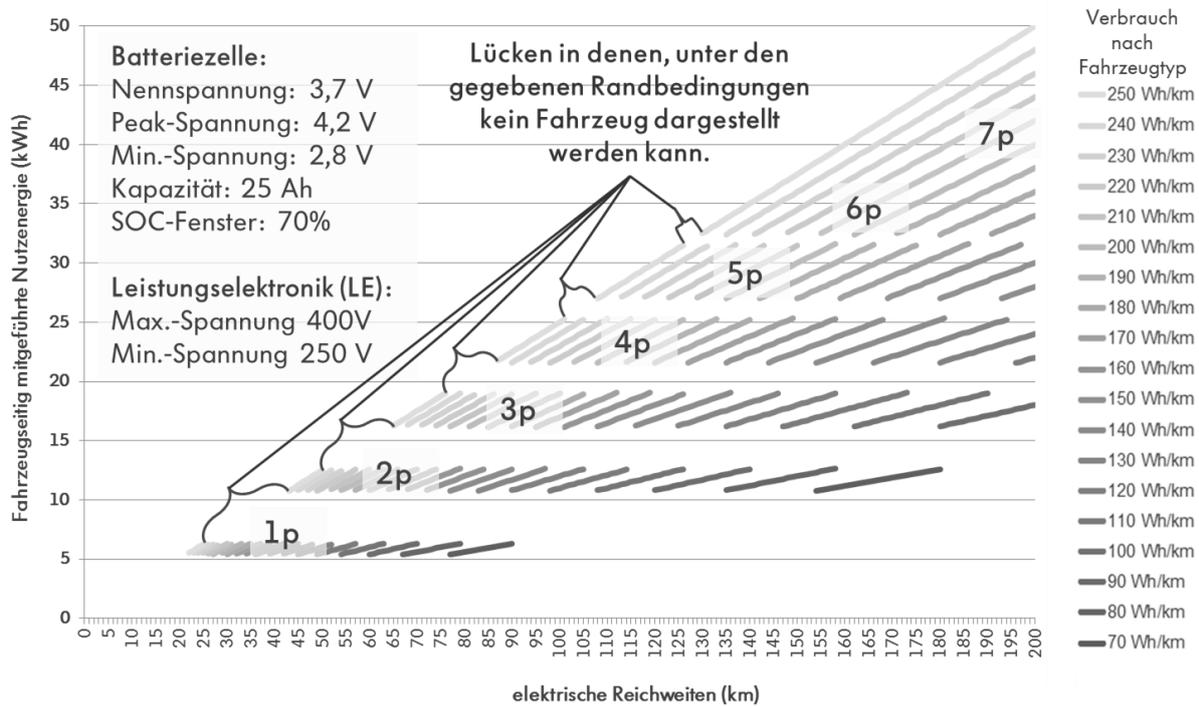
Anhang 44 Betrachtung der Traktionsbatterieart hinsichtlich der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte [BuVa-2013]

E5 Lösungsraum für elektrische Reichweiten in Abhängigkeit von Fahrzeugverbrauch und fahrzeugseitig mitgeführter Energie



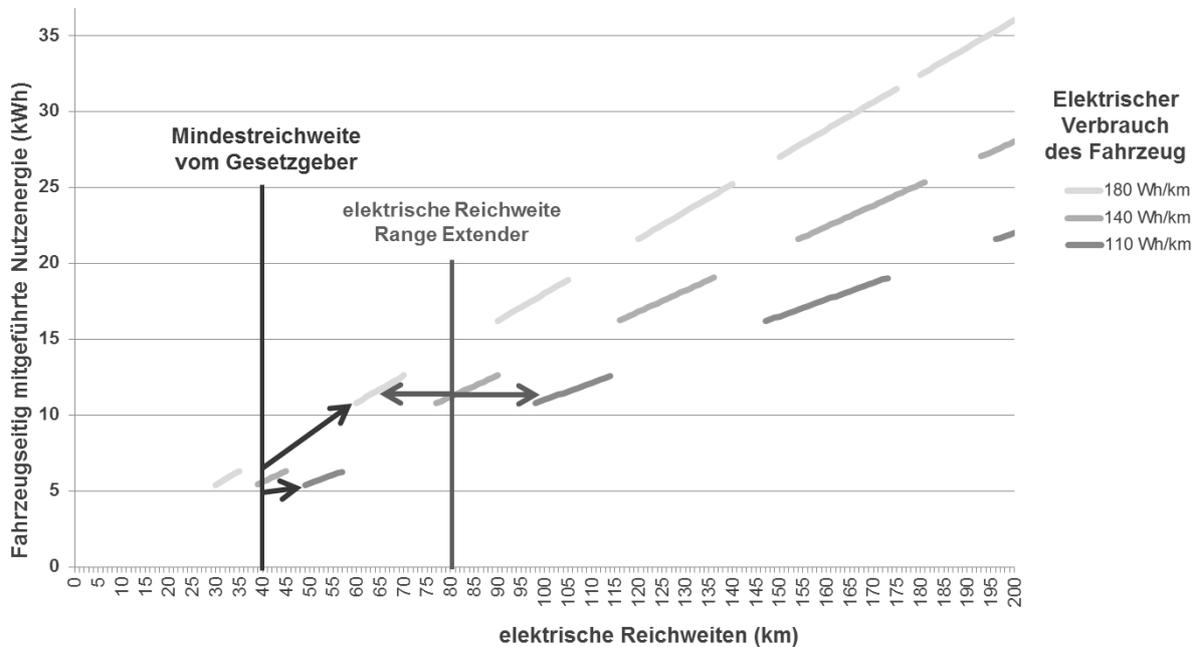
Anhang 45 Lösungsraum für elektrische Reichweiten in Abhängigkeit von elektrischen Verbrauch

E6 Lösungsraum unter Berücksichtigung der Spannungslage des AC-DC-Inverter und einer spezifischen Zelle



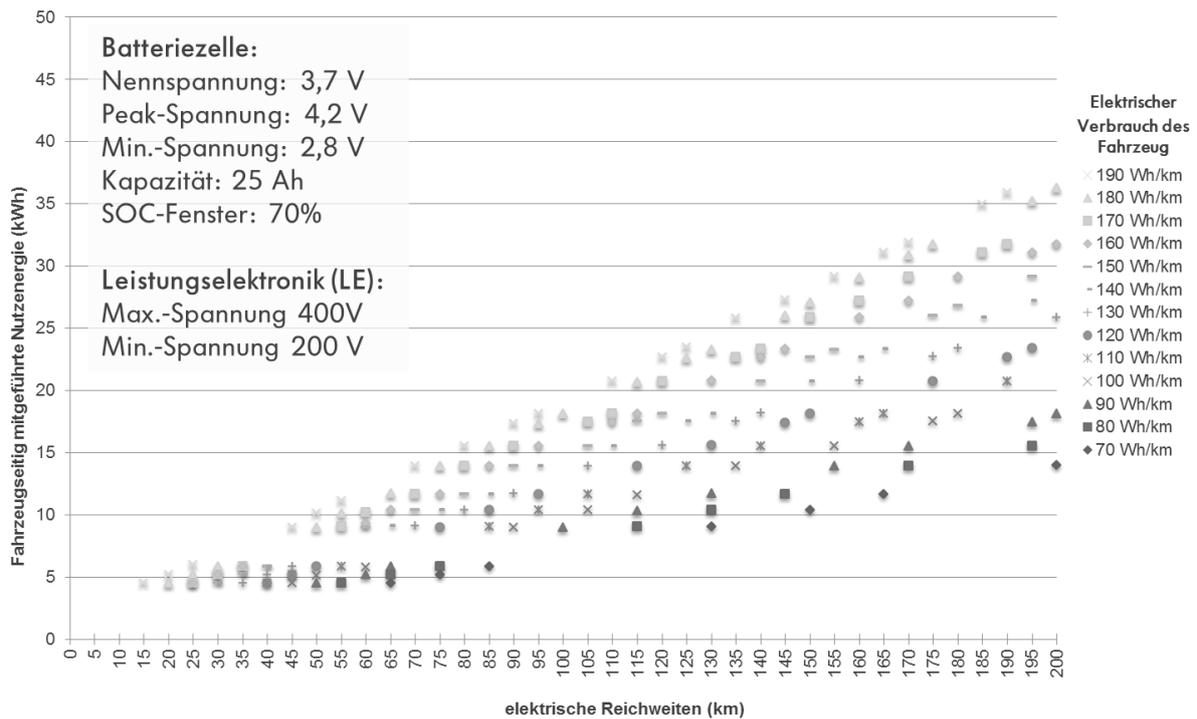
Anhang 46 Lücken im Lösungsraum nach Verschaltung in der Traktionsbatterie [BuVa-2013]

E7 Unterschiedliche elektrische Reichweiten durch Verschaltung der Traktionsbatterien



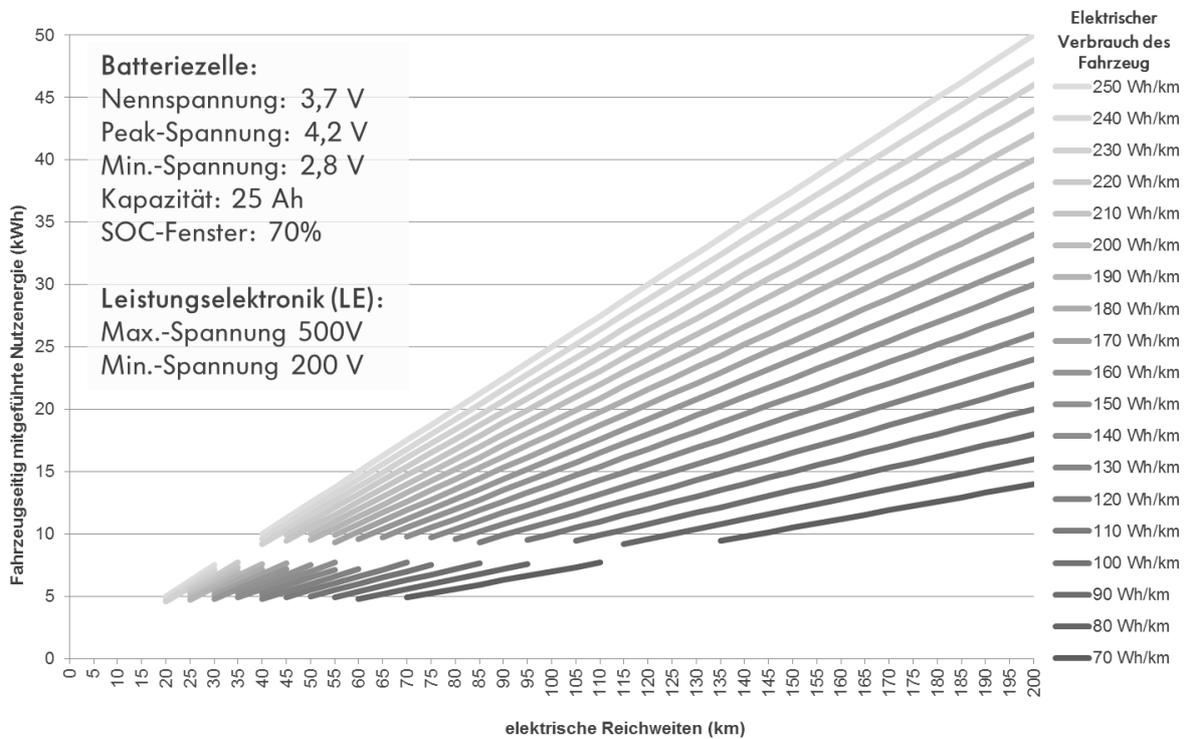
Anhang 47 Herausforderung von Mindest- und gleichen Reichweiten bei Fahrzeugarten [BuVa-2013]

E8 Lösungsraum bei der Verschaltung von Batteriezellen in 10er Modulen



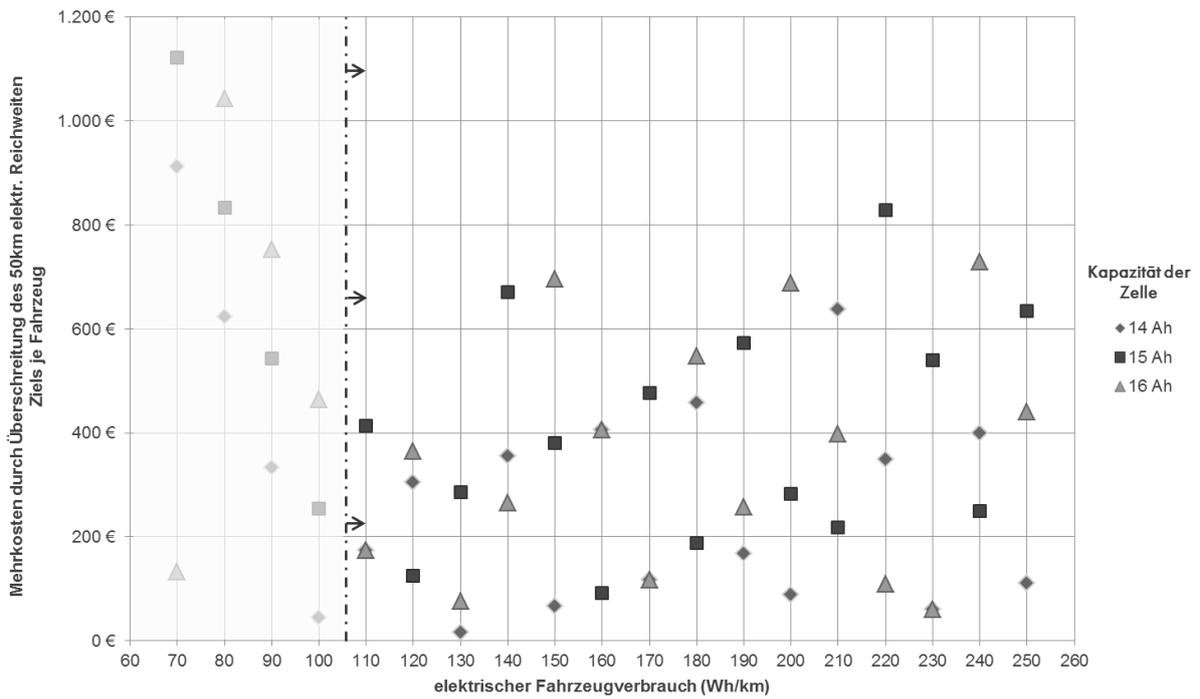
Anhang 48 Lösungsraum mit einer 25 Ah Batteriezelle in 10er Modulen

E9 Erhöhung der Spannung der LE



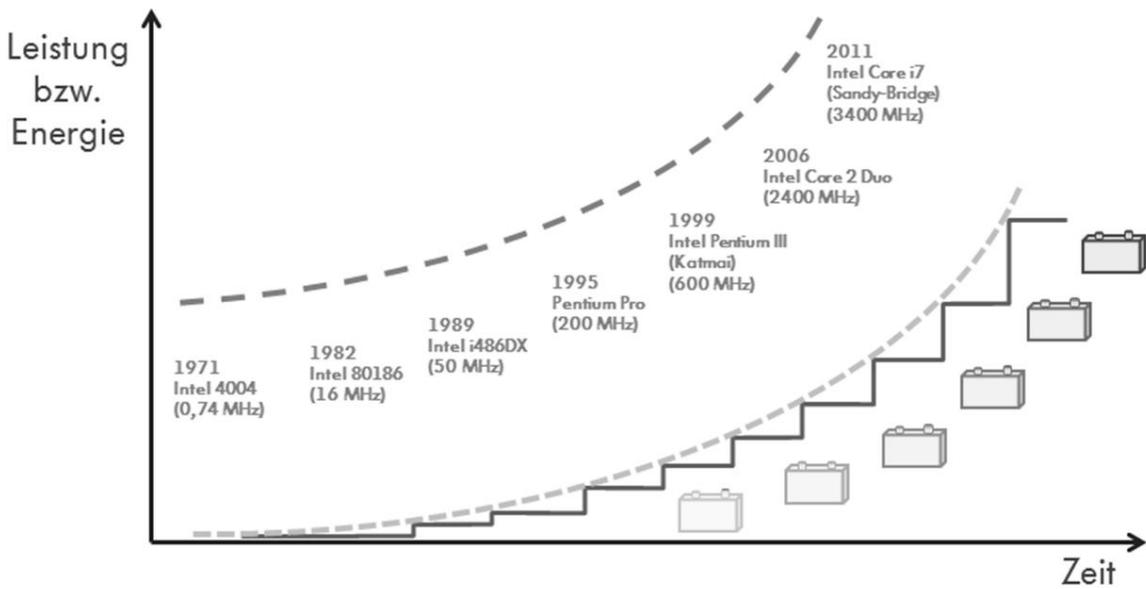
Anhang 49 Lösungsraum mit einer 25 Ah Batteriezelle bei 500 V max. Spannung des AC-DC-Inverters

E10 Mehrkosten für 14 Ah- bis 16 Ah-Batteriezele in 10er Batteriemodulen



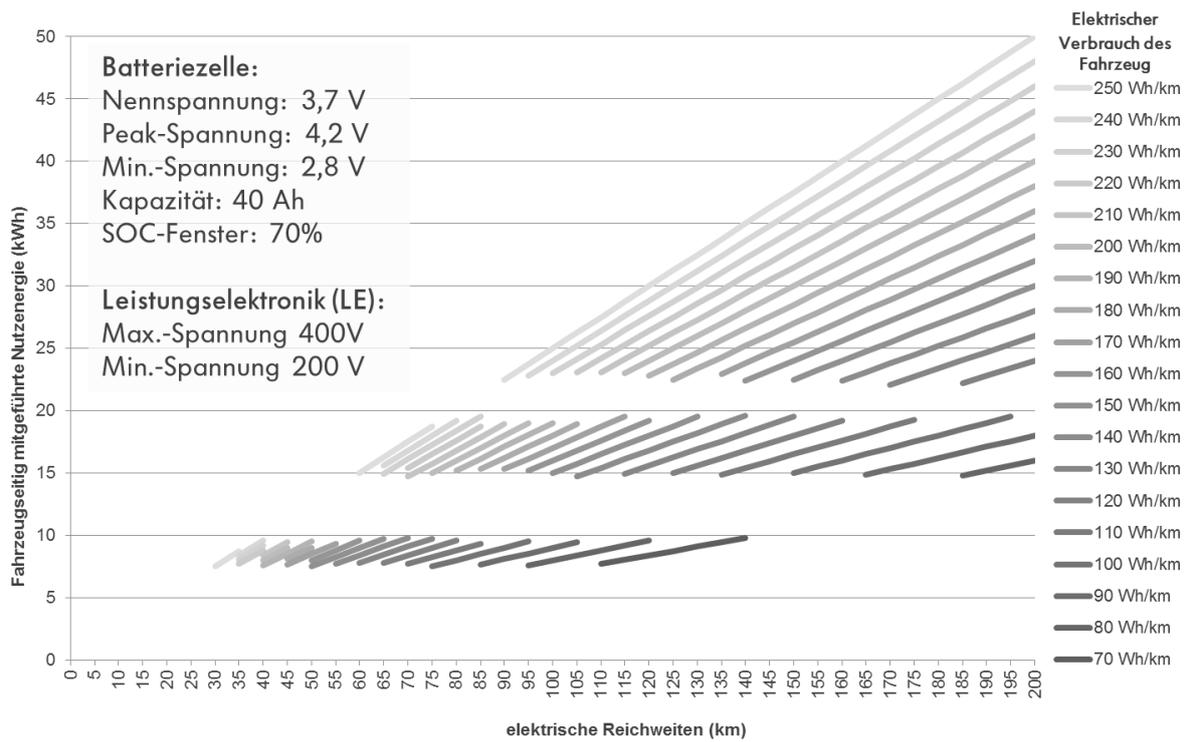
Anhang 50 Mehrkosten je nach elektrischen Verbrauch für Fahrzeuge mit 10er HV- Batteriemodulen

E11 Technologieentwicklung der Prozessoren Leistung als mögliches Pendant für die Batterie-technologie



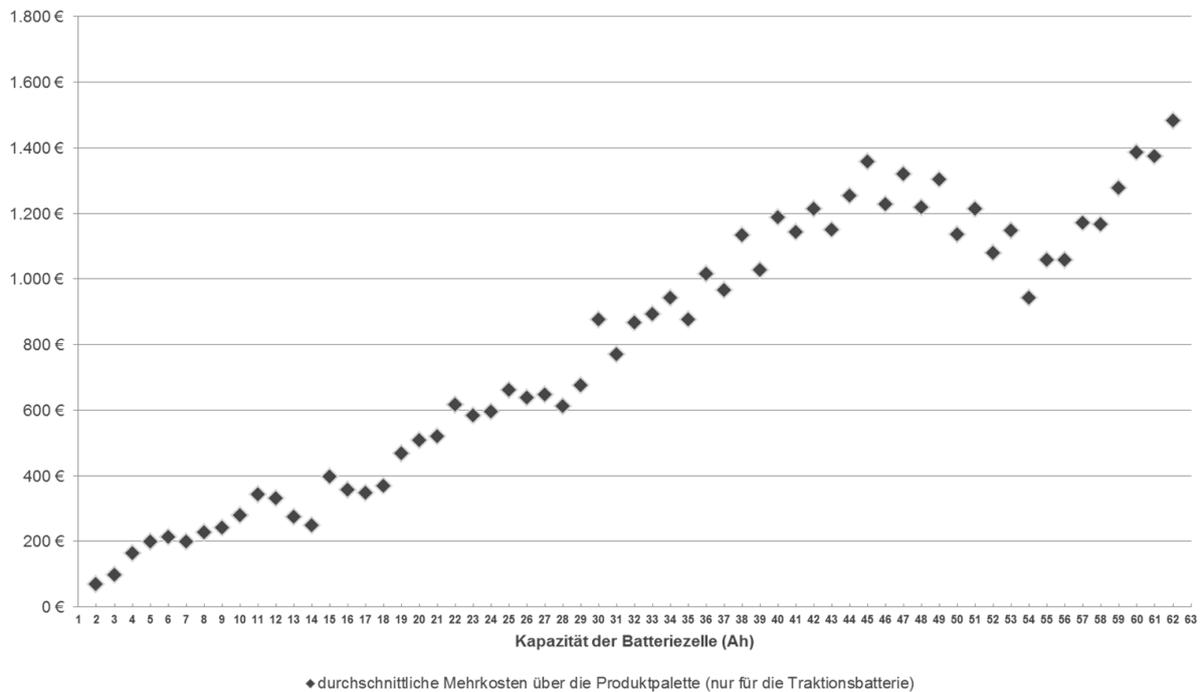
Anhang 51 Entwicklung der Prozessorleistung hinsichtlich der Tendenz bei der Batterietechnologie in Anlehnung an [BuVa-2013]

E12 Lösungsraum mit einer 40 Ah Batteriezelle



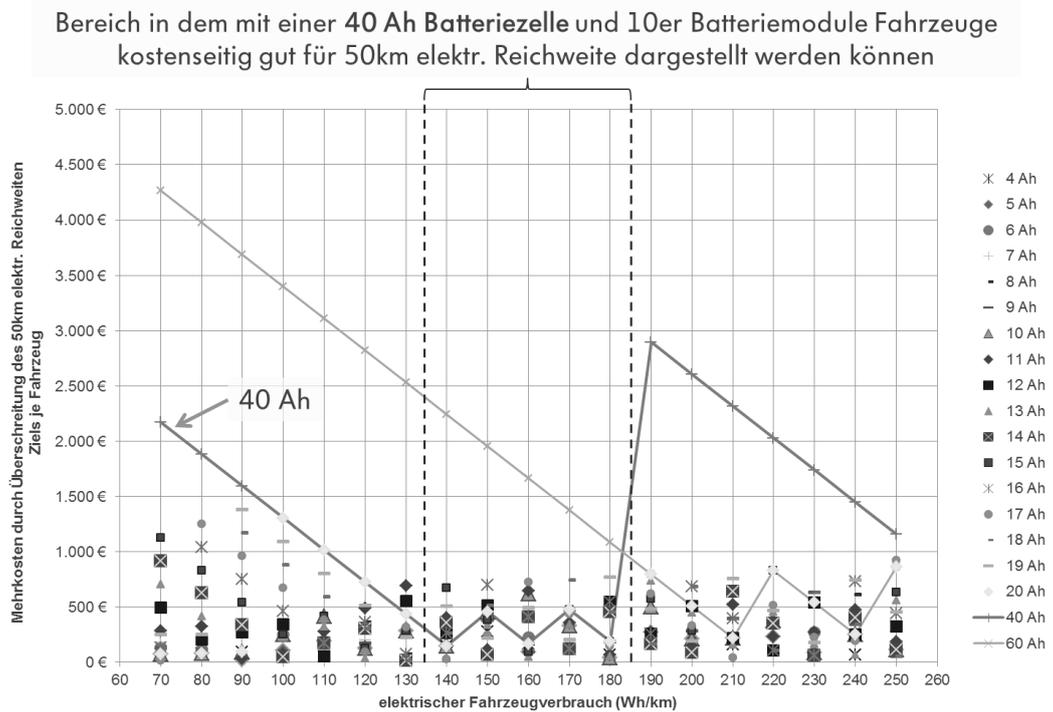
Anhang 52 Lösungsraum mit einer 40 Ah Batteriezelle

E13 Durchschnittliche Mehrkosten je Fahrzeug bzgl. der Zellkapazität für Fahrzeuge > 1.100 kg



Anhang 53 Durchschnittliche Mehrkosten je Fahrzeug bei 10er Batteriemodulen und einer Elektrifizierung von Fahrzeugen mit 110 Wh/km bis 250 Wh/km Verbrauch

E14 Mehrkosten nach Fahrzeugverbrauch für 4 Ah bis 20Ah, 40 Ah und 60 Ah Traktionsbatterien



Anhang 54 Mehrkosten je nach elektrischen Verbrauch für Fahrzeuge mit 10er HV- Batteriemodulen in Bezug auf differenzierte Zellkapazitäten

E15 Herleitung der Abmaße für 10er Batteriemodule

	Fahrzeugmaße	Batteriemodul zu bestehender Karosserie (70% Nutzvolumen)	Maß bezogen auf Längen – Breiten Verhältnis
L	345 mm	325 mm	325 mm
B	140 mm	125 mm	140 mm
H	120 mm	100 mm	100 mm
		4,06 dm ³ (≈ 4l)	4,55 dm ³ (≈ 4,5l)
Volumetrische Energiedichte Batteriemodul		↓	↓
	270 Wh/l	20 Zellen á 15 Ah	-
	250 Wh/l	-	20 Zellen á 15 Ah
Für 10er Batteriemodule		↓	↓
		(≈ 270 Wh/l)	(≈ 250 Wh/l)
L		215 mm	220 mm
B		95 mm	100 mm
H		100 mm	100 mm

Anhang 55 Abmaße bezogen auf heutige volumetrische Energiedichten von Lithium Ionen Zellen