

Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen

Dipl.-Ing. G. Elias Wiedemann

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Hornung

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

Die Dissertation wurde am 14.11.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 03.06.2014 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014

Zugl.: TU München, Univ., Diss., 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-789-5

eISBN 978-3-7369-4789-4

Prolog

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München im Rahmen des INI.TUM Kooperationsprojekts mit der AUDI AG in der Abteilung „Entwicklung Fahrzeugeigenschaften“.

Ganz besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp, der durch anregende fachliche Diskussionen und persönliche Unterstützung des Projekts wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Für weiterbringende Ideen und die Übernahme des Koreferats gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann. Für den Prüfungsvorsitz danke ich Prof. Dr.-Ing. M. Hornung.

Weiterhin möchte ich mich bei Dr.-Ing. U. Koser und Dr.-Ing. A. Meyer bedanken, die die Durchführung dieses Forschungsvorhabens über das Kooperationsprojekt INI.TUM mit seinen exzellenten Rahmenbedingungen ermöglichten.

Ein herzliches Dankeschön geht an meinen Betreuer bei der AUDI AG, J. Meurle, der den Anstoß zu dieser Arbeit gab und dessen konstruktive Anregungen sowie Fokussierung auf die Kernaspekte der Thematik wichtig und wertvoll für die Entwicklung des Projekts waren. Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich zudem bei allen Kollegen der Audi-Abteilung I/EB-23, insbesondere bei M. Rosenberger und Dr.-Ing. G. Forbriger, bedanken.

Hervorzuheben ist auch die kollegiale Atmosphäre am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Ein besonderer Dank hierfür geht an alle ehemaligen Kollegen, speziell an M. Rosenberger, J. Fuchs, M. Seitz und T. Pesce.

Ein großes Dankeswort gilt auch S. Blanke, O. Engert, M. Friebe, M. Giannantonio, P. Graf, S. Krapf, S. Lücke, K. Matros, B. Oldemeyer, M. Roth, B. Sass, A. Schleicher und F. Zitzelsberger, die durch ihr hohes Engagement im Rahmen von Studienarbeiten maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt geht mein Dank an meine Freundin Jana sowie an meine Eltern für ihre mentale Unterstützung bei diesem Projekt.

München, im November 2013

Elias Wiedemann

Kurzfassung

Ziel der Arbeit ist es, für den Entwickler eine Unterstützung bei der eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung von Elektrofahrzeugen zu schaffen. Vor allem die komplexen Zusammenhänge zwischen technischer Auslegung und einer möglichst ganzheitlichen Kundensicht werden adressiert. Zudem wird eine Möglichkeit geschaffen, automatisiert das bestmögliche Elektrofahrzeugkonzept auf Basis von Kundenbedürfnissen abzuleiten.

Dafür werden spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen identifiziert und in eine bestehende Struktur von Fahrzeugeigenschaften integriert. Sämtliche Eigenschaften werden entsprechend ihrer Objektivierbarkeit klassifiziert und in Bezug zu technischen Stellhebeln gesetzt. Durch den systematischen Überblick der komplexen Zusammenhänge werden die Beeinflussungsmöglichkeiten von Eigenschaften analysiert.

Ein abstrahierter Entwicklungsprozess ermöglicht es, aufbauend auf strategisch gesetzten Eigenschaftszielen, technische Fahrzeugkonzepte zu generieren. Die Automatisierung dieses Entwicklungsprozesses ist Kern der Arbeit.

Für eine Auswahl an objektivierbaren Eigenschaften werden abstrahierte Simulationsmodelle dargestellt, die eine Bewertung der Ausprägungen in kürzester Zeit zulassen. Zudem werden Korrelationsfunktionen zur Normierung der Eigenschaftsausprägungen geschaffen und eine Bewertungsfunktion aufgestellt, die in Bezug auf die gesetzten Ziele die Konzeptgüte beschreibt. Über eine automatisierte Variation der Parameter des technischen Konzepts kann eine Optimierung der Konzeptgüte erreicht werden. Klassische Versuchsplanung samt einer intelligenten Lösungsraumeingrenzung ermöglicht, Parameterkombinationen möglichst effizient zu untersuchen. Bei einer größeren Parameteranzahl können algorithmenbasierte Optimierer die Optima finden, ohne den vollständigen Lösungsraum analysieren zu müssen.

Die Plausibilität sowie die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des entwickelten Vorgehens sind am Beispiel der Optimierungsergebnisse eines Elektrostadtfahrzeugs dargestellt.

Abstract

The main target of this work is to support the developer in the characteristics-based development of electric vehicles. Therefore, the complex correlations between technical development and the holistic view of the customer are analyzed in detail. Based on these correlations a method is created to design the best possible electric vehicle concept subject to customer requirements.

Specific characteristics of electric vehicles are identified and integrated into an established set of vehicle characteristics. All characteristics are classified by the way they can be objectified. Furthermore, the characteristics are correlated to technical influence factors. The systematic outline of these complex relationships makes it possible to analyze how characteristics can be manipulated.

An abstract development process enables the generation of technical vehicle concepts based on strategically set targets of characteristics. The automation of this development process is at the heart of this approach.

In order to select characteristics, that can be objectified, abstract simulation models have been created to evaluate the characteristics in a very short period of time. In addition, correlation functions for the standardization of characteristic values have been set up. An evaluation was defined to assess the concept's quality according to the set objectives. The automated variation of the parameters of the technical concept can achieve an optimization of the concept's quality. Using classic design of experiments combined with an intelligent reduction of the solution space, different combinations of parameters can be examined efficiently. Furthermore, algorithm based optimizers have been implemented, that can find optimums for a higher number of parameters without analyzing the whole solution space.

The plausibility as well as the possible manifold applications of the developed method are demonstrated by the optimization results for an electric city vehicle.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XI
Abkürzungen und Definitionen	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Eigenschaften aus Sicht des Kunden	3
2.1.1 Eigenschaften in der Automobilentwicklung.....	3
2.1.2 Eigenschaftsstrukturen	5
2.1.3 Bewertung von Eigenschaften	7
2.2 Produktpositionierung über Eigenschaften.....	9
2.2.1 Eigenschaften im Produktentstehungsprozess.....	10
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Eigenschaftspositionierung	10
2.2.3 Produktsteckbrief und Eigenschaftsprofil.....	11
2.2.4 Ableitung von Zielwerten	13
2.3 Methodik der Quality Function Deployment	14
2.4 Bestehende Tools der virtuellen Fahrzeugentwicklung.....	15
2.4.1 Datenbankmodelle	17
2.4.2 Werkzeuge zur Fahrzeug-Grobkonzepterstellung.....	18
2.4.3 Virtuelle Auslegung geometrischer Umfänge.....	19
2.4.4 Simulation von Fahrleistung und Verbrauch	20
2.4.5 Modelle zur Abbildung der Querdynamik	20
2.5 Konzepte zur Einführung der Elektromobilität	21
2.6 Ansätze zur Optimierung von Fahrzeugkonzepten.....	23
2.6.1 Grundlagen der nichtlinearen Optimierung	23
2.6.2 Multikriterielle Optimierungsprobleme.....	25
2.6.3 Optimierungsalgorithmen bei Mehrparametervariation	27
2.6.4 Optimierung von Elektrofahrzeug-Konzepten	29
2.7 Fazit.....	31

3	Entwicklung der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen	33
3.1	Spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen	33
3.2	Klassifizierung von Eigenschaften gemäß ihrer Objektivierbarkeit.....	36
3.3	Abhängigkeiten von Eigenschaften und technischen Stellhebeln	39
3.3.1	Technische Stellhebel zur Beeinflussung von Eigenschaften	39
3.3.2	House of Quality für spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen	42
3.3.3	Wechselwirkungen technischer Stellhebel.....	44
3.4	Fazit.....	46
4	Prozess der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung	47
4.1	Defizite des in der Praxis angewandten Entwicklungsprozesses.....	47
4.2	Herausforderungen bei der Automatisierung des Prozesses	48
4.3	Modifizierter Entwicklungsprozess zur Ermöglichung einer Automatisierung	50
4.4	Fazit.....	52
5	Automatisierung des Entwicklungsprozesses	53
5.1	Auswahl abbildbarer Eigenschaften	53
5.2	Entwicklung der Korrelationsfunktionen	57
5.3	Aufbau des technischen Fahrzeugkonzepts	59
5.3.1	Grundkonzeptentscheidungen und Module	60
5.3.2	Einflussgrößen	61
5.3.3	Plausibilisierung des Antriebsstrangpackage	62
5.3.4	Berechnung der Gewichte.....	66
5.4	Implementierung der Eigenschaftsbewertungsmodule	71
5.4.1	Design und Maßkonzept	71
5.4.2	Querdynamik.....	72
5.4.3	Längsdynamik.....	74
5.4.4	Raumkomfort.....	77
5.4.5	Wirtschaftlichkeit	79
5.4.6	Alltagstauglichkeit	82
5.4.7	Reichweite und Batterieladen	85
5.5	Überprüfung der Eigenschaftsbewertungsmodule	88
5.6	Bewertung der Eigenschaftserfüllung des technischen Konzepts.....	93
5.7	Fazit.....	93

6	Eigenschaftsorientierte Optimierung von Fahrzeugkonzepten	95
6.1	Entwicklung einer parametrischen Bewertungsfunktion.....	95
6.1.1	Eigenschaftswerte als Grundlage der Bewertungsfunktion	95
6.1.2	Verhältnis von Über- zu Untererfüllung.....	96
6.1.3	Integration der Positionierung in die Bewertungsfunktion	97
6.1.4	Aufbau der Gesamt-Bewertungsfunktion	98
6.2	Alternative Ansätze für Bewertungsfunktionen.....	99
6.2.1	Lösung unter Verwendung von Pareto-Fronten.....	100
6.2.2	Bewertungsfunktion bei Anwendung von Fuzzy Decision Making	100
6.3	Mehrparametervariation.....	102
6.4	Versuchsplanung.....	105
6.4.1	Klassische Versuchsplanung	105
6.4.2	Statistische Versuchsplanung	106
6.4.3	Parametrische Lösungsraumeingrenzung	107
6.5	Algorithmusbasierte Optimierer	110
6.6	Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung im Vergleich	111
6.6.1	Vorgehensschemata von Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung	111
6.6.2	Analyse der Effektivität von Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung	113
6.7	Plausibilisierung der automatisierten Konzeptableitung	115
6.7.1	Sensitivitätsanalyse der Faktoren der Bewertungsfunktion	115
6.7.2	Plausibilität der gefundenen optimalen Fahrzeugkonzepte	117
6.8	Fazit.....	119
7	Optimierungsergebnisse für ein Elektrostadtfahrzeug	121
7.1	Eingaben für die Optimierung.....	121
7.1.1	Angestrebte Positionierung	121
7.1.2	Parametrierung der Eigenschaftskorrelationen.....	122
7.1.3	Gewählte Grundkonzeptentscheidungen	123
7.2	Optimierungsergebnisse bei Variation von Motorleistung und Batteriekapazität	124
7.2.1	Automatisierte Lösungsraumeingrenzung.....	124
7.2.2	Analyse des Eigenschaftsraums und möglicher Optima.....	125
7.3	Optimierungsergebnisse bei Variation mehrerer Einflussgrößen	128
7.4	Fazit.....	130

8 Diskussion	133
8.1 Grenzen der entwickelten Methodik	133
8.1.1 Rahmenbedingungen des gewählten Ansatzes	133
8.1.2 Auswahl der berücksichtigten Eigenschaften	134
8.1.3 Vereinfachungen in den Eigenschaftsbewertungsmodulen.....	134
8.1.4 Einschränkungen der Validierung des Optimierungsprozesses.....	136
8.2 Potentiale des aufgezeigten Ansatzes	136
8.2.1 Erfassen komplexer Zusammenhänge	137
8.2.2 Ableiten von ganzheitlichen Optima aus Eigenschaftssicht.....	137
8.2.3 Analyse von Technologiepotentialen und Szenarien	138
8.2.4 Szenarien zur Vergrößerung der Reichweite.....	138
8.2.5 Verallgemeinerungen des gezeigten Ansatzes	141
9 Abschließende Betrachtungen	143
9.1 Zusammenfassung	143
9.2 Ausblick.....	144
Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	v
Anhangsverzeichnis	vii
Anhang A: Grundkonzeptentscheidungen.....	ix
Anhang B: Eigenschaftswerte der Optimierungsergebnisse MUTE.....	xi
Anhang C: Faktor Kofferraumvolumen	xiii
Anhang D: Oberflächen des entwickelten EOKET	xv
Verzeichnis studentischer Arbeiten	xxi
Verzeichnis eigener Veröffentlichungen	xxiii
Literaturverzeichnis	xxv

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
α	[°]	Steigung der Fahrbahn
A_{St}	[m ²]	Stirnfläche des Fahrzeugs
a_v	[m/s ²]	Quereschleunigung des Fahrzeugs
β	[°]	Schwimmwinkel des Fahrzeugs: Winkel zwischen Bewegungsrichtung des Fahrzeugschwerpunkts und der Fahrzeuglängsachse
$b_{Batt,i}$	[mm]	Breite der jeweils abgeschlossenen, im Fahrzeug verteilten Batteriepacks
b_{Fzg}	[mm]	Breite des Fahrzeugs
b_{SW}	[mm]	Mittlere Spurweite des Fahrzeugs
$c_{v/h}$	[-]	Schräglaufsteifigkeit der vorderen / hinteren Achse
c_W	[-]	Strömungswiderstandskoeffizient des Fahrzeugs
δ	[°]	Einschlagwinkel der Räder beim Lenken
D	[-]	Gierdämpfungsmaß
$d_{EM / Basis-EM}$	[mm]	Durchmesser der im EOKET skalierten E-Maschine / Basis-E-Maschine
d_{Sitz}	[mm]	Dicke des Sitzes der vorderen Sitzanlage in x-Richtung
η_{BL}	[-]	Mittlerer Batterieladewirkungsgrad
$\eta_{Batt / LE / EM}$	[-]	Durchschnittliche Wirkungsgrade der Komponenten Batterie, Leistungselektronik und E-Maschine im NEFZ
η_{AS}	[-]	Wirkungsgrad der mechanischen Kraftübertragung des Antriebstrangs von der E-Maschine zu den Rädern
η_{Laden}	[-]	Durchschnittlicher Ladewirkungsgrad

Formelzeichen

η_{LL}	[-]	Verhältnis der durchschnittlichen Ladeleistung zur maximalen Ladeleistung
$E_{Nenn/Nutz}$	[kWh]	Nenn- bzw. Nutzkapazität der Batterie
EG	[° s ² /m]	Eigenlenkgradient des Fahrzeugs
$Eig_{Ist/Ziel}$	[-]	Eigenschafts-Ist-Wert bzw. Zielwert
ΔEig	[-]	Delta zwischen Eigenschafts-Istwert und Eigenschafts-Zielwert
ΔEig_{mod}	[-]	Über Modifikationsfunktion angepasstes ΔEig
F_Z	[N]	Zugkraft des Antriebs am Rad
$f_i(x)$	[-]	Einzelziele eines multikriteriellen Optimierungsproblems
f_R	[-]	Rollwiderstandsbeiwert
$f_{r0/r1/r2}$	[-]	Faktoren zur Bestimmung des Rollwiderstandsbeiwerts f_R in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit
G_i	[-]	Gewichtung von Eigenschaftsfeldern
G_{ij}	[-]	Gewichtung von Eigenschaften
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
$GEEG$	[%]	Gesamteigenschaftserfüllungsgrad
$\Theta_{Basisfzg}$	[kg m ²]	Trägheitsmoment um die Hochachse eines Fahrzeugs ohne seinen Antriebsstrang
Θ_{Gesfzg}	[kg m ²]	Fahrzeugträgheitsmoment um die Hochachse
$\Theta_{Komp/Batt/EM/LE/Getr}$	[kg m ²]	Trägheitsmoment der im EOKET ausgelegten Komponenten bzw. der Batterie, E-Maschine, Leistungselektronik oder des Getriebes im Komponenten-eigenen Koordinatensystem
$\Theta_{Komp,Gesfzg}$	[kg m ²]	Trägheitsmoment der Komponenten im Koordinatensystem des Gesamtfahrzeugs
$H30$	[mm]	Maß für den vertikalen Abstand des Gesäßpunkts über dem Ferspunkt

h_{Aufbau}	[mm]	Höhe des Fahrzeugaufbaus vom Unterboden bis zum Dach
$h_{\text{Batt},i}$	[mm]	Höhe der jeweils abgeschlossenen, im Fahrzeug verteilten Batteriepacks
h_{Fzg}	[mm]	Fahrzeughöhe
h_{SP}	[mm]	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts über der Fahrbahn
i_{Ges}	[-]	Gesamtübersetzung des Antriebsstrangs
K_{Basisfzg}	[-]	Kosten des Basisfahrzeugs ohne den Antriebsstrang
$K_{\text{Verkaufspreis}}$	[-]	Preis zu dem ein Fahrzeug auf dem Markt angeboten wird
k_l	[-]	Skalierungsfaktor der Länge der E-Maschine auf Basis der Wachstumsgesetze
k_d	[-]	Skalierungsfaktor des Durchmessers der E-Maschine auf Basis der Wachstumsgesetze
λ	[-]	Dynamischer Massenfaktor zur Berücksichtigung des rotatorischen Trägheitsmoments des Antriebsstrangs
λ_i	[-]	Gewichtung verschiedener Ziele bei multikriteriellen Optimierungsproblemen
l_{RS}	[mm]	Länge des Radstands
$l_{\text{Batt},i}$	[mm]	Länge der jeweils abgeschlossenen, im Fahrzeug verteilten Batteriepacks
$l_{\text{EM}/\text{Basis-EM}}$	[mm]	Länge der im EOKET skalierten E-Maschine / Basis-E-Maschine
$l_{\text{UEV}/\text{UEH}}$	[mm]	Länge des vorderen / hinteren Überhanges
$l_{\text{v}/\text{h}}$	[mm]	Abstand des Fahrzeugschwerpunkts in x-Richtung von der Vorder- / Hinterachse
$\mu(f_i(x))$	[-]	Funktion zur Normierung der Einzelziele eines multikriteriellen Optimierungsproblems auf die Fuzzy-Skala [0;1]
μ_{Asphalt}	[-]	Kraftschlussbeiwert Reifen-Asphalt

Formelzeichen

$M_{Basisfzg}$	[kg]	Gewicht eines Fahrzeugs abzüglich seines gesamten Antriebsstrangs
$M_{Batt,i}$	[kg]	Gewichte der im Fahrzeug verteilten Batteriepacks
$M_{Basisfzg,VA}$	[kg]	Anteiliges Gewicht auf der Vorderachse eines Fahrzeugs abzüglich seines gesamten Antriebsstrangs
$M_{DIN-Leer}$	[kg]	Betriebsbereites Gewicht des Fahrzeugs ohne Fahrer (entsprechend DIN-Norm Definition)
$M_{EG-Leer}$	[kg]	Betriebsbereites Gewicht des Fahrzeugs inklusive eines Fahrergewichts von 75 kg (entsprechend EG-Norm Definition)
$M_{Komp / Batt, / EM / LE / Getr}$	[kg]	Gewichte der im EOKET ausgelegten Komponenten bzw. Batterie, E-Maschine, Leistungselektronik oder Getriebe
$M_{VA / HA}$	[kg]	Anteiliges DIN-Leergewicht auf Vorder- beziehungsweise Hinterachse
n	[-]	Verhältnis Belohnung der Übererfüllung zur Bestrafung der Untererfüllung in der Modifikationsfunktion
$n_{FW / NEFZ / KUV}$	[kWh/100km]	Mittlerer Verbrauch eines Fahrzeugs mit spezifizierten Fahrwiderständen (FW) n_{FW} : im NEFZ ohne Nebenverbraucher n_{NEFZ} : im NEFZ mit geringem durchschnittlichen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher n_{KUV} : im KUV mit hohem durchschnittlichen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher
n_{OS}	[-]	Anzahl Optimierungsschleifen
P_{BL}	[W]	Maximale Leistung des verwendeten Ladegerätes beim Batterieladevorgang
$P_{BL, eff}$	[W]	Effektive Ladeleistung beim Batterieladevorgang
$P_{EM / Basis-EM}$	[kW]	Spitzenleistung der E-Maschine / Basis-E-Maschine

P_{Mot}	[kW]	Leistung des Verbrennungsmotors
$P_{EM,Nenn}$	[kW]	Nennleistung der E-Maschine
$P_{NEFZ/KUV}$	[W]	Mittlerer Leistungsbedarf der Nebenverbraucher im NEFZ bzw. KUV
q	[-]	Exponent der Gewichtungen der Eigenschaften in der Modifikationsfunktion
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte
r_{Rad}	[mm]	Raddurchmesser
$RW_{NEFZ/KUV}$	[km]	Reichweite auf Basis des Verbrauchs im NEFZ / KUV
R_{VL}	[m]	Wendekreisradius des vorderen linken Rads
$R_{WK,Bzgfz}$	[m]	Wendekreisradius eines Bezugsfahrzeugs
$R_{WK,\Delta RS}$	[m]	Wendekreisradius des Konzeptfahrzeugs unter Berücksichtigung einer Radstandsänderung Δl_{RS}
$R_{WK,\Delta UEV/WK,\Delta SW}$	[m]	Wendekreisradius des Konzeptfahrzeugs unter Berücksichtigung von Änderungen des Radstands Δl_{RS} , des vorderen Überhangs Δl_{UEV} und der Spurweite Δb_{SW} .
r_i	[-]	Anzahl der Ausprägungen eines Variationsparameters im Rahmen der klassischen Versuchsplanung
σ	[-]	Abklingkonstante des Fahrzeugs nach Anregung durch schlagartige Lenkmanöver
S	[-]	Wertebereiche der Variationsparameter x bei Ermittlung der Einzelziele $f_i(x)$.
$S_{A,St}$	[-]	Faktor zur Ableitung der Fahrzeug-Stirnfläche aus der von Höhe und Breite des Fahrzeugs aufgespannten Fläche
$S_{Derivat}$	[-]	Derivatspezifischer Faktor zur Berechnung des Kofferraumvolumens
$S_{K,AnteilAntrieb}$	[€/m ³]	Anteil des konventionellen Antriebs am Verkaufspreis

Formelzeichen

$S_{K,Basisfzg_1 / K,Basisfzg_2}$	[€/m ³]	Parameter der Regressionsfunktion zur Bestimmung der Basisfahrzeugkosten auf Basis des Fahrzeugblockvolumens
$S_{K,Batt / K,EM / K,LE / K,Getr}$	[-]	Faktoren zur Bestimmung der Kosten von Batterie / E-Maschine / Leistungselektronik bzw. Getriebe
$S_{K,Gewinnmarge}$	[%]	Derivatabhängige Gewinnmarge zur Bestimmung der Anschaffungskosten
$S_{K,Leichtbau}$	[€/kg]	Spezifische Kosten für über Leichtbau eingespartes Gewicht
$S_{K,Strompreis}$	[€/kWh]	Vom Kunden zu bezahlender Strompreis zum Laden der Batterie
S_{KUV}	[-]	Faktor zur Anpassung des Verbrauchs aus den Fahrwiderständen im NEFZ an einen dynamischeren kundennahen Zyklus
$S_{M,Leichtbau}$	[-]	Berücksichtigung von Leichtbaumaßnahmen bei der Berechnung des Basisfahrzeuggewichts sowie der Basisfahrzeugkosten
$S_{M,VFzg}$	[kg/m ³]	Faktor zur Abschätzung des Basisfahrzeuggewichts in Abhängigkeit vom Fahrzeugblockvolumen
$S_{M,Zellen}$	[Wh/kg]	Spezifisches Gewicht der Batteriezellen
$S_{M,PackKühl}$	[-]	Faktor zur Abschätzung des Mehrgewichts der Batterie für Package und Kühlung auf Basis des Gewichts der Einzelzellen
s	[-]	Formfaktor der Modifikationsfunktion
SG	[°s ² /m]	Schwimmwinkelgradient: Zunahme des Schwimmwinkels bei steigender Querbeschleunigung
$SgRP_{v/h}$	[mm]	Seating Reference Points der vorderen bzw. hinteren Sitzreihe
SSF	[-]	Static Stability Factor des Fahrzeugs
T_{EM}	[Nm]	Spitzendrehmoment der im EOKET ausgelegten E-Maschine

t_{NEFZ}	[s]	Zeitdauer des NEFZ
V_{Fzg}	[mm ³]	Blockvolumen des im EOKET ausgelegten Fahrzeugs, das sich aus dem Produkt von Länge, Breite und Höhe ergibt
$V_{Red,Ast,Bat}$	[mm]	Volumina des Antriebsstrangs und der Batterie, die in den Kofferraum hineinragen und dadurch das Kofferraumvolumen verringern
$v=\dot{x}$	[m/s]	Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Längsrichtung
v_{char}	[km/h]	Charakteristische Geschwindigkeit des Fahrzeugs, bei der das Maximum der Gierverstärkung erreicht wird
v_{Steig}	[km/h]	Erreichbare Höchstgeschwindigkeit bei einer Steigung von 15 %
\ddot{x}	[m/s ²]	Beschleunigung des Fahrzeugs in Längsrichtung
$x_{Batt / EM / LE / Getr}$	[mm]	Positionen in x-Richtung der Schwerpunkte der im EOKET ausgelegten Komponenten Batterie, E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe
x_{NEFZ}	[km]	Distanz des NEFZ
$x_{VA/HA}$	[mm]	Aufstandspunkte der Räder der Vorder- / Hinterachse in x-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems
ψ	[°]	Gierwinkel des Fahrzeugs
ω_0	[Hz]	Ungedämpfte Eigenfrequenz des Fahrzeugs

Abkürzungen und Definitionen

Begriff	Definition
Anlenkverhalten	Eigenschaft zur Beschreibung der Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkeingaben aus Geradeausfahrt [Hei02, S. 73 f.].
Ausprägung	Qualitative oder quantitative Ausgestaltung eines Merkmals oder einer Funktion. In dieser Arbeit gleichbedeutend mit „Eigenschaftsausprägung“.
Anforderung	Notwendige Fähigkeit oder Beschaffenheit eines Produkts. In der vorliegenden Arbeit gleichbedeutend mit „Kundenanforderung“.
Bewertungsfunktion	Formel zur Bestimmung der Güte eines Produkts oder eines Prozesses. Das Ergebnis der Bewertungsfunktion kann als Gütekriterium von Optimierungsalgorithmen verwendet werden. In dieser Arbeit verwendet zum Vergleich und der Optimierung der kundenwerten Güte von Fahrzeugkonzepten.
Design of Experiments = Statistische Versuchs- planung	Methodik zur intelligenten Planung von Versuchen. Anwendung statistischer Verfahren zur Reduktion der Anzahl der notwendigen Versuche. Das Vorgehen kann analog für die Planung von Simulationen angewendet werden.
Elektrofahrzeug	Über eine E-Maschine angetriebenes Fahrzeug, das seine Energie aus einem elektro-chemischen Energiespeicher bezieht.

EG = Eigenlenkgradient	Notwendige Änderung des Lenkradwinkels, um bei steigender Querbesehleunigung auf einem konstanten Kreisradius zu fahren [Hei07, S. 142].
Eigenlenkverhalten	Beschreibt die Über- oder Untersteuerneigung eines Fahrzeugs im linearen Bereich bis zu einer Querbesehleunigung von etwa 4,0 m/s ² . Beurteilt wird die Höhe des Eigenlenkgradienten [Schr10, S. 250].
Eigenschaft = Fahrzeugeigenschaft	Merkmal, das die Beschaffenheit eines Produkts beschreibt. Eigenschaften sind lösungsneutral formuliert und stellen über ihre Ausprägung die Güte eines Produkts dar. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Eigenschaften“ auf vom Kunden direkt erlebbare Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs eingeschränkt. Nicht direkt vom Kunden wahrnehmbare Eigenschaften, die für die Auslegung relevant sind, werden als Einflussgrößen bezeichnet (z.B. Achslastverteilung).
Eigenschaftsausprägung = Ausprägung	Vom Kunden wahrgenommene Ausgestaltung einer Eigenschaft. Alle Eigenschaftsausprägungen können auf der Eigenschaftswerteskala beschrieben werden. Ist eine Eigenschaft quantifizierbar, kann die Ausprägung auch als physikalischer Wert dargestellt werden.
Eigenschaftsfeld	Zusammenfassung von thematisch verwandten Eigenschaften zu einer Oberkategorie (z.B. Zuordnung der Eigenschaften Höchstgeschwindigkeit, Steigfähigkeit und der Besehleunigungswerte zum Eigenschaftsfeld Längsdynamik).
Eigenschaftswert	Quantitative Beschreibung der Ausprägung einer Eigenschaft, gemessen auf der Eigenschaftswerteskala.

Eigenschaftswerteskala	Maß zur einheitlichen Bewertung der Ausprägung von Eigenschaften. Die Werte dieser Skala reichen von eins bis zehn, wobei die Güte mit steigenden Eigenschaftswerten zunimmt. Der Bereich von eins bis vier beschreibt Ausprägungsniveaus, die nicht marktfähig sind. Der Eigenschaftswert fünf entspricht der Mindest-erfüllung für Marktakzeptanz. Die derzeit technisch bestmögliche Erfüllung wird mit dem Eigenschaftswert zehn gleichgesetzt.
Einflussgröße	Auslegungsrelevante Größe eines Produkts, das die Realisierung von Eigenschaften ermöglicht (z.B. Achs-lastverhältnis, c_W -Wert, Spurweite etc.).
EOKET = Eigenschaftsorientiertes Konzeptentwicklungstool	Bezeichnung des in dieser Arbeit entwickelten Ausle-gungstools, das die Entwicklung von Elektrofahrzeug-konzepten auf Basis von gesetzten Eigenschaftszielen unterstützt.
EREV = Extended Range Electric Vehicle	Fahrzeug mit seriell-hybridem Antriebsstrang. Entspricht einem Elektrofahrzeug, das um einen Verbrennungs-motor samt Generator ergänzt wurde, um während der Fahrt Energie zum Nachladen der Batterie oder zur Speisung des Elektromotors zu erzeugen. Das Aggregat wird als Range-Extender bezeichnet.
Fahrzeugderivat	Beschreibt die Karosserieform eines Fahrzeugs. Mögliche Derivate sind z.B. Limousine, Cabrio oder Coupé.
Fuzzy Decision Making	Verfahren, um multikriterielle Optimierungsprobleme unter Verwendung von Fuzzy-Operatoren in monokriterielle Optimierungsprobleme umzuwandeln [Ber00, S. 25-38].

GEEG = Gesamteigenschafts- erfüllungsgrad	Größe zur ganzheitlichen Bewertung der Güte eines Fahrzeugkonzepts. Ergibt sich als Ergebnis der Bewertungsfunktion.
GVF = Gierverstärkungsfaktor	Beschreibt die Gierreaktion, also die Drehung um die Hochachse, die ein Fahrzeug im Bereich bis 4 m/s ² Quereschleunigung in Abhängigkeit vom Lenkwinkel aufweist.
House of Quality	Werkzeug der Quality Function Deployment Methodik zur Darstellung und Analyse der Zusammenhänge zwischen kundenrelevanten Eigenschaften und der zur Realisierung der Eigenschaften notwendigen technischen Maßnahmen [Saa97, S. 35-39].
Klassische Versuchsplanung	Methodik zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Eingangsgrößen bei einem Versuch. Gemäß den Regeln der Kombinatorik werden bei der klassischen Versuchsplanung alle möglichen Kombinationen der Parameter und ihrer Ausprägungen entsprechend der festgelegten Schrittweiten untersucht.
Kundenanforderung = Anforderung	Vom Kunden geforderte Ausprägung einer Produkteigenschaft [Pon11, S. 428].
KUV = Kundennaher Verbrauchszyklus	Im Gegensatz zum NEFZ ein Zyklus, der das deutlich dynamischere Fahrverhalten des Kunden abbildet. In dieser Arbeit nicht mit einem spezifischen Zyklus verbunden, sondern als Überbegriff für alle kundennahen Verbrauchszyklen zu verstehen.

NCBS = New Car Buyers Survey	Studie, die auf Basis der Befragung von Neuwagenkäufern, Kaufentscheidungsgründe und Zufriedenheit mit Fahrzeugen analysiert [NCBS06].
NEFZ = Neuer Europäischer Fahrzyklus	Genormter Fahrzyklus zur Ermittlung des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs gemäß RL70/220/EWG.
Pareto-optimal	Pareto-optimale Lösungen stellen jeweils den besten Kompromiss zwischen mehreren konkurrierenden Zielen dar. Die Gesamtheit der Pareto-optimalen Lösungen zwischen zwei Zielen wird auch als Pareto-Front bezeichnet [Bai11, S. 88-90].
Quality Function Deployment	Methodik eines Entwicklungsprozesses zur strukturierten Umsetzung von Kundenforderungen in Produkte [Saa97, S. 9]. Zentrales Werkzeug der Quality Function Deployment Methodik ist das House of Quality.
Range-Extender	siehe EREV.
Segment = Fahrzeugsegment	Möglichkeit der Gruppierung von Fahrzeugen gemäß ihrer äußeren Abmaße und preislichen Positionierung.
SSF = Static Stability Factor	Gibt einen Anhaltspunkt für die Kippsicherheit bzw. das Überschlagsrisiko eines Fahrzeugs auf Basis der Schwerpunktshöhe und Spurweite.
SUV = Sport Utility Vehicle	Mischkonzept aus einem Geländefahrzeug und einem gewöhnlichen Straßenfahrzeug.
TCO = Total Cost of Ownership	Entspricht einer Gesamtkostenbetrachtung aus Kundensicht. Beim Fahrzeug werden zusätzlich zu den Anschaffungskosten sämtliche Unterhaltskosten sowie der Wertverlust betrachtet.

Technische Stellhebel

Menge der Beeinflussungsfaktoren eines technischen Fahrzeugkonzepts bestehend aus: Grundkonzept- und Modulentscheidungen, Einflussgrößen und Funktionen.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Kraftfahrzeuge tragen durch CO₂-Emissionen zum Treibhauseffekt und damit zur globalen Klimaerwärmung bei. Deshalb haben viele Regierungen Grenzwerte für die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der zu verkaufenden Fahrzeuge je Hersteller festgelegt. Zur Erreichung dieser Grenzwerte sind die Fahrzeughersteller zu einer drastischen Reduktion der Emissionswerte gezwungen. Dafür stellen Fahrzeuge mit rein elektrischem Antriebsstrang eine Lösungsmöglichkeit dar, weil diese per definitionem mit 0 g CO₂ in die Bilanz eingehen. Dadurch kann ein großer Beitrag zur Erreichung der gesetzlich vorgegebenen CO₂-Ziele geleistet werden. Kritisch zu hinterfragen sind die Emissionen, die bei der Erzeugung der elektrischen Energie entstehen. Nur bei CO₂-armer Stromerzeugung können Elektrofahrzeuge global gesehen die CO₂-Emissionen reduzieren [Lie12, S. 44 f.]. Weitere Treiber zur Einführung von Elektrofahrzeugen sind neben den politisch geprägten Grenzwerten für CO₂-Emissionen die Verknappung fossiler Kraftstoffe sowie die zunehmenden Kundenforderungen nach ökologischer Nachhaltigkeit [Wal10, S. 3-34].

Der Technologiesprung bei der Elektrifizierung des Antriebstrangs bringt eine gravierende Veränderung der Fahrzeugarchitektur mit sich. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ist vor allem die Auslegung der Batterie stark prägend für die Entwicklung des Gesamtfahrzeugs. Die Möglichkeit, elektrisch zu fahren, kann Einschränkungen in zahlreichen kundenrelevanten Gesamtfahrzeugeigenschaften wie der Höchstgeschwindigkeit oder der Reichweite hervorrufen. Der Großteil der Kunden ist nicht bereit, bei einem Umstieg von einem konventionell angetriebenen Fahrzeug auf ein Elektrofahrzeug starke Einschränkungen bei der Nutzung hinzunehmen. Deswegen sind die Fahrzeughersteller darauf angewiesen, Elektrofahrzeuge zu entwickeln, die einen möglichst hohen Kundennutzen bieten und nur bei nicht positionierungsrelevanten Eigenschaften Einschränkungen aufweisen. Daraus ergibt sich eine erhöhte Anforderung an eine kundenorientierte und eigenschaftsbasierte Fahrzeugentwicklung.

1.2 Zielsetzung

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Herausforderung, Elektrofahrzeuge mit einem maximalen Kundennutzen zu entwickeln. Dazu ist es erforderlich, dem Entwickler eine Unterstützung bei der ganzheitlichen Auslegung von Elektrofahrzeugen zu liefern.

Daher ist Ziel dieser Arbeit, eine Methodik zur Unterstützung der eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung von Elektrofahrzeugen zu entwickeln. Zentraler Bestandteil ist der komplexe Zusammenhang zwischen kundenrelevanten Eigenschaften und dem technischen Konzept. Für verschiedene Kundenanforderungen soll über einen zu entwickelnden Prozess das jeweils optimale technische Elektrofahrzeug-Grobkonzept abgeleitet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit besteht aus neun Kapiteln (Abbildung 1-1). In Kapitel zwei wird der Stand der Forschung und Technik diskutiert und bisher verfolgte Ansätze aufgezeigt. Im dritten Kapitel werden die spezifischen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen erläutert und deren Objektivierbarkeit und Beeinflussbarkeit in der Entwicklung analysiert. Kapitel vier abstrahiert den Prozess der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung, dessen Automatisierung im Detail in Kapitel fünf beschrieben wird. Die automatisierte Parametervariation der technischen Stellhebel und die damit gekoppelte Optimierung der Gesamteigenschaftserfüllung wird im sechsten Kapitel gezeigt, während im siebten Kapitel ausgewählte Ergebnisse präsentiert werden. Eine abschließende Diskussion und ein Ausblick auf weitere mögliche Arbeiten erfolgen in Kapiteln acht und neun.

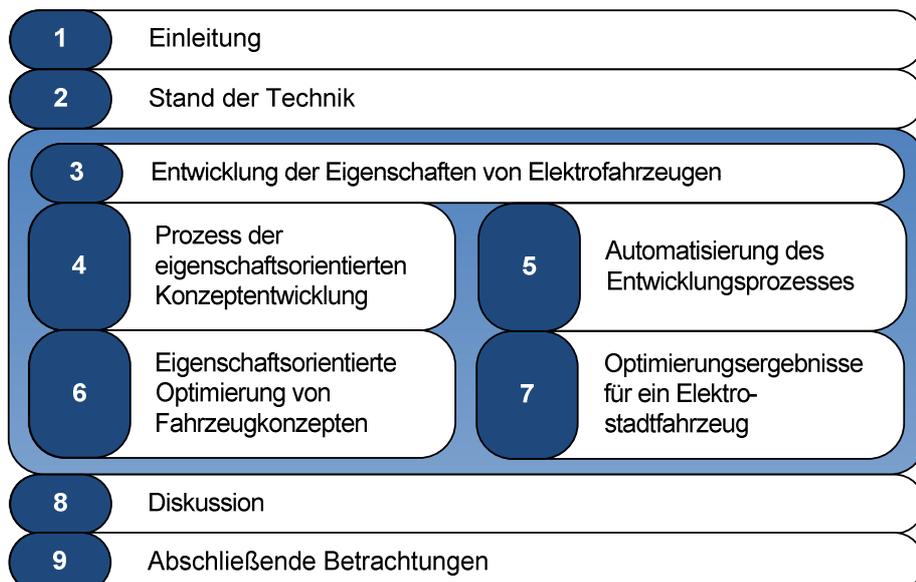


Abbildung 1-1 Struktur der Arbeit

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden wesentliche Elemente des aktuellen Wissensstands im Bereich eigenschaftsorientierter Fahrzeugentwicklung und Optimierung von Gesamtfahrzeugkonzepten dargestellt. Zudem wird ein Einblick in umgesetzte Ansätze zur Optimierung von Elektrofahrzeugen gegeben.

2.1 Eigenschaften aus Sicht des Kunden

In der kundenorientierten Produktentwicklung sind Eigenschaften geeignete Kriterien zur Beurteilung der Güte und Wettbewerbsfähigkeit eines Produkts. Sie bieten als Entwicklungsziele die Möglichkeit, Kundenanforderungen in die Entwicklung eines Produkts einfließen zu lassen [Lin09, S. 7].

2.1.1 Eigenschaften in der Automobilentwicklung

Über Befragungen im Rahmen von New Car Buyers Surveys [NCBS06] werden die Entscheidungsgründe von Neuwagenkäufern analysiert. Zu den am meisten genannten Kaufentscheidungsgründen zählen stets Design, Qualität, Markentreue, Längsdynamik, Sicherheit und das Preis-Leistungsverhältnis. In den letzten Jahren haben zudem die Umweltfreundlichkeit und die ökologische Nachhaltigkeit deutlich an Relevanz gewonnen [Wyr07]. Renz [Ren07] strukturiert die Kaufentscheidungsgründe in emotional verursachte Beweggründe, wie Design, Motorleistung oder Antriebsart, und in rational verursachte Beweggründe, wie Robustheit, Kraftstoffverbrauch oder das Preis-Leistungsverhältnis. Darüber hinaus zeigt Renz auf, dass ein Gewichtungverhältnis von 70:30 zugunsten der emotionalen Kaufentscheidungsgründe besteht.

Vor allem die rationalen jedoch auch teilweise die emotionalen Kaufentscheidungsgründe lassen sich über Produkteigenschaften abstrahieren. „Eigenschaften“ sind nach der Definition von Ponn und Lindemann [Pon11, S. 432] generell alle Charakteristika, die ein Produkt beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Eigenschaften“ auf die Charakteristika, die direkt vom Kunden wahrgenommen werden und zur Kaufentscheidung wesentlich beitragen, beschränkt.

Nicht direkt erlebbare Eigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit als „Einflussgrößen“ bezeichnet, weil sie vorrangig für die technische Auslegung des Konzepts benötigt werden, vom Kunden jedoch nicht direkt als Beurteilungskriterien wahr-

genommen werden. Bei Fahrzeugen zählt zu den Einflussgrößen z.B. die Achslastverteilung, die vom Kunden nicht direkt erfahrbar ist, allerdings auf viele Eigenschaften, wie die Längsdynamik oder Querdynamik, einen großen Einfluss hat.

Unabhängig von der Kundenrelevanz können Eigenschaften entsprechend ihrer Beeinflussbarkeit im Entwicklungsprozess unterteilt werden. Lindemann [Lin09, S. 160] führt drei Kategorien für Eigenschaften, bzw. entsprechend seiner Begriffsdefinition für „Produktmerkmale“, ein: Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmale (Abbildung 2-1). Beschaffenheitsmerkmale wie Geometriedaten können direkt festgelegt werden (Stellgrößen), während sich Funktions- und Relationsmerkmale aus der Kombination von Beschaffenheitsmerkmalen ergeben (Folgegrößen). Funktionsmerkmale beschreiben mögliche Funktionen wie das Anlenkverhalten. Über Analysen, wie realer Versuch oder Simulation, können Ausprägungen der Funktionsmerkmale bestimmt werden. Relationsmerkmale beinhalten die in Beziehung mit anderen Objekten auftretenden Eigenschaften wie beispielsweise die Herstellbarkeit.

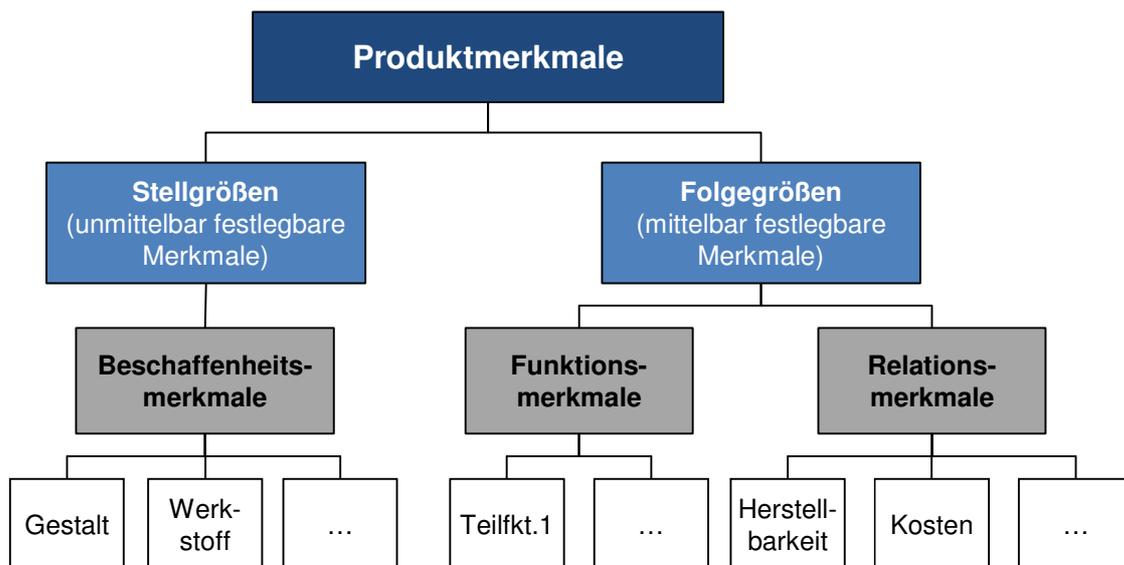


Abbildung 2-1 Einteilung von Produktmerkmalen nach [Lin09, S. 160]

Ziemann [Zie06, S. 24-28] verwendet den Begriff „Ziele“ synonym zur Definition von „Eigenschaften“ in dieser Arbeit. Er differenziert „harte“ und „weiche“ Ziele. Die Ausprägungen von harten Zielen werden in physikalischen Einheiten gemessen. Weiche Ziele hingegen lassen sich nicht direkt quantifizieren und werden deshalb mittels Relationen zu Referenzfahrzeugen oder anhand von qualitativen Beschreibungen ausgeprägt. Somit unterliegen weiche Ziele stets einer subjektiven Bewertung. Ziemann definiert zudem Schnittstellengrößen mit harten Zielwerten, die erfüllt werden müssen, um die Realisierung der weichen Ziele zu ermöglichen. Heinke

[Hei94, S. 127-129] unterscheidet in ähnlicher Weise zwischen objektiven und subjektiven Größen, wobei er zusätzlich einen Übergangsbereich definiert, in dem Teil-eigenschaften objektivierbar und andere nur subjektiv beurteilbar sind.

2.1.2 Eigenschaftsstrukturen

Bei der Nutzung komplexer Produkte ergibt sich eine Vielzahl differenziert erlebbarer Eigenschaften. Die Eigenschaftsstruktur eines Produkts definiert Lindemann als „Eigenschaftsliste“ [Lin09, S. 161]. In der vorliegenden Arbeit wird dafür der Begriff „Eigenschaftsstruktur“ verwendet. Unter Verwendung mehrerer Ebenen werden Eigenschaftsstrukturen hierarchisch aufgebaut, um die Vielzahl von Eigenschaften gemäß ihrer inhaltlichen Verwandtschaft zu gliedern. Die Eigenschaftsstrukturen werden im Rahmen der Eigenschaftsplanung mit Forderungen von Kunden und internen Anforderungen gefüllt. Nach Seiffert und Gotthard [Sei08, S. 15] dienen die angestrebten Eigenschaftsausprägungen als zentrales Maß der Entwicklungsarbeit von Produkten, auf deren Basis der Entwicklungsprozess gestartet wird und Entwicklungsstände gemessen werden.

Kundenanforderungen an Kraftfahrzeuge beinhalten vielfältige Aspekte aus den Bereichen Sicherheit, Qualität, Komfort, Wirtschaftlichkeit, Transport oder Fahrleistungen [Bra07, S. 9-16]. Ziemann stellt einen detaillierten Katalog der von der BMW AG betrachteten Fahrzeugeigenschaften vor [Zie06, S. 138-153]. In der vorliegenden Arbeit wurde auf eine von der AUDI AG verwendete Eigenschaftsstruktur aufgebaut. Diese Struktur wurde über Jahre hinweg weiterentwickelt und optimiert, jedoch nur in Teilen veröffentlicht. Abbildung 2-2 beschreibt die Eigenschaften der ersten Ebene, die sogenannten Eigenschaftsfelder. Abbildung 2-3 zeigt die Eigenschaften der zweiten Ebene beispielhaft für das Eigenschaftsfeld Alltagstauglichkeit. Das Netzdiagramm bietet die Möglichkeit, die Ausprägungen der Eigenschaften und damit die Stärken und Schwächen eines Fahrzeugs darzustellen. Die Mindestbefriedigung mit dem Eigenschaftswert fünf liegt in der Mitte des Diagramms, während die äußerste Netzdiagrammlinie dem Eigenschaftswert zehn entspricht. Mit Hilfe dieser Visualisierungsform können auch Positionierungen im Vergleich zu Wettbewerbsfahrzeugen anschaulich vorgenommen werden.

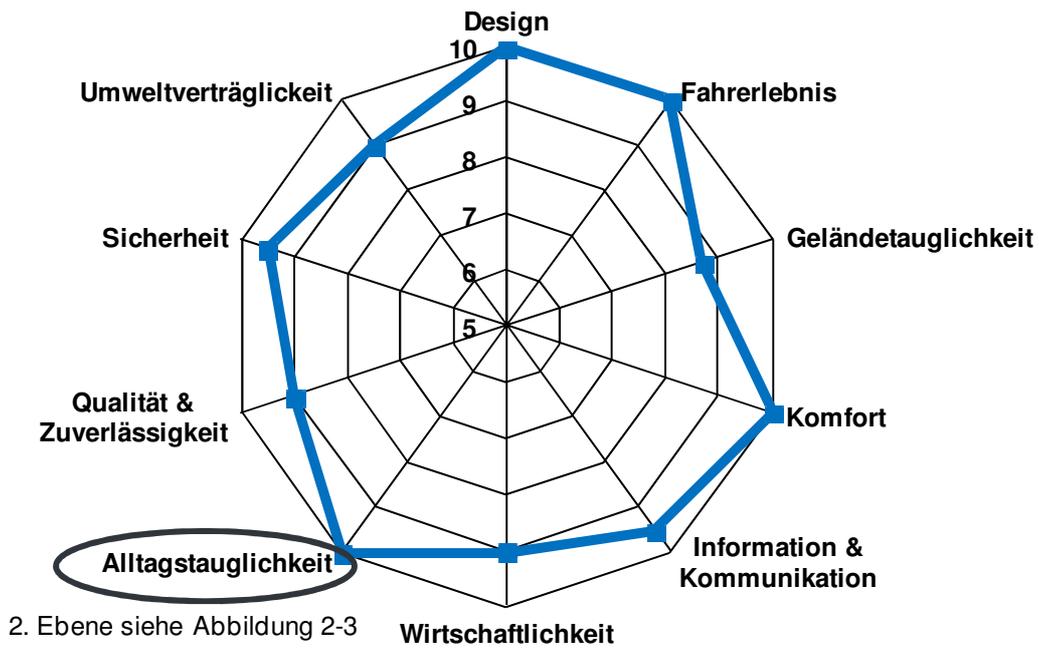


Abbildung 2-2 Fahrzeugeigenschaftsfelder der AUDI AG nach [Meu09]

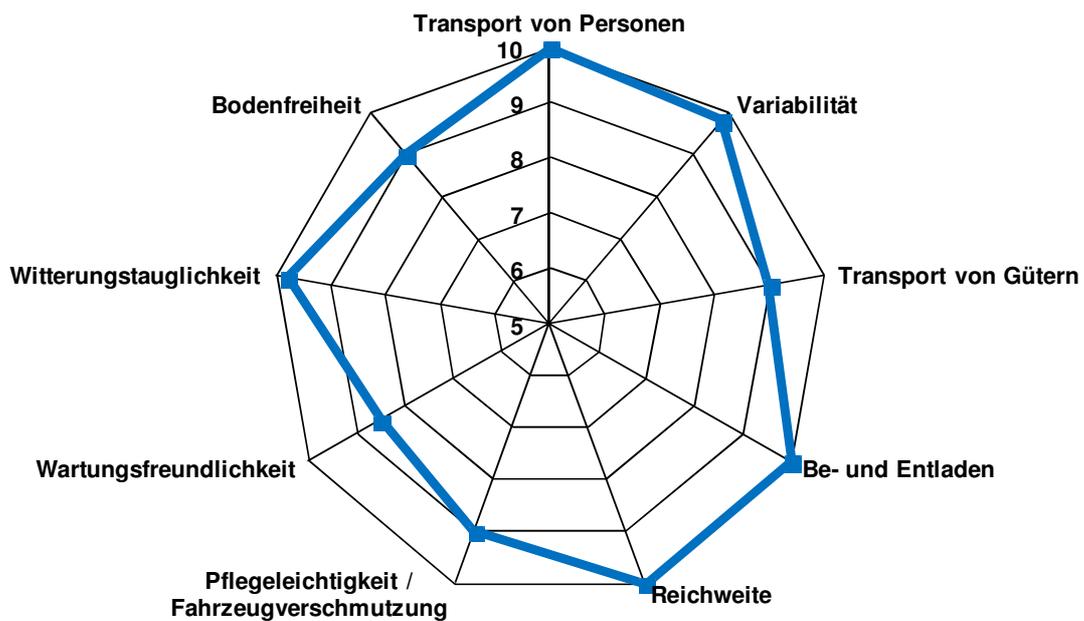


Abbildung 2-3 Eigenschaften der zweiten Ebene des Eigenschaftsfelds Alltagstauglichkeit nach [Meu09]

Automobilzeitschriften, die die Meinungsbildung potentieller Kunden stark beeinflussen können, führen ihre eigenen Eigenschaftsstrukturen. In Zeitschriften, wie Auto Motor und Sport [AMS], ADAC Motorwelt [ADAC] oder Auto Bild [Aut], werden Bewertungen von Fahrzeugen anhand dieser Eigenschaftsstrukturen vorgenommen, um die Güte eines Fahrzeugs im Vergleich zu seinen Wettbewerbern zu beschreiben.

2.1.3 Bewertung von Eigenschaften

Zur Beurteilung von Eigenschaften kann das Modell von Kano et al. herangezogen werden [Kan84]. Dieses teilt Eigenschaften entsprechend des Verlaufes der Kundenzufriedenheit in Abhängigkeit von der Eigenschaftserfüllung in drei Kriterien ein: Basis-, Leistungs- und Begeisterungskriterien. In Abbildung 2-4 sind typische Verläufe dieser Kriterien dargestellt.

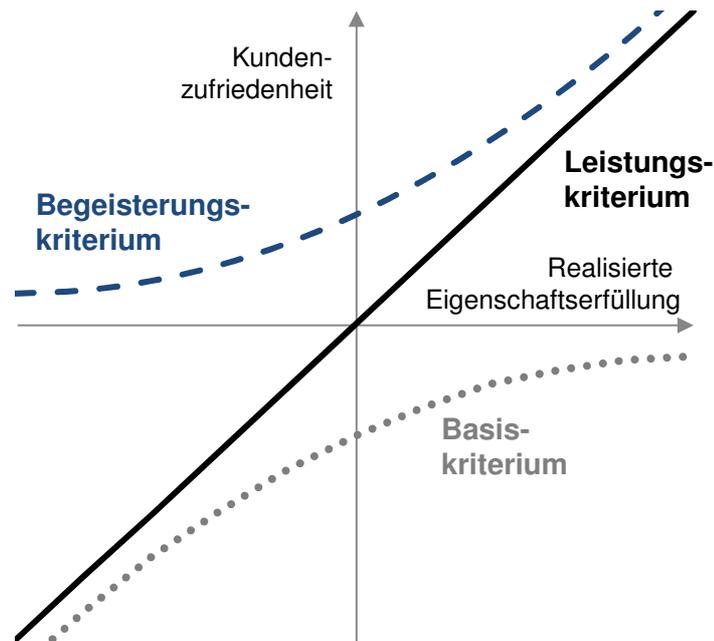


Abbildung 2-4 Kano-Modell zur Klassifizierung von Eigenschaften nach [Lin09, S. 106]

Die Erfüllung von Basiskriterien wird vom Kunden erwartet und muss auf jeden Fall gewährleistet sein. Beim Kunden ermöglicht die Erfüllung dieser Kriterien nur die Vermeidung von Unzufriedenheit und ruft keine Begeisterung für das Produkt hervor. Folglich haben Basiskriterien eine degressive Verlaufskurve im Bereich negativer bis neutraler Kundenzufriedenheit. Beispiele sind bereits etablierte und erwartete Ausprägungen von Eigenschaften, wie eine sichere Gefahrenbremsung, die ein Anti-Blockier-System ermöglicht.

Leistungskriterien weisen eine lineare Korrelation zwischen Ausprägung und Kundenzufriedenheit auf und können dadurch Unzufriedenheit, Zufriedenheit oder auch Begeisterung hervorrufen. Als Beispiel kann die Größe des Kofferraumvolumens genannt werden, weil bei geringen Werten Unzufriedenheit ausgelöst wird, höhere Werte jedoch Zufriedenheit und sogar Begeisterung in der Kundenwahrnehmung des Fahrzeugs verursachen.

Begeisterungskriterien werden vom Kunden nicht erwartet, sondern überraschen ihn positiv und rufen somit in überproportionaler Weise Zufriedenheit hervor. Begeisterungskriterien werden in vielen Fällen durch Innovationen realisiert und können im Markt Alleinstellungsmerkmale im Vergleich zu Wettbewerbern darstellen. Zudem ist diese Gattung von Eigenschaften bei vielen Kunden ausschlaggebend für die Kaufentscheidung und sollte deswegen gezielt zur Unterstützung von positionierungsrelevanten Eigenschaften eingesetzt werden. Ein Toter-Winkel-Assistent etwa wird nicht zwingend vom Kunden erwartet, kann jedoch durch Unterstützung des Sicherheitsgefühls Begeisterung auslösen.

Bei der Zuordnung von Eigenschaften zu den Kano-Kriterien ist zu beachten, dass sich Eigenschaften durch den Gewöhnungseffekt der Kundenwahrnehmung mit der Zeit von Begeisterungs-, über Leistungs- zu Basiskriterien verschieben. Gemäß Braess' Artikel „Nichts steigt so schnell wie die Ansprüche“ [Bra93] ist es die Herausforderung der Entwicklung, trotz steigender Kundenbedürfnisse, Produkte mit hohen Erfüllungen in Begeisterungs- und Leistungsmerkmalen zu schaffen.

In den Testschemata von Automobilzeitschriften werden Eigenschaftsausprägungen über die Vergabe von Punkten bewertet. Die Kundenzufriedenheit nimmt mit steigender Punkteanzahl zu, wobei die maximal erreichbare Punkteanzahl entsprechend der Wichtigkeit der jeweiligen Eigenschaft variiert. Beispielhaft ist die Korrelation für die Eigenschaft Beschleunigung 0-100 km/h bei Mittelklassefahrzeugen des Testschemas der AMS [AMS] in Abbildung 2-5 dargestellt, bei der in Abhängigkeit von den Beschleunigungswerten zwischen null und zehn Punkte erreicht werden können.

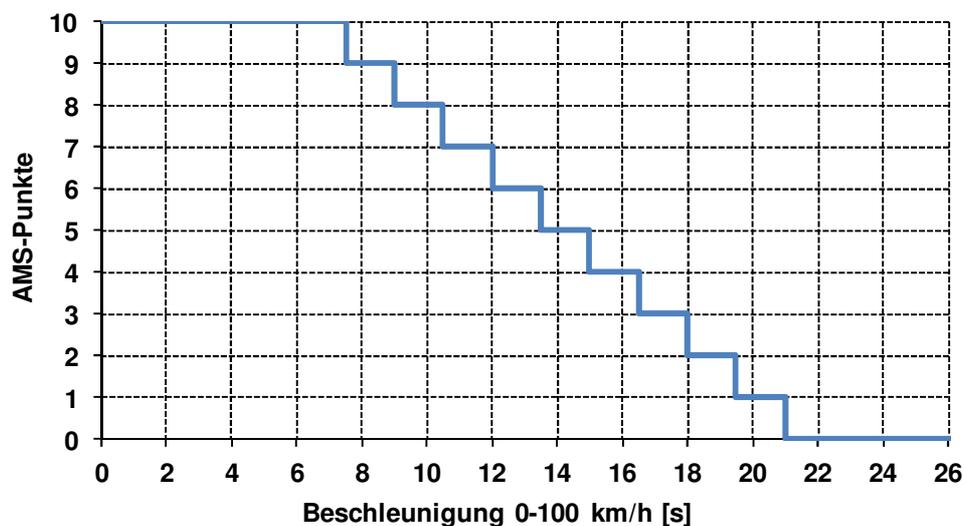


Abbildung 2-5 Eigenschaftsbewertung Beschleunigung 0-100 km/h nach [AMS]

In den Entwicklungsabteilungen vieler Automobilhersteller hat sich eine Eigenschaftswerteskala mit einem Bereich von eins bis zehn zur einheitlichen Bewertung von Fahrzeugeigenschaften etabliert (Tabelle 2.1). Der Wertebereich von eins bis vier sollte vermieden werden, weil das Fahrzeug in diesen Bewertungen deutliche Mängel aufweist und es zu Beanstandungen von Kunden kommt. Der Wertebereich für marktfähige Fahrzeuge liegt im Bereich von fünf bis zehn, mit steigender Güte in Richtung höherer Eigenschaftswerte. Je nach Anspruch des Automobilherstellers ist das Niveau des Eigenschaftswerts fünf unterschiedlich. Bei zehn wird die derzeit jeweils technisch beste mögliche Ausprägung der Eigenschaft erzielt.

	Note / Eigenschaftswert	Bewertung	Mängel
annehmbar	10	ausgezeichnet	nicht wahrnehmbar
	9	sehr gut	kaum wahrnehmbar
	8	gut	äußerst gering
	7	ausreichend	sehr gering
	6	annehmbar	gering
Grenzfall	5	Grenzfall	gut wahrnehmbar
nicht annehmbar	4	Kundenbeschwerden	unangenehm, Verbesserung erforderlich
	3	schlecht	nicht akzeptabel, Bauteil fehlerhaft
	2		nicht akzeptabel, Bauteil bedingt funktionsfähig
	1		nicht akzeptabel, Bauteil ohne Funktion

Tabelle 2-1 Eigenschaftswerteskala
nach [Aig82; Hei02, S. 27 f.; Zie06, S. 25]

2.2 Produktpositionierung über Eigenschaften

Wie im vorigen Kapitel dargelegt, sind Eigenschaften ein probates Maß zur Profilierung von Fahrzeugen aus Kundensicht. Die Profilierung stellt zugleich eine angestrebte Positionierung des Fahrzeugs im Wettbewerbsumfeld sowie eine Einordnung in das Produktportfolio des Herstellers dar.

2.2.1 Eigenschaften im Produktentstehungsprozess

Im zeitlichen Verlauf der Entwicklung wird die Positionierung stetig weiter detailliert. In der Planungsphase wird ein Produktsteckbrief definiert, der die strategische Mission des Projekts beschreibt. Daraus wird ein detailliertes Eigenschaftsprofil abgeleitet, in dem die Anforderungen an alle Eigenschaften bestimmt werden. Auf Basis dieser Anforderungen werden Zielwerte für die quantifizierbaren Eigenschaften festgelegt.

Der Prozess der Fahrzeugentwicklung wird nach Lienkamp [Lie11, Kap. Automobil-PEP, S. 63] in vier Phasen eingeteilt: Planungs-, Definitions-, Realisierungs- und Produktionsphase (Abbildung 2-6). Die virtuelle Fahrzeugentwicklung und entsprechend auch der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zum Einsatz in der Eigenschaftsentwicklung spielen sich vorrangig in der Planungs- und Definitionsphase ab. In der Planungsphase wird ein Produktsteckbrief inklusive erster Zielwerte erarbeitet, aus dem ein Eigenschaftsprofil abgeleitet wird (Kapitel 2.2.3). Im nächsten Detaillierungsschritt ist ein Eigenschaftskatalog zu erstellen. Anschließend können Zielwerte für die quantifizierbaren Eigenschaften sowie für die relevantesten Einflussgrößen festgelegt werden (Kapitel 2.2.4). In der Definitionsphase sind verschiedene Konzeptalternativen aus Eigenschaftssicht zu bewerten, während in der Realisierungs- und Produktionsphase das finale Fahrzeugkonzept umgesetzt und produziert wird.

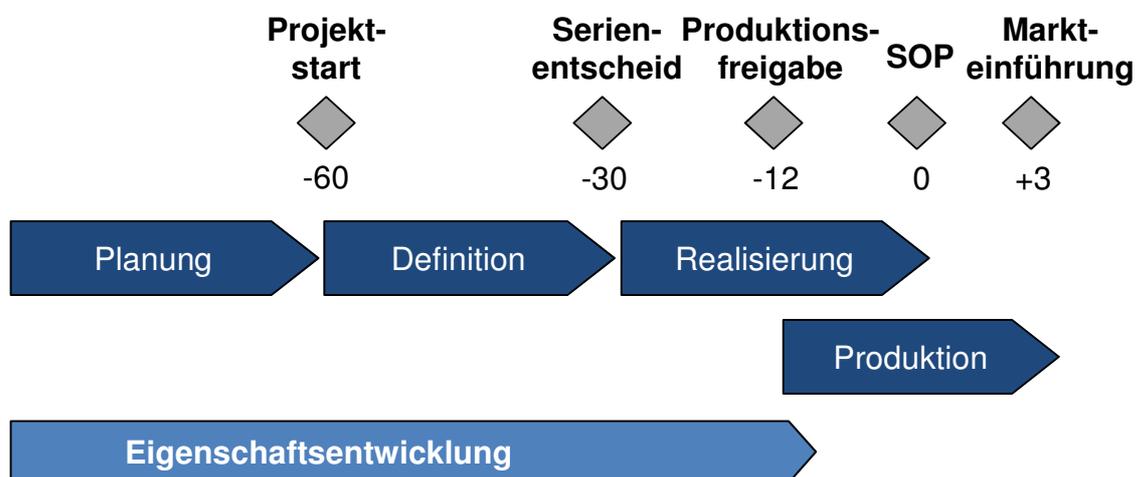


Abbildung 2-6 Automobil-Produktentwicklungsprozess nach [Lie11, Kap. Automobil-PEP, S. 63]

2.2.2 Einflussfaktoren auf die Eigenschaftspositionierung

Produktsteckbrief, Eigenschaftsprofil, Eigenschaftskatalog und Zielwerte werden von vielen äußeren Faktoren beeinflusst (Abbildung 2-7). Diese Einflussfaktoren gelten in den meisten Entwicklungsphasen und müssen ständig auf Änderungen hin überwacht

werden. Die Wettbewerbsanalyse umfasst die Auswertung der aktuell auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge sowie die Prognose über deren Nachfolger. Die Presse-Auswertung des Vorgängerfahrzeugs, soweit vorhanden, gibt Aufschluss darüber, welche Aspekte positiv oder negativ bewertet wurden. Weitere Stärken und Schwächen des Vorgängers werden über unternehmensinterne Analysen oder aus öffentlichen Quellen wie der ADAC-Pannenstatistik gewonnen. Zusätzlich fließen Ergebnisse aus Konzeptkliniken, Benchmarks oder J. D. Power Befragungen [JDP13] in die Positionierung eines Nachfolgerfahrzeugs ein. Jedes Fahrzeug muss zudem die marktspezifischen Zulassungsgesetze und Normen einhalten. Die Schwerpunkte der Positionierung sollten durch Begeisterungsmerkmale gestärkt werden, die markt-spezifisch stark variieren können [Schi13]. Darüber hinaus sind in Bereichen aktueller Trends positionierungsunterstützende Maßnahmen zu treffen. In Summe muss die Positionierung jedes Fahrzeugs die Markenwerte repräsentieren.

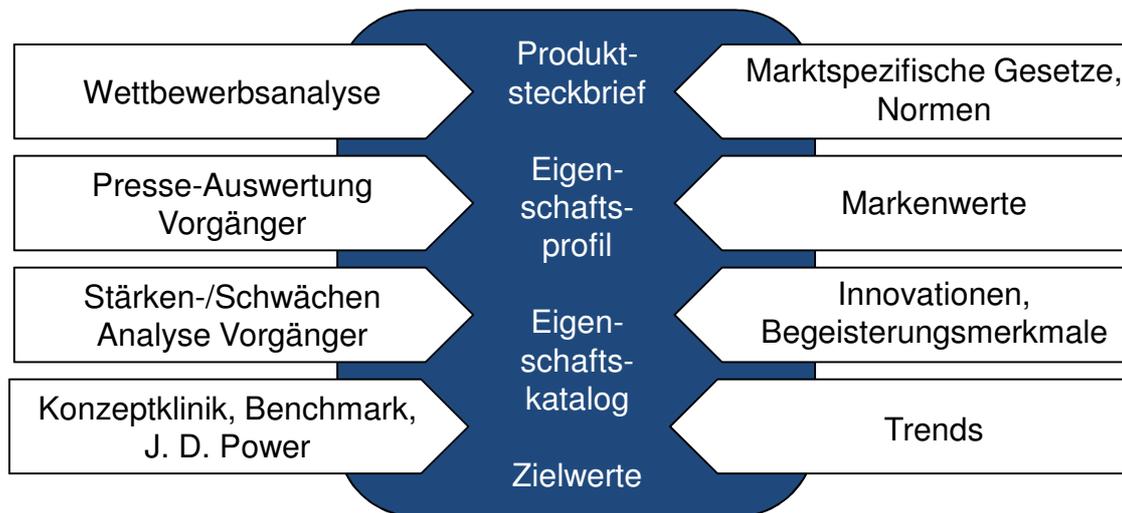


Abbildung 2-7 Einflüsse auf die Positionierung über Eigenschaften

2.2.3 Produktsteckbrief und Eigenschaftsprofil

Zu Projektstart wird ein Produktsteckbrief erstellt, der die Intention des geplanten Fahrzeugs beschreibt. Dazu zählt die Mission als strategischer Auftrag aus Unternehmenssicht. Zudem werden Rahmenbedingungen, wie Absatzmärkte und Fertigungsstandorte, definiert und ein Zielverkaufspreis mit einem angestrebten Absatzvolumen festgelegt. Auf Basis des Ziel-Kundensegments werden die wichtigsten Wettbewerbsfahrzeuge ausgewählt. Anschließend wird das Eigenschaftsprofil abgeleitet, das aus Gewichtung und Ausprägung sämtlicher Eigenschaften besteht (Abbildung 2-8). Bei der Gewichtung wird in geringe (Gewichtung 1), mittlere

(Gewichtung 2) und hohe Positionierungsrelevanz (Gewichtung 3) der jeweiligen Eigenschaft unterschieden. Die Ausprägungen der Eigenschaften werden auf der Eigenschaftswerteskala in Relation zu potentiellen Wettbewerbern vorgenommen. Aus diesen Prämissen lassen sich erste Einflussgrößen wie grobe Außenabmaße sowie Anforderungen an Technik und Innovationen ableiten [Lie11, Kap. Eigenschaften, S. 31].

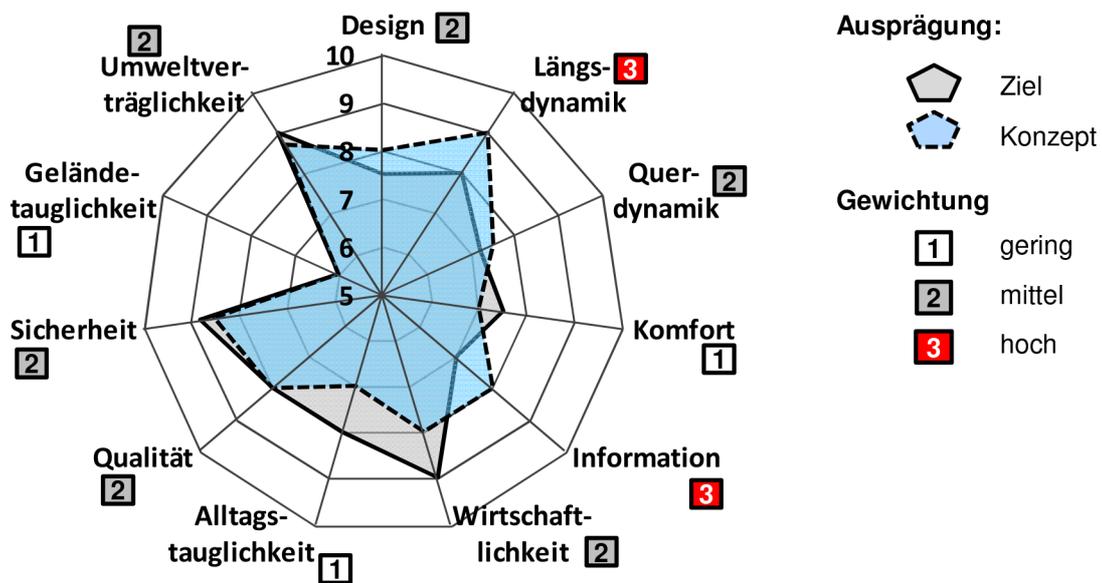


Abbildung 2-8 Beispiel eines Eigenschaftsprofils

Die nächste Detaillierungsstufe der Eigenschaftsprofilierung ist der Eigenschaftskatalog, der die angestrebten Ausprägungen der Eigenschaften beinhaltet. Dieser definiert neben der Gewichtung den Handlungsbedarf und Entwicklungsaufwand im Vergleich zum Vorgängerfahrzeug. Wie in Abbildung 2-9 gezeigt, werden über Handlungsfelder gezielt einzelne Eigenschaften benannt, deren Ausprägung verbessert oder erhalten werden soll, bzw. reduziert werden kann. Die gesetzte Gewichtung der Positionierung liefert eine Grundlage für Entwicklungsschwerpunkte und für die Priorisierung bei der Lösung von Zielkonflikten.

	Gewichtung	Handlungsbedarf zum Vorgänger	Aufwand	Handlungsfelder		
				Verbessern	Erhalten	Reduzieren
	1 gering 2 mittel 3 hoch	++ viel besser + besser 0 gleich - schlechter -- viel schlechter	++ sehr hoch + hoch 0 gering			
Querdynamik						
Kurvenverhalten	3	+	+	Agilität		
					Lenkpräzision	
				Lenkwinkelbedarf		
...

Abbildung 2-9 Ausschnitt eines Eigenschaftskatalogs

2.2.4 Ableitung von Zielwerten

Nach Eigenschaftsprofil und -katalog ist die Ableitung von Zielwerten eine weitere Konkretisierungsstufe. Für quantifizierbare Eigenschaften werden physikalische Zielwerte direkt definiert, während für nicht quantifizierbare Eigenschaften Ziele der wichtigsten Einflussgrößen festgelegt werden.

Zielwerte werden für jede Eigenschaft einzeln abgeleitet. Anschließend müssen sie in einem Zielsystem zueinander plausibilisiert werden. Nach Eiletz [Eil98, S. 13-20] kommt es zu Neutralität, Komplementarität, Konflikt oder einer Antinomie (gegenseitiger Ausschluss). In der Konzeptentwicklung wird der größte Aufwand für die Bewältigung von Zielkonflikten betrieben [Saa97, S. 144-146; Eil98; Ber99; Wil01]. Eiletz zeigt, dass Zielkonflikte vor allem durch verfrüht getroffene Konzeptentscheidungen entstehen und folglich durch erhöhtes Produktwissen in der frühen Phase reduziert werden können [Eil98, S. 29].

Sind Zielwerte im Zielsystem aufgrund von physikalischen Implausibilitäten nicht erreichbar, sollte eine Zielwertänderung vorgenommen werden. Die Bildung verschiedener Szenarien (kosten-, eigenschafts-, markt-, entwicklungsgetrieben) trägt

dazu bei, den Zielbereich einzugrenzen und die Zielwerte unter Berücksichtigung möglichst vieler Aspekte festzulegen [Zie06, S. 82-86].

Parallel zur Ableitung strategiebezogener Zielwerte ist stets die wirtschaftliche Darstellbarkeit des Produkts so früh wie möglich sicherzustellen. Die Planung von Zielkosten erfolgt über Target Costing, wobei der angestrebte Gesamtkostenrahmen auf die zu entwickelnden Komponenten aufgeteilt wird [Ehr06, S. 50-52; Ehr07, S. 65f.].

2.3 Methodik der Quality Function Deployment

Eine der etabliertesten Methoden der kundennutzenorientierten Produktentwicklung ist die Quality Function Deployment Methodik, die das Sammeln, Strukturieren und Umsetzen von Kundenanforderungen unterstützt. Das grundsätzliche Vorgehen sowie die entsprechende Anwendung in der Fahrzeugkonzeptentwicklung werden im Folgenden nach [Aka92; Kin94; Saa97, S. 35-174; Kam06, S. 254 - 261; Lin09, S. 123 f.] beschrieben.

Die Quality Function Deployment Methodik wurde Ende der 1960er Jahre entwickelt und erstmals in Japan in einer Schiffswerft eingesetzt. In den Folgejahren wurde sie bei Toyota Motors weiterentwickelt und wird heute auch in den USA und Europa in großen Unternehmen, wie General Electrics oder Siemens, verwendet [Kam06, S. 255].

Kernwerkzeug der Quality Function Deployment Methodik ist das House of Quality, das entsprechend der Systematik in vier Entwicklungsphasen eingesetzt werden kann. Jedes House of Quality besteht aus einer matrixförmigen Darstellung der Beziehungen von Zielgrößen und deren ermöglichenden Stellhebeln. Die aufeinander aufbauenden Phasen sind im Einzelnen [Kam06, S. 255 f.]:

- **Produkt:** Kundenrelevante Eigenschaften werden zu technischen Stellhebeln in Relation gesetzt.
- **Konstruktion / Teile:** Für die kritischen technischen Stellhebel werden die Beziehungen zu den umsetzungsrelevanten Komponenten analysiert.
- **Prozess:** Bezogen auf die kritischsten Komponenten werden die Prozess- und Prüfablaufpläne auf ihre Beeinflussungsmöglichkeiten hin untersucht.
- **Produktion:** Arbeits- und Prüfanweisungen der Produktion werden zu den prozesskritischsten Stellhebeln in Beziehung gesetzt.

Abbildung 2-10 zeigt den Aufbau eines House of Quality. In diesem wird die „Sprache des Kunden“, ausgedrückt durch die Eigenschaftsforderungen, in die „Sprache des

Ingenieurs“ anhand der technischen Stellhebel übersetzt. Die Matrix beschreibt die Stärke der jeweiligen Beziehung auf der nichtlinearen 0-1-3-9-Skala. Aus dem Summenprodukt der Beziehungen mit den Gewichtungen wird die technische Bedeutung eines Stellhebels berechnet. Daraus wird ein Ranking entsprechend der Relevanz der jeweiligen Größe für die Erfüllung der Eigenschaften abgeleitet. Dieses Ranking dient bei der Zielwertdefinition zur Priorisierung der wichtigsten technischen Stellhebel. Im Dach des House of Quality werden zusätzlich die Wechselwirkungen der technischen Stellhebel untereinander abgebildet.

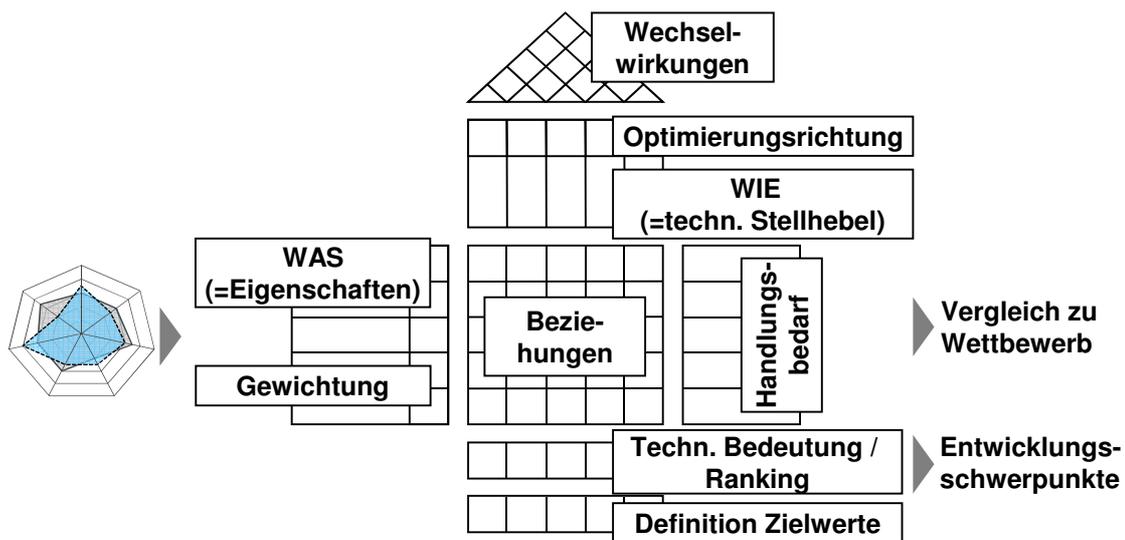


Abbildung 2-10 Schritte zum Aufbau und zur Nutzung eines House of Quality

Die Quality Function Deployment Methodik wird vor allem bei Produkten mit begrenzter Komplexität angewandt. Der Aufwand zur Füllung des House of Quality steigt mit der Anzahl an Eigenschaften und technischen Stellhebeln stark an und führt bei zu großen Datenmengen schnell zu Unübersichtlichkeit [Lin09, S. 124]. Ziemann hat ein House of Quality für ein Gesamtfahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang aufgebaut und gezeigt, dass dieser Ansatz auch für komplexe Produkte wie dem Kraftfahrzeug zielführend sein kann [Zie06, S. 99].

2.4 Bestehende Tools der virtuellen Fahrzeugentwicklung

In der frühen Entwicklungsphase ist aufgrund des geringen Reifegrads des Produkts der Kenntnisstand der Produkteigenschaften noch gering (Abbildung 2-11). Änderungen sind in dieser Phase ohne großen zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich. Je weiter die Entwicklung voranschreitet, desto höher wird der Kenntnisstand

der Produkteigenschaften. Gleichzeitig steigen die Kosten für notwendige Änderungen stark an.

Um die Notwendigkeit für Anpassungen zu reduzieren, kann durch virtuelle Produktentwicklung eine Eigenschaftsfrüherkennung ermöglicht werden. So ist zu jedem Entwicklungszeitpunkt das Produktwissen bereits größer, bzw. ein bestimmter Wissensstand ist schon früher in der Entwicklung vorhanden. Die virtuellen Techniken können durch eine Verkürzung der Produktentwicklungszeit sowie durch die Einsparung von realen Prototypen zu einer deutlichen Reduzierung der Entwicklungskosten führen [Lin09, S. 157-159].

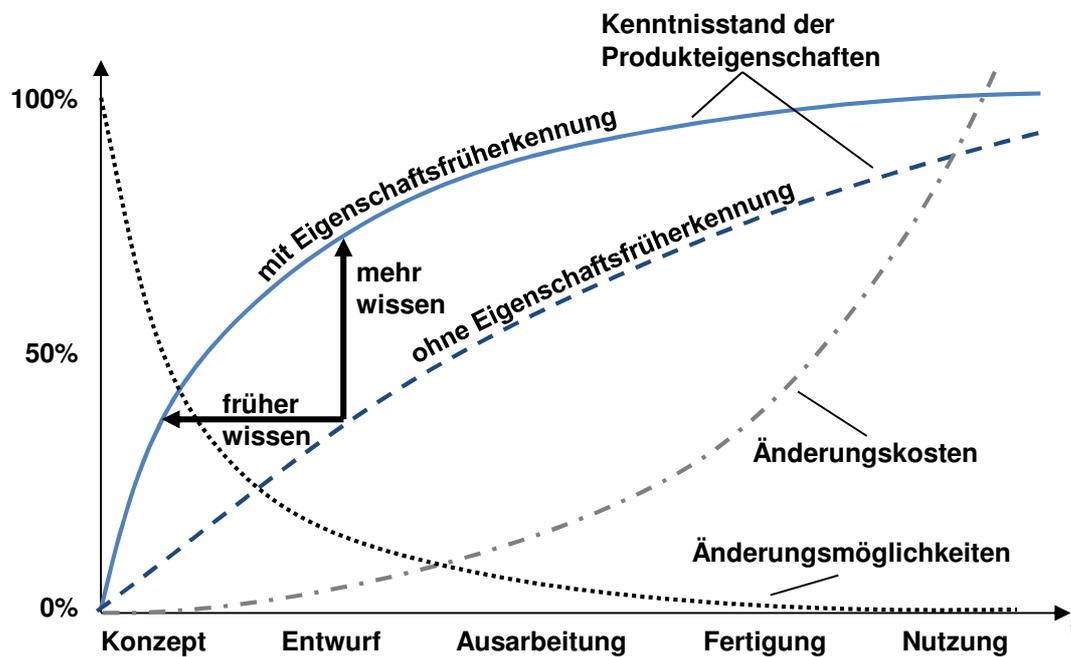
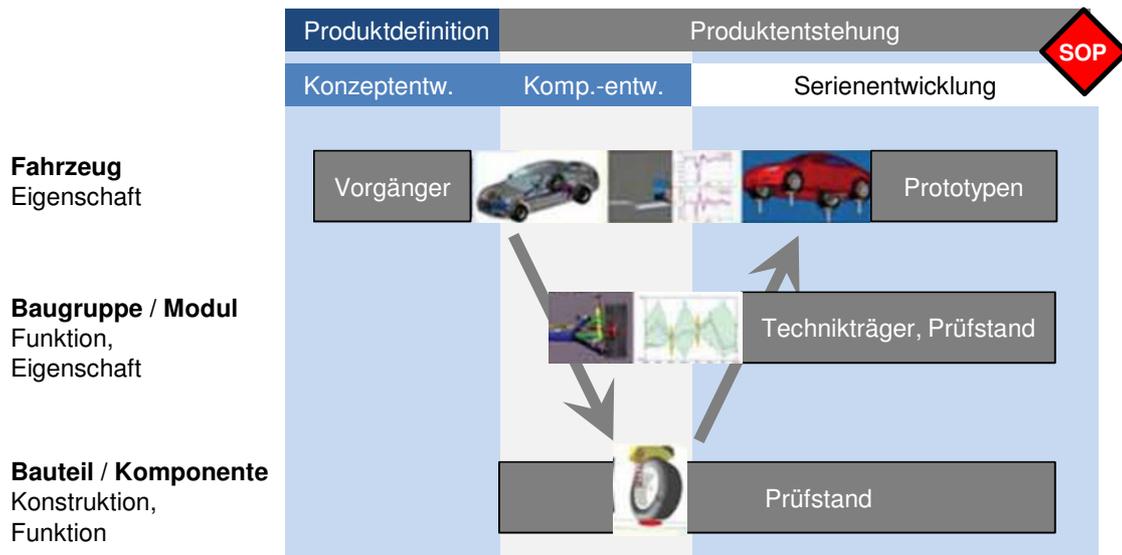


Abbildung 2-11 Eigenschaftsfrüherkennung
aus [Lin09, S. 159]

Die Umsetzung von Eigenschaften erfolgt entsprechend des V-Modells zur Entwicklung mechatronischer Systeme nach VDI Richtlinie 2206 [VDI04]. Dieses generische Vorgehen kann auch auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung angewandt werden. Fahrzeugeigenschaften werden über Baugruppen und Bauteile realisiert, deren Zielerreichung auf jeder Ebene über Hardware-Aufbauten oder über virtuelle Methoden überprüft wird (Abbildung 2-12).



*Abbildung 2-12 V-Modell zur Entwicklung von Eigenschaften
aus [Sei08, S. 18]*

Um in der frühen Phase Aussagen über die Ausprägung von Fahrzeugeigenschaften zu generieren, werden diverse Simulationswerkzeuge eingesetzt. Seiffert und Gotthard unterscheiden die Werkzeuge entsprechend ihrer zeitlichen Anwendung im Produktentwicklungsprozess [Sei08, S. 36]. Unterschiede liegen vor allem in der Modellierungstiefe der Simulationsmodelle und der Schärfe der Eingangsdaten sowie der erzielten Ergebnisqualität.

2.4.1 Datenbankmodelle

Zur Auswertung der Beziehungen zwischen Eigenschaften und Komponenten bestehen relationale Datenbankmodelle wie AUTOSYS [lps03, S. 35-46]. Diese bieten Unterstützung bei der Beherrschung der Komplexität der Zusammenhänge zwischen Sach-, Ziel- und Handlungssystem. Im Sachsystem wird das Fahrzeug hierarchisch in seine Produktkomponenten untergliedert. Das Zielsystem beinhaltet die hierarchische Struktur der kundenwertigen Eigenschaften sowie die Beziehung zu den ermöglichenden Komponenten des Sachsystems. Das Handlungssystem zeigt die Aufbauorganisation der Entwicklung des Unternehmens und deren Zuständigkeiten zu den Komponenten des Sachsystems. AUTOSYS ermöglicht es somit, über die abgebildeten komplexen Zusammenhänge die Auswirkungen von Konzeptänderungen auf Eigenschaften aufzuzeigen. Es beschränkt sich auf rein qualitative Aussagen und wird trotz erheblichem Modellierungsaufwand nur für bestehende Fahrzeuge und nicht für Neuentwicklungen angewandt [Ste97].

Der Ansatz von Prinz [Pri11] beschreibt ein Relationsmodell zwischen Auslegungsgrößen und technischen Eigenschaften. Dieses dient als Basis eines Ablaufplans für ein parametrisches Entwurfswerkzeug für Fahrzeugkonzepte, das jedoch bisher nicht umgesetzt wurde.

Zur Analyse von neuartigen Fahrzeugarchitekturen stellt Gorbea [Gor12] die Anwendung von Matrix-basierten Methoden vor. Im Fokus stehen die Beziehungen zwischen Fahrzeugkomponenten und ermöglichten Funktionen. Mit Hilfe von morphologischen Kästen und Kompatibilitätsmatrizen lassen sich Konstellationen für innovative Fahrzeugarchitekturen ableiten. Eine Bewertung der Konzeptgüte auf Basis von Fahrzeugeigenschaften wird jedoch bis auf die Bestimmung der Lebenszykluskosten nicht vorgenommen.

2.4.2 Werkzeuge zur Fahrzeug-Grobkonzepterstellung

Braess et al. [Bra85] entwickelten 1985 ein Auslegungsmodell für die frühe Phase von konventionell angetriebenen Fahrzeugen, das eine Auswahl von 18 Eigenschaften in Beziehung zu konstruktiven Parametern (= Einflussgrößen) setzt. Entsprechend Abbildung 2-13 werden vier Modellarten für mögliche Verknüpfungen zwischen verschiedenen Einflussgrößen sowie zwischen Einflussgrößen und Eigenschaften definiert. Die erste Modellart beinhaltet Erfahrungen von Entwicklern, die mathematisch über einfache Formeln abgebildet werden können. Bei der zweiten Modellvariante werden über auf Datenbanken bestehender Fahrzeuge basierenden Statistiken direkt Zusammenhänge abgeleitet. Am besten eignet sich die dritte Variante der realitätsnahen physikalischen Modelle, die beispielsweise Fahrleistungsberechnungen durchführen können. Die vierte Modellart besteht aus komplexen Modellen, die außerhalb des Auslegungstools ablaufen wie einer aufwändigen Finite-Elemente-Methode-Analyse. Braess ermöglicht in seinem Auslegungswerkzeug die Optimierung von Eigenschaften über die Variation der konstruktiven Parameter. Außen vor lässt er in seinem Ansatz den Ausschluss von nicht realisierbaren technischen Konzepten sowie die ganzheitliche Bewertung der gewonnenen Lösungen. Zudem ist Braess' Arbeit als Methodik und nicht als anwendbares Werkzeug zu verstehen. Diese Methodik bezieht sich stets auf die Entwicklung des Nachfolgers eines bestehenden Fahrzeugs, jedoch nicht auf neue, disruptiv entwickelte Fahrzeugkonzepte.

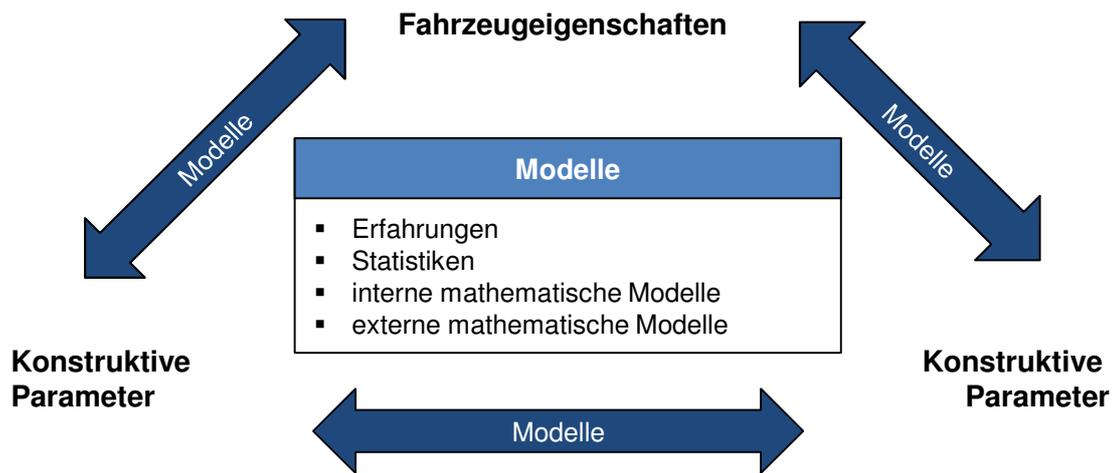


Abbildung 2-13 Auslegungsmodell für Fahrzeugkonzepte nach [Bra85]

2.4.3 Virtuelle Auslegung geometrischer Umfänge

In der frühen Phase hat die geometrische Auslegung hohe Relevanz auf die Untersuchung der Integration der Komponenten sowie auf die Unterbringung der Insassen im Fahrzeug. Einige Softwaretools bieten bei größtmöglicher Flexibilität die Option, generisch Fahrzeuggeometrien aufzubauen. Vertreter dieser Werkzeuggattung sind SFE Concept von der Gesellschaft für Strukturanalyse in Forschung und Entwicklung, das ehemals unter dem Namen AURORA an der Technischen Universität Berlin entwickelt wurde [Hei94, S. 73-80] sowie die Software-Umgebung Concept Factory von Magna Steyr [Mag13]. Beide ermöglichen eine parametrische Strukturauslegung der Karosserie sowie eine Grobauslegung des Package und Innenraums. Detaillierte 3D-CAD-Systeme wie Catia [Das13] bilden Fahrzeuge inklusive der relevanten Bauteile geometrisch ab und generieren darüber Aussagen zur Freigängigkeit und Umsetzbarkeit. Ein Analysewerkzeug, das neben dem Hauptfokus der geometrischen Auslegung von Fahrzeugkonzepten Berechnungen zur Absicherung der Funktionen durchführt, wird aktuell an der Technischen Universität München aufgebaut [Fuc13]. Ebenso wurde an der Technischen Universität Graz eine umfassende Auslegungsumgebung für die frühe Phase entwickelt. Unter Einbeziehung des Entwicklers wird die geometrische Gestaltung unter Verwendung von Auslegungsroutinen für zahlreiche Anforderungen, wie Crash oder Fahrleistungen, iterativ vorgenommen [Ros09]. Aus diesem Ansatz entstand in einer Kooperation zwischen der Technischen Universität Graz, der Volkswagen Konzernforschung und Magna Steyr das Auslegungswerkzeug ConceptCar [Hil12], das gekoppelt mit SFE-Concept eine geometrische Strukturauslegung und eine erste Gestaltung der Fahrzeugeigenschaften erlaubt. Die

Optimierung von Fahrzeugkonzepten wird auch bei ConceptCar nicht automatisiert durchgeführt, sondern manuell in iterativen Schleifen durch den Entwickler gesteuert.

2.4.4 Simulation von Fahrleistung und Verbrauch

Neben der geometrischen Konzeptentwicklung werden einige Softwareprogramme zur Analyse von Fahrzeugeigenschaften angeboten. So können Fahrleistungs- und Verbrauchswerte früh im Entwicklungsprozess in Abhängigkeit von gesetzten Einflussgrößen und Antriebsstranggrößen ermittelt werden. Zum Vergleich verschiedener Antriebskonzepte eignet sich etwa die Simulationsumgebung Powertrain System Analysis Toolkit (PSAT) vom Argonne National Laboratory [Rou08]. In dieser Umgebung werden verschiedene Antriebsstrangkonfigurationen unter den Aspekten Längsdynamik, Reichweite und Effizienz untersucht. Dabei werden Restriktionen durch das Package vernachlässigt. Simulationsprogramme zur detaillierteren Berechnung von Fahrleistungs- und Verbrauchswerten sind Tesis Dyna4 [Tes13], AVL Cruise [AVL13] oder die Dymola Programmbibliothek AlternativeVehicles des DLR [Hül09]. Diese bieten auf Basis einer größeren Menge an Inputdaten und bei detaillierterer Abbildung der physikalischen Effekte deutlich genauere Ergebnisse als das Konzeptauslegungstool PSAT. Eine noch realistischere Abbildung der Verbrauchswerte wird in Tools wie IPG Carmaker [IPG13] erreicht, die Interaktionen des Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern in frei definierbaren Straßenszenarien ermöglichen.

2.4.5 Modelle zur Abbildung der Querdynamik

Für die virtuelle Untersuchung der Querdynamik von Fahrzeugen bestehen ebenfalls Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden.

Nah an der Realität sind Gesamtfahrzeugmodelle, die Fahrwerk, Antriebsstrang und Lenkung sowie deren Wechselwirkungen mit Fahrereingaben, Wind und Fahrbahn berücksichtigen. Dazu werden Mehrkörpersysteme (MKS) mit starren Körpern und Gelenken aufgebaut, die mit Kräften beaufschlagt und zur Analyse der Kinematik und Dynamik des Fahrzeugs benutzt werden [Schr10, S. 325-378]. Standardisierte Fahrmanöver werden mit diesen Gesamtfahrzeugmodellen in Simulationsumgebungen, wie AdamsCar [MSC12] oder IPG Carmaker [IPG13], abgefahren, um über abgeleitete Kenngrößen Konzepte in ihrer Güte zu vergleichen [Gra11].

Eine weitere Abstraktion der Abbildung der Querdynamik stellt das räumliche Zweispurmodell dar. Dieses Modell vernachlässigt die Modellierung der Radaufhängung,

weshalb räumliche Bewegungen der Räder wie Sturzänderungen nicht abgebildet werden können. Wanken und Nicken sind jedoch umgesetzt, wodurch Antriebs-, Schalt- und Bremseinflüsse auf das Fahrwerk gut analysiert werden können. Die notwendigen Eingangsparameter sind allerdings umfangreich und der Rechenaufwand ist erheblich.

Für die Abbildung fahrdynamischer Zusammenhänge im linearen Bereich, also bis zu einer Querbewegung von 4 m/s^2 , ist eine weitere Vereinfachung über das ebene Einspurmodell möglich [Rie40]. Im Vergleich zum realen Modell werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Der Schwerpunkt wird auf die Höhe der Fahrbahn projiziert.
- Die Räder jeweils einer Achse werden in der Fahrzeugmitte zu einem Rad zusammengefasst.
- Die Radaufhängungen werden nicht modelliert.

Folglich lassen sich Nicken, Wanken oder eine dynamische Verlagerung der Radlasten nicht abbilden. Wesentliche querdynamische Kennwerte können über die Bewegungsgleichungen aus Kräfte- und Momentengleichgewicht nach Heißing [Hei07, S. 89-96] abgeleitet werden. Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Masse und das Trägheitsmoment des Fahrzeugs ($M_{DIN-Leer}$, Θ_{Fzg}^z), der Abstand des Schwerpunkts in Längsrichtung zur vorderen und hinteren Achse (l_v und l_h) sowie die Schräglaufsteifigkeiten der vorderen und hinteren Achse (c_v und c_h).

$$M_{DIN-Leer} \cdot v \cdot \dot{\beta} + \frac{1}{v} \cdot (M_{DIN-Leer} \cdot v^2 + c_v \cdot l_v - c_h \cdot l_h) \cdot \dot{\psi} + (c_v + c_h) \cdot \beta - c_v \cdot \delta = 0 \quad (2-1)$$

$$\Theta_{Gesfzg}^z \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{v} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) \cdot \dot{\psi} - (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) \cdot \beta - c_v \cdot l_v \cdot \delta = 0 \quad (2-2)$$

2.5 Konzepte zur Einführung der Elektromobilität

Die Markteinführung von Elektrofahrzeugen birgt vielfältige Herausforderungen. Dazu gehören vor allem die noch kaum vorhandene Ladeinfrastruktur sowie Einschränkungen in einigen Fahrzeugeigenschaften. Im Vergleich zu konventionell

verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen werden vor allem die geringere Reichweite sowie die höheren Anschaffungskosten negativ bewertet.

Deshalb bieten sich Hybridkonzepte mit hohen Reichweiten bei überschaubaren Mehrkosten als Übergangslösung an. Allerdings stellen Hybridfahrzeuge aus energetischer Sicht eine Kompromisslösung dar, weil sie im Stadtverkehr weniger effizient als ein Elektrofahrzeug und auf der Autobahn weniger effizient als ein konventionelles Fahrzeug sind [Lie12, S. 15]. Langfristig gesehen bieten Elektrofahrzeuge zumindest für den Kurzstreckeneinsatz das größte Potenzial. Strom aus erneuerbaren Energien vorausgesetzt, ermöglichen sie bei höchster Effizienz eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen [Lie12, S. 37 f.]. Zudem ergeben sich bei der Konzeptauslegung durch die Möglichkeit des Entfalls von Schaltgetriebe und Anfahrkupplung sowie durch eine erheblich kompaktere E-Maschine im Vergleich zum Verbrennungsmotor neue Freiheitsgrade. In dieser Arbeit wird der Fokus auf reine Elektrofahrzeugkonzepte, als konsequentester Schritt zur Elektrifizierung, gelegt.

Für Elektrofahrzeuge werden verschiedene Einführungsszenarien als zielführend angesehen. Zum einen wird gemäß dem Top-Down-Ansatz die neue Technologie bei Oberklasse-Sportwagen wie bei einem Tesla Roadsters [Tes11] angeboten. Bei Fahrzeugen in dieser Klasse spielt der Preis eine untergeordnete Rolle, weshalb die Mehrkosten für den Kunden keinen Ablehnungsgrund darstellen. Da es sich bei den Käufern der Zielgruppe zudem meist nicht um das einzige Fahrzeug im Haushalt handelt, sind auch die reduzierten Reichweiten tolerierbar. Zum anderen setzen Einführungsstrategien auf kleine Stadtfahrzeuge, die bei geringen Fahrwiderständen und mäßig geforderten Reichweiten nur kleine und entsprechend kostengünstige Batterien benötigen. Beispiele sind die bereits im Markt befindlichen Fahrzeuge Nissan Leaf [Mya11] oder der Smart Electric Drive [Sma13].

Bei der Konzeptionierung von Elektrofahrzeugen existieren zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen. Es kann von bestehenden konventionell angetriebenen Fahrzeugen ausgegangen werden und der konventionelle durch einen elektrischen Antriebsstrang ausgetauscht werden. Dieses Vorgehen, auch „Conversion Design“ genannt, birgt den großen Vorteil von Kostenersparnissen aufgrund hoher Synergieeffekte mit dem konventionell betriebenen Basisfahrzeug. Die Gestaltungsmöglichkeiten bei der geometrischen Integration von Batterie und E-Maschine sind jedoch eingeschränkt. Der Smart Fortwo wird beispielsweise bereits seit 1998 mit

konventionellem Verbrennungsmotor verkauft, seit 2012 jedoch zusätzlich in einer elektrisch angetriebenen Variante angeboten (Abbildung 2-14 a).

Neue Gestaltungsfreiheiten können nur beim Vorgehen des „Purpose Designs“ ausgenutzt werden, bei dem das Fahrzeug grundlegend neu und speziell auf den elektrischen Antriebsstrang ausgelegt wird. So ist es möglich, den Mitteltunnel entfallen zu lassen oder die Batterie in einem Sandwichboden unterzubringen. Ebenso ergeben sich für das Außendesign zahlreiche neue Gestaltungsmöglichkeiten [Bur13].

Viele dieser neuen Gestaltungsoptionen wurden in dem konsequent auf den elektrischen Antrieb ausgelegten Fahrzeugkonzept i3 der BMW AG umgesetzt (Abbildung 2-14 b).



a)

b)

Abbildung 2-14 a) Conversion Design: Smart ed b) Purpose Design: BMW i3 aus [Sma13] und [BMW13a]

2.6 Ansätze zur Optimierung von Fahrzeugkonzepten

Generell ist es das Ziel von Optimierungsaufgaben, unter der Berücksichtigung von Nebenbedingungen das Minimum oder Maximum einer Zielfunktion zu finden [Bai11, S. 17]. Auf Basis der Linearität und Konvexität der beteiligten Funktionen sowie der Anzahl der Optimierungsziele kann zwischen verschiedenen Optimierungsproblemen und Lösungsansätzen unterschieden werden.

2.6.1 Grundlagen der nichtlinearen Optimierung

Optimierungsaufgaben haben nach Baier [Bai11, S. 17] und Stöcker [Stö07, S. 6 f.] stets folgende Form:

$$\text{Min } \{f_i(x) \mid g_j(x) \leq 0, h_k(x) = 0, j = 1, \dots, p, k = 1, \dots, q\}, i = 1, \dots, M \quad (2-3)$$

Ziel der Optimierungsaufgabe ist, die verschiedenen Optimierungsziele $f_i(x)$ zu minimieren, bei Beachtung der Ungleichheitsbedingungen $g_j(x)$ und der Gleichheits-

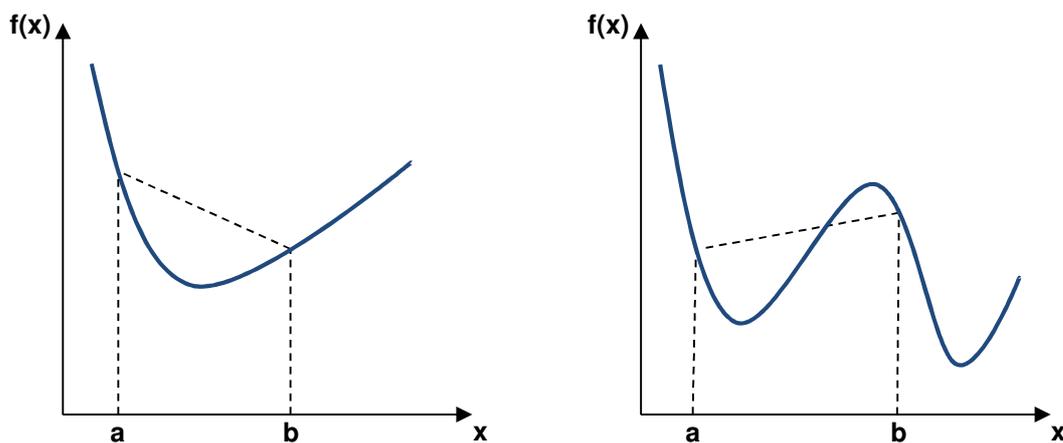
bedingungen $h_k(x)$. Die Optimierung löst stets ein Minimierungsproblem. Maximierungsprobleme werden über Negation in Minimierungsprobleme umgewandelt.

Sind alle Ziel- und Restriktionsfunktionen linear, handelt es sich um ein lineares Optimierungsproblem. Ist nur eine der Ziel- oder Nebenbedingungsfunktionen nicht linear, so führt dies zu einem nichtlinearen Optimierungsproblem. Die meisten technischen Optimierungsaufgaben zählen aufgrund der Abbildung physikalischer Zusammenhänge zur Gattung der nichtlinearen Optimierungsprobleme. Da auch die Problemstellung dieser Arbeit nichtlineare Zusammenhänge beinhaltet, werden im Folgenden ausschließlich Lösungen für nichtlineare Optimierungsprobleme erläutert.

Optimierungsprobleme werden neben der Linearität entsprechend dem Verlauf der Zielfunktion in konvexe und konkave Optimierungsprobleme unterteilt. Konvexe Zielfunktionen haben nur ein Optimum, während konkave Zielfunktionen zusätzlich zu einem globalen Optimum mehrere lokale Optima aufweisen können. Bei einem Minimierungsproblem ist eine Funktion $f(x)$ in einem Intervall $[a,b]$ konvex, wenn alle Funktionswerte $f(x)$ unterhalb der verbindenden Gerade von $f(a)$ und $f(b)$ liegen.

$$f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq t \cdot f(x_1) + (1-t) \cdot f(x_2), \quad t \in [0,1] \quad (2-4)$$

Beispiele für eine konvexe und eine konkave Funktion einer Minimierungsaufgabe sind in Abbildung 2-15 dargestellt.



a)
 b)
 Abbildung 2-15 a) Konvexe Zielfunktion b) Konkave Zielfunktion
 aus [Bai11, S. 25]

2.6.2 Multikriterielle Optimierungsprobleme

Wird auf ein einziges Ziel hin optimiert, handelt es sich um ein „monokriterielles Optimierungsproblem“. Eine Optimierung auf mehrere Ziele wird als „multikriterielles Optimierungsproblem“ bezeichnet [Stö07, S. 8-10]. Um die Erreichung mehrerer Ziele mit unterschiedlichen Einheiten vergleichbar zu machen, ist eine Normierung auf eine einheitliche Skala notwendige Voraussetzung [Bai11, S. 88-94].

Nach Andersson [And00] gibt es mehrere Möglichkeiten zur Lösung multikriterieller Optimierungsaufgaben. Er unterscheidet die Optimierungsziele nach

- keiner Gewichtung

oder einer Festlegung der Gewichtung

- zeitlich vor,
- zeitlich nach oder
- während des Lösungsprozesses.

Haben die Optimierungsziele keine Gewichtung, kann die Utopie-Punkt-Methode angewandt und darüber der Abstand zu einem festgelegten Optimum minimiert werden. Die Gewichtung während des Lösungsprozesses hat eine starke Einbindung des Entwicklers zur Folge, weshalb sich diese Methode für die automatisierte Analyse eines großen Lösungsraums nur bedingt eignet.

Die Gewichtung zeitlich nach der Optimierungsberechnung festzulegen, hat den Vorteil, dass die Bestimmung des Optimums nach der Berechnung der Zielerreichungen und dadurch unabhängig von der Berechnung vorgenommen wird. Dabei wird die Lage der Optima in Abhängigkeit von der Parametrierung der Bewertungsfunktion analysiert.

Eine andere Möglichkeit der nachträglichen Gewichtung sind Pareto-Mengen, die jeweils den besten Kompromiss zwischen mehreren Zielen darstellen. Innerhalb einer Pareto-Menge kann die Verbesserung eines Ziels nur durch die Verschlechterung eines anderen Ziels erreicht werden (Abbildung 2-16). Der Anwender wählt einen Punkt aus der Pareto-optimalen Menge als Lösung und legt im Nachhinein die Gewichtung der Ziele fest.

Pareto-Mengen können über einen Vollversuch mit anschließender Filterung der jeweils besten Kompromisslösungen gewonnen werden. Diese Filterung kann z.B. über die nachträgliche Anwendung der Methode der gewichteten Summe durchgeführt

werden [And00], wie sie im nächsten Absatz beschrieben ist. Wird nur die Pareto-Front selbst benötigt, kann diese auch über Verfahren wie Multi Objective Genetic Algorithm [Mat11] angenähert werden.

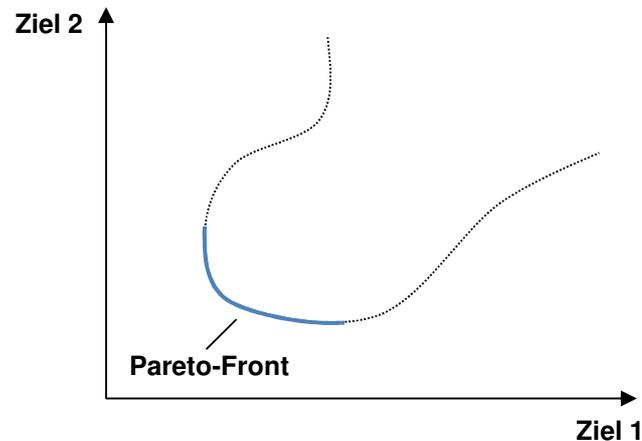


Abbildung 2-16 Pareto-Front als bester Kompromiss zwischen Ziel 1 und Ziel 2
aus [Bai11, S. 90]

Werden die Gewichtungen bereits vor dem Optimierungsvorgang definiert, ist es möglich, über ein zusammenfassendes Gütekriterium jede Lösung ganzheitlich zu bewerten. Dafür wird das multikriterielle Optimierungsproblem in ein monokriterielles umgewandelt. Bei dem Verfahren der gewichteten Summe werden die Einzelziele f_i normiert und über die Gewichtungen λ_i entsprechend der Priorisierung der Optimierungsziele zu einem ganzheitlichen Gütekriterium zusammengefasst.

$$\min \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(x) ; \text{ mit } x \in S, \lambda \in R^k \mid \lambda_i > 0, \sum \lambda_i = 1 \quad (2-5)$$

Nichtlineare Ansätze modifizieren die Einzelzielerfüllungen über exponentielle Funktionen, bevor die Summe gebildet wird. In (2-6) wird jedes Einzelziel f_i auf das Optimum in dieser Teildisziplin f_{i0} normiert und anschließend potenziert.

$$\min \sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x)}{f_{i0}} \right)^p, \quad x \in S \quad (2-6)$$

Ein anderer Ansatz nutzt den UND-Operator der Fuzzy Logik zur Verknüpfung der Optimierungsziele [Ber00, S. 27]. Hierbei werden die Einzelziele f_i über die Funktion $\mu(f_i(x))$ auf den Fuzzy-Bereich $[0;1]$ normiert (2-7). Zur Gewichtung der Einzelziele werden die Faktoren λ_i genutzt, wobei ein kleiner Wert von λ_i für eine hohe Gewichtung steht. Der Fuzzy UND-Operator kann über verschiedene Verfahren gelöst werden. Die Minimum-Funktion und das Produkt der gewichteten Einzelziele werden am häufigsten

eingesetzt. Möglich sind jedoch auch kompensatorische Verfahren wie der Gamma-Operator.

$$\max \mu(x) = \lambda_1 \mu_1(f_1(x)) \wedge \dots \wedge \lambda_N \mu_N(f_N(x)), \quad 0 \leq \lambda_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (2-7)$$

2.6.3 Optimierungsalgorithmen bei Mehrparametervariation

Für nichtlineare und nichtdifferenzierbare Optimierungsprobleme sind einige ziel-führende Verfahren in Tabelle 2-2 dargestellt.

Enumerative Verfahren	Deterministische Verfahren	Stochastische Verfahren	Hybride Verfahren
Klassische Versuchsplanung	Gradientenbasierte Verfahren	Genetische und evolutionäre Algorithmen	Kombinationen aus Algorithmen der drei anderen Verfahrensarten
Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)		Modellgestützte Optimierung	
		Swarm Intelligent Systems	

Tabelle 2-2 Optimierungsalgorithmen für nichtlineare und nichtdifferenzierbare Optimierungsprobleme nach [Eng11, S. 38]

Bei der Gruppe von enumerativen Optimierungsverfahren werden die durchzuführenden Versuche über Kombinatorik der Parameter bestimmt. Somit ist bereits vor dem Lösungsprozess die Anzahl der Versuche bekannt.

Bei klassischer Versuchsplanung werden alle Kombinationen der Parameter und ihrer möglichen Ausprägungen untersucht. Dieses Vorgehen wird auch vollständige Versuchsplanung genannt. Die Vollständigkeit der Lösungsraumanalyse hängt bei Faktoren mit kontinuierlichen Werten der Spektren jedoch stark von den gewählten Diskretisierungsstufen ab. Bei der klassischen Versuchsplanung können entsprechend der Abhängigkeit von den Parametern voll-, teil- oder einfaktorielle Versuche durchgeführt werden. Sind die Abhängigkeiten der Parameter stark, werden über den vollfaktoriellen Versuch alle möglichen Kombinationen der Parameter und Ausprägungen untersucht. Durch die große Anzahl an notwendigen Versuchen ist dieses Vorgehen aufwändig, die Auswertung der Ergebnisse hat jedoch eine hohe

Aussagekraft über den untersuchten Lösungsraum. Bei vielen zu untersuchenden Parametern bzw. zu großen Diskretisierungsstufen sinkt selbst bei einer hohen Versuchsanzahl die Ergebnisgüte stark ab.

Der teilfaktorielle Versuch wird eingesetzt, wenn Wechselwirkungen zwischen einigen Parametern nur gering bzw. nicht vorhanden sind. Zwischen den voneinander unabhängigen Parametern müssen nicht alle möglichen Kombinationen untersucht werden. Die sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren werden wie beim vollfaktoriellen Versuch kombiniert.

Falls es keine Wechselwirkungen zwischen den Parametern gibt, können beim einfaktoriellen Versuch die Einflüsse von Parameteränderungen einzeln und folglich losgelöst von den anderen Parametern untersucht werden [Lin09, S. 163].

Ohne die Wechselwirkungen zwischen den Parametern im Detail zu kennen, bietet die Methode der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments oder DoE) eine Möglichkeit, Simulationen intelligent zu planen und damit die notwendige Versuchsanzahl stark zu reduzieren [Kle07]. Dafür werden in sogenannten Screening-Versuchen die Parameter mit jeweils nur zwei Ausprägungen („+“ und „-“) gleichzeitig variiert und die Zielgröße berechnet. Anschließend werden die Einflüsse der Parameter auf die Zielgröße analysiert. Daraus ergeben sich die Beeinflussungsrichtung auf die Zielgröße (positiv oder negativ) sowie die Beeinflussungsstärke. Sinnvoll ist es, im weiteren Vorgehen vorrangig die Faktoren mit dem größten Einfluss auf die Zielgröße weiter zu untersuchen. Zudem können für nicht variierte Parameter bereits sinnvolle Werte manuell gewählt werden. Durch dieses Vorgehen lassen sich viele Versuche einsparen. Die Versuchsanzahl bleibt auch bei einer höheren Anzahl an Parametern überschaubar [Gra12, S. 44-49].

Deterministische Verfahren weisen ausgehend vom gleichen Startpunkt immer ein identisches Verhalten auf. Bei stetig differenzierbaren, also konvexen, Zielfunktionen kann über ein gradientenbasiertes Verfahren von einem Startpunkt ausgehend das Optimum angenähert werden [And00]. Für konkave Zielfunktionen eignet sich der Pattern Search Algorithmus [Mat11], weil der Lösungsraum nicht über das Gradientenverfahren, sondern über ein variables Netz analysiert wird. Dadurch wird das globale Optimum mit deutlich höherer Wahrscheinlichkeit gefunden. Der Startwert ist bei beiden Verfahren manuell festzulegen.

Stochastische Verfahren verwenden bei der Lösungssuche mindestens eine zufällige Komponente und liefern dadurch bei mehrfacher Ausführung nicht zwingend das

gleiche Ergebnis [And00]. Einige dieser Algorithmen ahmen Naturphänomene nach, wie die Verfahren der Schwarmintelligenz oder die genetischen Algorithmen. Diese Optimierungsverfahren eignen sich gut, um bei konkaven Zielfunktionen das globale Optimum zu finden.

Ziel der hybriden Verfahren ist es, die Vorteile von deterministischen und stochastischen Verfahren zu vereinen. So wird etwa der Startwert stochastisch gewählt, während das Optimum anschließend deterministisch bestimmt wird. Dadurch ist es möglich, auch gradientenbasierte Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen mit konkaven Zielfunktionen einzusetzen.

2.6.4 Optimierung von Elektrofahrzeug-Konzepten

Bereits 1994 stellten Frantzeskakis et al. [Fra94] einen Ansatz zur Analyse der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen vor. Der Fokus lag auf der Auswertung der Eigenschaftsänderungen bei unterschiedlichen Batterieenergiedichten, Spannungslagen und Differentialübersetzungen. Berücksichtigt wurden allerdings nur wenige ausgewählte Eigenschaften zur Bewertung von Beschleunigung, Reichweite, Kosten und Batterielebensdauer. Für eine multikriterielle Optimierung wurde eine einfache Bewertungsfunktion entsprechend des Verfahrens der gewichteten Summe in Kombination mit einer quadratischen Funktion (Kapitel 2.6.2) aufgestellt. Die Normierung wurde ohne Bezug auf ein Auslegungsziel über die prozentuale Erreichung im Intervall zwischen möglichem Minimum $f_{\min}(x)$ und Maximum $f_{\max}(x)$ der Eigenschaft erreicht (2-8). Da die erreichbaren Minima und Maxima für die Auswertung bekannt sein müssen, kann die Bewertung erst zeitlich nach der Lösungsraumanalyse durchgeführt werden.

$$\max \sum_{i=1}^k \lambda_i \left(\frac{f_i(x) - f_{\min}(x)}{f_{\max}(x) - f_{\min}(x)} \right)^2; \quad \lambda \in R^k \mid \lambda_i > 0, \sum \lambda_i = 1 \quad (2-8)$$

Golbuff [Gol07] benutzt die Eigenschaftsanforderungen lediglich als Rahmenbedingungen, um die Alltagstauglichkeit des Fahrzeugs sicher zu stellen. So werden Mindest erfüllungen für Beschleunigungswerte, die Höchstgeschwindigkeit und die Steigfähigkeit gesetzt. Für verschiedene definierte elektrische Reichweiten wird über eine Optimierung das kostengünstigste Plug-In-Hybrid-Fahrzeugkonzept gesucht.

Kuchenbuch [Kuc12] verwendet für den Entwurf von Elektrofahrzeugkonzepten ein Optimierungsverfahren mit Eigenschaftsrestriktionen. Der Hauptfokus liegt bei diesem

Projekt auf der automatisierten, geometrischen Integration der Batterie in ein parametrisches Fahrzeugmodell. Ausgehend von einer gewünschten Sitzposition wird der für die Batterie verfügbare Bauraum bestimmt. Unter Berücksichtigung einer möglichst günstigen Morphologie sowie den Anforderungen an die Leistungsdaten, wird das Package der Batterie in diesem Bauraum automatisiert erstellt. Die Optimierung des Fahrzeugkonzepts auf ausgewählte Eigenschaftsziele erfolgt in Microsoft Excel unter Verwendung der Software Noesis Optimus. Das Optimum wird über die Maximierung von gewichteten Nutzenfunktionen oder über die Bildung von Pareto-Fronten abgeleitet. Bei der Lösung über gewichtete Nutzenfunktionen werden keine Ziele für die Eigenschaften vorgegeben, sondern ein Nutzenverlauf über der Eigenschaftserfüllung und eine Gewichtung der Eigenschaften. Ein genetischer Optimierer ermittelt auf Basis dieser Nutzenfunktionen das optimale Fahrzeugkonzept [Kuc11a]. Ohne Gewichtung der Eigenschaften wird auf Basis von Mindest erfüllungen eine Pareto-Front zwischen zwei bis drei ausgewählten Eigenschaftszielen erzeugt (Abbildung 2-17). Vernachlässigt wird, dass Erfüllungen besser als die Mindest erfüllungen ebenfalls zur Güte eines Fahrzeugkonzepts beitragen. Beispielsweise wird für die Beschleunigung von 0 km/h auf 100 km/h ein Wert von 15 s als Mindest erfüllung definiert, allerdings wird ein erreichter Wert von 9 s nicht stärker als ein Wert von 14,5 s honoriert. Defizit dieses Ansatzes ist demnach, dass die erzeugte Pareto-Front nicht zwingend die jeweils optimale Lösung aus Gesamtfahrzeugsicht beinhaltet. Zudem ist anzumerken, dass bei Kuchenbuch keine saubere Trennung zwischen kundenrelevanten Größen wie der Reichweite und auslegungsrelevanten Größen wie dem Achslastverhältnis vorgenommen wird.

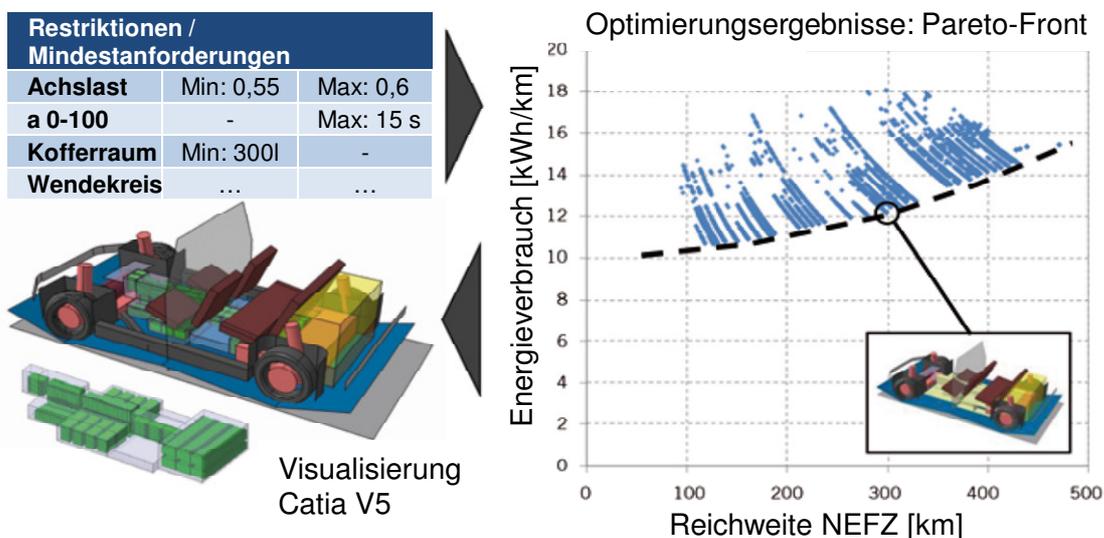


Abbildung 2-17 Pareto-Front unter Berücksichtigung von Restriktionen aus [Kuc11b]

Eghtessad und Küçükay [Egh11] stellen in ihrem Optimierungsansatz ebenso Forderungen an die Mindestbefüllung von Eigenschaften. Allerdings belohnen sie im Gegensatz zu Golbuff und Kuchenbuch in ihrer Bewertungsfunktion die über die Mindestbefüllungen hinausgehenden Befüllungen. Der Hauptfokus von Eghtessad und Küçükay liegt in der über Design of Experiments gefundenen bestmöglichen Konfiguration von Elektrofahrzeugen für ausgewählte Einsatzgebiete und Fahrertypen. Variiert werden in diesem Ansatz jedoch ausschließlich Größen des Antriebstrangs, wie Antriebsart, E-Maschinenleistung, Getriebeübersetzung oder Batteriekapazität. Zudem verfolgt die Bewertungsfunktion aus Eigenschaftssicht keinen ganzheitlichen Ansatz, sondern beschränkt sich auf Bewertungskriterien aus den Bereichen Energieeffizienz, Fahrleistung und Kosten.

Ein Auslegungsprozess gemäß Systems Engineering kombiniert mit einer multidisziplinären Werkzeugkette wird von AVL eingesetzt [Pal13]. Ein virtuelles Fahrzeug auf Systemebene wird aufgebaut und seine Architektur in der Simulation überprüft (Virtual System Prototyping). Verschiedene Kombinationen von Designparametern beschreiben den möglichen Lösungsraum, der über die Methode der Design Space Evaluation analysiert wird. Unter Anwendung von Design of Experiments werden sinnvolle Parameterkombinationen festgelegt und die Ergebnisse anschließend über Visualisierung von Pareto-Fronten ausgewertet. Ähnlich wie bei Eghtessad und Küçükay werden auch im Ansatz von AVL nur einzelne, ausgewählte Eigenschaften bei der Bewertung der Konzepte berücksichtigt. Zudem wird kein Gesamtoptimum bestimmt, sondern eine Unterstützung für das Bewältigen von Zielkonflikten angeboten.

2.7 Fazit

Die Grundlagen zum thematischen Komplex der eigenschaftsorientierten Fahrzeugkonzeptentwicklung wurden aufgezeigt. Dazu wurden die kundenrelevanten Eigenschaften von Fahrzeugen analysiert und die Gliederung über Eigenschaftsstrukturen dargelegt. Die eingesetzten Werkzeuge im Produktentwicklungsprozess dienen der Positionierung von Fahrzeugen über Eigenschaften und Ableitung von Zielwerten für die Entwicklung. Die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und technischen Zielwerten kann über die Methodik der Quality Function Deployment unterstützt werden. Zur frühen Überprüfung der Erreichung dieser Zielwerte und zum Vergleich verschiedener Konzeptalternativen wurden Tools der virtuellen Fahrzeugentwicklung vorgestellt. Da stets das bestmögliche Fahrzeug aus Eigenschaftssicht entwickelt werden soll, wurden Grundlagen zur Behandlung von nichtlinearen multi-

kriteriellen Optimierungsproblemen sowie Algorithmen zur automatisierten Lösungsfindung erläutert. Andere bereits umgesetzte Ansätze zu Fragestellungen in der Optimierung von Elektrofahrzeugen wurden kritisch verglichen und die jeweils offenen Punkte dargelegt.

Vor diesem Hintergrund lässt sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit verdeutlichen. Wie Ziemann im Ausblick seiner Arbeit schreibt [Zie06, S. 116-118], gibt es kaum Werkzeuge im Automobilbereich, die automatisiert aus ganzheitlichen Eigenschaftsanforderungen Ziele für Einflussgrößen generieren und plausibilisieren. Genau hier setzt die vorliegende Arbeit an. Über ein automatisierbares Tool soll aus Eigenschaftszielen ein Vorschlag für das bestmögliche technische Elektrofahrzeug-Grobkonzept abgeleitet werden. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen [Fra94; Gol07; Egh11; Kuc11b] liegt der Fokus auf der Ableitung möglichst ganzheitlich optimaler Fahrzeugkonzepte aus Kundensicht.

3 Entwicklung der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen

Im Rahmen dieses Kapitels werden spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen aufgezeigt und eine Systematik zur Bewertbarkeit von Eigenschaften vorgestellt. Verschiedene Eigenschaftstypen sind in der Entwicklung differenziert zu behandeln. Anhand der Quality Function Deployment Methodik wird ein mögliches Vorgehen zur Ableitung der Umsetzungsmaßnahmen und Generierung von Zielwerten dargelegt.

3.1 Spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen

Wie in Kapitel 2.1.2 gezeigt, wird die Eigenschaftsstruktur eingesetzt, um Fahrzeuge aus Kundensicht zu beschreiben und Ziele für die Entwicklungsarbeit zu setzen. Die Eigenschaften sind lösungsneutral definiert, weil der Kunde vorrangig von den generierten Eigenschaftsausprägungen und nicht von der dahinterstehenden Technik profitiert. Bei einem größeren Technologiesprung, wie beim Übergang von konventionell angetriebenen Fahrzeugen zu Elektrofahrzeugen, sind jedoch Anpassungen der Eigenschaftsstruktur notwendig.

Zur Untersuchung möglicher Anpassungen der Eigenschaftsstruktur wurde im Herbst 2009 eine Audi-interne Studie durchgeführt. Da kaum Elektrofahrzeuge auf dem Markt verfügbar waren, wurden Vollhybrid-Fahrzeugen verwendet, die zumindest bei geringen Geschwindigkeiten und niedrigen Lasten elektrisch fahren können.

Eine Erkenntnis der Studie war, dass die Fahrzeuge in den untersuchten Eigenschaften klar differenziert werden konnten (Abbildung 3-1). Die Ausprägungen in der Wertigkeit des Klangbilds der E-Maschine konnten deutlich unterschieden werden, ebenso wie das Geräuschbild der Nebenaggregate. Die Umsetzungen verschiedener Rekuperationsverhalten und die Inbetriebnahmekonzepte wurden unterschiedlich bewertet. Eine gute Ausprägung in den untersuchten Eigenschaften kann also einen Wettbewerbsvorteil schaffen. Dadurch wurde die Notwendigkeit aufgezeigt, die bestehende Eigenschaftsstruktur um neue, spezifische Eigenschaften für Elektrofahrzeuge zu ergänzen.

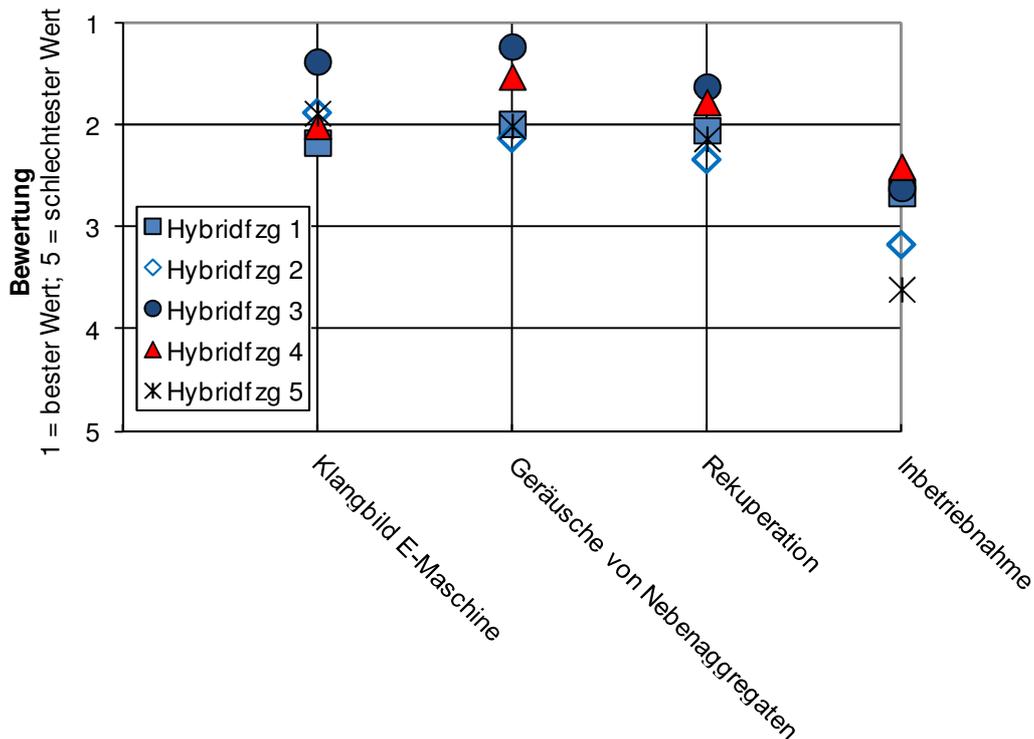


Abbildung 3-1 Auszug der Ergebnisse einer Studie zur Differenzierbarkeit von Hybridfahrzeugen

Wie in Abbildung 3-2 dargestellt, wurden, ausgehend von einer Struktur für Eigenschaften konventionell angetriebener Fahrzeuge, vier Kategorien für den Aufbau einer Eigenschaftsstruktur für Elektrofahrzeuge identifiziert.

Der größte Teil der Eigenschaften kann direkt übernommen werden. Dazu zählen alle Eigenschaften, in denen der Kunde keinen direkten Zusammenhang zur Elektrifizierung des Antriebs erkennt und folglich bei identischen Beurteilungskriterien ähnliche Anforderungen wie an konventionelle Fahrzeuge stellt. Beispielsweise müssen auch Elektrofahrzeuge an Steigungen anfahren können. Dies gilt unbeachtet der höheren technischen Herausforderung, die sich bei geringem Batterieladestand und tiefen Temperaturen ergibt.

Ein Teil der Eigenschaften konventioneller Fahrzeuge muss an die neue Technologie angepasst werden. So gibt es bei Elektrofahrzeugen keinen „Leerlaufkomfort“, sehr wohl jedoch einen „Komfort im Stand“, der den Geräusch- und Vibrationskomfort bei laufenden Aggregaten wie etwa Lüftern beschreibt.

Bei einigen Eigenschaften bleiben die Definitionen unverändert erhalten, allerdings muss die Bewertung des Ausprägungsniveaus deutlich angepasst werden. In der Öffentlichkeit am meisten diskutiert wird die Reichweite, die bei konventionellen Fahrzeugen im Bereich von etwa 500 km bis ca. 1200 km liegt, bei Elektrofahrzeugen jedoch nur Werte von etwa 100 km [Ren13] bis zu aktuell maximal 500 km [Tes13]

abdeckt. Die technologiebasierte Einschränkung von Eigenschaften muss über bessere Ausprägungen in anderen Eigenschaften mehr als kompensiert werden, um den Erfolg von Elektrofahrzeugen sicher zu stellen.

Diese Vorzüge können zum Teil durch den Komplexitätsverlust des Antriebsstrangs generiert werden. Bei der Eigenschaftsstruktur zeichnet sich dies durch den Entfall von Eigenschaften, wie etwa dem nicht mehr notwendigen Öl-Wechsel-Intervall, aus.

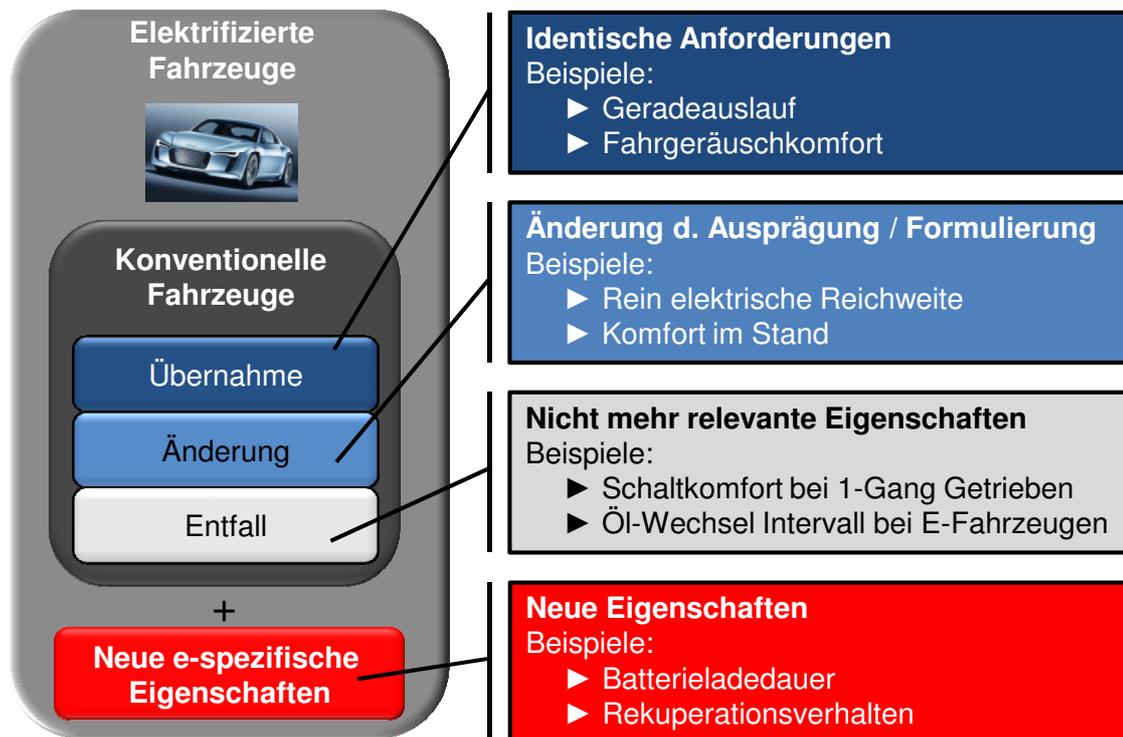


Abbildung 3-2 Eigenschaften bei Elektrifizierung aus [Wie11]

Neben den Anpassungen der Eigenschaftsstruktur müssen neue elektrifizierungsspezifische Eigenschaften definiert werden. Diese beziehen sich auf Aspekte, die durch den Ersatz von Kraftstofftank durch die Traktionsbatterie sowie den Unterschieden der E-Maschinen Charakteristik im Vergleich zum Verhalten des Verbrennungsmotors durch den Kunden erfahrbar sind. Beispielhaft seien die Batterieladedauer, die Ladeeffizienz oder das Rekuperationsverhalten genannt.

Insgesamt beinhaltet die angepasste Eigenschaftsstruktur 91 Eigenschaften. Die wichtigsten Eigenschaften von Elektrofahrzeugen, die sich aus Änderungen bestehender, konventioneller Eigenschaften sowie aus tatsächlich neuen Eigenschaften ergeben, sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

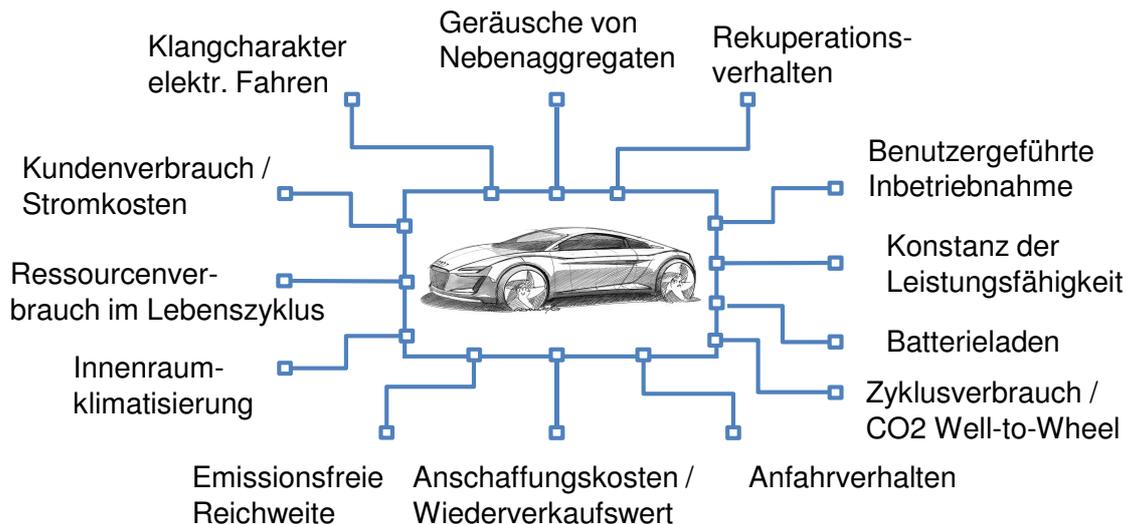


Abbildung 3-3 Eigenschaften von Elektrofahrzeugen
nach [Wie12a]

3.2 Klassifizierung von Eigenschaften gemäß ihrer Objektivierbarkeit

Um die Ausprägung von Eigenschaften zu planen und während der Entwicklung zu überprüfen, ist eine Bewertung anhand von Zielwerten essentiell. Dies ist nicht für alle Eigenschaften gleichermaßen möglich. Wie in Kapitel 2.1.1 gezeigt, ist eine Kategorisierung in harte und weiche bzw. in objektive und subjektive Eigenschaften entsprechend ihrer Bewertbarkeit möglich [Hei94, S. 127-129; Zie06, S. 24-28]. Genaue Kriterien der Zuordnung von Eigenschaften zu diesen Kategorien wurden jedoch in den referenzierten Arbeiten nicht festgelegt.

Deshalb wurde eine Systematik entwickelt, anhand derer Eigenschaften entsprechend ihrer quantitativen Bewertbarkeit in vier Klassen eingeteilt werden. Die dazu aufgestellten Kriterien untersuchen inwieweit eine Eigenschaft quantifizierbar und objektivierbar ist. Im ersten Schritt wird die eindeutige Spezifizierung der Rahmenbedingungen der Bewertung einer Eigenschaft überprüft. Z.B. wird ein Testverfahren wie die stationäre Kreisfahrt (DIN ISO 4138) genau beschrieben, um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse bei der Bewertung zu erhalten. In diesem spezifizierten Lastfall werden Eigenschaften direkt subjektiv beurteilt oder über definierte physikalische Größen gemessen. Bestehen physikalische Messwerte, wird eine Korrelation benötigt, um die Güte der Ausprägung zu beurteilen. Wird etwa in der stationären Kreisfahrt der Eigenlenkgradient ermittelt, ist eine Korrelation nötig, um die Güte des gemessenen Werts aus Kundensicht zu bewerten. Ist eine Eigenschaft

komplett über das geschilderte Verfahren objektivierbar, zählt sie zu Kategorie 1 der vollständig über Zielwerte bewertbaren Eigenschaften (Abbildung 3-4).

Bei einigen übergreifenden Eigenschaften sind Teileigenschaften wie bei Kategorie 1 quantifizierbar, andere Teileigenschaften unterliegen jedoch der rein subjektiven Beurteilung. Die Eigenschaft „Bremsen“ kann über den Bremsweg bei einem Bremsvorgang aus 100 km/h beschrieben werden, beinhaltet jedoch einige weitere Aspekte, die nicht direkt quantifizierbar sind. Beispielsweise gibt es für die Beurteilung der Bremsstabilität keine physikalische Größe, die das Fahrzeugverhalten ausreichend genau beschreibt. Diese teilweise über Zielwerte beschreibbaren Eigenschaften werden in Kategorie 2 zusammengefasst.

Eigenschaften der Kategorie 3 können zwar nicht direkt quantifiziert werden, jedoch lassen sich indirekte Ziele für sie definieren. Über die indirekten Ziele können zumindest die Voraussetzungen geschaffen werden, die angestrebte Erfüllung einer Eigenschaft zu erreichen. Eine gute Erfüllung des Sicherheitsgefühls kann beispielsweise schwer gemessen werden, jedoch existieren Zielwerte für andere Größen, um ein gutes Sicherheitsgefühl darzustellen. So sollten die Überhänge sowie die Sitzhöhe über der Fahrbahn gewisse Werte nicht unterschreiten. Zudem können Fahrerassistenzsysteme, wie ein System zur automatischen Gefahrenbremsung, das Sicherheitsgefühl in einem Fahrzeug unterstützen.

Trotz Bemühungen, alle Eigenschaften bewerten zu können, sind nach wie vor zahlreiche Eigenschaften nicht quantifizier- und objektivierbar. Diese Eigenschaften zählen zu Kategorie 4. So wird der Anzeigekomfort vieler Fahrerassistenzsysteme etwa in Studien über subjektive Bewertungen gemessen, weil keine adäquaten Größen zur objektiven Bewertung existieren.

Da die Objektivierbarkeit von Eigenschaften abhängig vom aktuellen Wissensstand ist, kann eine Zuordnung von Eigenschaften zu den definierten Kategorien immer nur eine Momentaufnahme sein. Ziel der Forschung und Entwicklung in vielen Projekten ist es, bisher nur indirekt oder nicht bewertbare Eigenschaften zu objektivieren [Kna10; Schi10].

Quantitative Bewertbarkeit							Kategorie
Kategorie / Beispiel Eigenschaft	Lastfall / Manöver genau spezifiziert	Über physikal. Größe vollständig bewertbar	Korrelation Messwert zu Eigenschaftserfüllung	Vollst. über quantitative Größen bewertbar	Indirekte Zielwerte vorhanden		
①	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Vollständig über Zielwerte bewertbar
Reichweite vor Kunde	Verbrauch in spezifiziertem Kundenzyklus	Reichweite in km	Z.B. 150km entspr. 8 von 10 Punkten	Ja	Leergewicht, cW*A, RoWi, Wirkungsgrade....		
②	Ja Ja	Ja Nein	Ja Nein	Nein	Ja		Teilweise über Zielwerte bewertbar
Bremsen	Bremsen leer aus 100km/h, trocken Bremsstabilität (geradeaus)	Bremsweg in m Nein	Z.B. 38m Bremsweg entspr. 9 Pkten Nein	Nur Teil-Eigenschaften bewertbar	Achslastverteilung, Schwerpunkt-höhe,...		
③	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja		Indirekt über Zielwerte bewertbar
Sicherheitsgefühl	Nicht genau definiert	Nein	Nein	Nein	Sitzhöhe über Fahrbahn, FAS		
④	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Derzeit nicht über Zielwerte bewertbar
Anzeigekomfort	Nicht genau definiert	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	

Abbildung 3-4 Klassifizierung der Objektivierbarkeit von Eigenschaften

3.3 Abhängigkeiten von Eigenschaften und technischen Stellhebeln

Die Anwendung der in Kapitel 2.3 vorgestellten Quality Function Deployment Methodik auf elektrifizierungsspezifische Eigenschaften ermöglicht ein besseres Verständnis für die wichtigsten Einflussgrößen des technischen Fahrzeugkonzepts. Über den Aufbau eines House of Quality werden die Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und technischen Stellhebeln systematisch dargestellt und analysiert.

3.3.1 Technische Stellhebel zur Beeinflussung von Eigenschaften

Bei der Anwendung der Quality Function Deployment Methodik müssen die technischen Stellhebel identifiziert werden, die die Realisierung der Eigenschaften beeinflussen. Diese werden in vier Kategorien eingeteilt: Package / Grundkonzept, Module / Komponenten, Einflussgrößen und Funktionen (Abbildung 3-5).

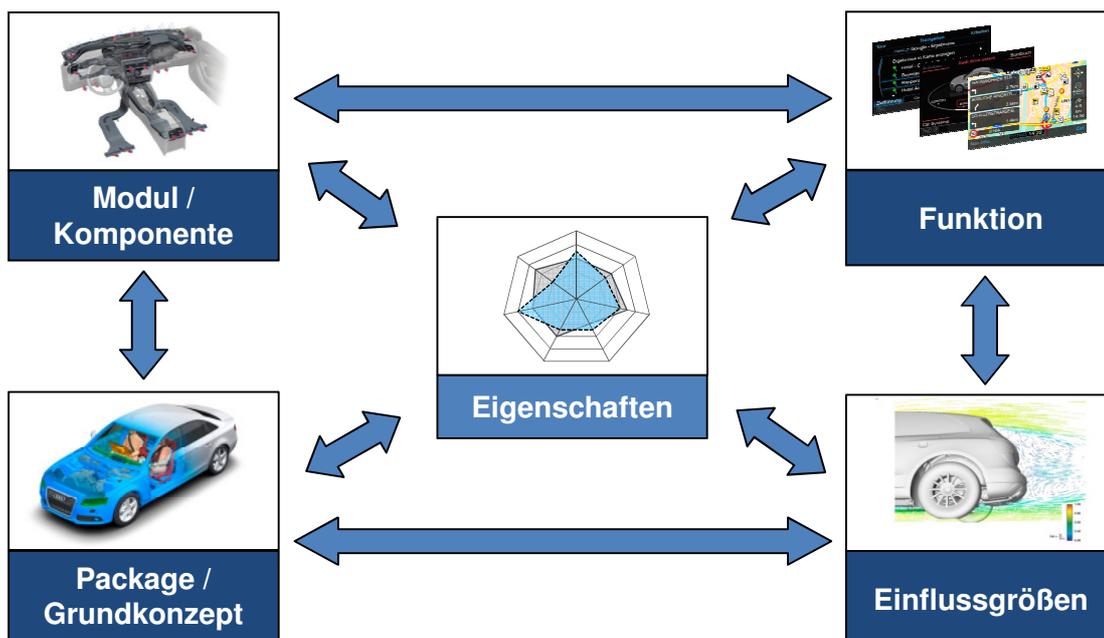


Abbildung 3-5 Beeinflussung von Eigenschaften nach [Meu09]

Die Package- und Grundkonzeptentscheidungen stellen grundlegende Weichen für das zu entwickelnde Fahrzeugkonzept dar. Sie beziehen sich vor allem auf die Karosserie, die über die groben Abmaße des Segments, die Form des Fahrzeugderivats sowie die gewünschte Türenanzahl beschrieben wird. Zudem hat die Anzahl der Sitzplätze großen Einfluss auf die Gestaltung des Innenraums. Der Antriebsstrang legt die Basis für die längsdynamische Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs fest. Zu den Entscheidungen der Antriebsstrangtopologie gehören in der frühen Phase vorrangig die

Lage der E-Maschine, die Wahl der angetriebenen Achsen sowie die Anbindung der E-Maschine an die Räder. Ebenso spielt die Positionierung der Batterie beim Elektrofahrzeug aufgrund ihres hohen Gewichts und großen Volumens eine wichtige Rolle.

Die Module und Komponenten sind die technischen Bauteilgruppen, aus denen sich das Gesamtfahrzeug zusammensetzt. Gemäß einem neu entwickelten Projektstrukturplan für Elektrofahrzeuge [Mat12, S. 5-9] müssen in den Bereichen Karosserie, Antrieb, Fahrwerk und Elektronik jeweils entsprechende Grundkonzeptentscheidungen getroffen werden. Die Wahl der technischen Konzeptalternativen muss so gefällt werden, dass sie die beste Voraussetzung zur Erfüllung der Anforderungen an die Gesamtfahrzeugeigenschaften bietet. Verschiedene Technologien stehen zur Wahl, wie etwa eine Mehrlenker- oder eine McPherson-Achse beim Achskonzept.

Abbildung 3-6 zeigt den Projektstrukturplan von Elektrofahrzeugen samt packagerelevanten Grundkonzeptentscheidungen und modulrelevanten Grundkonzeptalternativen. Eine Darstellung inklusive möglicher Konzeptalternativen ist in Anhang A zu finden. Dort wird auch systematisch gezeigt, welche der Grundkonzeptentscheidungen im entwickelten rechnergestützten Werkzeug abgebildet werden können bzw. bereits implementiert sind.

Antrieb	Fahrwerk
Antriebsanordnung	Achse
Aggregatelage / Kraftübertragung	Achskonzept Vorderachse
Aggregateeinbau	Achskonzept Hinterachse
Motor	Stabilisatorkonzept
Motortyp	Räder / Reifen
Motorabtrieb	Breitendimensionierung Reifen
Motorkühlung	Durchmesserdimensionierung Reifen
Leistungselektronik	Bremse
Leistungselektroniktyp	Bremskraftübertragung
Leistungsbereitstellung	Lenkung
Elektronische Bauelemente	Lenkkraftübertragung
Leistungselektronikkühlung	Feder / Dämpfer
Batterie	Federkonzept
Batterietyp	Federsteuerung
Zellkonzept	Dämpferkonzept
Batteriepositionierung	Dämpfersteuerung
Thermomanagement der Batterie	Karosserie
Ladegerät	Exterieur
Ladekonzept	Segment
Getriebe	Karosserieform / Derivat
Getriebestufen	Anzahl Türen
Getriebetyp	Interieur
Range-Extender	Sitzigkeit
Range-Extender-Typ	Innenraumvariabilität
Hybridkonzept	Heiz- / Klimakonzept
Elektrik	Grundstruktur
Energieversorgung	Komponente
Niedervolt-Bordnetz	Grundkonzept
Elektronische Datenübertragung	Konzeptalternative
Buskonzept	

Abbildung 3-6 Grundkonzeptentscheidungen für Package und Module nach [Mat12, S. 9]

Die dritte Gruppe der Beeinflussungsfaktoren aus Abbildung 3-5 wird durch die Einflussgrößen gebildet. Dies sind physikalische Maße, die für die Erfüllung der Fahrzeugeigenschaften hohe Relevanz haben. Dazu zählen Größen wie der c_w -Wert oder das Achslastverhältnis, aber ebenso modulbeschreibende Kennwerte wie die Motorleistung oder die Batteriekapazität. Die zuvor aufgezeigten Grundkonzeptentscheidungen haben großteils direkte Auswirkungen auf die möglichen Wertebereiche der Einflussgrößen. So wird z.B. für die Einflussgröße Geräuschpegel im Innenraum je nach Wahl eines Range-Extender Konzepts ein höherer oder geringerer Wert erreichbar sein.

Die vierte Kategorie der technischen Stellhebel wird durch Funktionen gebildet, die die Erreichung von Eigenschaften unterstützen bzw. erst ermöglichen. Dazu zählen über Software ermöglichte Funktionalitäten, wie die Analysemöglichkeit der Fahrstilleffizienz.

3.3.2 House of Quality für spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen

Um die in Abbildung 3-5 gezeigten Möglichkeiten der Beeinflussung von Eigenschaften strukturiert zu analysieren, eignet sich die Quality Function Deployment Methode (Kapitel 2.3). Anhand des Werkzeugs House of Quality werden in einer Matrix die Beziehungen zwischen technischen Stellhebeln und Fahrzeugeigenschaften untersucht.

Auf der vertikalen Achse des House of Quality werden die 91 Eigenschaften der angepassten Eigenschaftsstruktur für Elektrofahrzeuge (Kapitel 3.1) aufgetragen. Auf der horizontalen Achse werden die technischen Stellhebel eingesetzt, die der Realisierung der Eigenschaften dienen. Die Modul- und Grundkonzeptentscheidungen wirken sich vor allem über die annehmbaren Werte der Einflussgrößen auf das Fahrzeugkonzept aus. Deshalb werden vorzugsweise Einflussgrößen als technische Stellhebel verwendet.

Die Beziehungsmatrix zwischen technischen Stellhebeln und Eigenschaften wurde auf Basis von Expertenaussagen gefüllt. Dabei wurde die Matrix für elektrifizierungsspezifische Eigenschaften und technische Stellhebel neu aufgebaut (etwa 3900 Zellen) und anschließend mit einer bestehenden Matrix für konventionelle Fahrzeuge verbunden (etwa 8800 Zellen). Zudem wurden die Beziehungen der technischen Stellhebel zueinander im Dach des House of Quality bewertet, um Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen aufzuzeigen. Kritisch anzumerken ist hierbei, dass die Stärke der Zusammenhänge von der subjektiven Einschätzung der jeweiligen Experten abhängt. Durch einen übergreifenden Abgleich sämtlicher Beziehungen konnte jedoch ein in sich stimmiges Bezugsgefüge im House of Quality sichergestellt werden.

Die Quality Function Deployment Methodik liefert für die Ableitung von Maßnahmen und Zielwerten für die Erreichung von Eigenschaftszielen eine wichtige Grundlage. Dafür wird in das House of Quality eine Filterfunktionalität implementiert, die es ermöglicht, für eine Eigenschaft nur die mit ihr in Beziehung stehenden Einflussgrößen zu extrahieren. Die Stärke der Beziehung entsprechend des 0-1-3-9-Schemas stellt die Beeinflussungsmöglichkeit der jeweiligen Einflussgröße auf die Eigenschaft dar. Die Einflüsse auf die Eigenschaft „Konstanz der Leistungsfähigkeit“ sind in Abbildung 3-7 beispielhaft dargestellt.

House of Quality		Batterie							
		Batteriekonzept	Kühl- / Heizkonzept Batterie	Wirkungsgrad [%]	Selbstentladung [%/m]	Lebensdauer [Zyklen, Jahre, km]	Betriebstemperatur [°C]	Vorkonditionierung	Battery Energy Management
1	Schwache Beziehung								
3	Mittlere Beziehung								
9	Starke Beziehung								
02. Fahrerlebnis									
02.17. Konstanz der Leistungsfähigkeit		9	3	1	3	9	9	9	9
...									

Abbildung 3-7 Einflüsse auf die elektrifizierungsspezifische Eigenschaft „Konstanz der Leistungsfähigkeit“

Bei der Zielwertfestlegung von Einflussgrößen ist eine Filterung ebenso hilfreich, um aufzuzeigen, welche Eigenschaften von einer Einflussgröße anhängen. Abbildung 3-8 zeigt ein Beispiel für die beeinflussten Eigenschaften der „Selbstentladungsrate“ der Batterie.

House of Quality		Batterie	
		...	Selbstentladung [%/m]
1	Schwache Beziehung		
3	Mittlere Beziehung		
9	Starke Beziehung		
02. Fahrerlebnis			
02.17. Konstanz der Leistungsfähigkeit			3
04. Nutzungs- und Bedienkomfort			
04.04. Hinweisende Unterstützung bei der Fahraufgabe			3
07. Alltagstauglichkeit			
07.12. Emissionsfreie Reichweite			1
07.08. Witterungstauglichkeit			3
07.11. Fahrzeugverfügbarkeit			9
08. Qualität / Zuverlässigkeit			
08.02. Langzeitqualität			3
08.03. Funktionsqualität			1

Abbildung 3-8 Beeinflussungen der Einflussgröße „Selbstentladung“ der Batterie

Die technische Bedeutung einer Einflussgröße wird über das Summenprodukt aus Eigenschaftsgewichtung und Beziehungsstärke zu den Einflussgrößen berechnet.

Dadurch ist es möglich, für verschiedene Konzepte mit spezifischen Eigenschaftsgewichtungen, jeweils die technische Bedeutung der Einflussgrößen abzuleiten.

Die technische Bedeutung wird vorrangig zur Priorisierung der Einflussgrößen bei Zielkonflikten genutzt. Dazu werden die Eigenschaften in eine Rangfolge entsprechend der Höhe des Werts der technischen Bedeutung gebracht. Da diese Rangfolge zu detailliert für die Grobentscheidung über die Wichtigkeit der Erreichung der Zielwerte von Einflussgrößen ist, wird eine Klassifizierung eingeführt. Die Einflussgrößen werden entsprechend der ermittelten Rangfolge sortiert und anschließend in einige wenige Klassen eingeteilt (Abbildung 3-9).

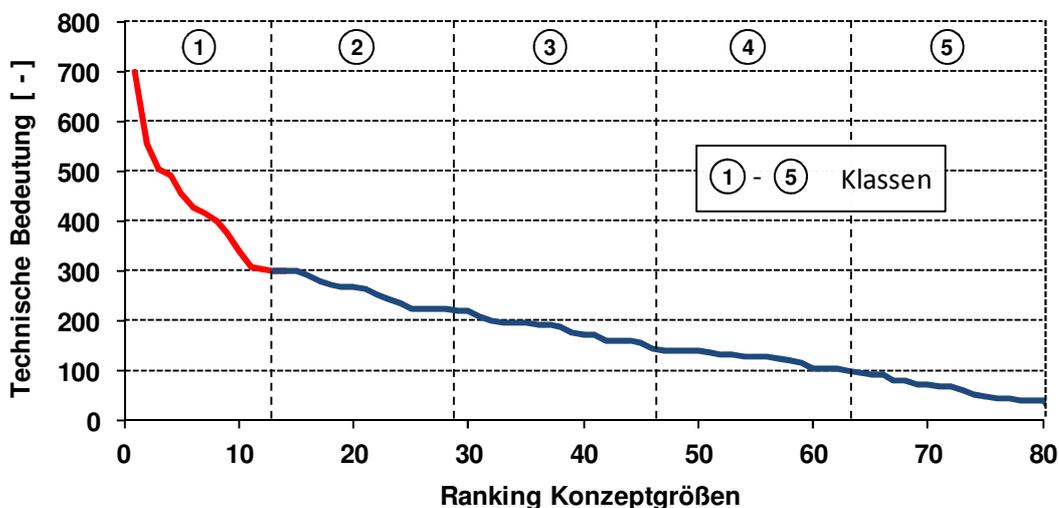


Abbildung 3-9 Klassifizierung von Einflussgrößen entsprechend ihrer technischen Bedeutung

Das in dieser Arbeit entwickelte Auslegungswerkzeug (Kapitel 5) versucht sämtliche Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und technischen Stellhebeln über mathematische Formeln abzubilden. Das House of Quality bietet über die strukturierte Darstellung der möglichen Einflüsse der Eigenschaften eine ideale Unterstützung,

3.3.3 Wechselwirkungen technischer Stellhebel

Das Dach des House of Quality zeigt die Wechselwirkungen der technischen Stellhebel. Bei Änderung einer Größe können die betroffenen technischen Stellhebel hervorgehoben werden. Dabei werden meist mehrstufige Wirkketten angestoßen, weil die betroffenen Änderungen weitere Sekundäränderungen der Einflussgrößen hervorrufen. Statt eines Spitzdachs, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, hat sich ein Hochdach als sinnvoll erwiesen, weil die Beeinflussung technischer Stellhebel untereinander selten bidirektional gleich ist. So beeinflusst beispielsweise die

Durchmesserklasse des Reifens den c_w -Wert. Der c_w -Wert ist jedoch eine Größe, die sich aus der Summe der aerodynamisch wirksamen Teile ergibt und somit keine aktive Auswirkung auf die Durchmesserklasse des Reifens hat (Abbildung 3-10).

		Technische Stellhebel					
		DIN-Leergewicht [kg]	Raddurchmesser [mm]	Batterienutzkapazität [kWh]	E-Maschine Spitzenleistung [kW]	c_w -Wert [-]	Fahrzeuglänge [mm]
Technische Stellhebel	DIN-Leergewicht [kg]						
	Raddurchmesser [mm]	+				+	
	Batterienennkapazität [kWh]	z			z		
	E-Maschine Spitzenleistung [kW]	+					
	c_w -Wert [-]						
	Fahrzeuglänge [mm]	+				-	
...							

Wird beeinflusst von ↑

Beeinflusst →

Abbildung 3-10 Wechselwirkungen der technischen Stellhebel im Hochdach des House of Quality

Im klassischen House of Quality nach Kapitel 2.3 werden die Zusammenhänge zwischen den technischen Stellhebeln entsprechend ihrer Zielvereinbarkeit bewertet. Da viele Einflussgrößen keine eindeutige Optimierungsrichtung aufweisen, ist dieses Vorgehen für das House of Quality für Elektrofahrzeuge nicht zielführend. Die Methodik wurde dahingehend angepasst, dass die Zusammenhänge entsprechend ihrer mathematischen Beeinflussungsrichtung bewertet werden. Wie in Abbildung 3-10 dargestellt, wird zwischen mathematisch gleichsinnigem (+), mathematisch gegenläufigem (-) und einem vorhandenen, jedoch nicht mathematisch eindeutig definierbaren Zusammenhang (z) unterschieden. Mathematisch gleichsinnig (+) bedeutet beispielsweise, dass bei Vergrößerung der Fahrzeuglänge mit hoher Wahrscheinlichkeit auch das DIN-Leergewicht steigt. Ein Beispiel für mathematisch gegenläufig (-) ist eine wahrscheinliche notwendige Vergrößerung der Fahrzeuglänge für eine Senkung des c_w -Werts. Ein nicht mathematisch eindeutiger Zusammenhang (z) liegt beispielsweise

bei der Beeinflussung der E-Maschinen Spitzenleistung durch die Batterienennkapazität vor. Ist die maximale Leistung der Batterie größer als die E-Maschinen Spitzenleistung, liegt kein Einfluss vor. Bei geringer Batteriekapazität jedoch beschränkt die maximale Batterieleistung die gewünschte E-Maschinen Spitzenleistung.

3.4 Fazit

Die Anpassungen einer Eigenschaftsstruktur von konventionell angetriebenen Fahrzeugen auf die spezifischen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen wurden beleuchtet. Nach einer Klassifizierung von Eigenschaften gemäß ihrer Objektivierbarkeit wurde die Anwendung des House of Quality für elektrifizierungsspezifische Eigenschaften erläutert.

Das entwickelte House of Quality kann zur Ableitung und Plausibilisierung von Zielwerten für Fahrzeugkonzepte genutzt werden [Zie06, S. 5 f.]. Vor allem für indirekt bewertbare Eigenschaften eignet sich diese Methode. Eine Analyse der Eigenschaftsausprägungen der Wettbewerbsfahrzeuge und der festgesetzte Anspruch in den jeweiligen Eigenschaften führen zu den Forderungen an die Einflussgrößen. Da die Eigenschaften jeweils unterschiedliche Anforderungen an eine Einflussgröße stellen können, kommt es vielfach zu widersprüchlichen Zielen. Ein in sich stimmiges, plausibilisiertes Zielwertsystem aufzustellen, das die beste Lösung für die kundenrelevanten Eigenschaftsanforderungen darstellt, ist Aufgabe des im folgenden Kapitel dargelegten zyklischen Entwicklungsprozesses.

Die Systematik des House of Quality dient als Maßstab für das Ziel, Fahrzeugkonzepte möglichst ganzheitlich nach Kundenanforderungen auszulegen. An diesem Anspruch wird auch das in Kapitel 5 vorgestellte Tool zur automatisierten Konzeptauslegung gemessen.

4 Prozess der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung

Zur Umsetzung der in Kapitel 3 beschriebenen Eigenschaften in einem Fahrzeugprojekt wird ein strukturierter, auf die Realisierung von Eigenschaften ausgerichteter Prozess benötigt. Der in der Praxis angewandte Entwicklungsprozess in der frühen Phase ist in vielen Automobilunternehmen sehr technikorientiert. Deswegen wird ein modifizierter, abstrahierter Prozess vorgestellt, der die Entwicklung von kundenrelevanten Eigenschaften in den Vordergrund stellt. Dieser Prozess soll zudem die Anforderungen für eine rechnergestützte Automatisierung erfüllen, um eine iterative Optimierung zu ermöglichen.

4.1 Defizite des in der Praxis angewandten Entwicklungsprozesses

Der derzeit umgesetzte Prozess weist einige Schwächen im Hinblick auf Transparenz und objektive Nachvollziehbarkeit der Erreichung von Eigenschaftszielen auf.

Der in Abbildung 4-1 dargestellte Prozess startet mit einem gesetzten Eigenschaftsprofil, das die angestrebten Eigenschaftsausprägungen sowie die Gewichtungen der Eigenschaften enthält. Über subjektive Experten-Einschätzungen werden Zielwerte für physikalische Zielgrößen abgeleitet, die den Anspruch der gesetzten Eigenschaftsziele widerspiegeln sollen. Ebenso werden auf Basis von Expertenmeinungen Entscheidungen beim Aufbau des technischen Konzepts gefällt, um die Eigenschaftsziele möglichst gut zu erreichen. Entscheidungen in den vier Kategorien der technischen Stellhebel sind entsprechend Kapitel 3.3.1 zu treffen: Grobkonzept, Module, Einflussgrößen und Funktionen. Das technische Konzept muss in sich plausibilisiert werden, um eine realistische Umsetzung sicher zu stellen. Problematisch am derzeit umgesetzten Prozess ist, dass in der Entwicklung auf das technisch bestmögliche Konzept optimiert wird und nicht zwingend die strategisch gesetzten Ziele im zentralen Fokus stehen. Deshalb werden Konzepte zu Meilensteinen auf die Erreichung ihrer Eigenschaftsziele hin überprüft. Die Ausprägungen der physikalischen Ist-Werte werden dazu per Simulation oder in Hardware-Aufbauten bestimmt. Im Zusammenspiel mit nicht quantifizierbaren Größen wird subjektiv beurteilt, wie gut das angestrebte Ziel-Eigenschaftsprofil erreicht wird. Diese Einschätzung wird für jedes Eigenschaftsfeld auf einer Ampelskala vorgenommen. Grün entspricht einer Ziel-

erreichung im Soll, gelb einer gefährdeten und rot einer derzeit nicht möglichen Zielerreichung. Vorteilhaft an der Bewertung über die Ampelskala ist, dass alle Eigenschaften, einschließlich der rein subjektiv beurteilbaren, auf der gleichen Skala bewertet werden. Problematisch ist die fehlende, objektive Nachvollziehbarkeit über die notwendige Größe der konzeptionellen Zielverfehlung, um den Status von grün auf gelb oder rot zu schalten. Auf Basis der Bewertungen auf der Ampelskala können Anpassungen des technischen Konzepts gefordert werden. Über diese Optimierungsschleife nähern sich die Ist-Eigenschaftsausprägungen des Konzepts dem angestrebten Eigenschaftsprofil an. Die Bewertungs- und Optimierungsschleifen sind jedoch aufwändig, weil ein für alle Entwicklungsabteilungen einheitlicher Konzeptstand geschaffen werden muss und die Eigenschaften über Simulationen und Hardware-Aufbauten zu prüfen sind. Im Gegensatz zum hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand dieser ganzheitlichen Konzeptstand-Analyse ist die Aussagekraft der Bewertung auf der Ampelskala allerdings beschränkt. Zudem ist die Ampelskala aufgrund der nur dreistufigen Ausprägung für den Vergleich einer großen Anzahl an Konzeptansätzen kaum geeignet.

4.2 Herausforderungen bei der Automatisierung des Prozesses

Für die Automatisierung eines eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozesses müssen einige Bedingungen erfüllt sein. Zunächst muss die Auswahl auf die objektivierbaren Eigenschaften eingeschränkt werden, weil mathematische Algorithmen nur mit quantitativen Größen umgehen können. Dadurch wird die Ganzheitlichkeit der Betrachtung zugunsten der Automatisierbarkeit reduziert.

Zudem ist eine transparente und objektive Übertragung von Eigenschaftswerten auf physikalische Zielwerte zu schaffen. So wird sichergestellt, dass die physikalischen Zielwerte reproduzierbar festgesetzt werden, um die Eigenschaftsziele zu erreichen.

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Prozessgestaltung ist die multidisziplinäre Bewertung von Fahrzeugkonzepten. Aufgrund der hohen Unschärfe der Eingangsdaten ist die Verwendung von hochdetaillierten Simulationsmodellen nicht angemessen. Es genügen Modelle mit relativ grober Abbildungsschärfe.

Für den ganzheitlichen Vergleich der Güte zweier Konzepte bedarf es einer Bewertungsfunktion, über die bereits kleine Unterschiede in den Eigenschaftsausprägungen zu messbar unterschiedlichen Ergebnissen führen.

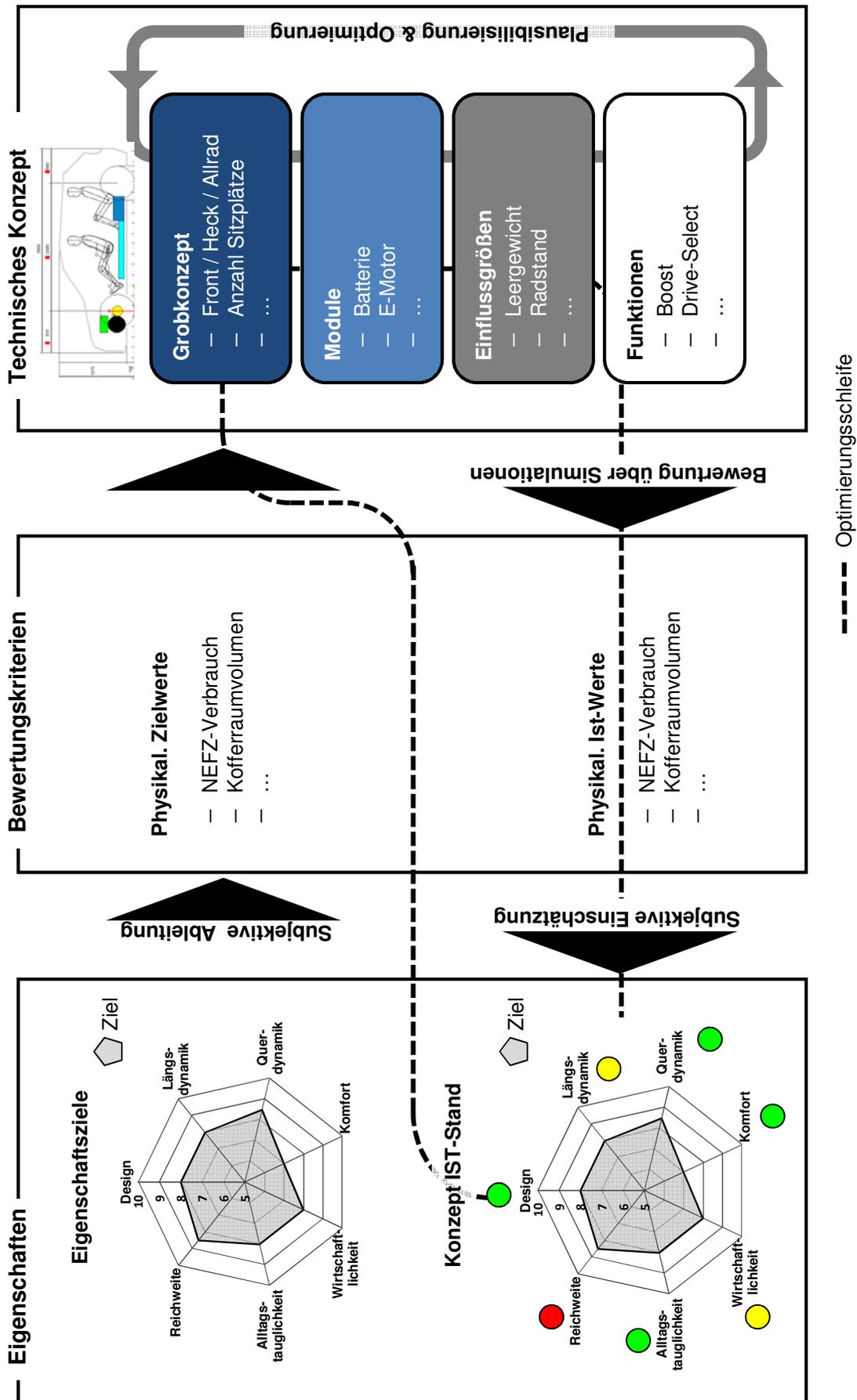


Abbildung 4-1 In der Praxis angewandter Prozess der Konzeptentwicklung

Im Gegensatz zu den meist langwierigen Optimierungsschleifen in der realen Entwicklung soll die algorithmusbasierte Optimierungsschleife in kurzer Zeit durchlaufen werden können. So ist es bei der rechnerbasierten Umsetzung möglich, in überschaubarer Zeit eine Vielzahl von Parameterkombinationen zu untersuchen.

4.3 Modifizierter Entwicklungsprozess zur Ermöglichung einer Automatisierung

Der in der Praxis angewandte Entwicklungsprozess aus Abbildung 4-1 wird entsprechend den Anforderungen der Automatisierung aus Kapitel 4.2 modifiziert. Dieser angepasste Prozess (Abbildung 4-2) wird in die Schritte ❶ bis ❷ unterteilt, die im Folgenden beschrieben werden.

Der Prozess basiert auf einem angestrebten Ziel-Eigenschaftsprofil, das in Schritt ❶ als Eingang definiert wird. Allerdings werden nicht alle Eigenschaften, sondern lediglich die direkt bzw. indirekt quantifizierbaren Eigenschaften verwendet. Um den Positionierungsanspruch des Fahrzeugs für die Entwicklung greifbarer zu machen, müssen in Schritt ❷ die angestrebten Ausprägungen von der Eigenschaftswerteskala auf die jeweiligen Skalen der physikalischen Eigenschaftsausprägungen übertragen werden. Durch neu eingeführte Korrelationsfunktionen wird diese Übertragung objektiv und nachvollziehbar gestaltet.

Auf den physikalischen Zielwerten aufbauend wird in Prozessschritt ❸ ein technisches Konzept abgeleitet, das die gesetzten Ziele möglichst gut erfüllt. Das technische Konzept muss in Prozessschritt ❹ in sich plausibilisiert werden, um die reale Umsetzbarkeit sicher zu stellen.

Über eine Softwareumgebung mit abstrahierten Simulationsmodellen aller Fachdisziplinen können die Fahrzeugkonzepte in Schritt ❺ in ihren Eigenschaften ganzheitlich und schnell evaluiert werden. Die sich ergebenden physikalischen Ist-Werte werden in Prozessschritt ❻ über die Korrelationsfunktionen auf die Eigenschaftswerteskala zurückgespiegelt. Folglich ist ein transparenter und aussagekräftiger Abgleich zwischen Ziel- und Ist-Konzept durchführbar. Zur Analyse der Güte eines Konzepts wird in Schritt ❼ eine Bewertungsfunktion integriert. Diese stellt auf Basis der Abweichungen zwischen Ziel- und Ist-Ausprägung der Eigenschaften sowie unter Berücksichtigung der Gewichtungen eine ganzheitliche Vergleichbarkeit verschiedener Konzepte her.

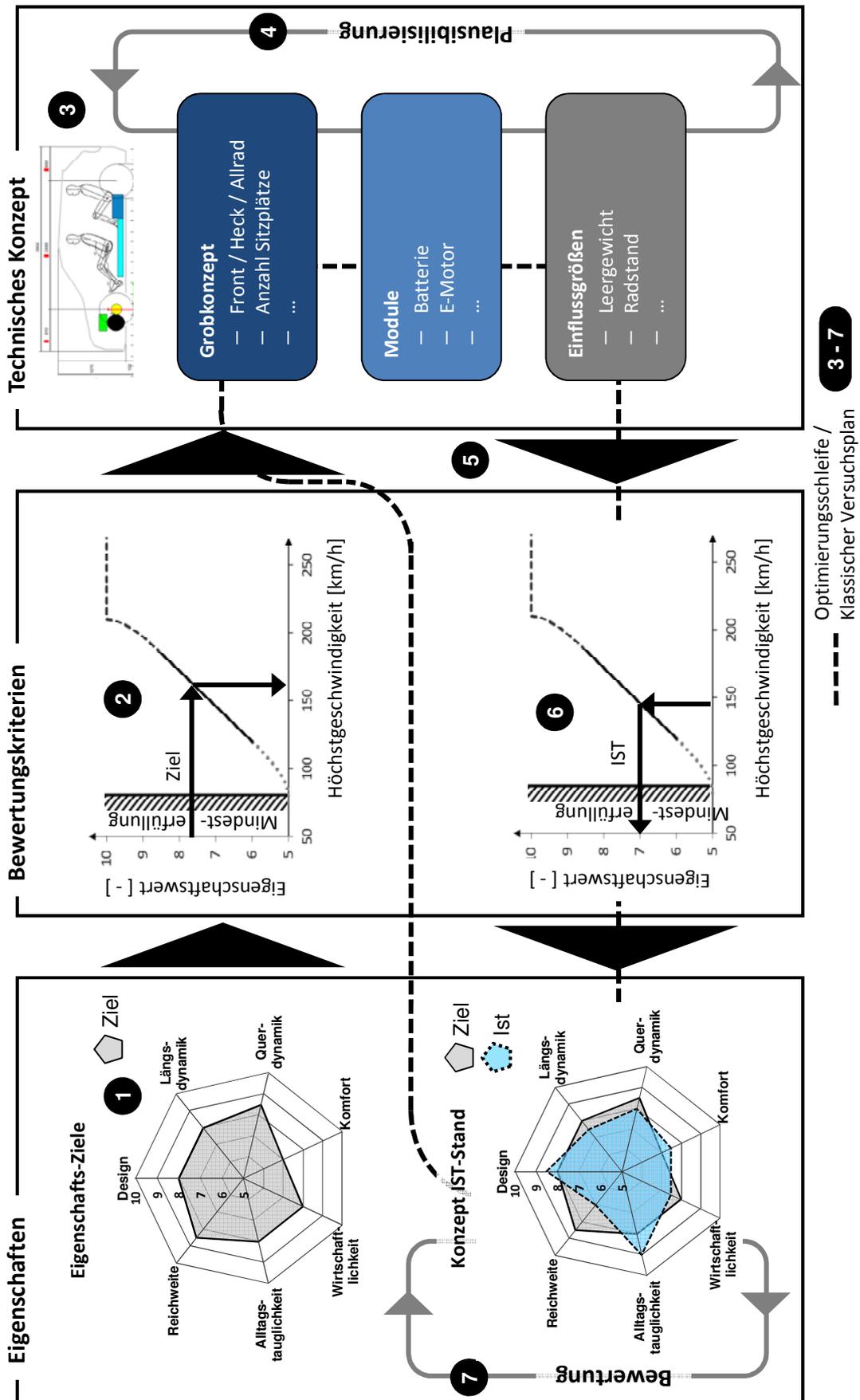


Abbildung 4-2 Prozess der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung nach [Wie12a]

Mittels des vorgestellten modifizierten Prozesses können Parametervariationen des technischen Konzepts durchgeführt und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften über die Bewertungsfunktion analysiert werden. Dadurch ist eine automatisierte Schleife der Prozessschritte ③ bis ⑦ zur Ableitung des bestmöglichen Fahrzeugkonzepts für ein spezifisches Eigenschaftsziel umsetzbar. Diese Schleife ist über Optimierungsalgorithmen oder über einen Versuchsplan steuerbar.

4.4 Fazit

Aufbauend auf dem aktuell in der Praxis angewandten Entwicklungsprozess von Fahrzeugeigenschaften in der Konzeptphase wurde ein Prozess für eine Automatisierung der Konzeptoptimierung entwickelt. Neben der Auswahl von abbildbaren Eigenschaften bedarf es dafür einer Möglichkeit der normierten Bewertung, um Ziel festlegung und Beurteilung der Zielerreichung auf der gleichen Skala vorzunehmen. Über multidisziplinäre Simulationsmodelle zur Eigenschaftsbewertung werden zudem die Optimierungsschleifen in kurzer Zeit durchgeführt. Der vorgestellte Prozess zur Automatisierung der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung ist die Basis für die Entwicklung des Simulationstools, das in den folgenden Kapiteln dargestellt wird.

5 Automatisierung des Entwicklungsprozesses

Der abstrahierte Entwicklungsprozess von Eigenschaften in der frühen Phase soll für die automatisierte Variation von technischen Parametern in einem rechnergestützten Werkzeug umgesetzt werden. Dafür wurde das „Eigenschaftsorientierte Konzeptentwicklungstool“, das im Folgenden „EOKET“ genannt wird, aufgebaut. Die Grundstruktur des EOKET sowie der Aufbau der Teilmodelle wurden mit Unterstützung von zwei Team-Diplomarbeiten von Zitzelsberger und Friebe [Zit10] sowie Engert und Krapf [Eng11] umgesetzt. Die notwendigen Schritte zur Implementierung des EOKET werden in diesem Abschnitt aufgezeigt und erläutert.

5.1 Auswahl abbildbarer Eigenschaften

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ist die objektive Bewertbarkeit der abzubildenden Eigenschaften eine der großen Herausforderungen bei der Automatisierung des Entwicklungsprozesses. Zudem muss die Beeinflussung durch technische Stellhebel in einem einfachen, mathematischen Simulationsmodell abbildbar sein.

Als Basis der Eigenschaftsauswahl diene die für Elektrifizierung angepasste Audi-Eigenschaftsstruktur (Kapitel 3.1), die eine Grundlage für die ganzheitliche Kundensicht auf das Fahrzeug bietet. Nach Zuordnung sämtlicher Eigenschaften zu den in Kapitel 3.2 beschriebenen Kategorien zeigt sich, dass 36 der 91 Eigenschaften der Kategorie 4 angehören und somit nicht über Zielwerte bewertbar sind (Abbildung 5-1). Von den 55 verbleibenden Eigenschaften lassen sich neun Eigenschaften vollständig quantifizieren und objektivieren (Kategorie 1). 32 Eigenschaften können teilweise über Zielwerte bewertet werden (Kategorie 2), während 14 Eigenschaften zumindest über indirekte Zielwerte maßgeblich beeinflusst werden können (Kategorie 3).

Diese Zuordnung gilt für ein vollständig aufgebautes Fahrzeug, bei dem sämtliche Realversuche durchgeführt werden können. In der frühen Phase ist jedoch in der Regel keine Hardware vorhanden und es werden Bewertungen von Eigenschaften fast ausschließlich mit Hilfe von Simulationen vorgenommen. Das trifft auf Aussagen zum Design anhand virtueller Design-Modelle ebenso zu wie auf Bewertungen des Beschleunigungsverhaltens mittels Längsdynamik-Simulationen.

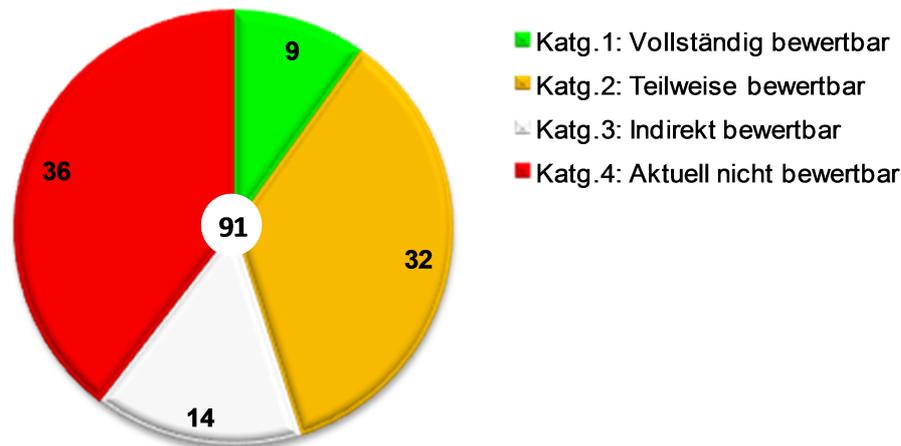


Abbildung 5-1 Bewertbarkeit der Eigenschaften über Zielwerte auf Basis der Audi-Eigenschaftsstruktur

Es ist ein generelles Ziel der Konzeptentwicklung, die Weichen für den anschließenden Entwicklungsprozess richtig zu stellen, ohne eine Detailauslegung des Fahrzeugs vorzunehmen. Viele kundenrelevante Eigenschaften, die in späteren Phasen des Auslegungsprozesses definiert werden, haben in der frühen Phase nur geringe Relevanz. Ein Beispiel dafür ist das Schaltverhalten eines Automatikgetriebes. Zur Umsetzung ist zwar eine Entscheidung für das richtige Getriebe in der Konzeptphase notwendig, die kundenrelevante Ausprägung kann jedoch über Applikation des Schaltverhaltens bis in die Realisierungsphase an spezifische Bedürfnisse angepasst werden.

Bei der Automatisierung des Entwicklungsprozesses muss eine Auswahl an zu berücksichtigenden Eigenschaften getroffen werden. Dabei wurden folgende Kriterien definiert:

1. Die Eigenschaft kann bereits in der frühen Phase über einfache, mathematische Simulationsmodelle abgebildet werden.
2. Die Eigenschaft hat hohe Konzeptrelevanz, wird also bereits in der frühen Phase grundlegend definiert und kann später nur mit großem Änderungsaufwand angepasst werden.

Von den 55 bewertbaren Eigenschaften vollständig aufgebauter Fahrzeugen aus Abbildung 5-1 erfüllen insgesamt fünf vollständig und neun teilweise bewertbare Eigenschaften diese beiden Kriterien (Abbildung 5-2).

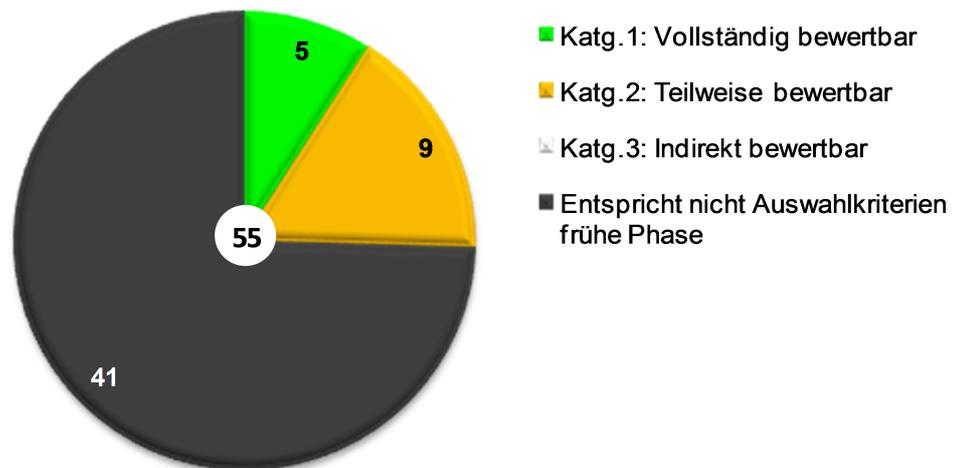


Abbildung 5-2 Abbildung von Eigenschaften über das EOKET

Für diese in Summe 14 Eigenschaften ist es sinnvoll und möglich, in der frühen Phase eine Aussage zu treffen und somit eine Umsetzung im EOKET zu realisieren (Tabelle 5-1).

Katg. 1: Vollständige Bewertbarkeit	Katg. 2: Teilweise Bewertbarkeit
• Kippempfindlichkeit	• Design
• Fahrzeuggewicht	• Querdynamik
• Kundenverbrauch	• Längsdynamik
• Anschaffungskosten	• Steigfähigkeit
• Emissionsfreie Reichweite	• Raumkomfort vorne
	• Raumkomfort hinten
	• Transport von Personen
	• Transport von Gütern
	• Batterieladen

Tabelle 5-1 Bewertbare Eigenschaften im EOKET

Um diese 14 Eigenschaften zu bewerten, werden insgesamt 28 mess- und bewertbare Eigenschaftsgrößen gewählt. Diese bestehen aus den Quantifizierungen der vollständig bewertbaren Eigenschaften sowie aus den Bewertungsgrößen der teilweise quantifizierbaren Eigenschaften.

Diese 28 Eigenschaften werden zu Eigenschaftsfeldern ähnlich den Audi-Eigenschaftsfeldern zusammengefasst (Abbildung 5-3).

<p>1. Design</p> <p>Überhang vorne Überhang hinten Radstand Verhältnis Höhe / Breite Räder Durchmesserklasse</p>	<p>4. Raumkomfort</p> <p>Kopffreiheit vorne Kopffreiheit hinten Beinfreiheit hinten</p>
<p>2. Querdynamik</p> <p>Anlenkverhalten Eigenlenkverhalten Pendelstabilität Kippsicherheit</p>	<p>5. Wirtschaftlichkeit / TCO</p> <p>Leergewicht Stromkosten (Kundenverbrauch) Anschaffungskosten</p>
<p>3. Längsdynamik</p> <p>Beschleunigung 0-60km/h Beschleunigung 0-100km/h Elastizität 40-60km/h Höchstgeschwindigkeit Anfahrsteigfähigkeit Dauergeschwindigkeit bei 15% Steigung</p>	<p>6. Alltagstauglichkeit</p> <p>Anzahl Sitzplätze Kofferraumvolumen Zuladung Wendekreis</p>
	<p>7. Reichweite / Batterieladen</p> <p>Reichweite (KUV / NEFZ) KUV-Betriebszeit Ladezeit (Normalladen)</p>

Abbildung 5-3 Eigenschaftsfelder und Eigenschaften im EOKET

Im Vergleich zwischen Audi- (Abbildung 2-2) und EOKET-Eigenschaftsfeldern (Abbildung 5-3) fällt auf, dass die Felder „Information & Kommunikation“ sowie „Qualität & Zuverlässigkeit“ im EOKET nicht berücksichtigt werden. Dies ist vor allem durch die geringen Beeinflussungsmöglichkeiten in der frühen Phase begründet. Die „Sicherheit“ wird im EOKET nicht als Eigenschaftsfeld bewertet. Vorhalte für Crashlängen wurden zur Einhaltung der Schutzzonen implementiert. Weitere Sicherheitsaspekte sind jedoch mit einfachen physikalischen Modellen kaum bewertbar. Zudem wird die „Geländetauglichkeit“ vernachlässigt, weil für Elektrofahrzeuge, zumindest in naher Zukunft, nur geringe Anforderungen bestehen. Die Eigenschaft „Reichweite“ wird auf die erste Ebene gesetzt, weil diese Größe einen der wichtigsten und kritischsten Aspekte bei der Beurteilung von Elektrofahrzeugen darstellt.

Ziel der Eigenschaftsauswahl ist eine ganzheitliche Bewertung der Fahrzeugkonzepte bei Abbildung möglichst vieler relevanter Eigenschaften. Im Vergleich zu anderen Fahrzeugoptimierungsansätzen [Egh11; Kuc11b], in denen nur einige wenige Eigenschaften berücksichtigt werden, ist die Anzahl von 28 Eigenschaften als sehr umfassend einzustufen.

5.2 Entwicklung der Korrelationsfunktionen

Für die zuvor definierten Eigenschaften werden in Schritt ❶ des Prozesses (Kapitel 4.3) strategische Ziele als Eingangswerte benötigt. Diese Zielwerte auf der Eigenschaftswerteskala müssen in Prozessschritt ❷ auf physikalische Zielwerte übertragen werden. Dazu werden Korrelationsfunktionen gebildet, die den Zusammenhang zwischen Eigenschaftswerten und den dafür notwendigen physikalischen Zielwerten abbilden. Die Korrelationsfunktionen sollten den Kundenanspruch der angestrebten Zielgruppe möglichst gut abbilden.

Verschiedene Verläufe der Korrelationsfunktion sind denkbar. Möglich wäre es, die Korrelationen für jede einzelne Eigenschaft über Marktstudien zu ermitteln. Die Bewertungsschemata von Automobilfachzeitschriften wie der AMS [AMS] bieten jedoch bereits eine gute Grundlage für die aktuelle Eigenschaftsbewertung einer breiten Mehrheit der Kunden. Allerdings gibt es für einige elektrifizierungsspezifische Eigenschaften noch keine Testschemata von Automobilzeitschriften und auch Marktstudien sind aufgrund der kleinen Stichprobe von Elektrofahrzeugkunden nicht aussagekräftig.

Die Entwicklung in der frühen Phase zielt auf Fahrzeuge ab, die erst in einigen Jahren auf dem Markt implementiert werden. Deswegen sind Annahmen über die Entwicklung der Bewertungskorrelationen bis zur Vermarktung des entsprechenden Fahrzeugs zu treffen. Es ist schwierig, Zukunftsprognosen aus Marktstudien abzuleiten, weil die meisten Kunden keine Aussagen über künftige Bedürfnisse treffen können. Deshalb sollte als Prämisse die Gestaltung der Korrelationsfunktionen aus möglichst ganzheitlicher Unternehmenssicht gesetzt werden. Die Bewertungsschemata der Fachzeitschriften können als Orientierung dienen, jedoch sollte die Korrelationsbestimmung auf die erwartete Werteentwicklung der Zielkunden bis zum Serienstart im Fokus stehen.

Beim Gestalten der Korrelationsfunktionen muss ein physikalischer Wert für die minimale Eigenschaftserfüllung definiert werden. Erreicht ein Konzept in nur einer Eigenschaft einen Wert unter dieser Mindestbefüllung, also dem Eigenschaftswert fünf, so gilt das Konzept als nicht marktfähig (Kapitel 2.1.3). Deshalb wird dieser Bereich als Ungültigkeitsbereich bezeichnet (Abbildung 5-4). Die Werte der Mindestbefüllung hängen stark vom angestrebten Segment bzw. der Zielgruppe ab. Für ein Kleinwagen Hatch-Fahrzeug kann beispielsweise eine Beschleunigung von 0-100 km/h in bis zu 25 s akzeptabel sein, für ein Mittelklasse-Cabrio sollten Werte von 12 s jedoch nicht überschritten werden. Meist ergeben sich die Forderungen für Mindestbefüllungen aus

Analysen der über Jahre etablierten minimalen Eigenschaftsausprägungen eines spezifischen Fahrzeugsegments [Schl11, S. 45 f.]. Diese gewachsenen Anforderungen sind bei der Entwicklung zukunftsweisender Fahrzeuge jedoch stets kritisch zu überdenken und zusätzlich mit strategischen Ansprüchen des Unternehmens abzugleichen.

Ebenso muss für jede Eigenschaft ein Wert für die Optimalerfüllung definiert werden. Ab diesem physikalischen Wert wird der Eigenschaftswert zehn erreicht. Eine bessere Erfüllung dieses Werts führt also zu keiner weiteren Verbesserung der Kundenwertung. Bei der Höchstgeschwindigkeit eines Kleinwagens wird der Maximalerfüllungsbereich bereits ab einem Wert von 210 km/h erreicht, weil für diese Fahrzeuggattung höhere Geschwindigkeiten kaum sinnvoll sind. Bei einem Oberklassefahrzeug liegt die Grenze erst bei 250 km/h (Abbildung 5-4).

Die Spanne zwischen Mindest- und Optimalerfüllung wird in Analogie zum Modell von Kano (Kapitel 2.1.3) in drei Bereiche eingeteilt (Abbildung 5-4). So folgt der Mindest-erfüllung zunächst der Basisbereich. In diesem Bereich erhält der Kunde eine Ausprägung, die er erwartet, die bei ihm jedoch keine Begeisterung auslöst. Beim Eigenschaftswert sechs geht die Korrelationskurve in den Leistungsbereich über und steigt linear an. Eine bessere Erfüllung des physikalischen Werts führt hier direkt proportional zu einer besseren Erfüllung des Eigenschaftswerts. Der Übergang aus dem Leistungsbereich in den Maximalerfüllungsbereich kann gemäß dem Kano-Leistungskriterium einen progressiven Verlauf oder eine degressive Abflachung aufweisen. Dies ist abhängig von der Einschätzung der Kundenwahrnehmung bei hohen Ausprägungen des physikalischen Werts. So kann es einen gewissen Schwellwert geben, bis zu dessen Erreichung die Kundenbegeisterung stark ansteigt. Bei weiterem Überschreiten steigt die Begeisterung jedoch kaum weiter an. Es gibt ebenso Fälle, in denen sich die Eigenschaftswertung mit höherer Erfüllung degressiv dem Eigenschaftswert zehn annähert.

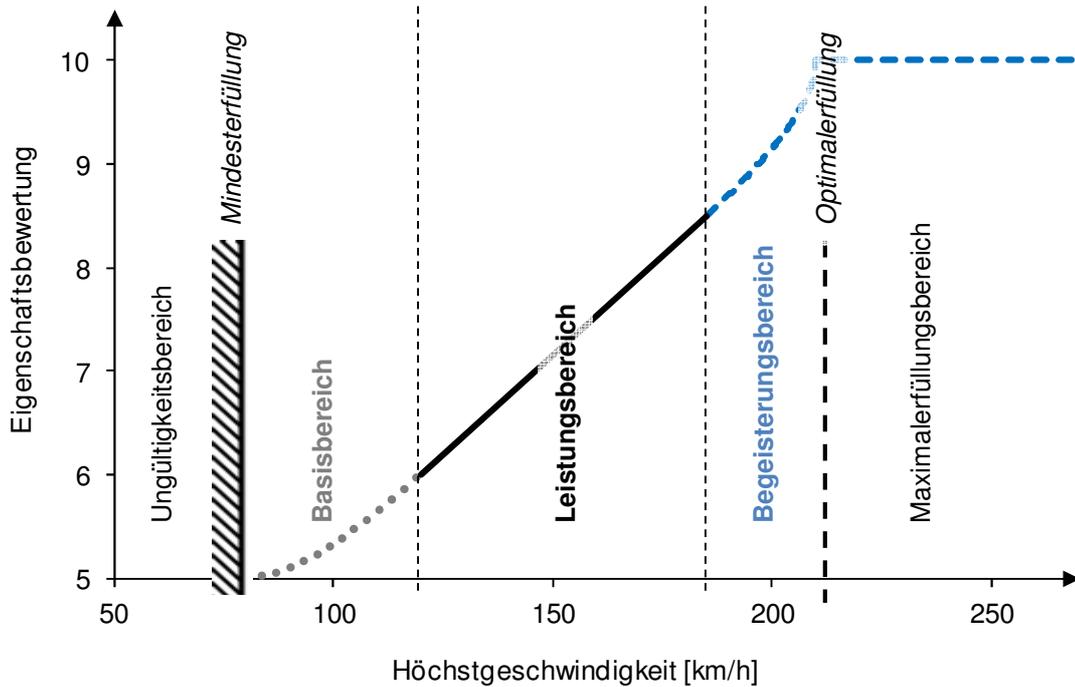


Abbildung 5-4 Bereiche zur Definition einer Korrelationsfunktion

Im Vergleich zu den Bewertungsschemata der Automobilzeitschriften wie der AMS (Abbildung 2-5) werden die Eigenschaftskorrelationen im EOKET nicht mit einem stufenförmigen, sondern einem stetig steigenden oder stetig fallenden Verlauf definiert. Dies ist eine notwendige Bedingung für die automatisierte Konzeptoptimierung, weil die Zielfunktion der Optimierungsalgorithmen dadurch stetig ist und somit die globalen Optima deutlich schneller gefunden werden. Weiterhin unterscheidet sich das EOKET Bewertungssystem von den AMS-Korrelationen darin, dass die Mindesterfüllung der EOKET-Korrelation und die geringste Ausprägung der AMS-Punktebewertung häufig voneinander abweichen. Dies liegt daran, dass bei Tests der AMS nur bereits zugelassene und somit marktfähige Fahrzeuge geprüft werden, in der Konzeptentwicklung diese Marktfähigkeit jedoch erst über kritischere Mindesterfüllungen sichergestellt werden muss. Zudem können Prognosen über die Werteentwicklung der angestrebten Zielgruppe dazu führen, den Verlauf sowie die Minimal- oder Optimalerfüllungen bewusst vom Bewertungsschema der AMS abweichen zu lassen (Beispiele siehe Abbildung 7-2).

5.3 Aufbau des technischen Fahrzeugkonzepts

In Schritt ⑤ des eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozesses aus Abbildung 4-2 ist ein technisches Fahrzeugkonzept abzuleiten, das den gesetzten Eigenschaftsanforderungen möglichst gut entspricht. Nach dem Treffen von Grundkonzept-

entscheidungen werden die Werte der Einflussgrößen festgelegt. Die Umsetzbarkeit des Konzepts ist über die Einhaltung der Gewichts- und Package-Bedingungen in Prozessschritt ④ zu plausibilisieren.

5.3.1 Grundkonzeptentscheidungen und Module

Beim Aufbau des technischen Konzepts sind die wesentlichen Grundkonzeptentscheidungen zu treffen, wie sie in Kapitel 3.3.1 beschrieben wurden. Im Rahmen des EOKET-Projekts wurde eine Vorgehensweise zur eigenschaftsorientierten Festlegung der Grundkonzeptentscheidungen entwickelt [Mat12, S. 120-124]. Basis dafür sind die Auswirkungen der Grundkonzepte auf die Eigenschaften sowie die Abhängigkeiten der Grundkonzepte untereinander.

Das Verfahren geht davon aus, dass bereits durch die Wahl eines Fahrzeugsegments und -derivats Entscheidungen für viele Grundkonzepte getroffen oder zumindest Konzeptalternativen ausgeschlossen werden können. So ist in einem Sportwagen eine Sitzplatzanzahl größer 2+2 in der Regel nicht zielführend, während in einem SUV mindestens vier vollwertige Sitzplätze gefordert werden. Diese fahrzeugsegment- und fahrzeugderivatspezifisch getroffenen Entscheidungen beeinflussen wiederum die Wahl anderer Grundkonzepte. So werden teilweise Konzeptalternativen gefordert oder zumindest begünstigt, während alternative Lösungsmöglichkeiten benachteiligt oder sogar ausgeschlossen werden. Ein 2+2-Sitzer benötigt keine vier Türen, während dies bei einem 7-Sitzer zwingend notwendig ist. Diese Zusammenhänge werden über Faktoren, die den Ausschluss bzw. die Begünstigung von Konzeptalternativen beschreiben, abgebildet.

Neben der gegenseitigen Beeinflussung der Grundkonzepte spielt der Einfluss auf die Eigenschaftserfüllung eine wichtige Rolle. Schließlich sollen auf Basis der strategischen Positionierung des Fahrzeugs die Grundkonzeptentscheidungen richtig gefällt werden.

Unter Anwendung der Beziehungsmatrix des House of Quality können die beeinflussten Eigenschaften der jeweiligen Grundkonzeptentscheidung gefunden werden. Auf Basis der Eignung der Grundkonzeptalternativen für eine optimale Eigenschaftserfüllung wird eine Reihenfolge aufgestellt. So ist etwa der Frontantrieb für einen geringen Verbrauch bei Elektrofahrzeugen tendenziell besser geeignet, weil er das höhere Rekuperationspotenzial an der Vorderachse nutzt.

Für die gesetzte Gewichtung der Eigenschaften erfolgt über ein Summenprodukt die Gesamtpriorisierung (Abbildung 5-5).

			Grundkonzeptalternativen			
			Frontmotor mit Vorderradantrieb		Heckmotor mit Heckantrieb	
		Gew.	Vor- / Nachteile	Rang	Vor- / Nachteile	Rang
Fahrzeugeigenschaften	Lenkverhalten	1	Belastung der Lenkanlage durch hohe Vorderachslast	2	Größerer Lenkeinschlag möglich	1
	Kurvenverhalten	3	Untersteuertendenz	2	Übersteuertendenz, fahrdynamisch im Vorteil	1
	Bremsen	2	Zu geringe Hinterachslast	2	Gute Bremskraftverteilung möglich	1
	Verbrauch	3	Hohe Rekuperationsleistung möglich	1	Hauptbremskraftanteil an der Vorderachse nicht rekuperierbar	2
	Kofferraumvolumen	2	Hohe Flexibilität im Hinterwagen	1	Einschränkungen über Antrieb im Heck möglich	2
Gesamt	Summenprodukt			17		16
	Priorisierung			2		1

Abbildung 5-5 Vorgehen für eigenschaftsorientierte Grundkonzeptentscheidungen auf Basis [Mat12, S. 25]

5.3.2 Einflussgrößen

Bei der Ableitung von Fahrzeugkonzepten sind neben den Grundkonzeptentscheidungen die Werte der Einflussgrößen wichtig. Die meisten dieser Größen werden mit Erfahrungswerten belegt und im Laufe des Optimierungsprozesses angepasst.

Zu diesen Einflussgrößen zählen viele geometrische Größen sowie die wichtigsten Eckdaten des elektrischen Antriebsstrangs. Zusätzlich werden weitere Gesamtfahrzeuggrößen direkt festgelegt (Tabelle 5-2).

Geometrische Größen	Größen des Antriebsstrangs	Gesamtfahrzeuggrößen
<ul style="list-style-type: none"> • Radstand [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> • Batteriekapazität [kWh] 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Traglasten der Achsen [kg]
<ul style="list-style-type: none"> • Vorderer und hinterer Überhang [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> • E-Maschinenleistung [kW] 	<ul style="list-style-type: none"> • c_w-Wert [-]
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeughöhe und -breite [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtübersetzung [-] 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht Basisfahrzeug [kg]
<ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • ...

Tabelle 5-2 Einflussgrößen zur Variation im EOKET

5.3.3 Plausibilisierung des Antriebsstrangpackage

Bei der Plausibilisierung des Fahrzeugkonzepts gemäß Prozessschritt ④ (Abbildung 4-2) ist vor allem die Integration des Antriebsstrangs in das Fahrzeug zu überprüfen. Dabei ist sicher zu stellen, dass die Batterie mit der gewünschten Kapazität sowie die E-Maschine mit der geforderten Leistung bei der gewünschten Antriebsform im Fahrzeug untergebracht werden können und dabei weder Package- noch Gewichtsbeschränkungen verletzt werden.

Dafür werden die E-Maschinen entsprechend der vorgegebenen Antriebsform im Package positioniert. Je Achse kann jeweils eine Zentralmaschine samt Differential und Leistungselektronik integriert werden. Daraus ergeben sich die Optionen Front-, Heck- und Allradantrieb. Radnabenmotoren werden aufgrund ihrer bisher geringen Aussichten auf einen Serieneinsatz nicht vorgehalten. Ebenso werden radnahe Konfigurationen nicht berücksichtigt, weil konzeptionell nur geringe Unterschiede zu Anordnungen mit Zentralmotoren bestehen. Bei Allradantrieb wird die Gesamtantriebsleistung vereinfachend zu gleichen Teilen auf den vorderen und hinteren Motor verteilt. Je Achse müssen E-Maschine und Leistungselektronik in Abhängigkeit vom zur Verfügung stehenden Bauraum in Relation zur Achse positioniert werden. In Abbildung 5-6 sind verschiedene automatisiert generierte Packageanordnungen in Abhängigkeit vom vorderen Überhang dargestellt.

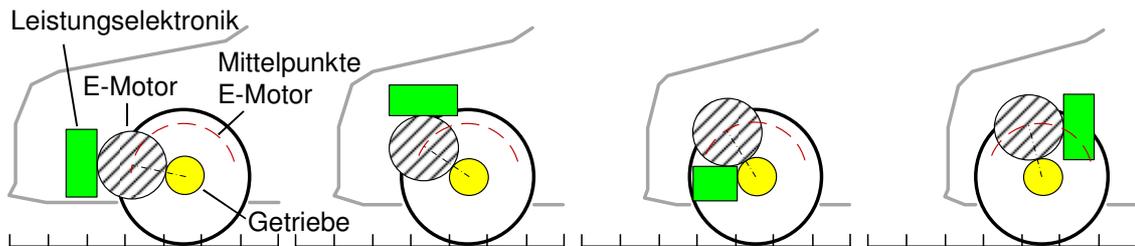


Abbildung 5-6 Automatisierte Positionierung der E-Maschine und der Leistungselektronik aus [Gia11, S. 37]

Der Bauraum, das Gewicht und das Trägheitsmoment der E-Maschine lassen sich auf Basis bestehender Maschinen in Abhängigkeit von der gewünschten Maximalleistung berechnen [Gia11, S. 37 f.]. Die Länge wird um den Faktor k_l sowie der Durchmesser um den Faktor k_d skaliert, unter Einhaltung des Wachstumsgesetzes zur Erreichung der gewünschten Leistung (5-1).

$$P_{EM} = k_l \cdot k_d^2 \cdot P_{Basis-EM} \quad (5-1)$$

Wie von Klein et al. empfohlen, wird bei Erhöhung der Leistung zunächst nur die Länge der E-Maschine skaliert, um den Skaleneffekt gleicher Blechpakete zu nutzen [Kle11]. Kann hierdurch aufgrund von Bauraumbeschränkungen die gewünschte Leistung nicht erreicht werden, wird zusätzlich der Durchmesser erhöht. Sind die Faktoren k_l und k_d festgelegt, werden die Abmaße der skalierten E-Maschine berechnet.

$$l_{EM} = k_l \cdot l_{Basis-EM} \quad ; \quad d_{EM} = k_d \cdot d_{Basis-EM} \quad (5-2)$$

Nach den Antriebsmaschinen werden die Passagiere entsprechend Kapitel 5.4.4 im Fahrzeug positioniert. Die verbleibenden Bauräume können zur Unterbringung der Batterie genutzt werden. Es stehen dafür die Technikräume im Vorderwagen, Mittel-tunnel, Unterboden, Fond und Kofferraum zur Verfügung (Abbildung 5-7). Jedes einzelne Bauraumvolumen wird unter Beachtung gesetzter Restriktionen sowie in Abhängigkeit von den Maßkonzeptvorgaben berechnet. So sind Sicherheitsabstände zu den Seiten sowie nach vorne und hinten vorzuhalten, um Crash-Anforderungen zu erfüllen. Im EOKET werden minimal einzuhaltende Sicherheitsbereiche vorgehalten, um die von Schöneburg und Justen definierte Schutzzone der Standardcrashtests zu berücksichtigen [Schö11]. Die Fahrzeugbreite ist ausschlaggebend für die Möglichkeit einer Positionierung der Batterie zwischen den Passagieren im Mittel-tunnel. Eine Positionierung im Unterboden hängt von der Fahrzeughöhe in Kombination mit der Bodenfreiheit ab. Es kann zusätzlich entschieden werden, dass einzelne Bauräume nicht genutzt werden sollen. So kann beispielsweise der Vorderwagen gesperrt

werden, um das Sicherheitsrisiko einer Batteriebeschädigung zu reduzieren. Ebenso ist es möglich den Bauraum des Mitteltunnels nicht zu nutzen, um einen ebenen Fahrzeugboden im Innenraum darzustellen.

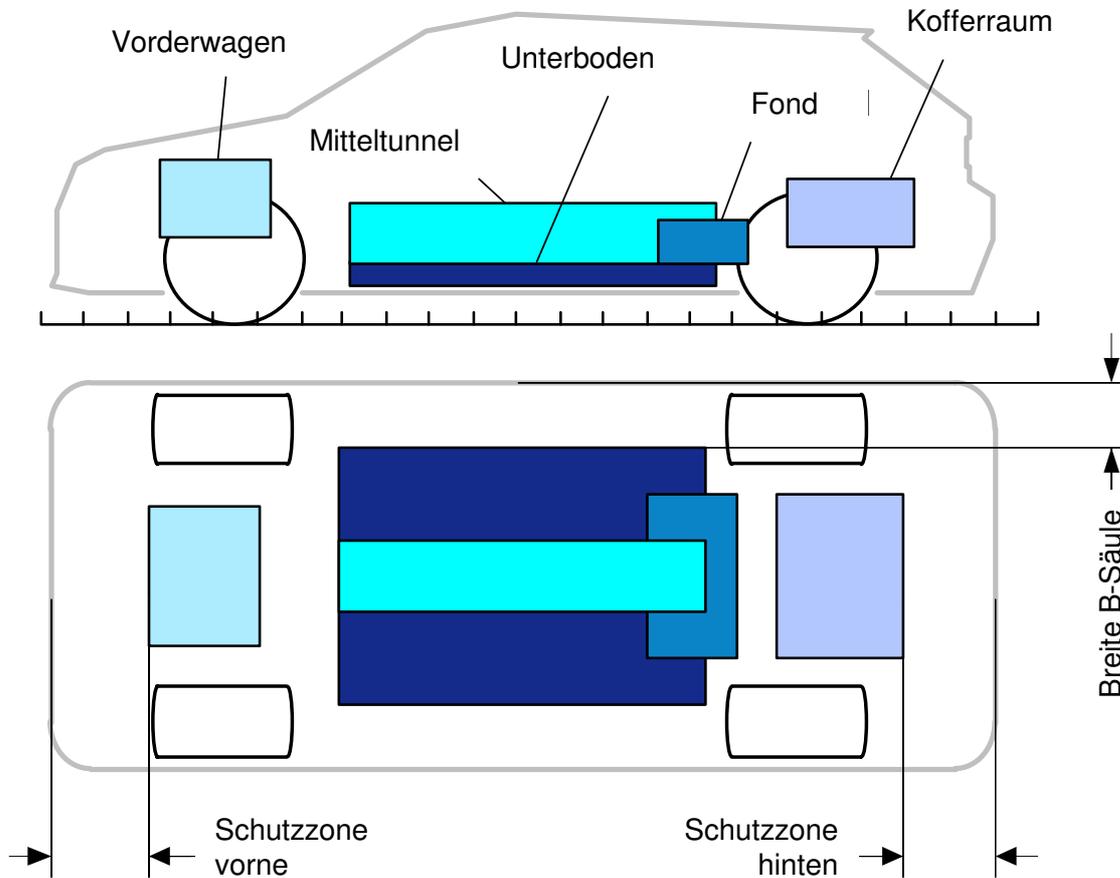


Abbildung 5-7 Mögliche Bauräume zur Positionierung der Batterie aus [Gia11, S. 39]

In Abhängigkeit von der gewünschten Batteriekapazität kann das zur Verfügung stehende und freigegebene Volumen sinnvoll mit Batteriezellen aufgefüllt werden. Zunächst muss die Seriell- und Parallelschaltung der Zellen so vorgenommen werden, dass die Spannungslage der Batterie im Auslegungsbereich der Leistungselektronik und der E-Maschine liegt. Im EOKET liegt der gültige Batteriespannungsbereich zwischen 300 V und 450 V, weil die meisten aktuell verfügbaren Leistungselektroniken in diesem Bereich arbeiten. Bei der Batterieauslegung kommt es vor, dass angestrebte Kapazitäten über die möglichen Kombinationen aus Seriell- und Parallelschaltung nicht erreicht werden (schraffierte Bereiche in Abbildung 5-8). So kann im Beispiel von Abbildung 5-8 eine Kapazität von 15 kWh über eine einsträngige Batterie nicht dargestellt werden, weil sich bei reiner Seriellschaltung eine zu hohe Spannung einstellt. Die Umsetzung über eine zweisträngige Batterie ist ebenso wenig möglich, weil in diesem Fall die Spannung des Batteriepacks unterhalb des Auslegungsbereichs

zu liegen kommt. Die nicht darstellbaren Batteriekapazitäten hängen dabei direkt von der Kapazität der verwendeten Zellen ab.

Neben der Auslegung auf einen Spannungsbereich sollten die Maximal- und die Dauerleistung der Batterie höher als die entsprechenden Leistungsdaten der E-Maschine sein.

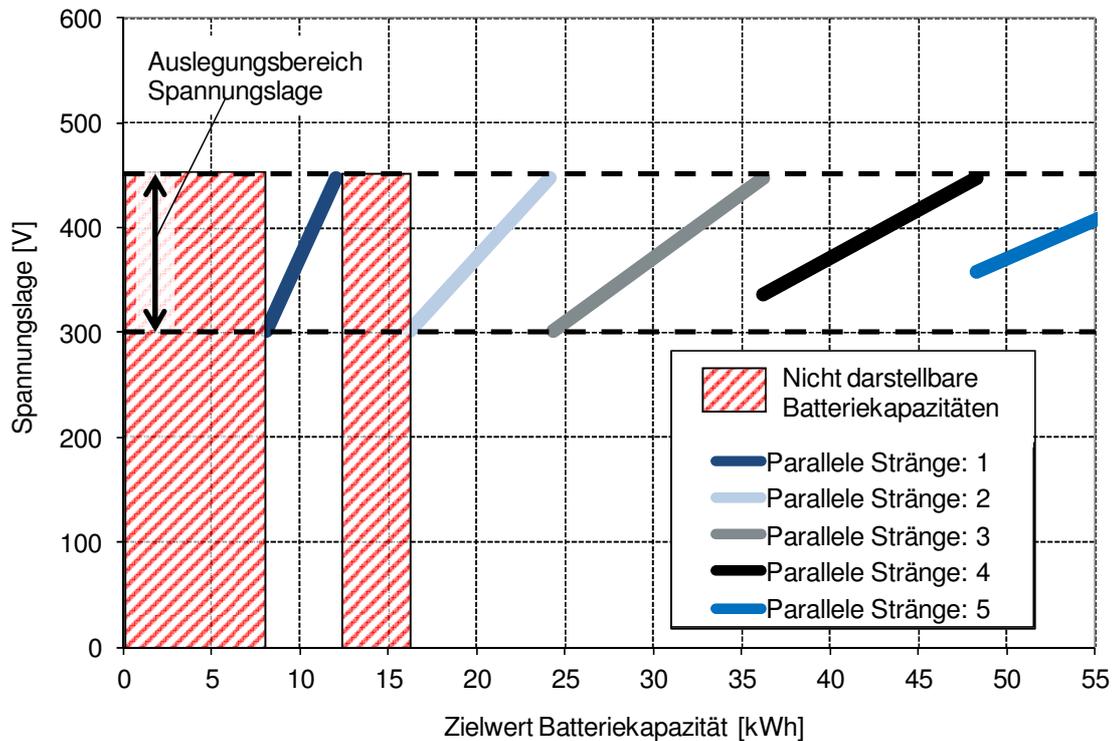


Abbildung 5-8 Batterie-Auslegung in Abhängigkeit von der Spannungslage

Die Verschaltung und geometrische Verbindung von Batteriezellen zu Batteriemodulen bzw. zum Batteriepack wird im Modell nicht implementiert. Um die Batterie dennoch möglichst realitätsnah abzubilden, wird das Batteriepackvolumen samt Trägerstruktur der Module über einen empirischen Faktor auf Basis des Gesamtvolumens aller Zellen ermittelt. Neben der Verschaltung wird die Kühlung der Zellen berücksichtigt. Dieser Faktor wurde auf Basis einer Analyse von Batteriepacks in realen Fahrzeugen [Ren09; Ban10; AMS11; Mya11; MUT11; Tes11; Sma13] auf den Wert 1,5 für prismatische Zellen und auf den Wert 2,0 für Rundzellen des Typs 18650 festgelegt.

Die Positionierung der Batterie im Fahrzeug ist komplex und muss einige konkurrierende Auslegungsziele berücksichtigen. Die Verteilung der Batteriezellen in den Bauräumen muss so vorgenommen werden, dass die jeweiligen Achs- und Radlasten nicht überschritten werden. Zudem ist eine Soll-Achslastverteilung anzustreben, die im Zielbereich der jeweiligen Antriebsart liegt. Darüber hinaus sollte für ein gutes

querdynamisches Verhalten, das Massenträgheitsmoment um die Hochachse möglichst gering ausfallen und ein tiefer Schwerpunkt erreicht werden.

5.3.4 Berechnung der Gewichte

Viele Simulationsmodelle benötigen als Eingangsparameter Aussagen zum Gesamtgewicht des Fahrzeugs. Grundsätzlich sind drei Aspekte bei der Betrachtung des Gewichts zu berücksichtigen:

- Gesamtgewicht: DIN-Leer (ohne Fahrer) bzw. EG-Leer (mit Fahrer)
- Trägheitsmoment um die Hochachse
- Masseverteilung: Achslastverteilung, absolute Achs- und Radlasten, Schwerpunkthöhe

Das DIN-Leergewicht ergibt sich aus einem abgeschätzten oder vorgegebenen Gewicht für ein Basisfahrzeug ohne Antriebsstrang, zuzüglich der Gewichte für die Komponenten Batterie, E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe.

$$M_{DIN-Leer} = M_{Basisfz} + M_{Batt} + M_{EM} + M_{LE} + M_{Getr} \quad (5-3)$$

Das EG-Leergewicht umfasst zusätzlich einen Fahrer mit 68kg und 7kg Gepäck.

$$M_{EG-Leer} = M_{DIN-Leer} + 75kg \quad (5-4)$$

Für die Berechnung des Gesamtfahrzeugträgheitsmoments Θ_{Gesfzg} , müssen die Trägheitsmomente der einzelnen Komponenten auf den Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs bezogen addiert werden.

$$\Theta_{Gesfzg} = \Theta_{Basisfz} + \Theta_{Batt} + \Theta_{EM} + \Theta_{LE} + \Theta_{Getr} \quad (5-5)$$

Für das Trägheitsmoment jeder Komponente bezogen auf das Koordinatensystem des Gesamtfahrzeugs $\theta_{Komp,Gesfzg}$ muss nach dem Steinerschen Parallelachsen-Theorem [Pau07, S. 83 f.] der senkrechte Abstand d_{Komp} des Schwerpunkts der Komponente vom Schwerpunkt des Basisfahrzeugs bestimmt werden. Der Steiner-Anteil ergibt sich aus dem Produkt der Masse der Komponente M_{Komp} und dem Quadrat der Länge d_{Komp} . Zudem ist das Trägheitsmoment der jeweiligen Komponente θ_{Komp} bezogen auf deren Schwerpunkt zu addieren.

$$\Theta_{Komp,Gesfzg} = \Theta_{Komp} + M_{Komp} d_{Komp}^2 \quad (5-6)$$

Die Achslastverteilung M_{VA} / M_{HA} ergibt sich aus der Betrachtung des Kräfte- und Momentengleichgewichts um die Aufstandspunkte der Räder der Vorderachse x_{VA} und der Hinterachse x_{HA} ((5-7), (5-8)).

$$M_{VA} = M_{Basisfzg,VA} + M_{Batt} \frac{x_{Batt} - x_{HA}}{x_{VA} - x_{HA}} + M_{EM} \frac{x_{EM} - x_{HA}}{x_{VA} - x_{HA}} + M_{LE} \frac{x_{LE} - x_{HA}}{x_{VA} - x_{HA}} + M_{Getr} \frac{x_{Getr} - x_{HA}}{x_{VA} - x_{HA}} \quad (5-7)$$

$$M_{VA} / M_{HA} = M_{VA} / (M_{DIN-Leer} - M_{VA}) \quad (5-8)$$

Falls das Gewicht des Basisfahrzeugs nicht bekannt ist, kann es über empirische Faktoren in Abhängigkeit vom Fahrzeugvolumen und -derivat bestimmt werden. Eine Analyse der Gewichte von über 200 Fahrzeugen wurde von Yanni [Yan10] durchgeführt (Abbildung 5-9).

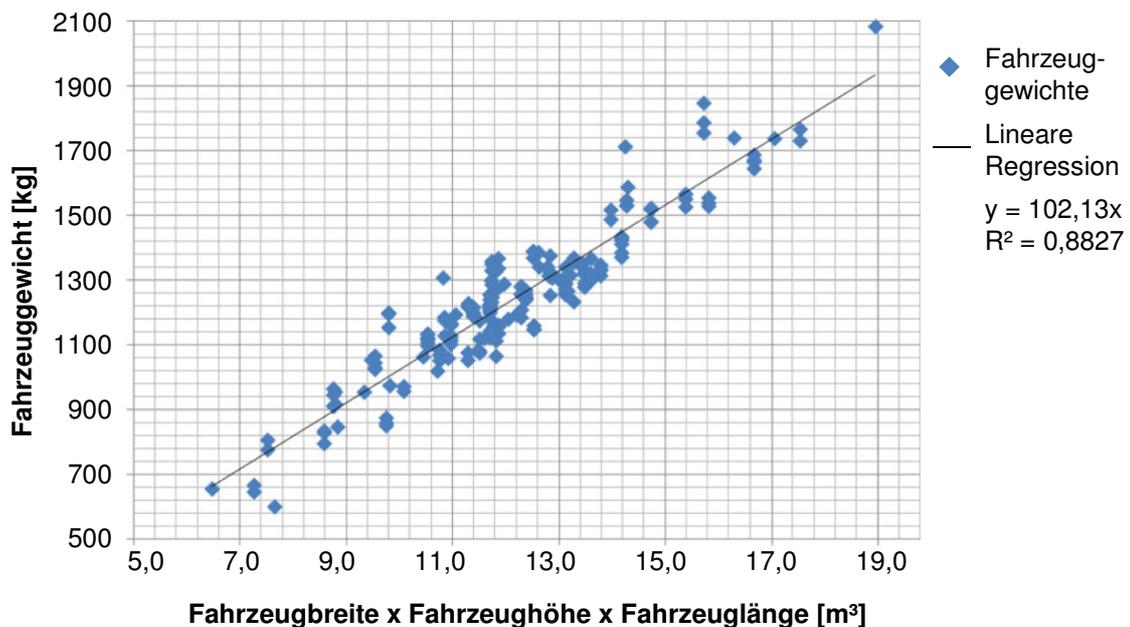


Abbildung 5-9 Regressionsanalyse Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit vom Volumen aus [Yan10]

Diese Studie definiert für Fahrzeuge ohne Hybridisierung die Regressionsfunktion (5-9), die das Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit von der Motorleistung und dem Fahrzeugvolumen bestimmt. Für Allrad, Diesel und Cabrio Varianten werden feste Zusatzgewichte angenommen.

$$M_{Fzg} = 1,38 P_{Mot} + 102 \text{kg} / \text{m}^3 V_{Fzg} + 70 \text{kg für Diesel} \quad (5-9)$$

80kg für Allrad
200kg für Cabrio

Eine Plausibilisierung dieser Formel an aktuellen Fahrzeugen zeigt, dass die Dichte von $S_{M,VFzg} = 102 \text{ kg/m}^3$ einen guten Mittelwert für die Ableitung der Gewichte darstellt.

	VW up! 1.0l MPI	Mini Cooper 1.6l TDI	BMW 328i	Audi A6 3.0l TDI	Mercedes S500	BMW X5 3.5dx
Länge [mm]	3540	3723	4624	4915	5116	4854
Breite [mm]	1641	1683	1811	1874	1899	1933
Höhe [mm]	1478	1407	1429	1455	1496	1776
Motorleistung [kW]	44	82	180	150	335	210
Leergewicht Herst.- Angabe [kg]	929	1090	1505	1645	1955	2140
Abgeschätztes Leergewicht [kg]	936	1082	1469	1654	1945	2140
Prozentuale Abweichung	0,8 %	-0,7 %	-2,4 %	0,5 %	-0,5 %	0,0 %

Tabelle 5-3 Plausibilisierung Regressionsfunktion zur Ableitung des Fahrzeuggewichts nach Yanni

Leichtbaufahrzeuge weichen zum Teil erheblich von der Ableitung anhand der Formel nach Yanni ab. Ein Audi A2 erreicht beispielsweise mit Hilfe seiner Aluminium-Karosserie einen Wert von 75 kg/m^3 und Konzeptstudien wie ein Audi Urban Concept sogar Werte an die 50 kg/m^3 (Tabelle 5-4).

	Audi Urban Concept	Opel Rak e	Porsche GT3 4.0l	Audi A2 1,4l FSI
Länge [mm]	3200	3000	4460	3826
Breite [mm]	1670	1200	1852	1673
Höhe [mm]	1190	1190	1280	1553
Motorleistung [kW]	15	10	368	55
Leergewicht [kg]	480	380	1360	820
Volumenfaktor [kg/m ³]	53	56	73	75

Tabelle 5-4 Volumenfaktoren von Leichtbaufahrzeugen

Um das Gewicht von Konzepten mit erhöhten Leichtbaumaßnahmen abzuschätzen, wird dem spezifischen Massenfaktor $S_{M,VFzg} = 102 \text{ kg/m}^3$ [Yan10] ein Leichtbaufaktor $S_{M,Leichtbau}$ überlagert (5-10).

$$M_{\text{Basisfzg}} = V_{\text{Fzg}} S_{M,VFzg} S_{M,Leichtbau} \quad (5-10)$$

Für die Berechnungen im EOKET werden drei Leichtbaustufen implementiert (Tabelle 5-5). Für gewöhnliche Fahrzeuge wird $S_{M,Leichtbau}$ auf den Wert 1,00 gesetzt. Wird ein erhöhter Aufwand zur Gewichtsreduzierung betrieben, nimmt $S_{M,Leichtbau}$ einen Wert von 0,75 an. Für Machbarkeitsstudien, wie Audi Urban Concept, wird $S_{M,Leichtbau} = 0,50$ gesetzt.

	Gewöhnliche Fahrzeuge z.B. Audi A3	Leichtbaufahrzeuge z.B. Audi A2	Machbarkeitsstudien z.B. Audi Urban Concept
Leichtbaufaktor $S_{M,Leichtbau} [-]$	1,00	0,75	0,50

 Tabelle 5-5 Stufen des Leichtbaufaktors $S_{M,Leichtbau}$

Neben dem Basisfahrzeuggewicht hat die Batterie den größten Anteil am Gesamtfahrzeuggewicht. Für eine Nennkapazität E_{Nenn} ergibt sich das Batteriegewicht in Abhängigkeit vom spezifischen Zellgewicht $S_{M,Zellen}$ und einem Vorhalt für Package und Kühlung $S_{M,PackKühl}$.

$$M_{\text{Batt}} = E_{\text{Nenn}} S_{M,Zellen} S_{M,PackKühl} \quad (5-11)$$

Lithium-Ionen Zellen erreichen aktuell gravimetrische Energiedichten von bis zu $S_{M,Zellen} = 200 \text{ Wh/kg}$ [Wal10, S. 87; Tüb11]. Im EOKET sind die Zelltypen „18650“ und

„Prismatische Zellen“ implementiert (Tabelle 5-6). Die 18650-Zellen weisen ein spezifisches Zellgewicht von 175 Wh/kg [Pan13; Son13] auf. Die prismatischen Zellen liegen bei 125 Wh/kg [A123Sy13; Saf13].

Das berechnete Gewicht wird bei beiden Zelltypen mit einem Faktor von $S_{M, PackKühl}$ für den Vorhalt von Package und Kühlung überlagert. Dieses Verhältnis $S_{M, PackKühl}$ zwischen Zellgewicht und Batteriepackgewicht wird in der Literatur zwischen 1,3 [Tüb11] und 1,65 [Sat13] angegeben und im EOKET auf den Wert 1,5 gesetzt.

Batteriezellentyp	18650 „Consumer Zellen“	Prismatisch „Automotive Zellen“
Spez. Gewicht Zellen $S_{M, Zellen}$ [Wh/kg]	175	125
Gewichtsfaktor für Package und Kühlung $S_{M, PackKühl}$ [-]	1,5	

Tabelle 5-6 Spezifisches Gewicht Batteriezellen und Faktor zur Berücksichtigung von Package und Kühlung

Das Trägheitsmoment der Batterie wird aus der Summe der Trägheitsmomente der einzelnen Batteriepacks sowie der entsprechenden Anteile nach Steiner ermittelt [Pau07, S. 83 f.]. Es wird vereinfachend von homogener Masseverteilung der Teilkörper ausgegangen und mit der Formel für Trägheitsmomente von Quadern gerechnet:

$$\Theta_{Batt} = \sum_i \left(\frac{1}{12} M_{Batt,i} (l_{Batt,i}^2 + b_{Batt,i}^2) + M_{Batt,i} d_{Batt,i}^2 \right) \quad (5-12)$$

Das Gewicht der E-Maschine lässt sich analog zu (5-1) gemäß dem Wachstumsgesetz für die entsprechende Maximalleistung bestimmen (5-13). Das Massenträgheitsmoment ergibt sich aus der Berechnung für einen Zylinder über die Querachse (5-14).

$$M_{EM} = k_1 \cdot k_d^2 \cdot M_{Basis-EM} \quad (5-13)$$

$$\Theta_{EM} = \frac{1}{4} M_{EM} \left(\frac{d_{EM}}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} M_{EM} l_{EM}^2 + M_{EM} d_{EM}^2 \quad (5-14)$$

Die Leistungselektronik und das Getriebe tragen im Verhältnis zu den Komponenten Batterie und E-Maschine einen relativ kleinen Teil zum Gesamtgewicht bei. Um den Rechenaufwand gering zu halten, wird die Masse der Leistungselektronik in

Abhängigkeit von der E-Maschinenleistung und das Gewicht des Getriebes in Abhängigkeit vom maximalen E-Maschinenmoment abgeschätzt [Gia11, S. 47-49].

5.4 Implementierung der Eigenschaftsbewertungsmodule

Für die Bewertung von Fahrzeugkonzepten in Prozessschritt ⑤ aus Abbildung 4-2 werden abstrahierte Simulationsmodelle benötigt. Ziel ist es, in einer kurzen Gesamtsimulationszeit von etwa einer Sekunde eine möglichst hohe Aussagegüte über die Eigenschaften zu erreichen. Für die Bestimmung der Simulationszeit wird ein aktuell üblicher PC für Office-Anwendungen mit einem Intel Core i5 Prozessor mit einer Taktfrequenz von 2,7 GHz und einem Arbeitsspeicher von 4 GB zugrunde gelegt. Im Folgenden wird die Implementierung vereinfachter Simulationsmodelle zur Bewertung der sieben Eigenschaftsfelder aus Abbildung 5-3 dargestellt.

Bei der Implementierung der Eigenschaftsbewertungsmodule werden theoretische (White Box) und experimentelle Modellbildung (Black Box) angewandt [Ise06, S. 27-29]. In den White Box Modellen werden die realen Systeme über die physikalischen Zusammenhänge nachgebildet, soweit dies auf einer abstrakten Ebene möglich ist. In den Black Box Modellen werden die Antwortverhalten der realen Systeme abgebildet, ohne das System in seinem Aufbau nachzubilden. Das White Box Verfahren wird bei eingeschränkter Komplexität und überschaubarem Aufwand zum Einsatz gebracht. Bei höherer Komplexität des realen Modells ist das Black Box Verfahren effektiver, um die Gesamtsimulationszeit gering zu halten. Die Kombination aus den beiden Verfahren, wie sie im vorliegenden Ansatz verfolgt wird, nennt Isermann [Ise06, S. 27-29] Grey Box Modellierung.

5.4.1 Design und Maßkonzept

Das Exterieur-Design lässt sich, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, der Gruppe der nur indirekt quantifizierbaren Eigenschaften zuordnen. Über ein entsprechendes Package und Maßkonzept werden nur die Bedingungen für die Verwirklichung eines guten Designs geschaffen. Die tatsächliche Erreichung kann jedoch nicht sichergestellt werden. Einige relevante Gesamtfahrzeugmaße haben sich als Schnittstellenparameter zwischen Entwicklung und Design etabliert. Die für die frühe Phase wichtigsten Größen sind der Radstand, der vordere und hintere Überhang, der Reifendurchmesser sowie das Verhältnis Fahrzeughöhe zu -breite (Abbildung 5-10).

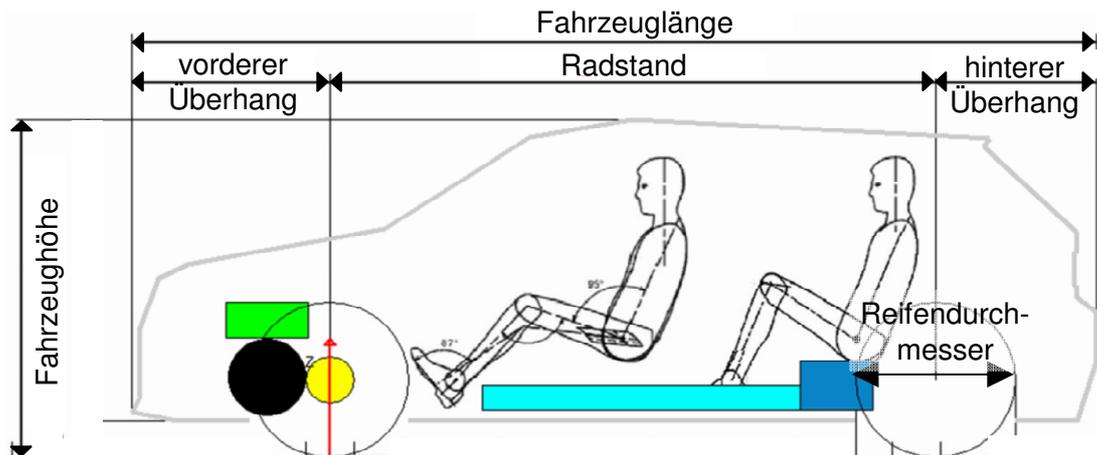


Abbildung 5-10 Geometrisches Fahrzeugmodell im EOKET

Abhängig von der Wahl des Fahrzeugsegments und -derivats werden Werte dieser geometrischen Maße definiert. Dafür wurden über eine Analyse von Fahrzeugen aus jedem Segment typische Werte der geometrischen Maße evaluiert [Zit10, S. 42-45]. Als Ausgangswert für ein A0-Segment-Fahrzeug liegt etwa der definierte Radstand bei 2469 mm, für ein D-Segment Fahrzeug bei 2992 mm. Das gewünschte Maßkonzept des Fahrzeugs aus Designsicht wird über Zieleingabe der Design-beeinflussenden geometrischen Größen bestimmt. Zusätzlich wird über Bewertungsfunktionen analog Kapitel 5.2 festgelegt, welche Fahrzeugproportionen zu präferieren sind. Da viele Eigenschaftsziele neben dem Design ebenso Anforderungen an die geometrischen Größen stellen, kommt es am Ende der Optimierungsschleife in der Regel zu Abweichungen vom aus Designsicht optimalen Maßkonzept.

5.4.2 Querdynamik

Bei der Modellierung der Querdynamik von Fahrzeugen gibt es diverse etablierte Ansätze mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden gemäß Kapitel 2.4.5. Um die Vorgabe der Gesamtsimulationszeit von einer Sekunde einzuhalten, eignet sich ausschließlich das Einspurmodell. Durch dieses Modell lässt sich die Querdynamik zumindest teilweise durch Aussagen zu Eigenlenkverhalten, Anlenkverhalten, Pendelstabilität und Kippsicherheit objektivieren.

Das Eigenlenkverhalten beschreibt die Stärke des Über- oder Untersteuerns im linearen Bereich, also bis etwa $4,0 \text{ m/s}^2$ Quereschleunigung [Rob10, S. 442]. Die Ausprägung des Eigenlenkverhaltens kann im Manöver der stationären Kreisfahrt ermittelt werden. Zur Ermittlung des Eigenlenkverhaltens wird der Eigenlenkgradient benötigt, der die Änderung des Lenkradwinkels δ bezeichnet. Dieser Winkel muss am

Lenkrad eingeschlagen werden, um bei steigender Querbewegung a_y auf einem konstanten Radius zu fahren [Rob10, S. 442 f.].

$$EG = \frac{d\delta}{da_y} \quad (5-15)$$

Bei untersteuernder Auslegung nimmt die Gierverstärkung bis zu einer gewissen Geschwindigkeit, der sogenannten „charakteristischen Geschwindigkeit“, zu und darüber hinaus wieder ab. Bei der charakteristischen Geschwindigkeit reagiert das Fahrzeug am empfindlichsten auf Lenkeinschläge [Schr10, S. 253]. Deswegen wird die charakteristische Geschwindigkeit als Kennwert für das Eigenlenkverhalten eines Fahrzeugs benutzt. Der Wertebereich liegt gewöhnlich zwischen etwa 65 km/h und 100 km/h.

$$v_{char} = \sqrt{\frac{l}{EG}} = \sqrt{\frac{l^2 \cdot c_v \cdot c_h}{M_{EG-Leer} \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v)}} \quad (5-16)$$

Das Anlenkverhalten beschreibt die Stabilität des Fahrzeugs bei Lenkbewegungen und kann über den Schwimmwinkelgradienten charakterisiert werden. Dieser Faktor beschreibt die Zunahme des Schwimmwinkels β bei steigender Querbewegung a_y und ergibt sich aus dem Verhältnis der Hinterachslast zur Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse c_h [Rob10, S. 442 f.]. Ziel der Fahrzeugauslegung ist ein möglichst kleiner Schwimmwinkelgradient, um ein direktes und nachvollziehbares Anlenkverhalten zu erreichen und damit eine hohe Fahrstabilität zu gewährleisten.

$$SG = \frac{d\beta}{da_y} = \frac{m \cdot l_v}{c_h \cdot l} \quad (5-17)$$

Die Pendelstabilität wird über das Dämpfungsmaß D und somit über die Reaktion eines Fahrzeugs auf eine Lenkwinkeländerung definiert. Sie ergibt sich analog [Rob10, S. 444] aus dem Quotienten von Abklingkonstante σ und ungedämpfter Eigenfrequenz ω_0 und entscheidet maßgeblich darüber, wie schnell durch ruckartige Lenkbewegungen verursachte Störungen abklingen. Ziel der Auslegung ist ein möglichst hohes Dämpfungsmaß, um fahrdynamische Sicherheit zu gewährleisten.

$$D = \frac{\sigma}{\omega_0} = \frac{\Theta_{Fzg}^z \cdot (c_v + c_h) + m_{Fzg} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2)}{2 \cdot \sqrt{\Theta_{Fzg}^z \cdot m_{Fzg} \cdot (m_{Fzg} \cdot v^2 \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + c_v \cdot c_h \cdot l^2)}} \quad (5-18)$$

Einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Kippsicherheit bzw. des Überschlagsrisikos von Fahrzeugen bietet der Static Stability Factor, der aus dem Verhältnis der mittleren Spurweite b_{SW} zur doppelten Schwerpunkthöhe h_{SP} gebildet wird [Wal05].

$$SSF = \frac{b_{SW}}{2 \cdot h_{SP}} \quad (5-19)$$

Je größer der Wert, desto sicherer ist das Fahrzeug im Hinblick auf seine Kippneigung. Der Zielbereich liegt für die meisten Flachbodenfahrzeuge zwischen 1,3 und 1,5; bei höher liegenden SUVs sind Werte von 1,0 bis 1,3 noch akzeptabel [Wal05].

5.4.3 Längsdynamik

Im Eigenschaftsfeld Längsdynamik sind die Beschleunigungswerte, die Höchstgeschwindigkeit sowie die Steigfähigkeiten zu bewerten. Dazu wird bei maximal möglicher Beschleunigung aus dem Stand ein Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit berechnet. Die Beschleunigung ergibt sich für jeden Zeitschritt aus der Differenz der Zugkraft am Rad F_Z und den Fahrwiderständen, bestehend aus Luft- und Rollwiderstand (Bewegungsgleichung in (5-20)). Da die Ermittlung der maximalen Beschleunigung in der Ebene durchgeführt wird, kann der Steigungswiderstand vernachlässigt werden.

$$\dot{x} = \int \ddot{x} = \int \frac{F_Z - \frac{1}{2} c_W A_{St} \rho_L \dot{x}^2 - f_r M_{EG-Leer} g}{M_{EG-Leer} \cdot \lambda} \quad (5-20)$$

Die Zugkraft am Rad F_Z berechnet sich aus dem gestellten Moment der E-Maschine T_{EM} in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Wirkungsgrad des Antriebsstrangs η_{AS} , der Gesamtübersetzung zum Rad i_{Ges} sowie dem Radradius r_{Rad} .

$$F_Z = \frac{T_{EM} \cdot \eta_{AS} \cdot i_{Ges}}{r_{Rad}} \quad ; \quad \text{mit } F_Z \leq \mu_{Asphalt} F_N \quad (5-21)$$

Der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs η_{AS} beinhaltet die Wirkungsgrade der mechanischen Kraftübertragung von der E-Maschine zu den Rädern und wird konstant mit 97 % (Tabelle 5-13) angenommen. Die sich ergebende Kraft am Rad F_Z muss kleiner als die maximal übertragbare Kraft des Reifens auf die Straße sein. Diese Grenze ist abhängig von der Aufstandskraft F_N der antreibenden Achse sowie dem Kraftschlussbeiwert $\mu_{Asphalt}$. Der Wert von $\mu_{Asphalt}$ wird von der Größe der

Aufstandsfläche sowie der Gummimischung des Reifens beeinflusst. Da bei Sportwagen ein hoher Fokus auf der Traktion liegt, kann von Reifen mit einem höheren Kraftschlussbeiwert als bei den übrigen Derivaten ausgegangen werden (Tabelle 5-7).

Während bei SUVs eine gute Kraftübertragung auch im Gelände verlangt wird, ist dies bei anderen Derivaten ausschließlich auf Asphalt notwendig. Daraus resultieren bei den SUV-Derivaten höhere Reifengewichte und damit ein größerer dynamischer Massenfaktor λ im Vergleich zu den anderen Derivaten. Bei Sportwagen wird über Leichtbau felgen ein niedrigerer dynamischer Massenfaktor erreicht (Tabelle 5-7).

Derivat	Kompakt	Limousine	Coupé	Cabrio	SUV	Sportwg.
Kraftschlussbeiwert Reifen - Asphalt $\mu_{Asphalt}$ [-]	0,85					0,90
Dynamischer Massenfaktor λ [-]	1,10				1,15	1,05

Tabelle 5-7 Kraftschlussbeiwert und dynamischer Massenfaktor nach [Ber94] und [Böc12, S. 10]

Die Stirnfläche A_{St} wird aus der Fläche, die durch Fahrzeughöhe und -breite aufgespannt wird, und dem empirischen Faktor $S_{A_{St}}$ abgeleitet. Böcker zeigt einen Wertebereich von $S_{A_{St}}$ zwischen 0,79 und 0,83 [Böc12, S. 11]. Eine Analyse von über hundert Fahrzeugen ergab einen durchschnittlicher Wert von $S_{A_{St}} = 0,80$.

$$A_{St} = S_{A_{St}} \cdot b_{Fzg} \cdot h_{Fzg} \quad (5-22)$$

Die Bestimmung des c_W -Werts ist komplex und bedarf für gute Annäherungen aufwändiger Strömungssimulationen. Da dies mit dem Ziel einer kurzen Simulationszeit nicht vereinbar ist, muss der c_W -Wert vom Anwender manuell vorgegeben werden.

Der Rollwiderstandsbeiwert f_r nimmt über die Fahrzeuggeschwindigkeit zu. Der Wert f_{r0} wird meist vom Reifenhersteller zur Verfügung gestellt, während die Werte f_{r1} und f_{r2} in Abhängigkeit von f_{r0} nach Stiegeler berechnet werden [Sti08, S. 17 f.].

$$f_R = f_{r0} + f_{r1} \cdot \frac{v}{100 \text{ km/h}} + f_{r2} \cdot \left(\frac{v}{100 \text{ km/h}} \right)^4 \quad (5-23)$$

$$f_{r1} = 0,01 \cdot f_{r0} \quad (5-24)$$

$$f_{r2} = 0,22 \cdot f_{r0} \quad (5-25)$$

Auf Basis (5-20) kann der Geschwindigkeitsverlauf bei maximaler Momentenabgabe der E-Maschine bestimmt werden. Aus diesem Verlauf werden die Werte für die Beschleunigungen 0-60 km/h, 0-100 km/h sowie die Elastizität 40-60 km/h berechnet.

Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit ergibt sich aus der Begrenzung der Maximaldrehzahl der E-Maschine, gekoppelt mit der Gesamtübersetzung des Antriebsstrangs. Weiterhin kann die exponentiell steigende Fahrwiderstandsleistung die E-Maschinen-nennleistung übertreffen und folglich die Geschwindigkeit nach oben limitieren. Dazu ist bei jeder iterativen Erhöhung der Geschwindigkeit die Bedingung in (5-26) zu überprüfen.

$$\frac{P_{EM,Nenn}}{v} > \frac{1}{2} c_W A_{St} \rho_L v^2 + f_R M_{EG-Leer} g \quad (5-26)$$

Analog zur Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird der Wert für die Dauersteigfähigkeit bei 15 % Steigung bestimmt, die einer Höchstgeschwindigkeit bei erhöhten Fahrwiderständen entspricht. Zusätzlich zur Motorleistung hängt die Dauersteigfähigkeit von der verfügbaren Traktion und entsprechend direkt von der erreichten Achslastverteilung ab (5-27).

$$\frac{P_{EM,Nenn}}{v_{Steig}} > \frac{1}{2} c_W A_{St} \rho_L v_{Steig}^2 + f_R M_{EG-Leer} g (1 + \sin \alpha) \quad (5-27)$$

Bei der Anfahrsteigfähigkeit wird im Vergleich zur Dauersteigfähigkeit kein aerodynamischer Widerstand berücksichtigt. Dafür ist ein zusätzlicher Widerstand für die Beschleunigung zu überwinden (5-28).

$$\dot{x} = \int \ddot{x} = \int \frac{F_Z \mu_{Asphalt} - f_r M_{EG-Leer} g - M_{EG-Leer} \dot{x}}{M_{EG-Leer} \cdot \lambda} \quad (5-28)$$

Bei der Modellierung der Längsdynamik werden einige Vereinfachungen zugunsten der kurzen angestrebten Simulationsdauer vorgenommen. So werden für alle Komponenten des Antriebsstrangs konstante, durchschnittliche Wirkungsgrade angenommen, um eine rechenaufwändige Ermittlung anhand von Kennfeldern zu vermeiden. Die Vernachlässigung sämtlicher instationärer Effekte der Komponenten wie der Temperaturabhängigkeit führt zu einer weiteren Rechenzeiteinsparung.

5.4.4 Raumkomfort

Körpergrößen und Proportionen der möglichen Kunden variieren stark. Deshalb wird zur Beurteilung des Raumkomforts nur der kritischste Fall mit großen männlichen Insassen untersucht. Es wird ein sogenannter 95-Perzentil-Mann verwendet, der mit seinen Abmaßen 95 % der männlichen Bevölkerung übertrifft und das Gros der Kunden repräsentiert. Mehrere dieser 95-Perzentil-Männer werden über ihre Gesäßpunkte entsprechend der gewünschten Anzahl der Sitzplätze in ein, zwei oder drei Sitzreihen im Fahrzeug positioniert. Die Lage der vordersten Sitzreihe wird in Abhängigkeit vom Radstand definiert. Bei den meisten Elektrofahrzeugen liegt der Abstand der vordersten Sitzreihe von der Vorderachse zwischen 45 % und 55 % des Radstands [Ren09; Ban10; AMS11; Mya11; MUT11; Tes11; Sma13]. Im EOKET wird ein mittlerer Wert von 50 % angenommen.

In vertikaler Richtung wird die Positionierung der Insassen im Fahrzeug von unten nach oben vorgenommen (Abbildung 5-11).

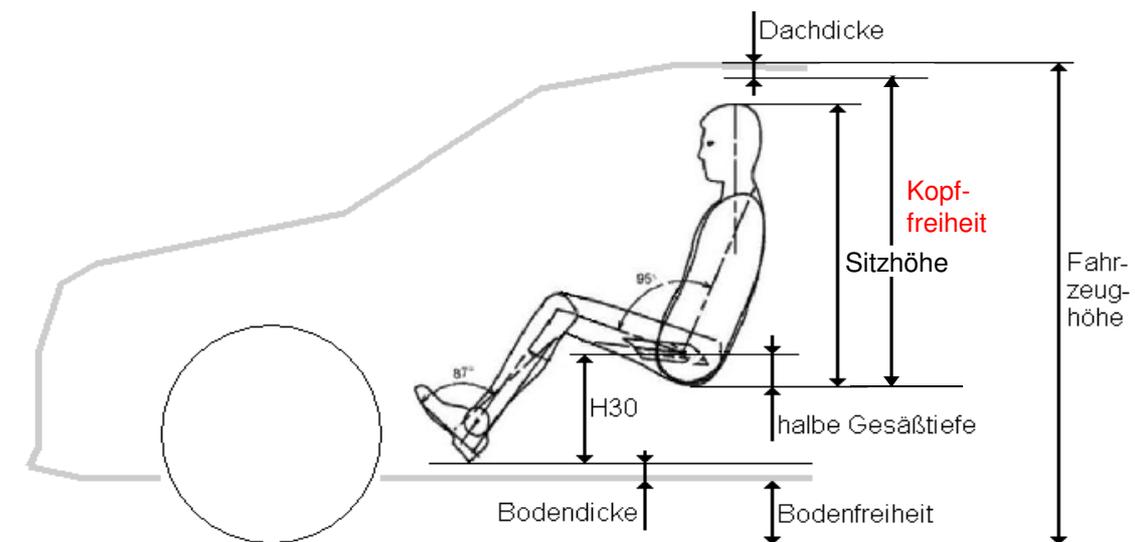


Abbildung 5-11 Bestimmung der Kopffreiheit nach [Eng11, S. 90]

Abhängig von der Summe aus Bodenfreiheit und Bodendicke wird die Höhe des Ferspunkts über der Straße bestimmt. Die Bodenfreiheit liegt nach Braess und Seiffert [Bra07, S. 96] für die meisten Fahrzeuge im Bereich zwischen 100 mm und 150 mm. Für SUV-Fahrzeuge wird ein typischer Bereich von 170 mm bis 250 mm aufgezeigt. Auf Basis dieser Daten werden die Bodenfreiheiten entsprechend Tabelle 5-8 in Abhängigkeit vom Derivat festgelegt.

Derivat	Kompakt	Limou- sine	Coupé	Cabrio	SUV	Sportwg.
Bodenfreiheit [mm]	150		125		200	110

Tabelle 5-8 Derivatabhängige Werte der Bodenfreiheit nach [Bra07, S. 96]

Das H30-Maß beschreibt die Höhe des Gesäßpunkts über dem Ferspunkt und entscheidet maßgeblich über das Sitzgefühl in einem Fahrzeug. Typisch für einen Sportwagen sind kleine Werte und eine entsprechend flache Sitzposition, während bei SUVs große Werte eine aufrechte Sitzposition ermöglichen. In Anlehnung an Braess und Seiffert [Bra07, S. 96] wurden für die Nutzung im EOKET repräsentative H30-Werte für die verschiedenen Derivate festgelegt (Tabelle 5-9).

Derivat	Kompakt	Limou- sine	Coupé	Cabrio	SUV	Sportwg.
H30-Maß [mm]	250		230		300	150

Tabelle 5-9 H30-Maß in Abhängigkeit vom Derivat nach [Bra07, S. 96]

Die Kopffreiheit wird aus der vertikalen Maßkette in Abhängigkeit von Dachdicke und halber Gesäßtiefe bestimmt (5-29).

$$\begin{aligned} \text{Kopffreiheit} = & \text{Fahrzeughöhe} - \text{Bodenfreiheit} - \text{Bodendicke} - \text{H30} \\ & - \text{Dachdicke} + \text{halbe Gesäßtiefe} \end{aligned} \quad (5-29)$$

Zur Ermittlung der Beinfreiheiten wird eine Maßkette in Längsrichtung des Fahrzeugs aufgestellt. Die vordere Beinfreiheit wird festgelegt und die hintere Beinfreiheit in Abhängigkeit vom zur Verfügung stehenden Raum maximiert. Der Wert der hinteren Beinfreiheit ergibt sich aus der Differenz der x-Koordinaten der Seating Reference Points ($SgRP$) von vorderer und hinterer Sitzreihe, abzüglich der Dicke der Sitzlehne der vorderen Sitzanlage.

$$\text{Beinfreiheit}_h = SgRP_h - SgRP_v - d_{\text{Sitz}} \quad (5-30)$$

Nicht berücksichtigt werden in dieser Beurteilung des Raumkomforts sämtliche Maße in Querrichtung des Fahrzeugs, wie die Schulter- oder Ellbogenfreiheit. Aufgrund der abstrahierten Abbildung des Package sind Aussagen zu diesen Größen nicht in ausreichender Güte möglich.

5.4.5 Wirtschaftlichkeit

Hauptaspekt bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sind die Anschaffungskosten. Es wird ähnlich wie bei der Gewichtsbestimmung von einem Grundbetrag für das Basisfahrzeug zuzüglich Kosten für Batterie, E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe ausgegangen. Der Verkaufspreis lässt sich über die Gewinnmarge aus den Einzelkosten bestimmen.

$$\text{Anschaffungskosten} = \left(\begin{array}{l} K_{\text{Basisfzg}} + E_{\text{Batt}} S_{K,\text{Batt}} + P_{EM} S_{K,EM} + \\ P_{LE} S_{K,LE} + M_{\text{Getr}} S_{K,\text{Getr}} \end{array} \right) \cdot (1 + S_{K,\text{Gewinnmarge}}) \quad (5-31)$$

Die Gewinnmarge $S_{K,\text{Gewinnmarge}}$ ist stark abhängig von der Anzahl der verkauften Fahrzeuge pro Derivat. Je mehr Fahrzeuge pro Derivat verkauft werden, desto geringer kann die Gewinnmarge ausfallen, weil die Einmalkosten auf höhere Stückzahlen umgelegt werden können. Die Werte der Gewinnmarge wurden in Anlehnung an die Zulassungszahlen der AUDI AG in 2012 in Deutschland derivatabhängig festgelegt (Tabelle 5-10).

	Anzahl Neuzulassungen Audi in Deutschland 2012	Fahrzeuge	Anzahl Derivate	Fahrzeuge pro Derivat	Festgelegte Gewinnmarge $S_{K,\text{Gewinnmarge}}$
Kompakt	75445	A1, A3	4	18861	20 %
Limousine	114018	A4, A6, A8	6	19003	20 %
Coupé, Cabrio	21369	A5	3	7123	30 %
SUV	49760	Q3, Q5, Q7	3	16587	20 %
Sportwagen	5481	TT, R8	4	1370	50 %

Tabelle 5-10 Bestimmung der derivatabhängigen Gewinnmarge auf Basis [KBA13]

Die Kosten für das Basisfahrzeug K_{Basisfzg} sind vom Blockvolumen des Fahrzeugs V_{Fzg} abhängig. Zur Bestimmung des mathematischen Zusammenhangs wurde eine Analyse von Premiumfahrzeugen der Marken Audi und BMW sowie von Volumenfahrzeugen der Marken VW und Toyota durchgeführt. Vom Verkaufspreis $K_{\text{Verkaufspreis}}$ wird die Gewinnmarge $S_{K,\text{Gewinnmarge}}$ entsprechend des Derivats (Tabelle 5-10)

abgezogen. Zusätzlich wird der Kostenanteil des konventionellen Antriebs $S_{K, AnteilAntrieb}$ subtrahiert, der nach Kampker [Kam13, S. 47] ca. 23 % des Kaufpreises beträgt.

$$K_{Basisfzg, Benchmark} = K_{Verkaufspreis} (1 - S_{K, Gewinnmarge}) (1 - S_{K, AnteilAntrieb}) \quad (5-32)$$

Die verbleibenden Basisfahrzeugkosten der untersuchten Fahrzeuge $K_{Basisfzg, Benchmark}$ werden über dem Fahrzeugblockvolumen V_{Fzg} aus Länge, Breite und Höhe aufgetragen (Abbildung 5-12).

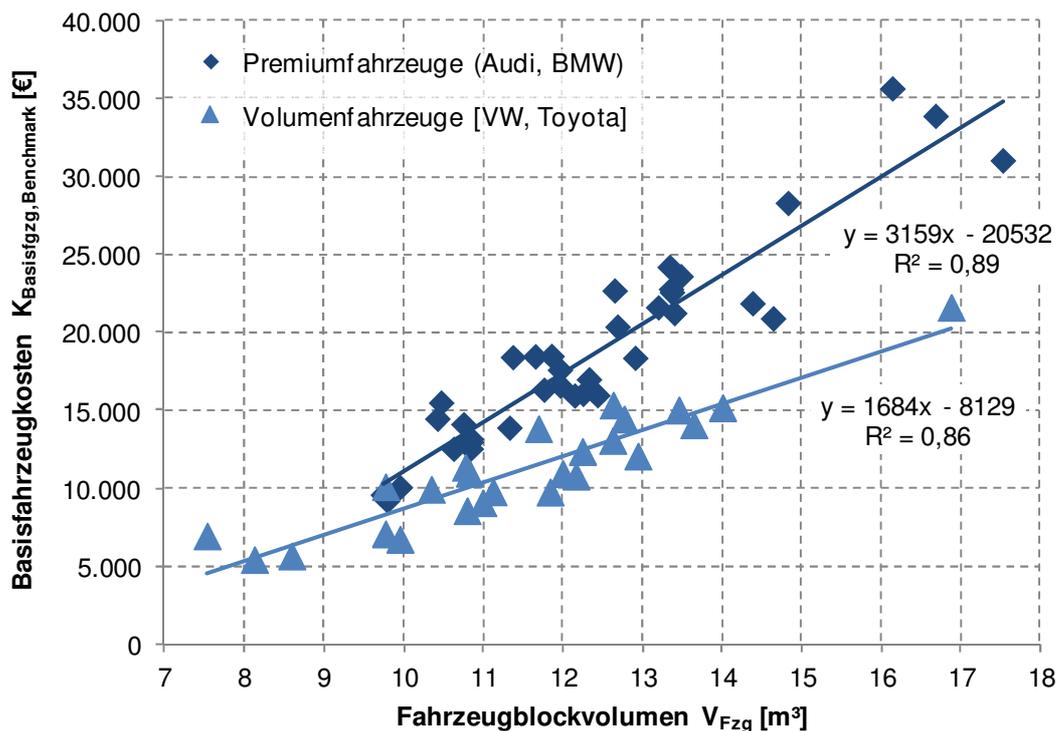


Abbildung 5-12 Bestimmung der Basisfahrzeugkosten

Mittels linearer Regression lassen sich für Premium- und Volumenfahrzeuge jeweils Zusammenhänge ableiten, um die Basisfahrzeugkosten aus dem Fahrzeugblockvolumen zu berechnen. Mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 > 0,85$ ist eine ausreichende Genauigkeit der beiden Regressionsfunktionen gewährleistet (Abbildung 5-12).

Zur Berechnung der Basisfahrzeugkosten $K_{Basisfzg}$ von neuen Konzepten wird im EOKET zwischen Premium- und Volumenfahrzeugen entsprechend der ermittelten Regressionsfunktionen (Abbildung 5-12) unterschieden. Formel (5-33) stellt diesen Zusammenhang in Abhängigkeit von der Parametrierung für Premiumfahrzeuge ($S_{K, Basisfzg_1} = 3159 \text{ €/m}^3$; $S_{K, Basisfzg_2} = 20532 \text{ €}$) und Volumenfahrzeuge ($S_{K, Basisfzg_1} = 1684 \text{ €/m}^3$; $S_{K, Basisfzg_2} = 8129 \text{ €}$) dar.

$$K_{Basisfzg} = S_{K, Basisfzg_1} V_{Fzg} - S_{K, Basisfzg_2} + (1 - S_{M, Leichtbau}) M_{Basisfzg} S_{K, Leichtbau} \quad (5-33)$$

Zudem werden in (5-33) die Mehrkosten für Leichtbau berücksichtigt. Für das eingesparte Gewicht (Kapitel 5.3.4) werden dabei die spezifischen Kosten $S_{K,Leichtbau} = 5 \text{ €/kg}$ [Eck10] angesetzt.

Neben den Kosten für das Basisfahrzeug verursachen die Batteriekosten einen großen Anteil des Verkaufspreises von Elektrofahrzeugen. Die spezifischen Batteriekosten liegen nach aktuellen Studien zwischen 300 €/kWh und 700 €/kWh [Val09, S. 48 f.; Ele12; Han12, S. 6]. Für die Berechnungen im EOKET wird ein mittlerer Wert von $S_{K,Batt} = 500 \text{ €/kWh}$ [Wal10, S. 129] angenommen.

Die Kosten der übrigen Komponenten des Antriebsstrangs werden ebenfalls über empirische Faktoren bestimmt. Wallentowitz zeigt eine Prognose zu spezifischen Kosten der E-Maschine und Leistungselektronik bei Großserienfertigung [Wal10, S. 119]. Die Kosten beider Komponenten werden in Abhängigkeit von der verbauten E-Maschinenleistung berechnet. Um zusätzlich den Kostenvorteil der Asynchronmaschine umzusetzen [Wal10, S. 120], wird die Asynchronmaschine mit $S_{K,EM} = 15 \text{ €/kW}$ dargestellt, während die permanenterregte Synchronmaschine $S_{K,EM} = 18 \text{ €/kW}$ verursacht. Die Leistungselektronik wird mit $S_{K,LE} = 10 \text{ €/kW}$ angesetzt [Wal10, S. 124].

Zum Vergleich verschiedener Antriebstechnologien ist eine Analyse der Gesamtkosten bzw. TCO (Total Cost of Ownership) zielführend. Da im EOKET ausschließlich reine Elektrofahrzeuge verglichen werden, können Versicherungs- und Instandhaltungskosten sowie die Steuern vernachlässigt werden. Innerhalb einer Antriebstechnologie ergeben sich in diesen Aspekten kaum Unterschiede. Hohe Relevanz bei der Konzeptauslegung haben jedoch neben den Anschaffungskosten die Energiekosten. Diese ergeben sich auf Basis des Stromverbrauchs n_{KUV} in einem kundennahen Zyklus (5-49) zuzüglich des durchschnittlichen Ladewirkungsgrads von $\eta_{Laden} = 90 \%$ [Bru13]. Die Strompreise variierten allein in Europa im Jahr 2012 zwischen 0,08 €/kWh und 0,29 €/kWh [Sta13, S. 48]. Deutschland lag mit einem durchschnittlichen Wert von 0,27 €/kWh unter den teuersten Ländern. Im EOKET wird ein gemäßiger Wert von $S_{K,Strompreis} = 0,20 \text{ €/kWh}$ für die Berechnung der Energiekosten angenommen.

$$\text{Energiekosten} = n_{KUV} \eta_{Laden} S_{K,Strompreis} \quad (5-34)$$

Das Fahrzeuggewicht hat einen großen Einfluss auf viele Eigenschaften und wird in vielen Ansätzen den Eigenschaftsfeldern Quer- oder Längsdynamik zugeordnet. Im EOKET wird das Gewicht der Wirtschaftlichkeit zugeschrieben, weil es stark von den

verwendeten Materialien, der eingesetzten Batterietechnologie und -kapazität abhängt und folglich direkte Wechselbeziehungen zum Anschaffungspreis hat. Zudem geht das Gewicht in die Berechnung von Verbrauch und Energiekosten ein. Die Bestimmung des Gewichts ist in Kapitel 5.3.4 beschrieben. Um gute Gesamtwerte im Eigenschaftsfeld Wirtschaftlichkeit zu erzielen, muss ein leichtes Fahrzeug mit geringen Kosten angestrebt werden.

5.4.6 Alltagstauglichkeit

Die ausgewählten Eigenschaften aus dem Feld Alltagstauglichkeit umfassen das Kofferraumvolumen, die Zuladung, den Wendekreis sowie die Anzahl der Sitzplätze.

Das Kofferraumvolumen kann auf Basis der äußeren Abmaße des Hinterwagens berechnet werden. Der jeweilige Verlauf der Dachlinie wird über den Faktor S_{KV} in Abhängigkeit vom Fahrzeugderivat einbezogen (Tabelle 5-11). Die Werte dieses Faktors werden auf Basis der Derivate der aktuellen Audi Fahrzeuge abgeleitet (Anhang C). Von dem berechneten Volumen müssen die Volumina des Antriebsstrangs und der Batterie $V_{Red,AST,BAT}$ sowie der 2. Sitzreihe $V_{Red,2,SR}$ subtrahiert werden, die in den Bereich des Kofferraums hineinragen.

$$Kofferraumvolumen = (0,8l_{UEH} \cdot 0,7b_{Fzg} \cdot 0,6h_{Aufbau})S_{KV} - V_{Red,AST,BAT} - V_{Red,2,SR} \quad (5-35)$$

Derivat	Kompakt	Limousine	Coupé	Cabrio	SUV	Sportwg.
S_{KV}	0,85	0,75		0,55	0,85	0,55

Tabelle 5-11 Faktor S_{KV} zur Bestimmung des Kofferraumvolumens

Die Zuladung ergibt sich aus der verbleibenden Traglast der Achsen, nach Abzug des DIN-Leergewichts von der Summe der maximalen Vorder- und Hinterachslast.

$$Zuladung = (Achslast_{max,v} + Achslast_{max,h}) - M_{DIN-Leer} \quad (5-36)$$

Der Wendekreis wird nach dem Wall-to-Wall-Prinzip bestimmt. Der Wall-to-Wall-Wendekreis beschreibt den Abstand von zwei parallelen Mauern, zwischen denen ein 180°-Wendemanöver möglich ist. Dabei wird der Platz berücksichtigt, der beim Wenden vom vorderen Überhang l_{UEV} überstrichen wird. Zusätzlich zum vorderen Überhang hängt der Wendekreis maßgeblich von den Einflussgrößen Radstand l_{RS} und Spurweite b_{SW} ab. Eine weitere Einflussgröße ist der maximale Einschlagwinkel

der lenkbaren Räder, der von zahlreichen Größen, wie Antriebsarchitektur oder Rädergröße, beeinflusst wird. Eine hohe Güte der Ableitung des Wendekreises kann über trigonometrische Zusammenhänge in Abhängigkeit von realen Bezugsfahrzeugen erreicht werden. Dabei wird von einem Bezugsfahrzeug mit einem Radstand l_{RS} , einer Spurweite b_{SW} und einem vorderen Überhang l_{UEV} ausgegangen, dessen Wendekreisradius $R_{WK,Bzgfzg}$ bekannt ist. Der Einschlagwinkel der Vorderräder des Bezugsfahrzeugs wird vereinfachend als konstant angenommen (Tabelle 5-12).

Radstand Konzeptfahrzeug [mm]	< 2200	2200-2600	2600-2900	>2900
Bezugsfahrzeug	Toyota iQ	AUDI A3	AUDI A4	AUDI Q7
Radstand l_{RS}	2000 mm	2578 mm	2808 mm	3002 mm
Spurweite b_{SW}	1470 mm	1534 mm	1564 mm	1651 mm
Vorderer Überhang l_{UEV}	530 mm	881 mm	866 mm	962 mm
Wendekreis $R_{WK,Bzgfzg}$	8,3 m	10,7 m	11,5 m	12,0 m

Tabelle 5-12 Bezugsfahrzeuge zur Ermittlung des Wendekreises

Auf Basis der Differenzen zwischen Bezugsfahrzeug und Konzeptfahrzeug Δl_{RS} , Δb_{SW} und Δl_{UEV} kann der Wendekreis unter Ausnutzung geometrischer Zusammenhänge bestimmt werden. So wird auf Basis von Δl_{RS} bei konstant angenommenem Einschlagwinkel der Vorderräder die Zwischengröße $R_{WK,\Delta RS}$ berechnet (Abbildung 5-13 a).

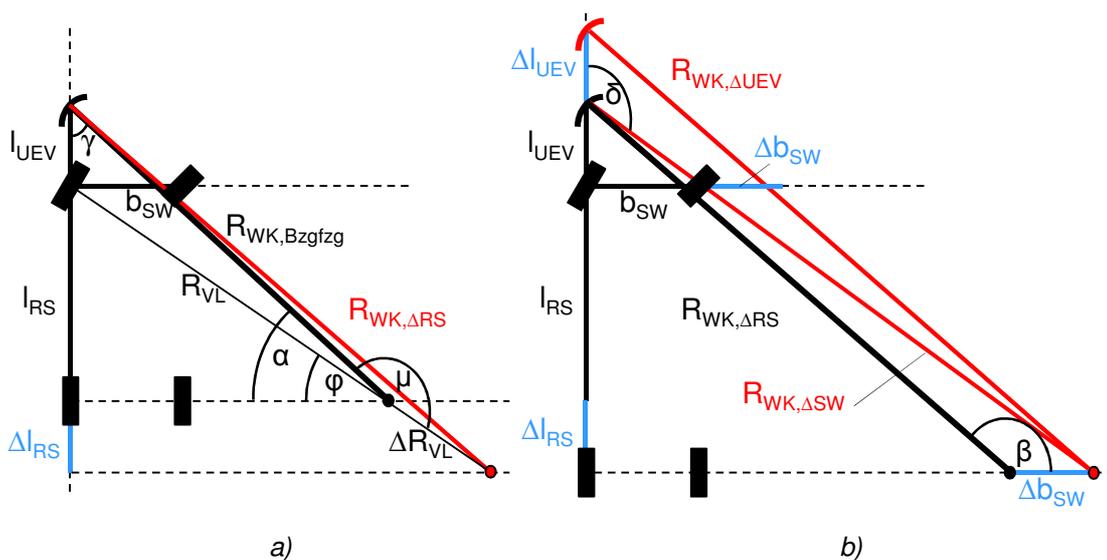


Abbildung 5-13 Berechnung des Wendekreises in Abhängigkeit von a) l_{RS} und b) b_{SW} und l_{UEV}

Dazu werden als zusätzliche Größen der Wendekreisradius des vorderen linken Rads R_{VL} sowie entsprechende Winkel berechnet ((5-37) bis (5-40)).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l_{UEV} + l_{RS}}{R_{WK, Bzgfzgg}}\right) \quad \gamma = 90^\circ - \alpha \quad (5-37)$$

$$R_{VL} = \sqrt{l_{UEV}^2 + R_{WK, Bzgfzgg}^2 - 2l_{UEV} R_{WK, Bzgfzgg} \cos \gamma} \quad \Delta R_{VL} = \frac{\Delta l_{RS}}{l_{RS}} R_{VL} \quad (5-38)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{l_{RS}}{R_{VL}}\right) \quad \mu = 180^\circ - \alpha + \varphi \quad (5-39)$$

$$R_{WK, \Delta RS} = \sqrt{\Delta R_{VL}^2 + R_{WK, Bzgfzgg}^2 - 2\Delta R_{VL} R_{WK, Bzgfzgg} \cos \mu} \quad (5-40)$$

Aufbauend auf dem Wendekreisradius $R_{WK, \Delta RS}$ gehen die Differenzen der Spurweite Δb_{SW} und des Überhangs Δl_{UEV} in die weitere Berechnung des Wendekreises ein (Abbildung 5-13 b). Die Formeln (5-41) bis (5-44) beschreiben die entsprechenden trigonometrischen Zusammenhänge zur Bestimmung der Zwischengrößen $R_{WK, \Delta SW}$ und $R_{WK, \Delta UEV}$.

$$\beta = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{l_{UEV} + l_{RS} + \Delta l_{RS}}{R_{WK, \Delta RS}}\right) \quad (5-41)$$

$$R_{WK, \Delta SW} = \sqrt{R_{WK, Bzgfzgg}^2 + \Delta b_{SW}^2 - 2\Delta b_{SW} R_{WK, Bzgfzgg} \cos \beta} \quad (5-42)$$

$$\delta' = 180^\circ - \arccos\left(\frac{l_{UEV} + l_{RS} + \Delta l_{RS}}{R_{WK, \Delta SW}}\right) \quad (5-43)$$

$$R_{WK, \Delta UEV} = \sqrt{R_{WK, \Delta SW}^2 + \Delta l_{UEV}^2 - 2\Delta l_{UEV} R_{WK, \Delta SW} \cos \delta'} \quad (5-44)$$

Nach Berücksichtigung von Δl_{RS} , Δb_{SW} und Δl_{UEV} kann aus dem Wendekreisradius $R_{WK, \Delta UEV}$ der Wendekreisradius ermittelt werden (5-45).

$$\text{Wendekreis} = 2R_{WK, \Delta UEV} \quad (5-45)$$

Die Anzahl der maximal verfügbaren Sitzplätze wird über Bauraum-beschränkende Faktoren ermittelt. So ist eine dritte Sitzreihe und entsprechend eine Anzahl von sieben Sitzen nur für Fahrzeuge mit einem Radstand größer 2,90 m möglich [Eng11, S. 79]. Unterhalb einer Fahrzeugbreite von 1,65 m können die hinteren Sitzreihen nur jeweils

zwei Sitzplätze aufweisen, wodurch ein Sieben- zu einem Sechssitzer bzw. ein Fünf- zu einem Viersitzer reduziert wird [Eng11, S. 79].

5.4.7 Reichweite und Batterieladen

Für die Bestimmung der Reichweite und der Ladezeit wird die Nutzkapazität der Batterie benötigt. Der sogenannte „SOC-Hub“ beschreibt den Ladungsbereich (State of Charge = SOC) der Batterie, der für Ladung und Entladung freigegeben wird. Über den SOC-Hub kann aus der Nennkapazität die Nutzkapazität bestimmt werden. Um die Alterung der Batterie in einem akzeptablen Bereich zu halten, wird der SOC-Hub im EOKET auf 85 % [BMW13b, S. 27] beschränkt.

Die Reichweite ergibt sich aus dem Quotienten der Nutzkapazität und dem durchschnittlichen Energieverbrauch in einem Zyklus $n_{NEFZ/KUV}$ (5-46). Ziel ist es, eine kundennahe Reichweite abzubilden. Da es jedoch mit ARTEMIS Zyklus [Haa01], TÜV Süd Elektrofahrzeug Zyklus [Res11] sowie Automobilhersteller-eigenen Kundenzyklen keinen allgemein gültigen kundennahen Zyklus gibt, liegt die Basis der Berechnung im EOKET auf dem zulassungsrelevanten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Für diesen Zyklus gibt es eine hohe Anzahl an Messdaten realer Fahrzeuge, die zur Validierung herangezogen werden können. Auf dem validierten NEFZ-Verbrauch aufbauend wird der Verbrauch in einem kundennahen Verbrauchszyklus (KUV) abgeleitet.

$$RW_{NEFZ/KUV} = E_{Nutz} / n_{NEFZ/KUV} \quad (5-46)$$

Die Berechnung des Energieverbrauchs $n_{NEFZ/KUV}$ beruht auf einer Rückwärts-simulation, bei der die jeweils notwendige Leistung zur Überwindung der Fahrwiderstände über die E-Maschine von der Batterie abgerufen wird. Diese Gleichung gilt auch für den Fall der Bremsrekuperation, wobei Energie in die Batterie zurückgespeist wird.

$$n_{FW} = \frac{1}{\eta_{Batt} \eta_{LE} \eta_{EM} \eta_{AS}} \int_0^{t_{NEFZ}} \left(\frac{1}{2} c_W A_{St} \rho_L v^2 + f_R M_{EG-Leer} g + M_{EG-Leer} \lambda \dot{v}_{Fzg} \right) v_{Fzg} dt \quad (5-47)$$

Die Fahrwiderstände ergeben sich analog zu den Berechnungen der Längsdynamik Eigenschaften in Kapitel 5.4.3. Zusätzlich zum Wirkungsgrad des Antriebsstrangs η_{AS} müssen für die Reichweitenbestimmung die Wirkungsgrade von Batterie η_{Batt} , Leistungselektronik η_{LE} sowie E-Maschine η_{EM} berücksichtigt werden. In der Literatur

werden Wirkungsgradkennfelder der Komponenten bzw. Wirkungsgradbereiche im Arbeitsbetrieb angegeben. Für die Verbrauchsbestimmung werden aus diesen Spektren Werte für die durchschnittlichen Wirkungsgrade im NEFZ abgeleitet (Tabelle 5-13).

Die Lithium-Ionen Batterie arbeitet gemäß [Neu10; Kas12; Kam13, S. 301] im Wirkungsgradbereich zwischen 92 % und 97 %. Für den NEFZ wird $\eta_{Batt} = 95 \%$ angenommen. Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik liegt im Bereich von 93 % bis 98 % [Wal10, S. 84; Jun12; Kas12] und wird für die Berechnungen im NEFZ ebenfalls auf einen mittleren Wert von 95 % gesetzt. E-Maschinen Wirkungsgrade im Arbeitsbetrieb werden für PSM im Bereich von 85 % bis 95 % [Bra12; Jun12] und für ASM im Bereich 80 % bis 91 % [Nau07, S. 27, 71; Val09, S. 39] angegeben. Im NEFZ werden gemittelte Werte η_{EM} von 90 % Effizienz für die PSM und 85 % für die ASM angesetzt. Der Antriebsstrang, bestehend aus Getriebe und Differenzial, überträgt die Momente bei Wirkungsgraden η_{AS} zwischen 95 % und 98 % [Böc12, S. 37] und wird im NEFZ mit 97 % angenommen.

Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebs im NEFZ liegt bei Verwendung einer PSM bei 79 % bzw. bei Integration einer ASM bei 74 % (Tabelle 5-13). Diese Werte werden auch in anderen Publikationen bestätigt [Kuc12, S. 62].

	Durchschnittliche Wirkungsgrade im NEFZ	
Batterie η_{Batt}	95 %	
Leistungselektronik η_{LE}	95 %	
E-Maschine η_{EM}	PSM: 90 %	ASM: 85 %
Antriebsstrang η_{AS}	97 %	
Gesamtwirkungsgrad	79 %	74 %

Tabelle 5-13 Durchschnittliche Wirkungsgrade Antriebsstrang

Neben den Fahrwiderständen ergibt sich ein Verbrauch aus dem angenommenen durchschnittlichen NEFZ-Leistungsbedarf der Nebenverbraucher P_{NEFZ} von 250 W [Lun09, S. 16]. Der durchschnittliche Verbrauch im NEFZ n_{NEFZ} wird entsprechend (5-48) berechnet.

$$n_{NEFZ} = n_{FW} + \frac{P_{NEFZ} \cdot t_{NEFZ}}{x_{NEFZ}} \quad (5-48)$$

Für den KUV wird der Verbrauch der Fahrwiderstände im NEFZ auf die dynamischere Fahrweise angepasst und der erhöhte Leistungsbedarf der Nebenaggregate berücksichtigt.

$$n_{KUV} = n_{FW} \cdot S_{KUV} + \frac{P_{KUV} \cdot t_{NEFZ}}{x_{NEFZ}} \quad (5-49)$$

Der spezifische Mehrverbrauchs faktor S_{KUV} für die dynamischere Fahrweise liegt für sämtliche Derivate bei 1,1, wird jedoch für Sportwagen aufgrund der noch sportlicheren Fahrweise auf 1,3 gesetzt. Zudem wird die durchschnittliche elektrische Leistung der Nebenverbraucher P_{KUV} auf einen kundennahen Wert angepasst. Aufbauend auf einer Abschätzung von Wallentowitz [Wal10, S. 102] ergeben sich für einen Lastfaktor von 20 % im KUV in Abhängigkeit vom Segment Werte zwischen 1,0 kW und 1,5 kW (Tabelle 5-14).

Segment	A00	A0	A	B	C	D
Klimaanlage [kW]	4	5	6			
Lenkunterstützung [kW]	1	1,1	1,2			
Bremsunterstützung [kW]	0,2	0,2	0,2			
Lastfaktor KUV [%]	20	20	20			
Leistung Nebenverbraucher im KUV [kW]	1,0	1,25	1,5			

Tabelle 5-14 Segmentspezifische Leistung der Nebenverbraucher im KUV

Die Reichweiten im NEFZ respektive im KUV ergeben sich entsprechend (5-46) aus den jeweils berechneten Verbräuchen (5-48) bzw. (5-49).

Die Ladezeit wird aus dem Quotienten von Nutzkapazität E_{Nutz} und effektiver Ladeleistung $P_{BL,eff}$ ermittelt. Die effektive Ladeleistung wird aus der maximalen Leistung des verwendeten Ladegerätes P_{BL} bestimmt, reduziert auf die durchschnittliche Leistung während des Ladevorgangs durch den Faktor η_{LL} . Auf Basis einer Analyse des Ladevorgangs bis zu einem SOC von 95 % liegt η_{LL} bei 75 % (Abbildung 5-14).

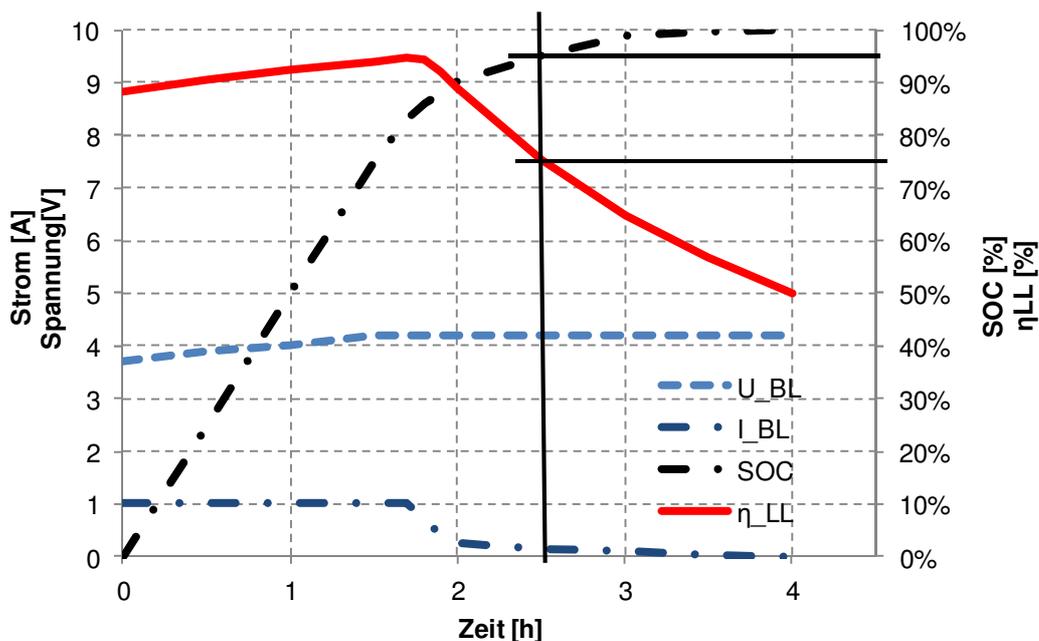


Abbildung 5-14 Bestimmung der mittleren Ladeleistung auf Basis Batteriezellen Sony US18650 [Son13, S. 33]

Zusätzlich ist bei der Berechnung der Ladezeit der durchschnittliche Ladewirkungsgrad $\eta_{BL} = 90\%$ [Bru13] zu berücksichtigen.

$$Ladezeit = \frac{E_{Nutz}}{P_{BL,eff}} = \frac{E_{Nutz}}{P_{BL} \cdot \eta_{LL} \cdot \eta_{BL}} \quad (5-50)$$

Die mögliche Betriebszeit des Fahrzeugs im Stand berechnet sich analog zur Ladezeit. Dabei wird als anliegende Leistung die durchschnittliche Nebenverbraucherleistung P_{KUV} des kundennahen Zyklus verwendet.

$$Betriebszeit = \frac{E_{Nutz}}{P_{KUV}} \quad (5-51)$$

5.5 Überprüfung der Eigenschaftsbewertungsmodule

Eine klassische Validierung der Eigenschaftsbewertungsmodule für Fahrzeuge aller Segmente und Derivate ist aufgrund der zu hohen Varianz und der zu geringen Verfügbarkeit an Realfahrzeugen leider nicht möglich. Umsetzbar ist jedoch die Überprüfung der Abbildungsgüte der Eigenschaftsbewertungsmodule bei der Nachbildung einzelner realer Fahrzeuge.

Entsprechend Abbildung 5-15 wird dafür jedes Realfahrzeug möglichst originalgetreu über ein virtuelles Konzeptfahrzeug abgebildet. Die Grundkonzeptentscheidungen, Einflussgrößen und Komponenten sind identisch zum Realfahrzeug zu konfigurieren.

Um ein Package vergleichbar mit dem des Realfahrzeugs umzusetzen, ist die automatisierte Positionierung der Batterie und der Antriebskomponenten zu überprüfen. Dadurch wird sichergestellt, dass ähnliche Gewichtsverteilungen vorliegen.

Sämtliche unbekannte Größen des Realfahrzeugs werden auf Basis von Gesetzmäßigkeiten entsprechend Kapitel 5.4 automatisiert abgeleitet. Die Eigenschaftsbewertungsmodule werden durchlaufen und deren Abbildungsgüte anschließend für jede einzelne Eigenschaft analysiert.

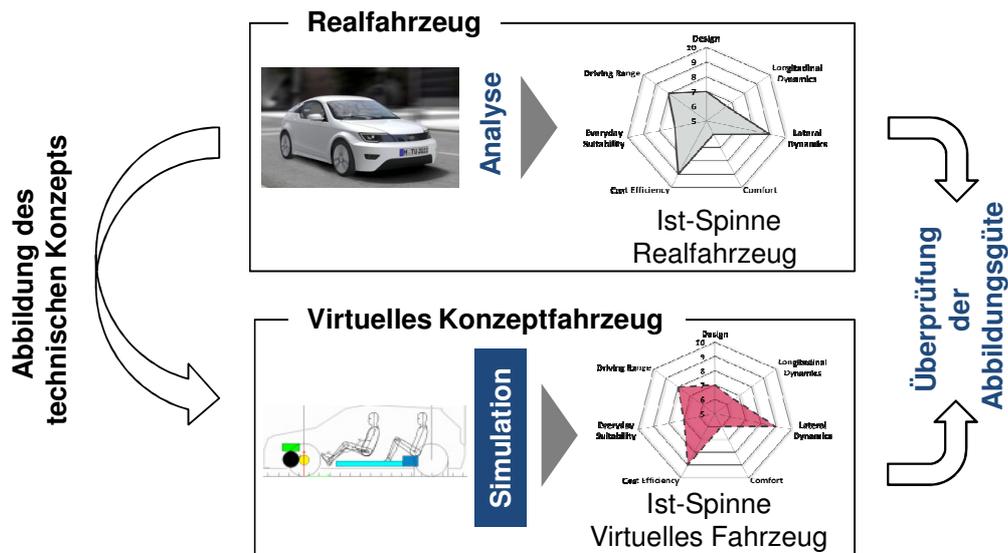


Abbildung 5-15 Vorgehen der Validierung anhand von Realfahrzeugen

Die Überprüfung wurde anhand der Elektrofahrzeuge TUM MUTE [Pie11], Smart Ed [Sma13], Mitsubishi iMiEV [Ban10], Audi A2 e-tron [AMS11], BMW i3 [BMW13b], Nissan Leaf [Mya11], Renault Fluence Z.E. [Ren09], Tesla Roadster [Tes11] und Tesla Model S [Tes13] durchgeführt. Da nicht für alle 28 Eigenschaften Werte der Realfahrzeuge öffentlich verfügbar waren, musste die Validierung um elf Eigenschaften reduziert werden. Darunter fallen vor allem Eigenschaften aus den Feldern Querdynamik, Steigfähigkeiten sowie Komfortmaßen. Manuell vorgegeben wurden die Designwerte sowie die Anzahl der Sitzplätze, die folglich nicht zu überprüfen sind.

Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 zeigen die Ergebnisse der Validierung. Bei den meisten Eigenschaften wurden Abweichungen kleiner 10 % erzielt (in den Abbildungen grün markiert). In einigen Fällen traten Abweichungen im Bereich 10 % bis 20 % auf (in den Abbildungen gelb markiert). Nur in einer Ausnahme war die Abweichung größer 20 % (in den Abbildungen rot markiert).

Die Fahrleistungswerte konnten im EOKET gut abgebildet werden. Dafür wurde die Ableitung der Fahrwiderstandswerte wie der Stirnfläche, dem Gesamtfahrzeuggewicht

sowie die Ableitung der Gewichtsverteilung überprüft. Zudem musste die Skalierung der E-Maschine und der Batterie mit den jeweils geforderten Komponentengrößen abgeglichen werden. Die Gesamtübersetzung wurde so gewählt, dass bei maximaler E-Maschinendrehzahl die Höchstgeschwindigkeit erreichbar ist. Unter diesen Prämissen wurden für die meisten Fahrzeuge plausible Ergebnisse erzielt. Einzig beim Mitsubishi iMiEV ergab sich eine zu geringe Beschleunigungszeit.

Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit konnten die Stromkosten sowie das Leergewicht mit hoher Abbildungsgüte nachgebildet werden. Die Ergebnisse der Anschaffungskosten wiesen jedoch teilweise hohe Abweichungen zu den Herstellerangaben auf. Da sämtliche E-Fahrzeuge bisher noch nicht am Markt etabliert sind, können die publizierten Preise der Automobilhersteller nicht als finale Werte bei Absatz großer Stückzahlen angesehen werden. Auch wenn sich Abweichungen zu den Herstellerangaben ergeben, bieten somit die berechneten Anschaffungskosten aus dem EOKET eine bessere Vergleichbarkeit, weil sie auf derselben Berechnungsgrundlage basieren.

Die Angaben zur KUV-Reichweite ließen sich in der Simulation mit hoher Güte bestätigen. Alle Ergebnisse blieben innerhalb der 10 %-Toleranzschwelle. Bei der Ladezeit mussten deutlichere Abweichungen akzeptiert werden, weil das Ladeprogramm je nach Hersteller unterschiedlich ausgelegt wird und somit die Herstellerangaben der Ladezeiten selbst bei ähnlichen Batteriekapazitäten stark voneinander abweichen.

Zu Komfortmaßen waren kaum Größen bekannt. Allein die Simulationsergebnisse zur vorderen Kopffreiheit konnten mit einzelnen Herstellerangaben erfolgreich abgeglichen werden.

In den Eigenschaften der Alltagstauglichkeit stellt die Vielfalt der Fahrzeugkonzepte eine große Herausforderung an die Simulationsmodelle. Die Abweichungen beim Kofferraumvolumen treten aufgrund der starken Vereinfachung der Kofferraumgeometrie durch einen Quader auf. Bei Bestimmung der Wendekreise ergeben sich einige Differenzen zu den Herstellerangaben aufgrund des konstant angenommenen Einschlagswinkels der Vorderräder. Alle Differenzen bleiben jedoch im Toleranzband bis 20 % Abweichung.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaftsbewertungsmodule des EOKET in der Lage sind, reale Fahrzeuge mit einer Abbildungsgüte von maximal 20 % Abweichung virtuell nachzubilden und die Eigenschaftserfüllungen realitätsnah zu bewerten.

	MUTE	Smart ED	Mitsubishi iMiEV	Audi A2 e-tron	BMW i3
					
Fahrerlebnis längs					
0-60	Realizg 6,8	Realizg 4,5	Realizg 5,2	Realizg 4,2	Realizg 3,7
	EOKET 7,0	EOKET 4,4	EOKET 5,2	EOKET 4,6	EOKET 3,8
	Delta 3%	Delta -1%	Delta	Delta 10%	Delta 2%
0-100	Realizg 21,9	Realizg 11,5	Realizg 13,7	Realizg 9,3	Realizg 7,2
	EOKET 20,5	EOKET 10,9	EOKET 13,7	EOKET 9,6	EOKET 6,8
	Delta -7%	Delta -5%	Delta -14%	Delta 3%	Delta -5%
v_max	Realizg 120	Realizg 125	Realizg 130	Realizg 150	Realizg 150
	EOKET 120	EOKET 125	EOKET 130	EOKET 150	EOKET 151
	Delta 0%	Delta 0%	Delta 0%	Delta 0%	Delta 1%
Wirtschaftlichkeit					
Stromkosten	Realizg 2,25	Realizg 3,32	Realizg 3,36	Realizg 3,66	Realizg 3,44
	EOKET 2,19	EOKET 3,27	EOKET 3,43	EOKET 3,77	EOKET 3,56
	Delta -2%	Delta -2%	Delta 2%	Delta 3%	Delta 3%
Anschaffungskosten	Realizg 17000	Realizg 22000	Realizg 29300	Realizg 42500	Realizg 35000
	EOKET 16900	EOKET 17850	EOKET 20700	EOKET 42500	EOKET 39000
	Delta -1%	Delta -19%	Delta -29%	Delta	Delta 11%
Leergewicht	Realizg 575	Realizg 975	Realizg 1185	Realizg 1150	Realizg 1195
	EOKET 550	EOKET 1010	EOKET 1170	EOKET 1270	EOKET 1195
	Delta -4%	Delta 4%	Delta -1%	Delta 10%	Delta 0%
Reichweite / Batterie					
Reichweite	Realizg 84	Realizg 100	Realizg 90	Realizg 160	Realizg 130
	EOKET 86	EOKET 102	EOKET 89	EOKET 155	EOKET 117
	Delta 2%	Delta 2%	Delta -1%	Delta -3%	Delta -10%
Ladezeit	Realizg 3,5	Realizg 7,0	Realizg 8,0	Realizg 4,0	Realizg 8,0
	EOKET 3,4	EOKET 6,0	EOKET 8,9	EOKET 3,5	EOKET 7,6
	Delta -2%	Delta -14%	Delta 11%	Delta -13%	Delta -5%
Komfort					
Kopffreiheit vorne	Realizg 919	Realizg 1038	Realizg 1078	Realizg 1027	Realizg 1007
	EOKET 935	EOKET 1038	EOKET 1078	EOKET 1027	EOKET 1061
	Delta 2%	Delta	Delta	Delta	Delta 5%
Alltagstauglichkeit					
Kofferraumvolumen	Realizg 400*	Realizg 220	Realizg 150	Realizg 250	Realizg 220
	EOKET 395	EOKET 205	EOKET 140	EOKET 270	EOKET 260
	Delta -1%	Delta -7%	Delta -7%	Delta 8%	Delta 18%
Wendekreis	Realizg 8,0	Realizg 9,2	Realizg 9,4	Realizg 10,4	Realizg 9,9
	EOKET 9,0	EOKET 7,4	EOKET 9,6	EOKET 10,4	EOKET 10,5
	Delta 13%	Delta -19%	Delta 2%	Delta 0%	Delta 6%

* Kofferraumvolumen MUTE:
400l im Hinterwagen und 110l
im Vorderwagen

Abbildung 5-16 Validierungsergebnisse der Eigenschaftsbewertungsmodule 1/2

5.6 Bewertung der Eigenschaftserfüllung des technischen Konzepts

In Prozessschritt ⑥ werden die gewonnenen physikalischen Ist-Werte des Konzepts auf die Eigenschaftswerteskala übertragen. Dazu werden die Korrelationsfunktionen, die in Kapitel 5.2 entwickelt wurden, erneut angewandt. Aus einer Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h wird so der Eigenschaftswert 7 (Abbildung 4-2).

Daraus ergibt sich ein Ist-Eigenschaftsprofil des technischen Konzepts. Aus der Darstellung im Netzdiagramm können die einzelnen Stärken und Schwächen im Vergleich zu den gesetzten Zielen analysiert werden (Abbildung 5-18).

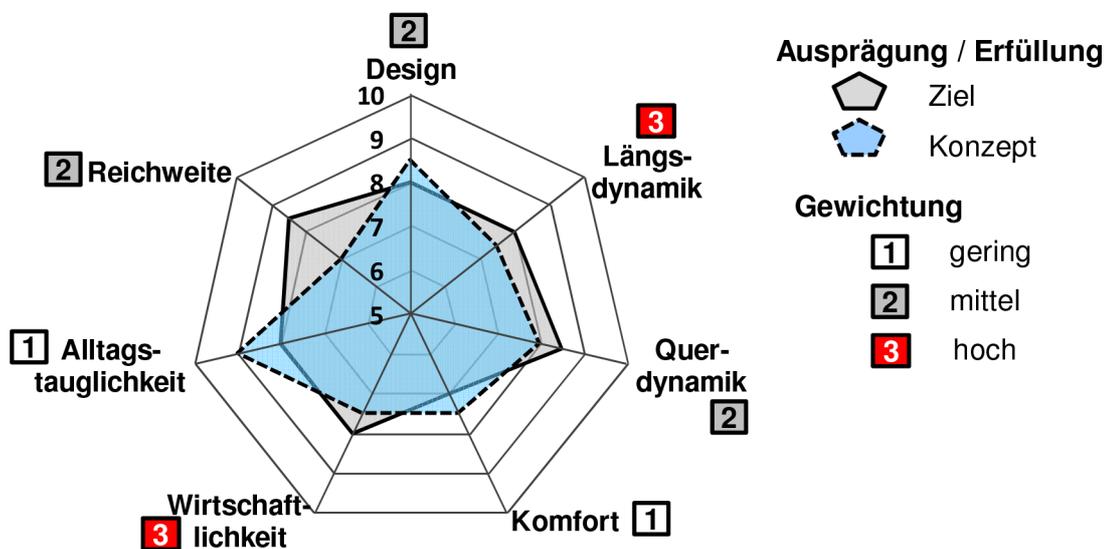


Abbildung 5-18 Analyse der erreichten Eigenschaftswerte eines technischen Konzepts

5.7 Fazit

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie der in Kapitel 4.3 vorgestellte Entwicklungsprozess automatisiert werden kann. Dazu wurden sinnvolle Kriterien definiert, um eine Auswahl an abbildbaren Eigenschaften zu treffen. Zusätzlich wurden Korrelationsfunktionen aufgestellt, die eine Bewertung von allen ausgewählten Eigenschaften auf einer einheitlichen Skala ermöglichen. Der Fokus bei der Automatisierung des Entwicklungsprozesses liegt in der Abstraktion von Simulationsmodellen zur Bewertung der Eigenschaften in der frühen Phase. Es wurden die Implementierungen für jede einzelne bewertete Eigenschaft gezeigt. Anschließend wurden diese anhand der Abbildung von Realfahrzeugen im EOKET überprüft.

Somit wurde eine Lösung entwickelt, die Grundzüge des Gesamtprozesses der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung im Software-Werkzeug EOKET abzubilden. Die Bedienoberflächen des EOKET sind im Anhang D dargestellt.

Die gezeigte Automatisierung des Prozesses bietet die Basis für die Optimierung der Eigenschaftserfüllung über Variationen des technischen Konzepts, wie sie im folgenden Kapitel beschrieben wird.

6 Eigenschaftsorientierte Optimierung von Fahrzeugkonzepten

Der in Kapitel 4.3 dargestellte Prozess dient der Auslegung und Bewertung eines Elektrofahrzeugkonzepts auf Basis gesetzter Eigenschaftsziele. So können Parameter des technischen Konzepts variiert und die Güte aus Eigenschaftssicht über eine Bewertungsfunktion verglichen werden (Prozessschritt ⑦). Zur Optimierung des technischen Konzepts werden die Prozessschritte ③ bis ⑦ iterativ durchlaufen. Verschiedene Möglichkeiten von Parametervariationen werden vorgestellt, um möglichst effektiv die Optima aus Eigenschaftssicht abzuleiten.

6.1 Entwicklung einer parametrischen Bewertungsfunktion

Die Schwierigkeit bei multikriteriellen Optimierungsproblemen liegt vor allem darin, den besten Kompromiss in der Erreichung verschiedener Eigenschaften zu erzielen. Das vorliegende Optimierungsproblem beinhaltet, entsprechend des Anspruchs einer möglichst ganzheitlichen Bewertung, die Optimierung der in Kapitel 5 gezeigten 28 Eigenschaftsziele.

Gemäß der theoretischen Grundlagen in Kapitel 2.6.2 eignet sich für die losgelöste Bewertung einzelner Konzepte vor allem eine Vorgehensweise, die eine Gewichtung der Eigenschaften zeitlich vor dem Lösungsprozess festlegt.

6.1.1 Eigenschaftswerte als Grundlage der Bewertungsfunktion

Für die Bewertungsfunktion werden alle physikalischen Eigenschaftsausprägungen gemäß Kapitel 5.2 auf die Eigenschaftswerteskala normiert. Anschließend wird jeweils die Differenz der Ist- und Ziel-Eigenschaftswerte ermittelt. Abweichungen des aktuellen Konzepts zur Zielpositionierung $\Delta Eig_{ij} = Eig_{Ist,ij} - Eig_{Ziel,ij}$ sind Basis der Bewertungsfunktion. Der Index i steht für die Eigenschaftsfelder, der Index j für die einzelnen Eigenschaften des jeweiligen Eigenschaftsfelds. Je nach Ausprägung der jeweiligen Eigenschaft ergibt sich eine Unter- oder Übererfüllung in Bezug auf das angestrebte Ziel. Positive Werte der Differenz von Ist- zu Ziel-Eigenschaftswerten bedeuten Übererfüllungen, negative Werte Untererfüllungen im Vergleich zum gesetzten Ziel. Der Wertebereich reicht von -5 bis 5 aufgrund der maximal möglichen Differenzen (Abbildung 6-1).

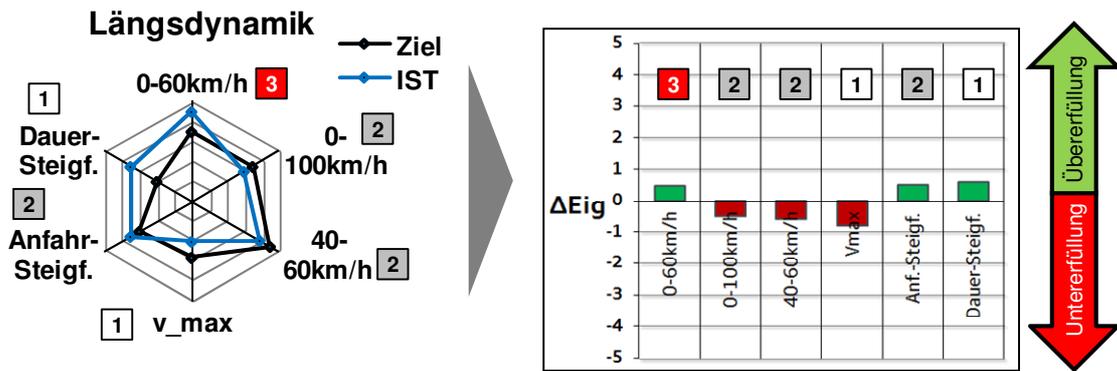


Abbildung 6-1 Abweichungen der Eigenschaftserfüllungen als Basis der Bewertungsfunktion aus [Wie12a]

Um Abweichungen von den Zielwerten differenziert zu bewerten, wurde aufbauend auf den Eigenschaftsdeltas ΔEig eine Modifikationsfunktion ΔEig_{mod} entwickelt (6-1). Über diese Modifikationsfunktion können unterschiedliche Konzepte in Bezug auf die Kundenwünsche bzw. die Positionierung favorisiert werden, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben wird. Dabei steht n für das Verhältnis von Über- zu Untererfüllung (Kapitel 6.1.2) und der Faktor s für die Form der Modifikationsfunktion (Kapitel 6.1.3).

$$\Delta Eig_{mod,ij} = f(\Delta Eig_{ij}) = \begin{cases} -\frac{1}{5^s} (\Delta Eig_{ij})^s & \text{für } \Delta Eig_{ij} \leq 0; s \in \mathbb{R}^+ \\ \frac{1}{5^s} n (\Delta Eig_{ij})^s & \text{für } \Delta Eig_{ij} > 0; n \in [0;1]; s \in \mathbb{R}^+ \end{cases} \quad (6-1)$$

6.1.2 Verhältnis von Über- zu Untererfüllung

Eine Unterscheidung der Differenzen der Eigenschaftserfüllungen in Unter- und Übererfüllungen ist nötig, um Stellhebel für die strategische Bewertung der Erreichung von Zielwerten zu erhalten. Ist die Differenz null, so ist der Zielwert exakt erfüllt. Negative Differenzen, also Untererfüllungen von Zielen, sind zu „sanktionieren“. Wie stark jedoch die Übererfüllung von Zielen „honorieren“ wird, hängt von der strategischen Betrachtungsweise der gesetzten Zielwerte ab.

Werden Zielwerte als optimale Werte für das Gesamtfahrzeug angenommen, kann davon ausgegangen werden, dass Übererfüllungen vom Kunden nur geringfügig honoriert werden. Werden Zielwerte hingegen als plausible, für das Fahrzeug realistische Werte angesehen, die jedoch einzeln nicht das jeweils absolute Optimum darstellen, können Übererfüllungen stark belohnt werden.

Über die Modifikationsfunktion ΔEig_{mod} wird der Wertebereich von ΔEig von $[-5;5]$ auf das Intervall $[-1;1]$ abgebildet. Über den Verhältnissfaktor n wird der positive Bereich, also die Übererfüllung, auf das Intervall $[0;n]$ skaliert. Damit wird der Einfluss der Übererfüllung im Vergleich zur Untererfüllung reduziert (Abbildung 6-2).

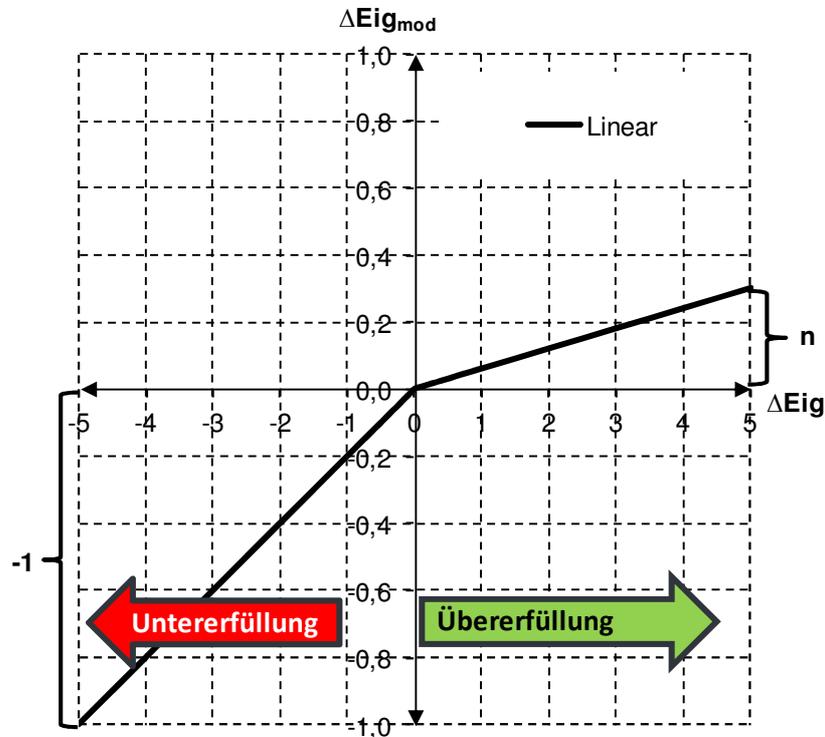


Abbildung 6-2 Modifikationsfunktion: Verhältnis Über- zu Untererfüllung aus [Wie12b]

6.1.3 Integration der Positionierung in die Bewertungsfunktion

Neben dem Verhältnis der Über- zur Untererfüllung wird über den Formfaktor s in (6-1) der Verlauf der Modifikationsfunktion angepasst. Folglich ist es möglich, kleine Abweichungen vom Zielwert anders als große Abweichungen zu bewerten.

Um ausgeglichene Konzepte zu bevorzugen, werden Werte von s zwischen null und eins gewählt. Der entstehende wurzelfunktionsähnliche Verlauf bewirkt, dass bereits kleine Untererfüllungen mit großen negativen Werten belegt werden und entsprechend möglichst vermieden werden sollten. Übererfüllungen sind erwünscht und werden honoriert, jedoch ist die Höhe der Übererfüllung aufgrund des stark degressiven Verlaufs der Funktion kaum ausschlaggebend. Es werden kleine Übererfüllungen angestrebt, große Übererfüllungen hingegen sind nicht zwingend notwendig (hellblaue Kurve in Abbildung 6-3).

Bei einer spitzen Fahrzeugpositionierung sollten einige hoch priorisierte Eigenschaften besonders gut ausgeprägt sein, während eine geringe Ausprägung in nieder priorisierten Eigenschaften akzeptiert wird. Für die spitze Positionierung werden Potenzfunktionen mit Werten von s größer eins gewählt. Durch diesen Verlauf der Modifikationsfunktion haben kleine Abweichungen vom Zielwert fast keinen Einfluss auf die Bewertungsfunktion. Große Übererfüllungen, die sogenannten Konzeptspitzen, werden exponentiell stark belohnt. Um diese große Übererfüllung spitzer Fahrzeugkonzepte zu ermöglichen, werden kleine Untererfüllungen toleriert und kaum bestraft. Große Untererfüllungen gehen jedoch mit progressiv steigend negativen Werten in die Bewertungsfunktion ein, um zu große Abweichungen der jeweiligen Zielwerte zu verhindern (dunkelblaue Kurve in Abbildung 6-3).

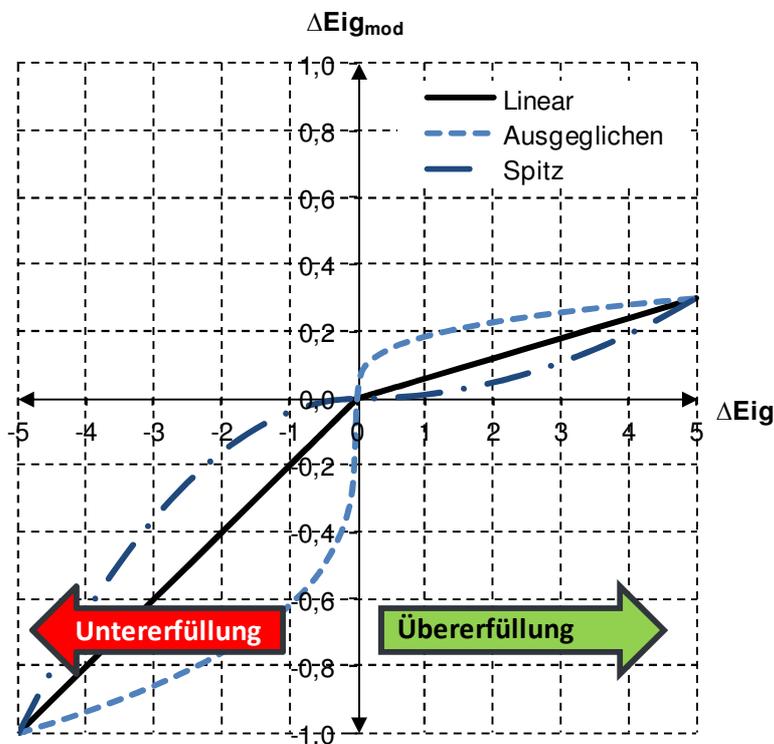


Abbildung 6-3 Modifikationsfunktion: Positionierung über Formfaktor aus [Wie12b]

6.1.4 Aufbau der Gesamt-Bewertungsfunktion

Um die Güte eines Konzepts zu bestimmen, sind die Erfüllungen der 28 im EOKET abgebildeten Eigenschaften (Kapitel 5.1) zu bewerten. Dazu müssen die modifizierten Eigenschaftsdeltas $\Delta Eig_{mod,ij}$ zu einer einzigen Kennziffer zusammengefasst werden.

Es wird das Verfahren der mehrstufig gewichteten Summe nach Lindemann [Lin09, S. 185 f.] angewandt werden. Die modifizierten Eigenschaftsdeltas werden mit ihrer

Gewichtung G_{ij} multipliziert und addiert. Daraus ergeben sich die gewichteten durchschnittlichen Deltas der Eigenschaftsfelder ($\Delta Eig_{mod,i}$). Es ist somit wichtiger, in hoch gewichteten Eigenschaften gute Erfüllungen zu erzielen, weil diese stärker als gering gewichtete Eigenschaften in die Bewertungsfunktion eingehen.

$$\Delta Eig_{mod,i} = \sum_{j=1}^k \Delta Eig_{mod,ij} \frac{G_{ij}^q}{\sum_{j=1}^k G_{ij}^q} \quad (6-2)$$

Der Gesamteigenschaftserfüllungsgrad (kurz GEEG) wird durch eine erneute Anwendung des Verfahrens der gewichteten Summe bestimmt. Das gewichtete durchschnittliche Gesamteigenschaftsdelta wird auf eine Abweichung von einem 100 %-igen GEEG bezogen. Sind die Eigenschaftsdeltas im gewichteten Schnitt positiv, ergibt sich eine Erfüllung von über 100 %. Sind die Eigenschaftsdeltas im gewichteten Schnitt negativ, liegt der GEEG unter 100 %.

$$GEEG = 100\% \cdot \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \left[\Delta Eig_{mod,i} \frac{G_i^q}{\sum_{i=1}^k G_i^q} \right] \right\} \quad (6-3)$$

In beiden Stufen der gewichteten Summe (6-2) und (6-3) können die Gewichtungsfaktoren über den Potenzfaktor q modifiziert werden. Bei $q = 0$ haben alle Gewichtungen den Wert eins. Folglich ist die Erfüllung in allen Eigenschaften gleich wichtig. Bei $q = 1$ werden die auf der 1-2-3-Skala gesetzten Gewichtungen unverändert verwendet. Bei Werten von $q > 1$ sind die höher gewichteten Eigenschaften exponentiell wichtiger als die gering gewichteten. Die Randbedingungen für die unterschiedlichen möglichen Parametrierungen von q sind in Kapitel 6.7.1 beschrieben.

6.2 Alternative Ansätze für Bewertungsfunktionen

Neben dem umgesetzten Vorgehen der mehrstufig gewichteten Summe gibt es, wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, weitere Ansätze zur Lösung von multikriteriellen Optimierungsproblemen. Im Folgenden werden zwei weitere vielversprechende Lösungsmöglichkeiten für die vorliegende Optimierungsaufgabe untersucht und diskutiert.

6.2.1 Lösung unter Verwendung von Pareto-Fronten

Andere Forschungsansätze, wie Kuchenbuch et al. [Kuc11b], setzen für einige Eigenschaften Mindest erfüllungen und optimieren nur die Zielerreichung in zwei oder drei Eigenschaften. Für zwei Eigenschaften kann als Ergebnis der Optimierung eine Pareto-Front mit allen besten Kompromissen für diese beiden Eigenschaften gewonnen werden (Grundlagen in Kapitel 2.6.2). Vorteil der Vorgehensweise ist der Wegfall der komplexen Bewertungsfunktion und die manuelle Auswahl eines Konzepts aus der Menge der Pareto-optimalen Lösungen durch den Nutzer. Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass die Ausprägung von den mit Mindest erfüllungen belegten Eigenschaften keinen Einfluss auf die Lage des Optimums hat. Wird etwa für eine Mindest erfüllung eine Grenze für den Anschaffungspreis gesetzt, werden mögliche günstigere Anschaffungspreise, also Übererfüllungen dieser Mindestforderung, nicht honoriert. Dabei werden Aspekte, die die Lösungsfindung maßgeblich beeinflussen, ausgeblendet, weshalb die Ganzheitlichkeit des Ansatzes kritisch anzusehen ist. Ein Beispiel für eine Pareto-Front mit möglichen Lösungen wird in Kapitel 7.2.2 gezeigt.

6.2.2 Bewertungsfunktion bei Anwendung von Fuzzy Decision Making

Ein Problem bei der Bewertungsfunktion gemäß dem Verfahren der gewichteten Summe ist die häufig sprunghafte Änderung des Optimums bei Anpassung der Gewichtungen [Ber00, S. 28-34]. Für einen kontinuierlicheren Verlauf des Optimums kann die Methodik Fuzzy Decision Making [Bai03] gemäß Kapitel 2.6.2 angewandt werden.

Abbildung 6-4 zeigt ein Beispiel, in dem die Anwendung des Verfahrens der gewichteten Summe zu einem Sprung bei Änderung der Gewichtung führt. Bei hoher Gewichtung der Beschleunigung liegt das Optimum bei 5 kWh Batteriekapazität und springt bei höherer Gewichtung der Reichweite auf 33 kWh. Im Gegensatz dazu gibt es bei der Fuzzy-Lösung einen kontinuierlichen Verlauf mit zahlreichen Lösungen zwischen den beiden Optima.

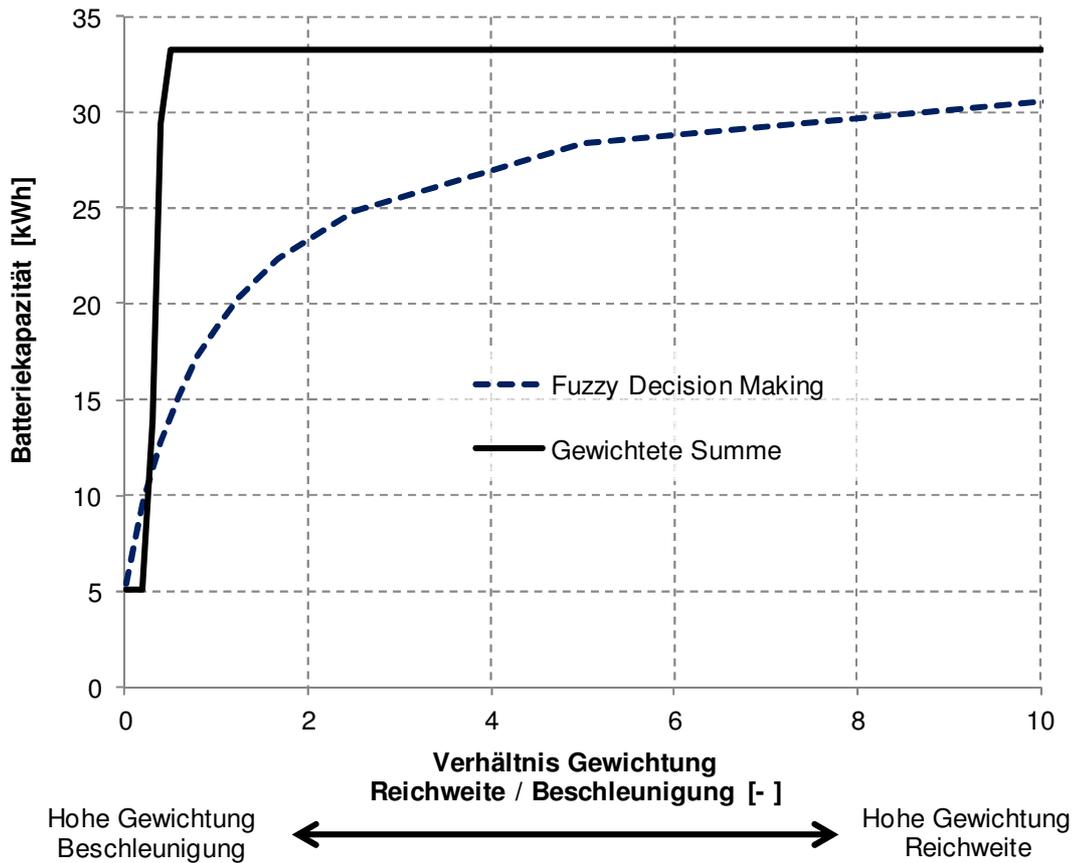


Abbildung 6-4 Verlauf Optimum bei Fuzzy Decision Making im Vergleich zu gewichteter Summe nach [Bla12, S. 42]

Bei zwei konkurrierenden Zielen kann das Verfahren Fuzzy Decision Making die sprungartige Änderung des Optimums effektiv verhindern. Wird auf die Erreichung mehrerer Ziele optimiert, sind bei Anwendung des Minimum-Operators einige wenige dominante Eigenschaften vorhanden, die die Lage des Optimums bestimmen und viele weitere Eigenschaften, die keinen Einfluss auf das Optimum haben. In Abbildung 6-5 sind die Verläufe der drei Eigenschaften Reichweite, Beschleunigung 0-100 km/h und Anschaffungskosten über der Batteriekapazität dargestellt. Die Minimum-Funktion nach Fuzzy Decision Making ergibt sich lediglich aus den Verläufen der Reichweite und der Anschaffungskosten, ohne durch den Verlauf der Beschleunigung beeinflusst zu werden.

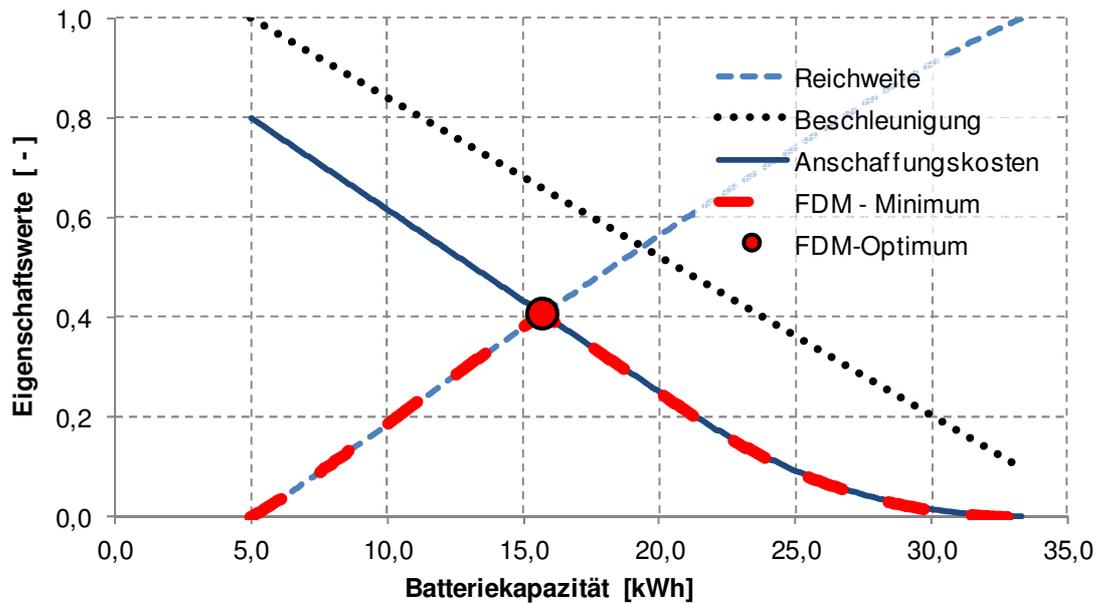


Abbildung 6-5 Minimum Operator bei Fuzzy Decision Making

Eine Möglichkeit, Abhilfe für dieses Problem zu schaffen, liegt darin, den Minimum-Operator der Fuzzy-UND-Verknüpfung durch einen γ -Operator zu ersetzen [Ber00, S. 24 f.]. Hierfür muss allerdings für γ ein willkürlicher Wert gewählt werden, wodurch zusätzliche Unschärfe und Intransparenz in die Bewertungsfunktion gebracht werden. Deshalb wurde von der Anwendung des γ -Operators abgesehen.

Eine weitere Herausforderung der Bewertung über Fuzzy Decision Making ist die notwendige Normierung der Eigenschaftserfüllung auf das Intervall [0;1]. Dafür muss der maximal erreichbare Eigenschaftswert bekannt sein, was allerdings meist erst nach der kompletten Lösungsraumanalyse der Fall ist. Außerdem muss die Gewichtung der Eigenschaften, die als Input mit den Werten [1; 1,5; 2; 2,5; 3] vorliegt, in einer willkürlichen Weise auf die Fuzzy-Skala [0;1] übertragen werden. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird die Methodik der Fuzzy Decision Making für das vorliegende multikriterielle Optimierungsproblem als ungeeignet angesehen.

6.3 Mehrparametervariation

Gemäß dem aufgezeigten Optimierungsprozess (Kapitel 4.1) wird das technische Konzept variiert, um die Eigenschaftserfüllung zu verbessern. Ziel ist es, das Konzept mit der höchsten Güte, also dem besten Wert für die in Kapitel 6.1 definierte Bewertungsfunktion, zu finden.

Für die Variationen des technischen Konzepts kommen zahlreiche Parameter in Frage. Dies sind neben Grundkonzeptentscheidungen vor allem Größen des

Gesamtfahrzeugs und der Komponenten, die innerhalb gewisser Grenzen frei definiert werden können. Damit die Variation eines Parameters durch das Auslegungstool sinnvoll ist, muss bei Änderung des Parameterwerts mindestens ein Zielkonflikt zwischen verschiedenen Eigenschaften beeinflusst werden. Die Parametervariation in eine Richtung verändert also eine Eigenschaft positiv und gleichzeitig eine andere negativ (Abbildung 6-6). Über die Optimierungsschleife kann der Wert des Parameters so lange variiert werden, bis die beste Lösung für die Zielkonflikte gefunden ist. Vielfach sind die Auswirkungen auf Eigenschaften aufgrund der starken Vernetzung im Fahrzeug von indirekter Art. Das Design strebt z.B. einen kleinen vorderen Überhang an – ein großer vorderer Überhang bietet jedoch mehr Bauraum im Vorderwagen und dadurch die Voraussetzung für eine präferierte Achslastverteilung und damit bessere Ausprägungen der Längs- und Querdynamik.

Bereits die Variation eines einzigen Parameters kann Auswirkungen auf viele Eigenschaften haben. Beispielsweise können bei Variation der Batteriekapazität 21 der 28 betrachteten Eigenschaften betroffen sein (Abbildung 6-6). Für jede Batteriekapazität werden, bei sonst unveränderten Einflussgrößen, der Wert des GEEG und die Güte des Konzepts berechnet. Es ist jedoch möglich, dass das Optimum bei einer anderen Kombination der unveränderten Größen auftritt und dadurch über die einfaktorielle Variation der Batteriekapazität nicht gefunden werden kann. Möglichkeiten, dieses Gesamtoptimum mit möglichst geringem Aufwand zu bestimmen, werden in Kapitel 6.4 erläutert.

Auswirkungen auf Eigenschaftswerte bei Erhöhung der Werte der technischen Stellhebel:	Technische Stellhebel									
	Batteriekapazität	Spitzenleistung E-Motor	Übersetzung Gang 1 / 2	Radstand	Raddurchmesser	Fahrzeughöhe	Fahrzeubreite	Überhang vorne	Überhang hinten	Antriebsart (FWD / RWD / 4WD)
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> + Verbesserung - Verschlechterung x Untersch. Beeinflussungen </div>										
Design außen										
Überhang vorne								-		
Überhang hinten									-	
Radstand				+						
Verhältnis Höhe / Breite						-	+			
Durchmesser / Räderklasse					+					
Fahrerlebnis längs										
Beschleunigung 0-60 km/h	-	+	+	-	-	-	-	-	-	x
Beschleunigung 0-100 km/h	-	+	+	-	-	-	-	-	-	x
Elastizität 40-60 km/h	-	+	+	-	-	-	-	-	-	x
Höchstgeschwindigkeit	-	+	-	-	x	-	-	-	-	x
Anfahrsteigfähigkeit	x	+	+	-	-	x		x	x	x
Dauerhöchstgeschw. bei 15% St.	x	+	-	-	x	x	-	x	x	x
Fahrerlebnis quer										
Charakterist. Geschwindigkeit	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Static Stability Factor	x	x		x	x	x	+		x	
Gierdämpfungsmaß	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Schwimmwinkelgradient	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Wirtschaftlichkeit										
Anschaffungskosten	-	-		-		-	-	-	-	x
Stromkosten	-	-	x	-		-	-	-	-	x
Leergewicht	-	-		-		-	-	-	-	x
Reichweite / Batterie										
Ladezeit	-									
Reichweite	+	-	x	-		-	-	-	-	x
Betriebszeit	+									
Komfort										
Kopffreiheit vorne	x					+				
Beinfreiheit hinten				+	-			+	+	
Kopffreiheit hinten	x					+				
Alltagstauglichkeit										
Zuladung	-	-		-		-	-	-	-	x
Kofferraumvolumen	x	x		x		+	+		+	x
Wendekreis				-			-	-		
Anzahl Sitzplätze	x	x		+			x			

Abbildung 6-6 Übersicht Einflüsse technischer Stellhebel auf Eigenschaften nach [Eng11, S. 96]

6.4 Versuchsplanung

Der naheliegendste Gedanke für Parametervariationen ist die vollständige Analyse des Lösungsraums über klassische Versuchsplanung analog Kapitel 2.6.3. Aus den möglichen Kombinationen bei größerer Anzahl der Parameter und bei kleinen Schrittweiten ergeben sich jedoch schnell hohe Versuchsanzahlen und damit lange Simulationszeiten. Im Folgenden wird ein geeigneter Umgang mit diesem Thema im Rahmen des Konzeptentwicklungstools aufgezeigt.

6.4.1 Klassische Versuchsplanung

Im EOKET wurde unter anderem das Vorgehen der klassischen Versuchsplanung umgesetzt. Gemäß den Gesetzen der Kombinatorik können alle möglichen Kombinationen der variierten Parameter und deren Ausprägungen analysiert werden.

Bei kontinuierlichem Wertebereich wird die Anzahl der Ausprägungen je Parameter durch die manuell festgelegte untere und obere Grenze sowie die Schrittweite in diesem Bereich bestimmt. Je größer der Bereich und je kleiner die Schrittweite, desto höher ist die Anzahl an Ausprägungen. Beispielsweise befinden sich im Bereich der Batteriekapazität von 10 kWh bis 30 kWh bei einer Schrittweite von 5 kWh insgesamt fünf Ausprägungen. Bei einer Anpassung des Bereichs auf 5 kWh bis 45 kWh und einer Schrittweite von 0,1 kWh ergeben sich bereits 401 Ausprägungen.

Die Variation der zehn beschriebenen technischen Stellhebel (Kapitel 6.3) sind im EOKET umgesetzt. Die Anzahl der notwendigen Simulationen n_{OS} berechnet sich aus der Multiplikation der zu untersuchenden Ausprägungen r_i der einzelnen Parameter gemäß (6-4). Sind z.B. neben den zuvor beschriebenen 401 Ausprägungen der Batteriekapazität, 60 Ausprägungen der Motorleistung zu untersuchen, ergeben sich 24.060 notwendige Simulationen. Weitere 25 Ausprägungen der Übersetzung des Getriebes sowie drei Antriebsarten führen bereits zu über 1,8 Millionen notwendige Simulationen, wobei nur vier der zehn möglichen Variationsparameter zum Einsatz kommen.

$$n_{OS} = \prod_{i=1}^f r_i \quad (6-4)$$

Bei der manuellen klassischen Versuchsplanung muss stets ein Kompromiss zwischen möglichst genauer Analyse des Lösungsraums und möglichst geringer Rechenzeit eingegangen werden. Wird eine große Schrittweite gewählt, ergibt sich eine kurze

Rechenzeit. Allerdings ist das Risiko hoch, die optimale Kombination der Parameter nicht simuliert zu haben. Wird eine lange Rechenzeit in Kauf genommen, kann bei vielen frei gegebenen Parametern und kleinen Schrittweiten eine genaue Analyse des Lösungsraums durchgeführt werden. Diese Simulationen können jedoch mehrere Stunden bis Tage oder Wochen dauern. Die oben beispielhaft erwähnten 1,8 Millionen Kombinationen benötigen bei einer Schleifendauer von einer Sekunde eine Gesamtsimulationsdauer von etwa 21 Tagen. Möglichkeiten der Konfliktauflösung zwischen kurzer Rechenzeit und genauer Lösungsraumanalyse werden in den folgenden Abschnitten mit statistischer Versuchsplanung sowie parametrischer Lösungsräumengrenzung aufgezeigt.

6.4.2 Statistische Versuchsplanung

Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung auf das vorliegende Optimierungsproblem wurde von Graf [Gra12, S. 44-49] detailliert geprüft. Dazu wurde ein Screening-Versuch durchgeführt und ausgewertet. Somit konnte die Einflussstärke und -richtung der einzelnen Einflussgrößen auf die Gesamteigenschaftserfüllung bestimmt werden.

Problematisch bei diesem Vorgehen ist, dass im Screening-Versuch für jede Einflussgröße nur zwei Werte analysiert werden („+“ und „-“ Stufe). Für den Radstand könnten also die Werte 2400 mm und 2450 mm und für die Batterie die Werte 5 kWh und 25 kWh beliebig festgelegt werden. Der gewählte Abstand zwischen der jeweiligen „+“ und „-“ Stufe geht direkt in die Auswertung des Einflusses des Parameters ein. Folglich hängt die berechnete Einflussstärke stark von den beliebig gewählten Werten der Einflussgrößen ab und ist nur bedingt aussagekräftig.

Werden die „+“ und „-“ Stufen der Einflussgrößen nicht beliebig gewählt, sondern etwa nach dem Kriterium „gleiche Mehrkosten durch die Änderung von ‚-‘ auf ‚+‘ Stufe“, sind die Ergebnisse besser vergleichbar. Jedoch bleibt das Problem bestehen, dass sich der berechnete Einfluss nur auf den betrachteten Sprung der Einflussgröße bezieht und weder eine Inter- noch eine Extrapolation der Werte direkt möglich ist. Deswegen wurde der Ansatz, die Einflussstärke und -richtung über statistische Versuchsplanung zu bestimmen, nicht weiter verfolgt.

6.4.3 Parametrische Lösungsraumeingrenzung

Eine andere Möglichkeit zur Reduzierung von Simulationsschleifen besteht darin, bereits vor Start der Simulationsreihe Bereiche des Lösungsraums mit ungültigen Konzepten auszuschließen. So muss nur ein kleinerer Bereich des Lösungsraums analysiert werden.

Zwei Ursachen können zur Ungültigkeit von Konzepten führen. Zum einen sind dies technische Restriktionen und zum anderen die geforderten Mindest erfüllungen in allen Eigenschaften. Die technischen Restriktionen schließen nicht realistisch darstellbare Konzepte von der Lösungsmenge aus. Beispielsweise ist der Bauraum im Fahrzeug bei unveränderten Abmaßen und folglich die maximal im Fahrzeug verbaubare Anzahl an Batteriezellen begrenzt. Restriktionen für die Kombination aus Batterie-Energieinhalt und Motorleistung sind unter anderem die vorgegebene Spannungslage der Batterie, Gewichtsbeschränkungen sowie das Zusammenspiel der Leistungen (Abbildung 6-7).

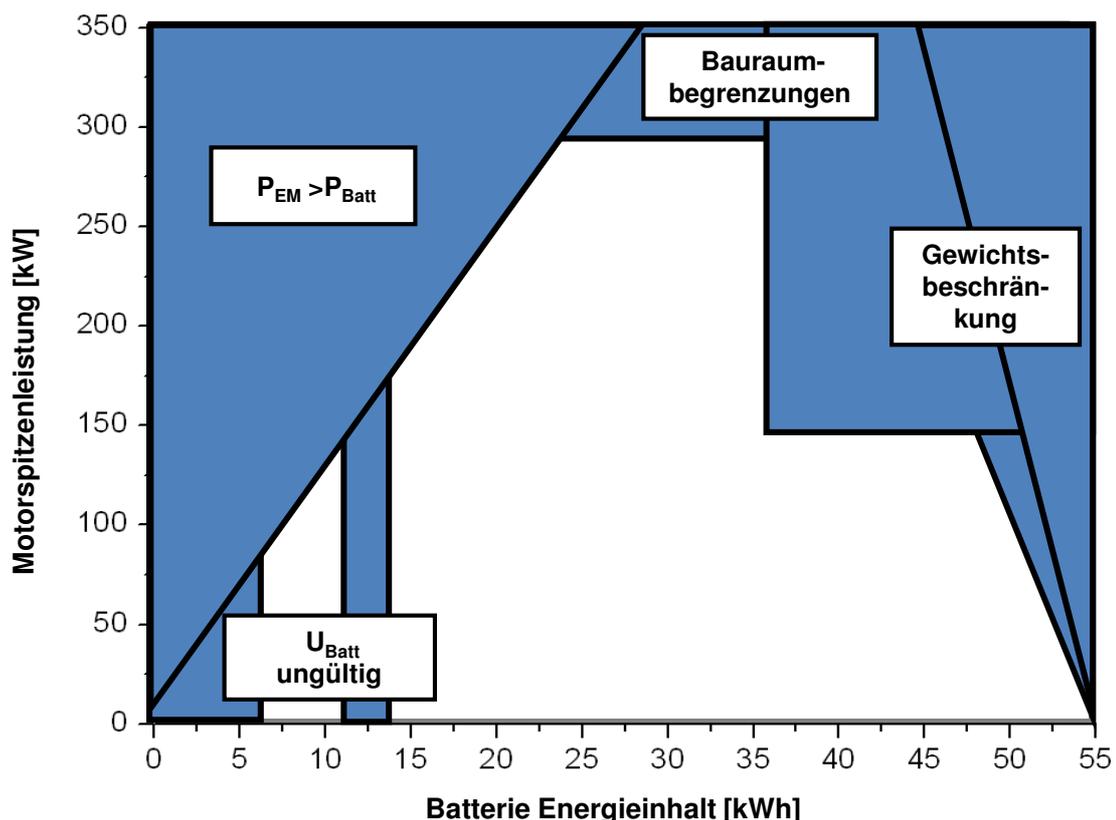


Abbildung 6-7 Lösungsraumeingrenzung durch technische Restriktionen nach [Wie12a]

Neben technischen Restriktionen wird der Lösungsraum durch die definierten Mindest erfüllungen in den Eigenschaften weiter eingeschränkt (Kapitel 5.2). Für ein gültiges Konzept muss die Erfüllung in allen Eigenschaften mindestens den Eigenschaftswert

fünf erreichen. Die physikalischen Werte für die Mindest erfüllungen sind über die Korrelationsfunktionen festgelegt. Bei der Reichweite kann z.B. für den Eigenschaftswert fünf eine Mindest erfüllung von 40 km notwendig sein. Die zur Erreichung der Mindest erfüllungen notwendige Dimensionierung der Auslegungsparameter wird über Simulationen bestimmt.

In Abbildung 6-8 sind die Lösungsraumeingrenzungen von Batteriekapazität und Motorleistung aufgrund der Mindest erfüllungen von Reichweite, Beschleunigungswerten und Anschaffungskosten dargestellt. Für eine Mindest erfüllung von 40 km Reichweite ergibt sich eine Batterie mit einer Mindestkapazität von 14 kWh. Bei höheren Motorleistungen steigt diese Mindestkapazität an, weil bei einer schwereren E-Maschine eine höhere Kapazität notwendig ist, um die Mindestreichweite von 40 km zu erfüllen. Wird die Batteriekapazität auf geringere Werte gesetzt, führt dies unweigerlich zu ungültigen Konzepten, weil sich für die Reichweite Eigenschaftswerte unter fünf ergeben. Alle dargestellten Restriktionen sind parametrisch und variieren bei Änderung der notwendigen Mindest erfüllungen.

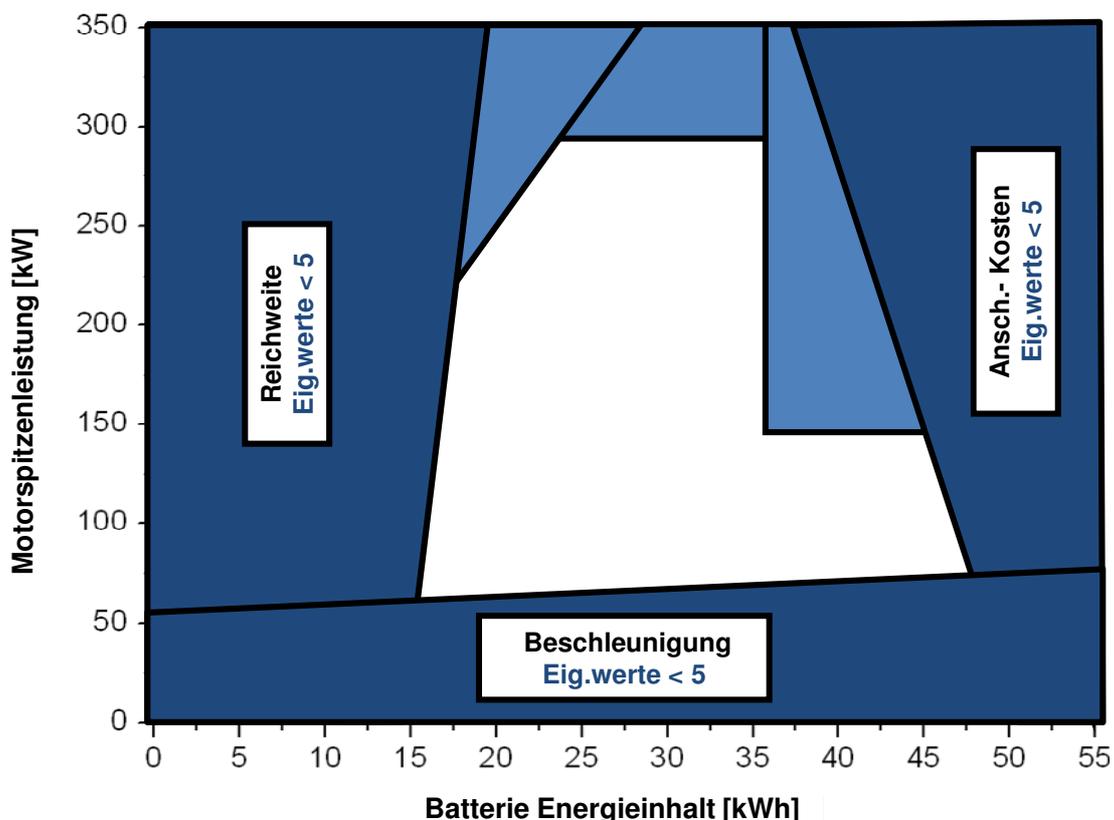


Abbildung 6-8 Lösungsraumeingrenzung durch Mindest erfüllungen in den Eigenschaften nach [Wie12a]

Die Automatisierung der Lösungsraumeingrenzung wurde von Graf [Gra12, S. 50-77] umgesetzt. Dabei werden sämtliche technische Restriktionen sowie Eigenschafts-Mindest erfüllungen auf ihre Beschränkung des Lösungsraums hin untersucht. Über einen Algorithmus wird daraus der Lösungsraum in Abhängigkeit von den festgelegten Eigenschaftskorrelationen generiert. Dadurch ergeben sich für alle Einflussgrößen maximale Variationsbereiche, also sinnvolle Unter- und Obergrenzen.

Der mögliche Lösungsraum von E-Maschinenleistung und Batteriekapazität kann über diesen Algorithmus analog Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8 generiert werden. Zur Veranschaulichung und zum Verständnis des verfügbaren Lösungsraums ist dies ein nützliches Vorgehen. Da der Algorithmus zur detaillierten Berechnung aller Restriktionen einige Zeit in Anspruch nimmt, wurde ein vereinfachtes Vorgehen zur Anwendung in der klassischen Versuchsplanung entwickelt. Wird etwa zusätzlich zu Batteriekapazität und Motorleistung der Radstand variiert, soll für jeden Wert des Radstands der mögliche Lösungsraum abgeschätzt und daraus die Grenzen für die Variation von Batteriekapazität und Motorleistung definiert werden. Bei einer Verkleinerung des Radstands ist es effektiv, den Bereich der Batteriekapazität aufgrund des geringeren verfügbaren Platzes einzuschränken, um weitere ungültige Simulationen einzusparen.

Für die klassische Versuchsplanung genügt es, eine rechteckige Form des Lösungsraums zu kennen. Um die vier notwendigen Punkte des Rechtecks fest zu legen, ist ein wesentlich einfacherer und schnellerer Algorithmus ausreichend. Der zusätzliche zeitliche Aufwand der Lösungsraumbestimmung muss über die Zeitersparnis für nicht durchgeführte Simulationen mehr als kompensiert werden, damit sich das Vorgehen lohnt. Abbildung 6-9 zeigt das grundsätzliche Vorgehen. Über eine Abschätzung der minimalen und maximalen Werte für Motorleistung und Batteriekapazität wird der verbleibende Lösungsraum aufgespannt. Werden in diesem Lösungsraum sämtliche Kombinationen aus Motorleistung und Batteriekapazität simuliert, gibt es stets einen gewissen Anteil ungültiger Kombinationen (hell- und dunkelblaue Bereiche). Im Vergleich zu einem Vollversuch des gesamten Lösungsraums, also inklusive des grauen Bereichs, ist der Vorteil durch die vereinfachte Lösungsraumeingrenzung jedoch deutlich erkennbar. Für die in Graf [Gra12, S. 78 f.] geprüften Beispiele entsteht über dieses Verfahren ein zeitlicher Gewinn von etwa 25 %.

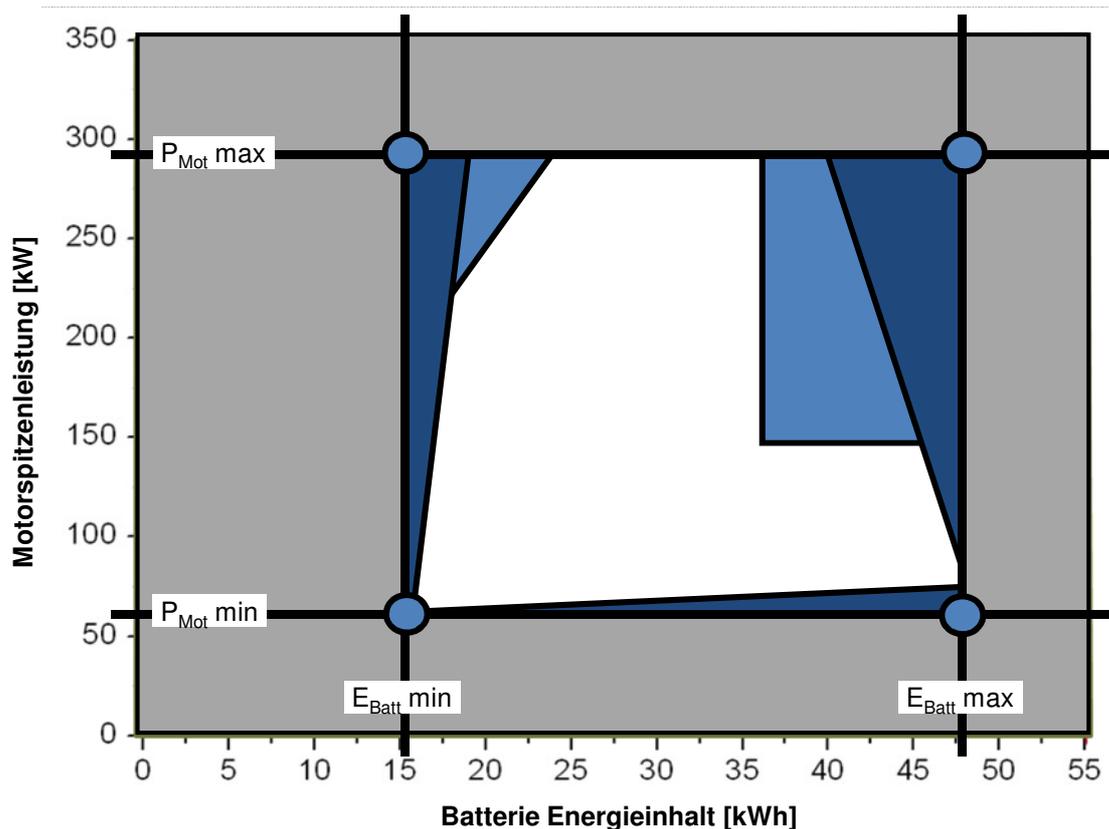


Abbildung 6-9 Vereinfachtes Vorgehen der Lösungsraumeingrenzung bei klassischer Versuchsplanung

6.5 Algorithmusbasierte Optimierer

Mit der klassischen Versuchsplanung kann theoretisch jede Kombination der technischen Stellhebel simuliert werden, jedoch erfordert eine komplette Analyse des Lösungsraums eine hohe Anzahl an Iterationen (Kapitel 6.4.1). Abhilfe wird über algorithmusbasierte Optimierer geschaffen, die nicht den gesamten Lösungsraum analysieren, sondern sich auf das Ableiten der Optima konzentrieren.

Für das vorliegende Problem kommen verschiedene Optimierungsalgorithmen in Frage (Kapitel 2.6.3). Die Anwendung von enumerativen Algorithmen, wie der klassischen Versuchsplanung oder der Design of Experiments Methodik, wurde bereits in Kapitel 6.4 diskutiert. Hier soll nun die Verwendung einer deterministischen, einer stochastischen sowie einer hybriden Methodik untersucht werden. Die Algorithmen wurden der Matlab Global Algorithm Toolbox [Mat11] entnommen und für die Bearbeitung der Aufgabenstellung entsprechend parametrisiert.

Als Vertreter der deterministischen Verfahren wurde der Pattern Search Algorithmus (Kapitel 2.6.3) ausgewählt, der nicht gradientenbasiert arbeitet. Wird der Pattern Search Algorithmus mit einer stochastischen Startwertwahl kombiniert, entsteht ein hybrides Verfahren, das deutlich besser mit konkaven Zielfunktionen umgehen kann.

Dadurch wird das Risiko, ein lokales statt des globalen Optimums zu finden, weiter minimiert. Die stochastische Startwertwahl wird über den „GlobalSearch“ Algorithmus der Matlab Global Optimization Toolbox umgesetzt [Mat11, S. 43- 49].

Zusätzlich wird als Beispiel für die stochastischen Algorithmen ein genetischer Algorithmus im EOKET implementiert und auf seine Eignung zur Ableitung des globalen Optimums überprüft.

6.6 Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung im Vergleich

Die Ansätze der Parametervariation durch Versuchsplanung und Optimierungsalgorithmen haben jeweils Vorzüge und Einschränkungen. Der Vergleich der Vorgehensschemata sowie die Analyse der jeweiligen Effektivität beschreiben die Wahl des richtigen Verfahrens für unterschiedliche Optimierungsszenarien.

6.6.1 Vorgehensschemata von Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung

Der Entwicklungsprozess aus Abbildung 4-2 ist für klassische Versuchsplanung und algorithmusbasierte Optimierer gleichermaßen gültig. Unterschiede liegen in der Vorgehensweise zur Bestimmung der Variationsparameter.

In Abbildung 6-10 werden beide Prozesse verglichen. Die zu variierenden Parameter werden in beiden Fällen manuell ausgewählt. In der klassischen Versuchsplanung müssen zusätzlich die Variationsbereiche und Schrittweiten für die einzelnen Parameter festgelegt werden. Die parametrische Lösungsraumeingrenzung nach Kapitel 6.4.3 kann sinnvolle Grenzen für die Parameter automatisiert ableiten. Sind Variationsbereiche und Schrittweiten der Parameter definiert, wird in der klassischen Versuchsplanung die Versuchsanzahl gemäß (6-4) berechnet. Im Gegensatz dazu wird bei den Optimierungsalgorithmen lediglich der gewünschte Algorithmus ausgewählt. Die Startwerte werden manuell oder über einen weiteren Algorithmus festgelegt. Die notwendige Schleifenanzahl ist vor der Optimierung nicht bekannt.

Beim Durchlaufen der Optimierungsschleifen berechnet der Optimierungsalgorithmus nach jeder Evaluierung der Eigenschaftswerte sinnvolle Ausprägungen der Variationsparameter für den nächsten Durchlauf. Ziel des Algorithmus ist die Maximierung des Werts der Gesamteigenschaftserfüllung. Erst bei Erreichen des Abbruchkriteriums wird

die Optimierungsprozedur beendet. Als Ergebnis wird ein einziges Konzept ausgegeben, das für die freigegebenen Variationsparameter den besten Wert der Gesamteigenschaftserfüllung erreicht hat.

Im Gegensatz dazu sind bei der klassischen Versuchsplanung sämtliche zu untersuchende Variationsparameter-Kombinationen bereits vor der Optimierung bekannt und werden nacheinander simuliert und anschließend über die Bewertungsfunktion evaluiert. Sind alle Versuche n_{OS} durchgeführt, ist das Ergebnis der Lösungsraum für alle berechneten Parameterkombinationen. Aus diesem Lösungsraum können die Konzepte mit der höchsten Gesamteigenschaftserfüllung bestimmt werden.

Im kommenden Abschnitt wird die Effektivität der beiden Optimierungskonzepte bei unterschiedlichen Randbedingungen analysiert.

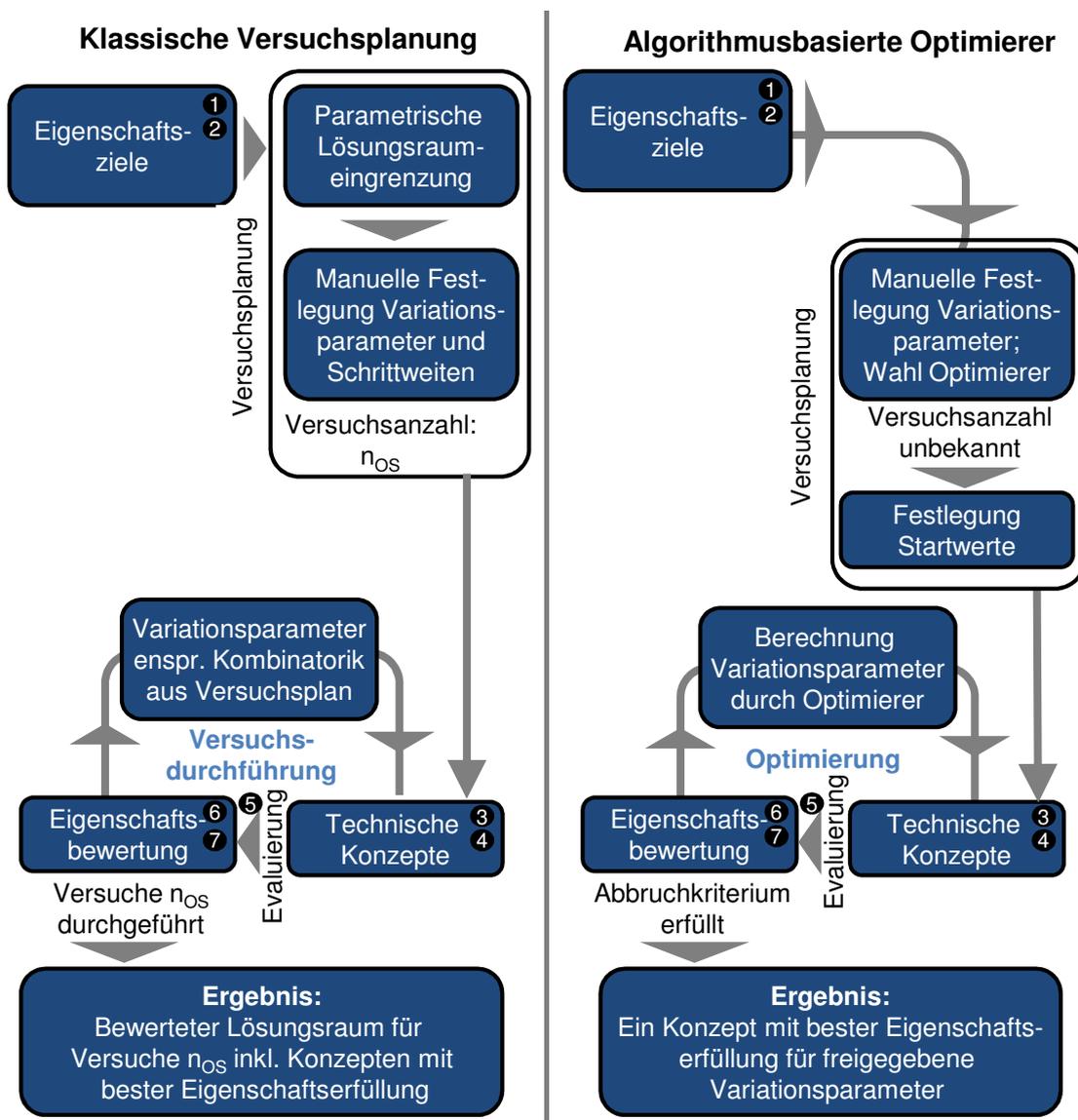


Abbildung 6-10 Vergleich der Vorgehensschemata von klassischer Versuchsplanung und algorithmusbasierten Optimierern

6.6.2 Analyse der Effektivität von Optimierungsalgorithmen und Versuchsplanung

Um die Güte der in Kapitel 6.5 definierten Optimierungsalgorithmen mit der klassischen Versuchsplanung zu vergleichen, wurden zahlreiche Szenarien analysiert [Eng11, S. 103-108; Bla12, S. 66-72; Lüc12, S. 55-64]. Bewertet wurde die Anzahl der notwendigen Simulationen mit entsprechender Simulationszeit, um das Optimum zu finden. Zudem wurden die prozentualen Abweichungen der von den Algorithmen gefundenen Optima vom jeweils besten Optimum aller Verfahren bestimmt.

Die untersuchten Fälle unterscheiden sich vorrangig in der Anzahl der zur Variation freigegebenen Parameter. Bei bis zu drei variierten Parametern kann die klassische Versuchsplanung unter Verwendung kleiner Schrittweiten und einer entsprechend detaillierten Analyse des Lösungsraums deutlich bessere Ergebnisse als die Optimierungsalgorithmen erzielen. Die Rechenzeit der klassischen Versuchsplanung beträgt allerdings ein Vielfaches der Werte der Optimierungsalgorithmen (Abbildung 6-11).

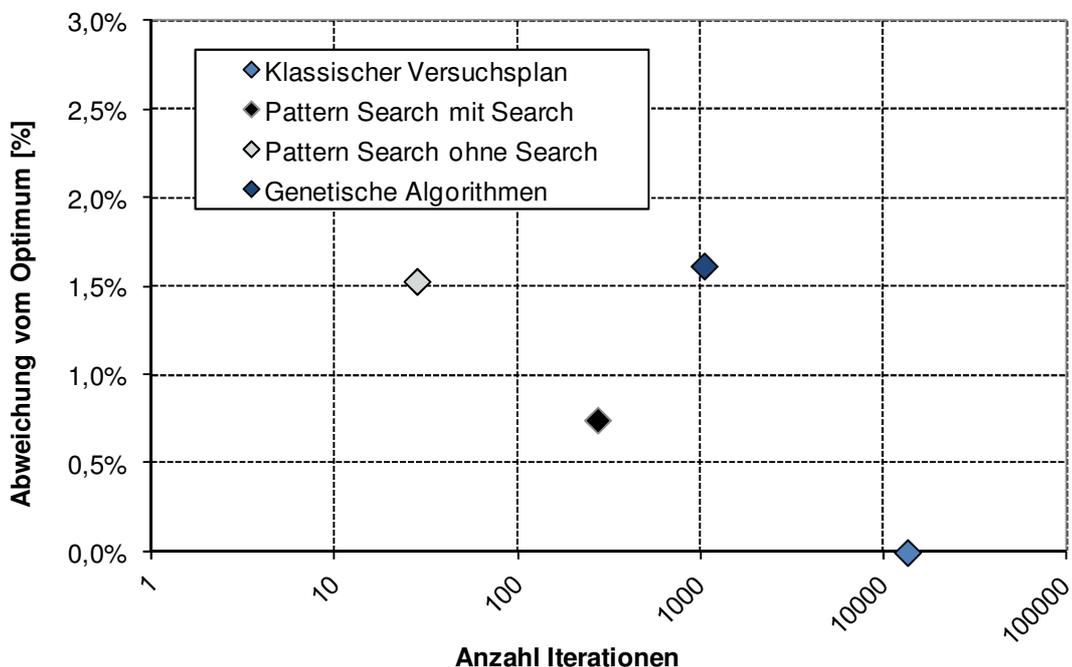


Abbildung 6-11 Vergleich der Optimierungsalgorithmen bei drei Variationsparametern nach [Eng11, S. 103-108]

Aufgrund zu großer Schrittweiten kann bei fünf Parametern und einer maximalen Simulationsanzahl von 10.000 Iterationen (entspricht etwa 3 Stunden) das Optimum über die klassische Versuchsplanung nicht mehr gefunden werden. Somit liegt bei den

Optimierungsalgorithmen die Güte der Ergebnisse bei deutlich kürzeren Simulationszeiten sogar höher (Abbildung 6-12).

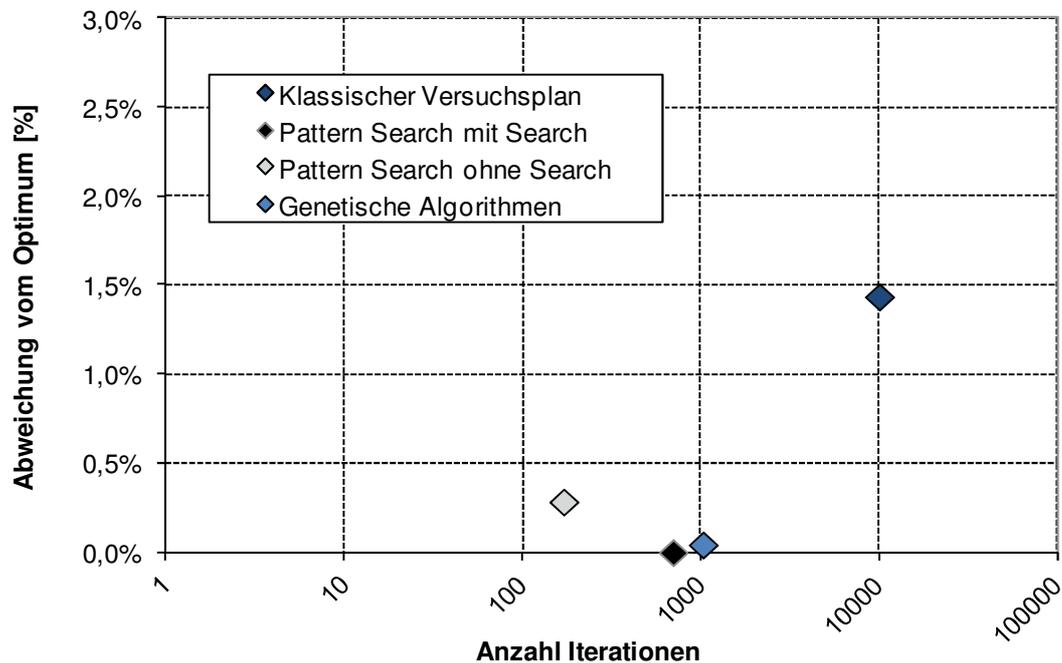


Abbildung 6-12 Vergleich der Optimierungsalgorithmen bei fünf Variationsparametern nach [Eng11, S. 103-108]

Auf Basis der durchgeführten Vergleichssimulationen kann eine Empfehlung zu Anwendungsbedingungen der Optimierungsverfahren abgeleitet werden. Bei einer geringen Anzahl an Variationsparametern und kleinen Variationsbereichen wird über die klassische Versuchsplanung mit kleinen Schrittweiten meist das beste Ergebnis erzielt. Sind allerdings mehr als drei Parameter zu variieren, kommt bei begrenzter Simulationszeit die klassische Versuchsplanung an ihre Grenzen, weil die Schrittweiten zu groß werden (Abbildung 6-13). Die Wahrscheinlichkeit, das Optimum über die Optimierungsalgorithmen zu finden, ist deutlich größer als in klassischer Versuchsplanung. Pattern Search mit Search im Vergleich zu der Variante ohne Search bringt über die stochastische Startwertfestlegung (Search) stets bessere Ergebnisse bei überschaubar längeren Simulationszeiten. Der genetische Algorithmus bietet bei mehreren Variationsparametern ähnlich gute Ergebnisse wie der Pattern Search mit Search Algorithmus und ist noch unabhängiger vom eingestellten Startwert.

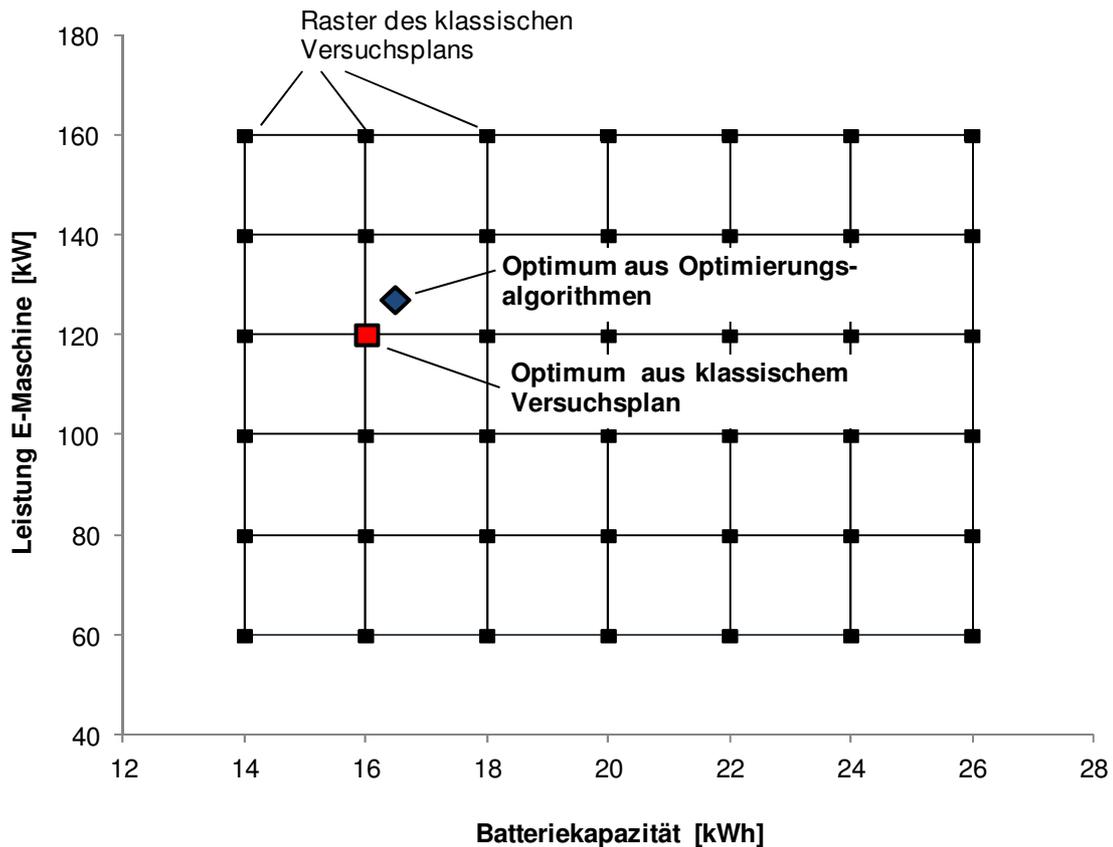


Abbildung 6-13 Problem zu großer Schrittweiten bei klassischer Versuchsplanung nach [Lüc12, S. 46]

6.7 Plausibilisierung der automatisierten Konzeptableitung

Die automatisierte Optimierung über die Prozessschritte ③ bis ⑦ (Abbildung 4-2) zur Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen ist in seiner Funktionsweise zu plausibilisieren. Dafür wurde bereits in Kapitel 5.5 die korrekte Abbildung in den einzelnen Eigenschaftsberechnungsmodulen bestätigt. Die plausible Ableitung von optimalen Konzepten über Parametervariation und die Funktionsweise der parametrischen Bewertungsfunktion werden im Folgenden analysiert.

6.7.1 Sensitivitätsanalyse der Faktoren der Bewertungsfunktion

Das über die Bewertungsfunktion erzielte Optimum hängt stark von den drei Größen Formfaktor, Gewichtung und Verhältnis Über- zu Untererfüllung ab (Kapitel 6.1). Um den Einfluss dieser Faktoren genauer zu spezifizieren und geeignete Werte für plausible Optima zu bestimmen, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Faktoren durchgeführt.

Dafür wurde eine Zielpositionierung über Gewichtung und Ausprägung der Eigenschaften festgelegt und eine detaillierte Analyse des Lösungsraums über einen klassischen Versuchsplan durchgeführt. Über die Anpassung der Faktoren der Bewertungsfunktion ändert sich die Lage des Optimums entsprechend der Ergebnisse in Abbildung 6-14.

Der Formfaktor s wurde von einem spitzen Optimum mit dem Wert fünf bis zu einem ausgeglichenen Optimum mit dem Wert 0,1 variiert (Abbildung 6-14 a). Dabei wandert das Optimum bei konstanter Batteriekapazität von einer hohen zu einer geringeren Motorleistung. Anschließend sinkt die Batteriekapazität bei wieder steigender Motorleistung. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei der spitzen Positionierung gute Reichweiten und Beschleunigungswerte durch akzeptierte Untererfüllungen in den Eigenschaften Querdynamik, Kosten und Alltagstauglichkeit erreicht werden. Je mehr der Faktor in Richtung ausgeglichenen Konzepts tendiert, desto stärker werden Untererfüllungen bestraft. Über eine geringere Motorleistung und Batteriekapazität wird also versucht, die Untererfüllungen in allen Eigenschaften zu reduzieren.

Durch Erhöhung des Werts q , der Potenzierung der Gewichtungen, und folglich einer immer spitzeren Positionierung, steigt die Motorleistung an (Abbildung 6-14 b). q wurde für spitze Konzepte mit drei gewählt, wodurch die Gewichtungsfaktoren statt 1-2-3 auf 1-8-27 gespreizt werden. Eine mit drei gewichtete Eigenschaft geht dadurch mit 27-fachem Gewicht im Vergleich zu einer mit eins gewichteten Eigenschaft in die Bewertungsfunktion ein. Bei Parametrierungen von $q = 0$ werden alle Gewichtungen auf den Wert eins gesetzt. Es gehen damit alle Eigenschaften mit gleicher Wichtigkeit in die Bewertungsfunktion ein. Im dargestellten Beispiel ergibt sich bei dieser ausgeglichenen Parametrierung eine deutlich kleinere Motorleistung unter Nutzung der gleichen Batteriekapazität.

Der Faktor des Verhältnisses von Über- zu Untererfüllung n beschreibt die Beziehung der Belohnung von Übererfüllung zur Bestrafung von Untererfüllung. Soll die Übererfüllung von Zielwerten nicht belohnt werden, ist das Verhältnis null. Wird die Übererfüllung im gleichen Maße belohnt wie die Untererfüllung bestraft, so hat das Verhältnis den Wert eins. Bei stärkerer Belohnung von Übererfüllungen wandert das Optimum im betrachteten Fall in Richtung kleinerer Batteriekapazitäten und größerer Motorleistungen (Abbildung 6-14 c). Dies liegt an der stärkeren Belohnung der Übererfüllung in der Längsdynamik im Vergleich zur schwächer gewichteten Untererfüllung der Reichweite.

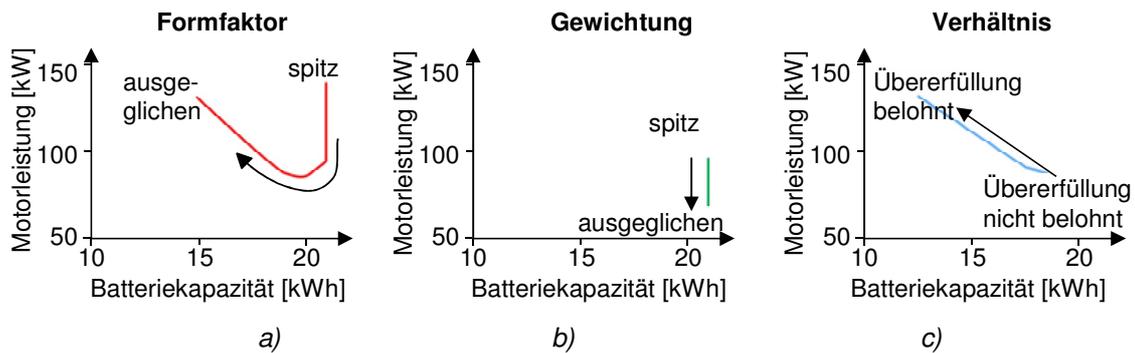


Abbildung 6-14 Sensitivität der Faktoren der Bewertungsfunktion auf das Optimum aus [Bla12, S. 36-38]

Die Verläufe des Optimums bei Änderung der Faktoren der Bewertungsfunktion sind nachvollziehbar. Somit wird die Bewertungsfunktion als plausibilisiert angesehen. Für die drei Faktoren werden folgende Wertebereiche als sinnvoll erachtet und für die weitere Verwendung in der Optimierung verwendet:

	Positionierung	
	Spitz	Ausgeglichen
Formfaktor s	3...5	0,1...0,3
Gewichtung q	3...5	0...1
Verhältnis Über- / Untererfüllung n	0,3...1	0...0,1

Tabelle 6-1 Faktoren der Bewertungsfunktion

6.7.2 Plausibilität der gefundenen optimalen Fahrzeugkonzepte

Die optimalen Fahrzeugkonzepte, die sich aus der Parametervariation über die klassische Versuchsplanung oder die algorithmusbasierten Optimierer ergeben, sind auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Zwei grundlegende Fälle werden unterschieden.

Im ersten Fall ist die Zielpositionierung so gesetzt, dass alle Eigenschaftsziele erreicht oder sogar teilweise übererfüllt werden können. Dadurch ist bei einer ausgeglichenen Bewertungsfunktion eine möglichst genaue Abbildung der Zielwerte das plausibelste Ergebnis. Die Güte des Ergebnisses lässt sich dadurch nachvollziehbar überprüfen.

Im EOKET wurden zahlreiche Optimierungsreihen unter Berücksichtigung der Zielerreichbarkeit durchgeführt. Die Ergebnisse weisen bei ausgeglichener Bewertungsfunktion nur geringe Abweichungen von den Zielwerten auf. Beispielhaft ist in Abbildung 6-15 ein Optimierungsergebnis mit leichten Übererfüllungen dargestellt.

Dadurch ist die plausible Arbeitsweise des Optimierungsalgorithmus bei Erreichbarkeit der Ziele sichergestellt.

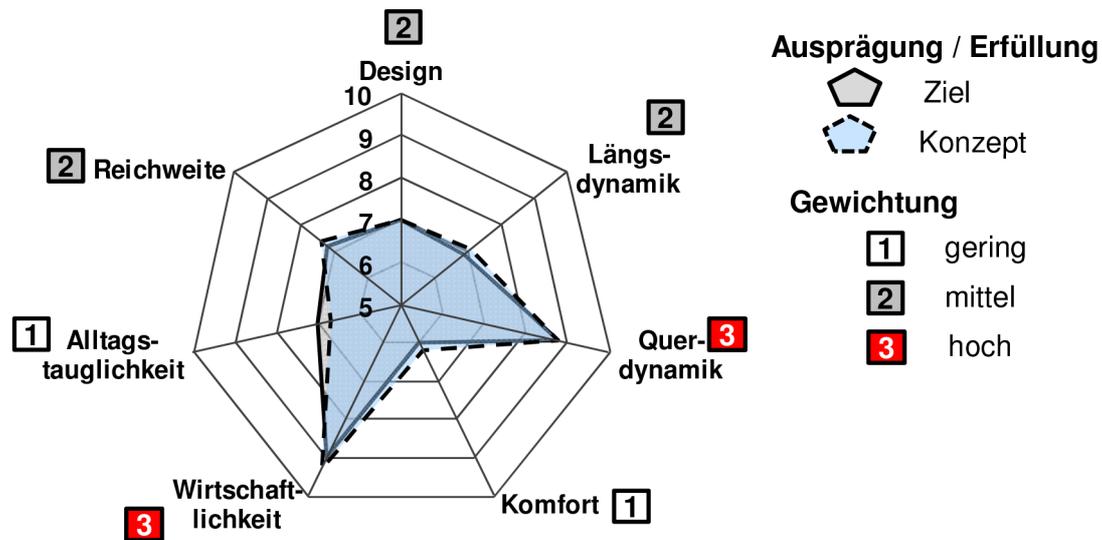


Abbildung 6-15 Plausibilisierung der Optimierungsalgorithmen

Sind wie im zweiten Fall jedoch die Eigenschaftsziele mit Anspannung gesetzt, ist es bei definierten Maximalkosten physikalisch nicht möglich, alle Eigenschaftsziele gleichzeitig zu erreichen. Ziel der Optimierung ist hierbei, den bestmöglichen Kompromiss in den Zielerreichungen zu finden. Das gefundene Optimum kann je nach gewünschter Positionierung in Richtung spitz oder ausgeglichen ausgeprägt sein. Die Plausibilität der abgeleiteten Konzepte wird anschließend beurteilt. Anhand von Fallbeispielen wird die Plausibilität der gefundenen Ergebnisse in Kapitel 7 erläutert.

Um die Validierung des Gesamt-Optimierungsprozesses durchzuführen, müsste die Kundenzufriedenheit für die gefundenen Optima überprüft werden. Dafür wären in Hardware aufgebaute Prototypen notwendig, weil die Mehrheit der Kunden einen Maßkonzeptplan und physikalische Ausprägungen von Eigenschaften nicht wie ein reales Fahrzeug bewerten kann. Der Aufbau von Prototypen bedeutet einen zu hohen Aufwand für die Validierung des Vorgehens. Zur Überprüfung der Kundenzufriedenheit muss also auf die Ergebnisse der Bewertungsfunktion zurückgegriffen werden.

6.8 Fazit

Für das multikriterielle Optimierungsproblem wurde eine parametrische Bewertungsfunktion entwickelt. Diese baut auf den Deltas der Eigenschaftserfüllungen zwischen Ziel- und Ist-Werten auf und wird über Formfaktor, Gewichtungsexponent und Verhältnis Über- zu Untererfüllung modifiziert. Über die klassische Versuchsplanung und verschiedene Optimierungsalgorithmen kann eine Parametervariation durchgeführt und das Optimum für die aufgestellte Bewertungsfunktion gefunden werden. Auf Basis der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse und Bewertung der gefundenen Optima wird das Verfahren als plausibilisiert angesehen.

7 Optimierungsergebnisse für ein Elektrostadtfahrzeug

In Kapitel 5 und 6 wurde die Umsetzung des eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozesses von Elektrofahrzeugen im rechnergestützten Werkzeug EOKET dargestellt. Dieses Tool kann zur Untersuchung vielfältiger Fragestellungen genutzt werden. Wird das EOKET angewandt, sind vor allem die notwendigen Eingaben und erzeugbaren Ergebnisse interessant. Beispielhaft wird die Anwendung des EOKET an einigen Fragestellungen für den MUTE, das Elektrostadtfahrzeug der Technischen Universität München, gezeigt.

7.1 Eingaben für die Optimierung

Für die Optimierungsschleifen muss die angestrebte Positionierung vorgegeben werden. Zudem sind die Korrelationsfunktionen zur Bewertung der Eigenschaften zu parametrieren und die Grundkonzeptentscheidungen entsprechend der Positionierung zu fällen.

7.1.1 Angestrebte Positionierung

Zur Festlegung des Positionierungsanspruchs werden sämtliche relevante Einflüsse, wie Wettbewerbsumfeld oder mögliche Trends und Innovationen, analysiert und daraus Schlüsse für eine sinnvolle Positionierung abgeleitet (Kapitel 2.2.2). Der Positionierungsanspruch bestimmt die Festlegung der Gewichtungen und Ausprägungen der Eigenschaften (Prozessschritt ①). Die hoch gewichteten Eigenschaften stellen die Positionierungsspitzen dar, also die Eigenschaften, in denen das entsprechende Fahrzeug ausgeprägte Stärken haben soll.

An das zu entwickelnde Elektrostadtfahrzeug MUTE wurde der Anspruch gestellt, in seinen Gesamtkosten für den Kunden deutlich günstiger zu sein als vergleichbare Wettbewerbsfahrzeuge. Zudem sollte es bei geringen Geschwindigkeiten im urbanen Umfeld eine hohe querdynamische Agilität bieten. Deswegen wurden die Eigenschaften Wirtschaftlichkeit und Querdynamik als Positionierungsspitzen definiert (Abbildung 7-1). Die Eigenschaften Reichweite, Längsdynamik und Design sind mit mittlerer Gewichtung belegt, sollen also Ausprägungen auf Wettbewerbsniveau erreichen. Bei den Eigenschaften Alltagstauglichkeit und Komfort können für die

gewählte Positionierung Einschränkungen der Ausprägung hingenommen werden, vor allem wenn dies zur besseren Erfüllung höher gewichteter Eigenschaften führt.

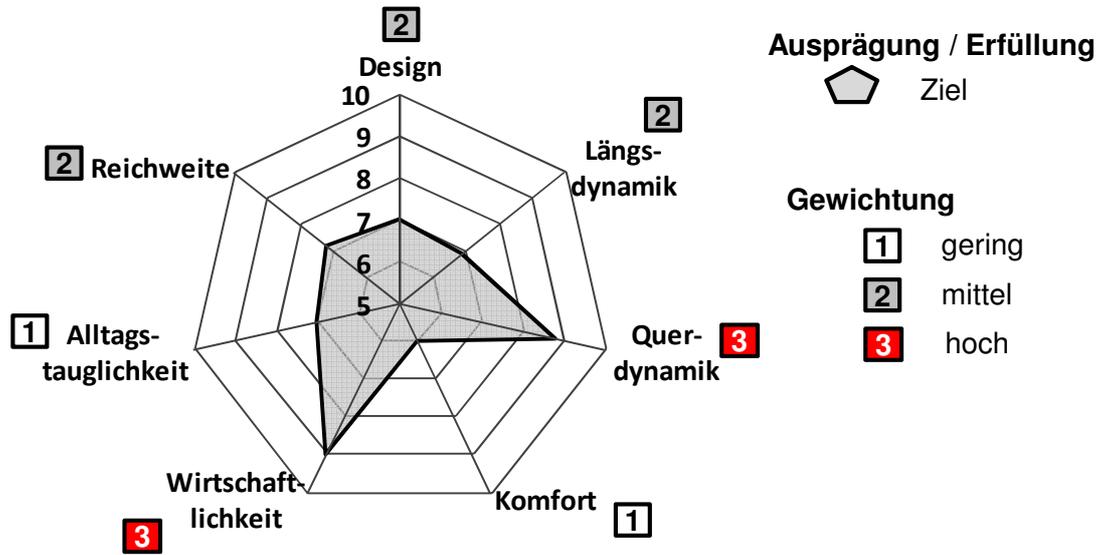


Abbildung 7-1 Gewichtung der Eigenschaften und Ausprägungen des MUTE aus [Wie12a]

7.1.2 Parametrierung der Eigenschaftskorrelationen

Über die Korrelationsverläufe können für alle 28 Eigenschaften, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, die Maßstäbe der Bewertung entsprechend definiert werden (Prozessschritt ②). Für ein Elektrostadtfahrzeug sind die Anforderungen auf die Bedürfnisse von Kunden, die sich hauptsächlich im urbanen Raum bewegen, abzustimmen.

Die Korrelationsfunktionen für die Eigenschaften Beschleunigung 0-100 km/h sowie Reichweite zeigt Abbildung 7-2. Zur Orientierung sind neben der gewählten Korrelation für den MUTE, die Bewertungsschemata der AMS dargestellt.

Der gewählte Verlauf der Reichweitenkorrelation liegt im gesamten Bereich unterhalb der AMS-Korrelation. Um die Marktfähigkeit sicher zu stellen wurde die Mindest-erfüllung auf 40 km gesetzt, im Gegensatz zu minimalen 10 km Reichweite in der AMS. Der maximale Eigenschaftswert zehn wird bei der EOKET-Korrelation erst bei 250 km Reichweite erreicht, um auch Fahrzeuge mit größeren Reichweiten als 180 km, dem Maximalwert der AMS, linear zu belohnen.

Die gewählte Beschleunigung 0-100 km/h-Korrelation wird im ganzen Bereich deutlich weniger angespannt als die AMS-Korrelation gesetzt. Dies ist darin begründet, dass an Stadtfahrzeuge zwar mittlere Anforderungen an das Beschleunigungsverhalten 0-60 km/h gestellt werden, die außerstädtische Elastizität 60-100 km/h und folglich die

Beschleunigung 0-100 km/h jedoch relativ geringe Relevanz für die Zielgruppe hat. Daraus resultiert die geringe Mindestbefriedigung von 30 s für die Marktfähigkeit. Die optimale Eigenschaftserfüllung wird, ähnlich wie bei der AMS, bei etwa 7 s erreicht. Fahrzeuge, die schneller beschleunigen, erhalten ebenfalls den maximalen Eigenschaftswert zehn. Der Verlauf dazwischen ist linear mit Abflachungen in Richtung der beiden Extreme.

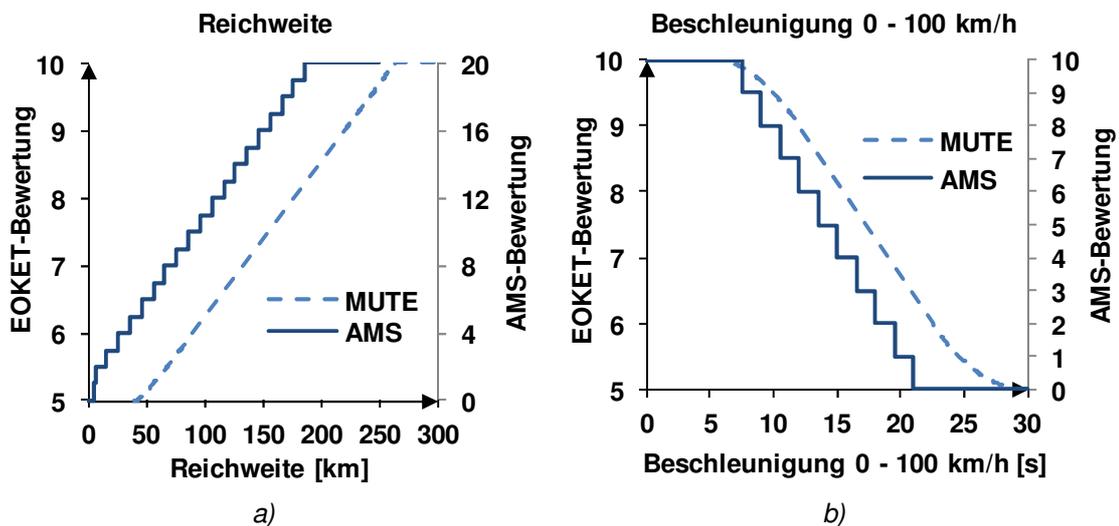


Abbildung 7-2 Punktebewertung der AMS und festgelegte Korrelationen für ein Elektrostadtfahrzeug aus [Bla12, S. 54 f.]

Ebenso wie für Reichweite und Beschleunigung 0-100 km/h sind die Korrelationen der anderen 26 Eigenschaften für die Ansprüche möglicher Kunden eines Elektrostadtfahrzeugs festzulegen.

7.1.3 Gewählte Grundkonzeptentscheidungen

Vor Beginn der Optimierung müssen Grundkonzeptentscheidungen getroffen werden. Diese werden analog zur Umsetzung des MUTE gewählt (Abbildung 7-3). So werden eine permanenterrregte Synchronmaschine und eine prismatische Hochenergie-Batteriezelle bei fester Getriebeübersetzung und Heckantrieb gewählt. Zusätzlich wird eine Karosserieform mit zwei Sitzplätzen und einem Steilheck gesetzt.

Antrieb	Fahrwerk
Antriebsanordnung	Räder / Reifen
Aggregatelage und Kraftübertragung	Durchmesserdimensionierung Reifen
Frontmotor mit Vorderradantrieb	Groß
Heckmotor mit Heckantrieb	Klein
Allradantrieb	Karosserie
Motor	Exterieur
Motortyp	Segment
PSM	Mini / Mega-City
ASM	Kompaktklasse
HSM	Mittelklasse
Batterie	Oberklasse
Zellkonzept	Van / MPV
Rundzelle	SUV
Prisma	Sportwagen
Batteriepositionierung	Karosserieform / Derivat
Vorderwagen	Kombi / Steilheck
Unterboden	Limousine / Schrägheck
Tunnel	Coupé / Fließheck
Hinten quer	Cabriolet
Hinterwagen	Interieur
Thermomanagement der Batterie	Sitzigkeit
Verstärkte Luftkühlung	2 Sitze
Flüssigkeitskühlung	4 / 5 Sitze
Getriebe	6 - 8 Sitze
Getriebestufen	
Einstufig	
Zweistufig / mehrstufig	

Grundkonzepte MUTE

Abbildung 7-3 Getroffene Grundkonzeptentscheidungen für ein Elektrostadtfahrzeug

Zudem sind die Werte der Einflussgrößen, die nicht vom EOKET variiert werden, festzulegen. So werden Vorder- und Hinterachse mit einer maximalen Traglast von 700 kg definiert. Der c_W -Wert wird auf 0,27 gesetzt.

7.2 Optimierungsergebnisse bei Variation von Motorleistung und Batteriekapazität

Nach Eingabe der angestrebten Eigenschaftsziele und -korrelationen wird die Optimierung gestartet. Dazu werden im ersten Schritt die beiden Parameter Batteriekapazität und Motorleistung variiert, weil diese die größten Auswirkungen auf die Auslegung der Eigenschaften haben.

7.2.1 Automatisierte Lösungsraumeingrenzung

Bei Variation von wenigen Parametern ist entsprechend Kapitel 6.6.2 der Einsatz der klassischen Versuchsplanung am sinnvollsten, weil auf Basis der Ergebnisse eine Analyse des Lösungsraums durchgeführt werden kann.

Analog zu Kapitel 6.4.3 wird bei der Variation von Batteriekapazität und Motorleistung durch klassische Versuchsplanung der Lösungsraum automatisiert eingegrenzt.

Für die zuvor festgelegten Eigenschaftsrestriktionen ergibt sich der Lösungsraum, wie in Abbildung 7-4 dargestellt. Der maximal mögliche Bereich der Batteriekapazität liegt zwischen 4 kWh und 33 kWh bei einer Motorleistung von 12 kW bis 100 kW.

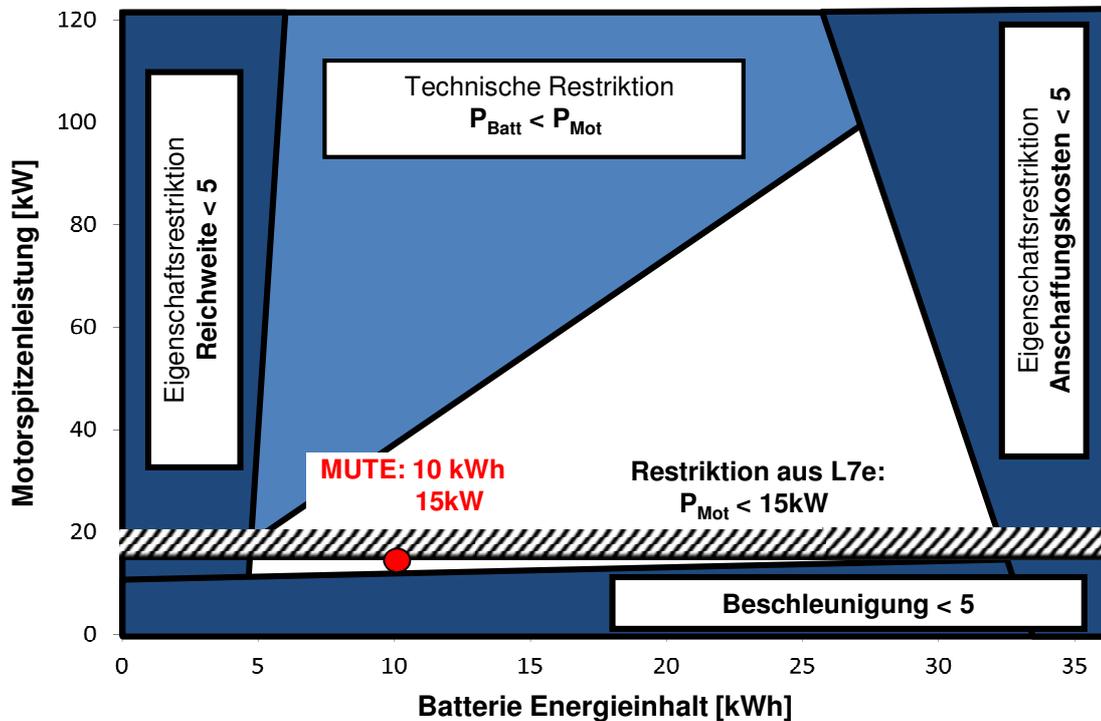


Abbildung 7-4 Lösungsraum bei gegebenen Mindest erfüllungen und technischen Restriktionen aus [Wie12a]

Die Zulassungsklasse L7e [Ble06] begrenzt die Motorleistung auf 15 kW und schränkt den Lösungsraum ein. Das Fahrzeug MUTE der Technischen Universität München [MUT11] verfolgt den Ansatz dieser Zulassungsklasse und ist mit seinen 10 kWh Batteriekapazität und 15 kW Motorleistung in Abbildung 7-4 dargestellt. Ohne die gesetzlichen Einschränkungen der Zulassungsklasse L7e werden andere Kombinationen und damit weitere Optima möglich, die im Folgenden diskutiert werden.

7.2.2 Analyse des Eigenschaftsraums und möglicher Optima

Werden sämtliche Kombinationen aus Batteriekapazität und Motorleistung entsprechend der Lösungsraumbegrenzungen analysiert, ergibt sich der mögliche Eigenschaftsraum. Für jede Batterie / Motor-Kombination werden per Simulation die 28 Eigenschaftswerte ermittelt. Manche Eigenschaften, wie Design oder Komfort, werden kaum von den Änderungen beeinflusst, während vor allem die Eigenschaften aus den

Bereichen Längsdynamik, Querdynamik, Wirtschaftlichkeit und Reichweite stark betroffen sind. Zur Lösungsraumanalyse sollen die Auswirkungen auf die Eigenschaften Reichweite und Beschleunigung 0-100 km/h beispielhaft im Detail betrachtet werden.

Eine erste Möglichkeit der Lösungsraumanalyse besteht in der Bildung einer Pareto-Front (Abbildung 7-5). Alle Punkte auf dieser Front bilden den besten Kompromiss zwischen den optimalen Erfüllungen der beiden dargestellten Eigenschaften (Kapitel 6.2.1). Alle übrigen 26 Eigenschaften erreichen mindestens den Eigenschaftswert 5, werden jedoch bei besserer Ausprägung nicht stärker belohnt. Daraus ergeben sich Ausprägungen im Netzdiagramm, wie in Abbildung 7-5 ersichtlich, bei denen in den Eigenschaftsfeldern Reichweite und Längsdynamik sehr gute Erfüllungen erreicht werden. Starke Einbußen müssen in Eigenschaften, wie Querdynamik und Wirtschaftlichkeit, hingenommen werden, obwohl gerade diese Eigenschaften hoch gewichtet sind. Von ganzheitlichen Optima aus Kundensicht kann somit nicht gesprochen werden, weil die gesetzten Eigenschaftsziele unzureichend erfüllt werden. Der Pareto-Ansatz ist für das vorliegende Optimierungsproblem deshalb nicht geeignet.

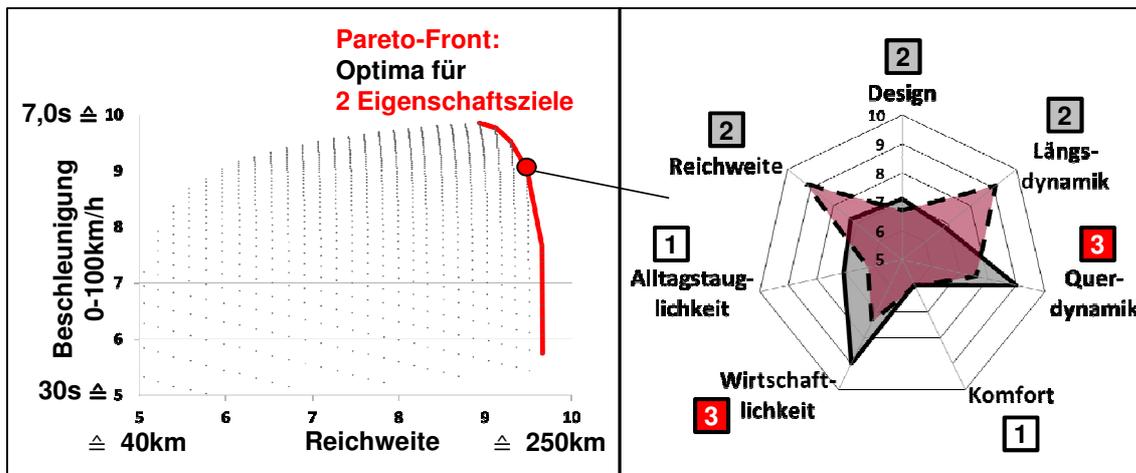


Abbildung 7-5 Pareto-Front für Beschleunigung 0-100 km/h und Reichweite aus [Wie12a]

Ganzheitlichere Optima werden über die in Kapitel 6.1 entwickelte Bewertungsfunktion erzielt. Entsprechend der Parametrierung der Bewertungsfunktion für eine spitze Positionierung ergeben sich die Optima entsprechend Abbildung 7-6. Es werden die Optima für eine hohe Gewichtung von Reichweite und Beschleunigung 0-100 km/h gegenüber gestellt. Für beide Gewichtungen liegt die sich ergebende Ausprägung deutlich näher an der gewünschten Positionierung. Das spitz auf 0-100 km/h ausgelegte Konzept erreicht sehr gute Werte in der Längsdynamik, ohne in den

anderen Eigenschaften zu große Kompromisse eingehen zu müssen. Das spitz auf Reichweite ausgelegte Gesamtoptimum ermöglicht eine geringe Übererfüllung der Reichweite bei geringer Untererfüllung der Längsdynamik.

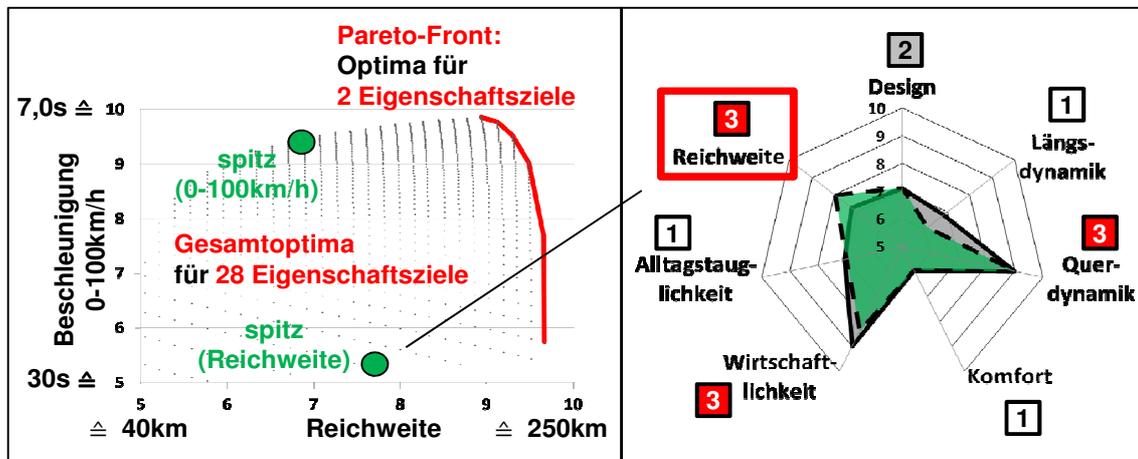


Abbildung 7-6 Ganzheitliches Optimum bei spitzer Kostenfunktion aus [Wie12a]

Wird die Parametrierung der Bewertungsfunktion für ein ausgeglichenes Optimum gewählt, ergibt sich eine Positionierung, die die geforderten Ausprägungen gut trifft und sogar in der Längsdynamik eine Übererfüllung der Zielwerte ermöglicht (Abbildung 7-7).

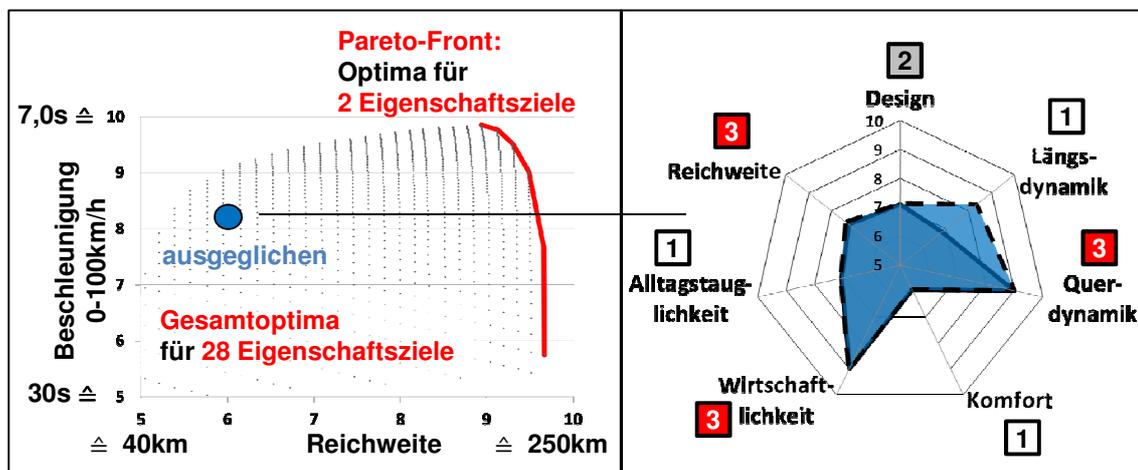


Abbildung 7-7 Ganzheitliches Optimum bei ausgeglichener Kostenfunktion aus [Wie12a]

Die vorgestellten Optima demonstrieren verschiedene Konzepte, die entsprechend der gewählten Bewertungsfunktion optimal sind. Durch Variation der Gewichtungen wird aufgezeigt, welche Konzeptvariante für einen Positionierungsanspruch am besten geeignet ist. Umgekehrt lässt sich analysieren, welche Positionierung sich jeweils für eine Kombination aus Batteriekapazität und Motorleistung ergibt.

7.3 Optimierungsergebnisse bei Variation mehrerer Einflussgrößen

Werden nicht nur zwei, sondern alle zehn Einflussgrößen variiert, entstehen viele weitere Freiheitsgrade und folglich Möglichkeiten, die Positionierung zu verändern. Aufgrund der hohen Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten der Einflussgrößen und ihrer möglichen Ausprägungen wird der Optimierungsalgorithmus „Pattern Search mit Search“ gemäß Kapitel 6.5 zur Ableitung der verschiedenen Optima angewandt.

Nach entsprechender Parametrierung der Bewertungsfunktion ergeben sich nach Durchlauf der Optimierungsalgorithmen ein spitzes und ein ausgeglichenes optimales Konzept. Die Ergebnisse der Variationsparameter im Vergleich zu den Werten des MUTE sind in Abbildung 7-8 zu sehen. Die zugehörigen Positionierungen im Netzdiagramm sowie die Grobpackages sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Die sich ergebenden Werte für alle 28 Eigenschaften zeigt Anhang B.

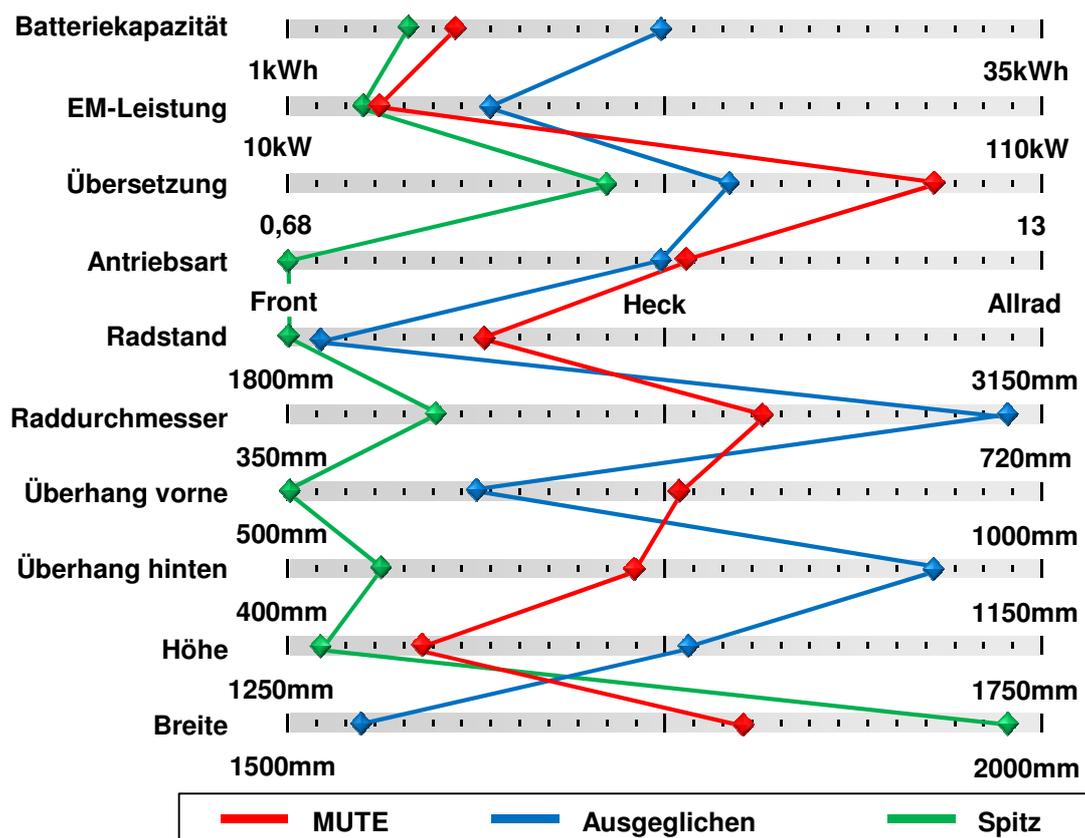


Abbildung 7-8 Vergleich der Ausprägungen der Einflussgrößen der abgeleiteten Optima aus [Wie12a]

Ziel des ausgeglichenen Konzepts ist eine möglichst gleichmäßig ausgeprägte Positionierung im Netzdiagramm. Dafür wurden alle Zieleigenschaftswerte auf den Wert acht und der Übererfüllungsfaktor n der Bewertungsfunktion auf null gesetzt. Die

sich einstellende Ist-Positionierung kann die als Ziel gesetzte Positionierung beinahe komplett erreichen. Größere Abweichungen ergeben sich lediglich im Design. Da nicht alle Eigenschaftsziele gleichzeitig erfüllt werden können, ist das ermittelte Konzept der beste Kompromiss, um über den GEEG die meisten Punkte zu erhalten. Für die Eigenschaftswerte acht ist in den Bereichen Reichweite und Längsdynamik eine Kombination aus 16 kWh Batteriekapazität und 35 kW Motorleistung notwendig. Um über die Kopffreiheit einen guten Komfort zu erzielen und eine für die Querdynamik optimale Batterielage im Unterboden zu ermöglichen, wird das Fahrzeug in seiner Höhe deutlich vergrößert. Gleichzeitig wird die Breite des Fahrzeugs reduziert, um einen zu großen Fahrwiderstand zu vermeiden. Für eine gute Alltagstauglichkeit wird der hintere Überhang erhöht, um das Kofferraumvolumen zu vergrößern. Gute Werte werden im Design durch eine Verkürzung des vorderen Überhangs sowie eine Vergrößerung der Reifendimension erreicht. Die kurze Übersetzung gleicht die große Raddimension wieder aus, um das im Vergleich hohe Leergewicht von 644 kg gut zu beschleunigen.

Im Gegensatz zum ausgeglichenen Konzept, soll beim spitzen Konzept eine Positionierung vor allem auf Basis der gesetzten Gewichtungen erfolgen. In den hoch gewichteten Eigenschaften sind Bestwerte zu erzielen, während in den geringer gewichteten Eigenschaftsfeldern Kompromisse eingegangen werden können. Um dies zu erreichen, wurden alle Zielwerte auf den Eigenschaftswert fünf gesetzt. So ergeben sich in allen Eigenschaften Übererfüllungen. Zusätzlich zum spitzen Formfaktor von drei wurde der Potenzfaktor der Gewichtung q mit dem Wert zwei belegt, um die Spreizung der Gewichtung zu erhöhen.

Das sich bei den hoch gewichteten Eigenschaften Wirtschaftlichkeit und Querdynamik ermittelte spitze Konzept ist ein kompromisslos auf geringe Kosten und hohe querdynamische Agilität ausgerichtetes Fahrzeug. Dies wird auf Kosten nur minimaler Erfüllungen der Eigenschaften Reichweite und Komfort ermöglicht. Design, Längsdynamik und Alltagstauglichkeit sind ähnlich dem MUTE ausgeprägt. Diese extreme Positionierung wird großteils über eine kleine, leichte und damit kostengünstige Batterie mit nur 8 kWh erreicht. Radstand, vorderer Überhang und Höhe werden auf minimale Werte reduziert, um zusätzlich zur kleinen Batterie Gewicht zu sparen. Bei einem Leergewicht von nur 492 kg werden trotz der geringen Motorleistung von 15 kW akzeptable längsdynamische Werte erreicht. Für die Bestwerte in der Querdynamik zeigt sich der Frontantrieb als favorisierte Alternative, weil sich über die Batterielage im Heck ein ausgeglichenes und damit für die Querdynamik fast optimales Achslastverhältnis von

52:48 ergibt. Weiterhin unterstützen die große Fahrzeugbreite und der kurze Radstand die Fokussierung auf optimale querdynamische Werte.

7.4 Fazit

Die entwickelte Auslegungsmethodik konnte anhand eines Elektrostadtfahrzeugs beispielhaft demonstriert werden. Dafür wurden die Eigenschaftskorrelationen definiert und über die Gewichtungen der Eigenschaften eine angestrebte Positionierung für ein Elektrostadtfahrzeug festgelegt.

Die Variation von Batteriekapazität und Motorleistung durch klassische Versuchsplanung ermöglicht eine Analyse des Lösungsraums. Die Pareto-Front zwischen Beschleunigung 0-100 km/h und Reichweite wurde aufgestellt und ein Konzept auf dieser Front vorgestellt. Ganzheitliche Optima genügen der angestrebten Positionierung deutlich besser als die Pareto-Optima, weil sie die Ausprägungen in allen 28 und nicht nur in zwei Eigenschaften berücksichtigen. Dafür wurden Ergebnisse der Bewertungsfunktion mit Parametrierung einer spitzen und einer ausgeglichenen Positionierung vorgestellt.

Werden zusätzlich zu Batteriekapazität und Motorleistung die zehn technischen Einflussgrößen variiert, können Freiheiten für weitere mögliche Positionierungen geschaffen werden. Über Optimierungsalgorithmen wurden ganzheitliche Optima für eine spitze und eine ausgeglichene Positionierung abgeleitet und ihre Ausprägungen im Netzdiagramm erläutert. Die nachvollziehbaren Ergebnisse, die sich bei Anwendung der Auslegungsmethodik am Beispiel des Elektrostadtfahrzeugs ergeben, zeigen somit die Plausibilität des entwickelten Vorgehens.

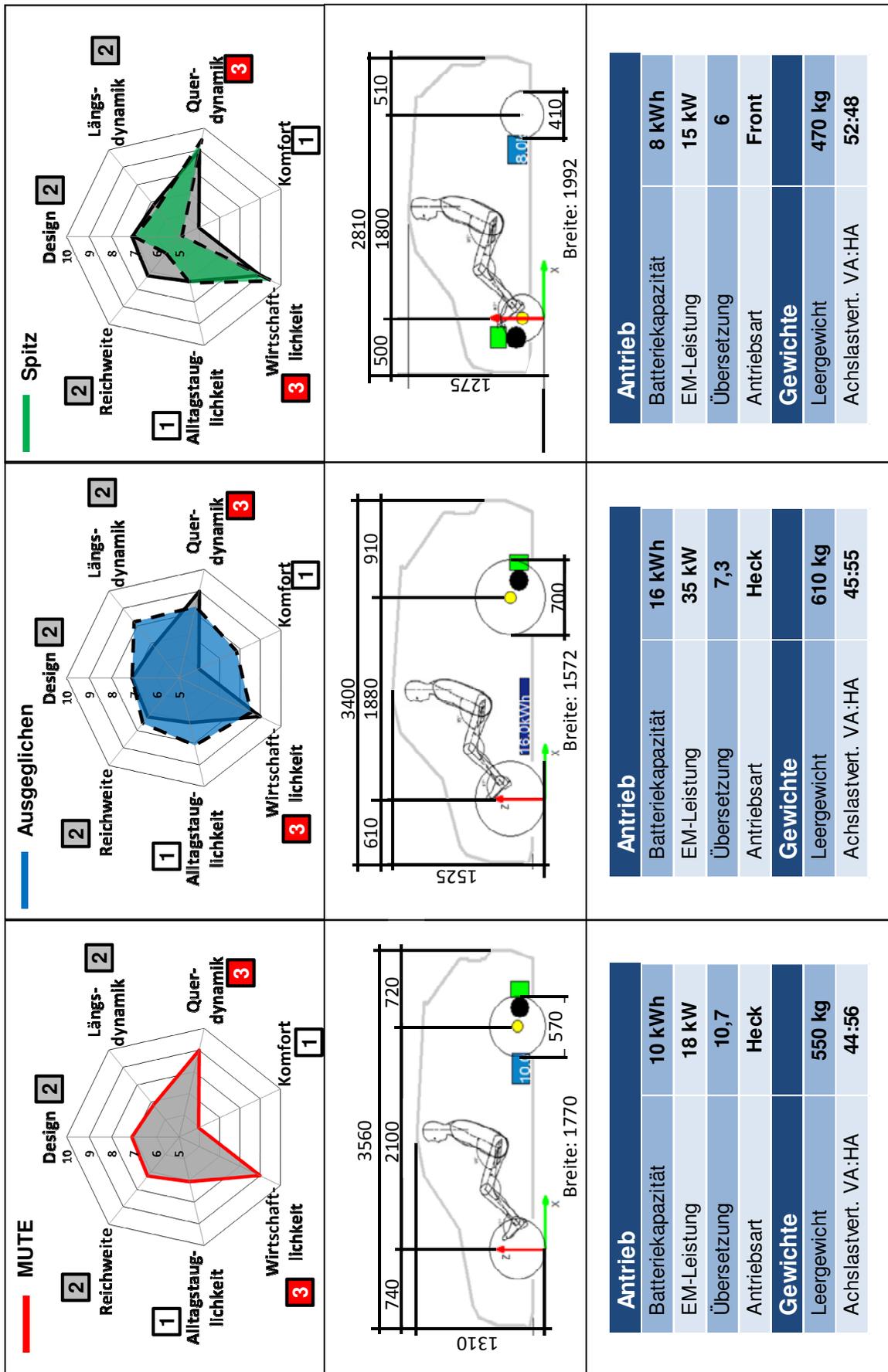


Abbildung 7-9 Vergleich der Packages und Positionierungen der abgeleiteten Optima aus [Wie12a]

8 Diskussion

Die gezeigte Methodik zur automatisierten Ableitung von Fahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen bietet ein großes Potential zur stärkeren Ausrichtung auf die kundenwerten Eigenschaften in der frühen Entwicklungsphase. Jedoch sind die Einschränkungen der Anwendbarkeit kritisch zu hinterfragen.

8.1 Grenzen der entwickelten Methodik

Zur sinnvollen Anwendung der Methodik müssen einige Rahmenbedingungen an konzeptioneller Freiheit sowie an notwendigen Eingangsdaten erfüllt sein. Darüber hinaus ist die Aussagekraft der Ergebnisse zu überprüfen, weil nur einige ausgewählte Eigenschaften verwendet wurden.

8.1.1 Rahmenbedingungen des gewählten Ansatzes

Grundvoraussetzung zur Anwendung der gezeigten Auslegungsmethodik ist eine große konzeptionelle Freiheit, die nur in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses vorhanden ist. Als Eingangsgröße wird ein Eigenschaftsprofil benötigt. Zudem sind einige Rahmenbedingungen notwendig, die den Auslegungsprozess maßgeblich beeinflussen. Dazu zählen die Kostenentwicklung von Komponenten oder Prognosen zur Anpassungen von Gesetzen oder Zulassungsbestimmungen in den Zielmärkten bis zum Serienstart.

Gleichzeitig sollten so wenige der wesentlichen, technischen Entscheidungen wie möglich gefällt sein, um den Lösungsraum nicht zu stark einzuschränken. Die Entscheidung für eine Karosserie-Plattform mit all ihren Restriktionen sollte etwa noch nicht gefällt sein.

Der Spagat zwischen notwendigem Input und zu vielen gesetzten Rahmenbedingungen schränkt die optimale Phase der Anwendung des EOKET zeitlich ein. Je mehr technische Entscheidungen im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs gefällt sind, desto kleiner wird der Lösungsraum des EOKET.

8.1.2 Auswahl der berücksichtigten Eigenschaften

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, können nicht alle Eigenschaften quantifiziert und objektiviert werden. Da das EOKET auf mathematischen Algorithmen basiert, wird nur eine Auswahl an Eigenschaften bei der Bewertung berücksichtigt.

Die Kategorie der direkt mit Zielwerten belegbaren Eigenschaften lässt sich im EOKET gut abbilden. Jedoch werden in der Kategorie der teilweise über Zielwerte bewertbaren Eigenschaften die Eigenschaftsaspekte, die eine subjektiv zu fällende Bewertung durch einen Experten voraussetzen, nicht im EOKET berücksichtigt. Bei indirekt bewertbaren Eigenschaften können über das EOKET nur die Voraussetzungen für die gewünschte Ausprägung einer Eigenschaft geschaffen und dadurch indirekt ein Beitrag zur subjektiv beurteilten Eigenschaftserreichung geleistet werden. Die Gruppe der derzeit nicht über Zielwerte bewertbaren Eigenschaften wird auch im EOKET nicht abgebildet. Entsprechend Kapitel 5.1 wurden die im EOKET abzubildenden Eigenschaften gemäß ihrer Konzeptrelevanz und Möglichkeit der Abbildung über einfache mathematische Simulationsmodelle ausgewählt.

Der Anspruch einer möglichst ganzheitlichen, kundenorientierten Auslegung steht im Widerspruch zur nur teilweisen Objektivierbarkeit der Eigenschaften. Im Vergleich zu anderen Ansätzen, die sich auf nur wenige Eigenschaften konzentrieren, kann der gezeigte Forschungsansatz jedoch als ganzheitlich und umfassend angesehen werden.

8.1.3 Vereinfachungen in den Eigenschaftsbewertungsmodulen

Aufgrund der geforderten kurzen Rechenzeit für jede Iterationsschleife von nur einer Sekunde, müssen die Simulationsmodelle der Eigenschaftsbewertungsmodule ein hohes Abstraktionsniveau aufweisen. Folglich können viele physikalische Effekte in der Simulation nicht berücksichtigt werden, wodurch die Schärfe der Simulationsergebnisse eingeschränkt ist.

Folgende Vereinfachungen werden vorgenommen:

- **Design:** Es werden nur Aussagen zu absoluten geometrischen Maßen getroffen. Eine für das Design wichtige Beschreibung der Konturen, wie der Bombierung der Fahrzeugfront oder der Höhe der Tornado-Linie, wird aus Abstraktionsgründen nicht vorgenommen. Zudem sind einige geometrische

Abhängigkeiten nicht im EOKET abgebildet, wie beispielsweise die Bestimmung des Bauraums im Vorderwagen in Abhängigkeit vom Reifendurchmesser.

- **Querdynamik:** Durch Verwendung des Einspurmodells sind keine Aussagen zu Wanken, Nicken sowie dynamischen Verlagerungen der Radlasten möglich. Zudem können durch das vereinfachte Modell keine Einflüsse der Rad-aufhängung analysiert werden.
- **Längsdynamik:** Für die Berechnung der Fahrleistungsdaten wurden für sämtliche Antriebskomponenten feste durchschnittliche Wirkungsgrade angenommen, weil das Auswerten von Kennfeldern zu rechenintensiv ist. Zudem wurden instationäre Effekte wie Temperaturabhängigkeiten der Komponenten nicht modelliert.
- **Raumkomfort:** Der Innenraum des Fahrzeugs wird auf Basis eines Längs-schnitts und einer Oberansicht ausgelegt und bewertet. Dadurch ergeben sich einige Einschränkungen im Vergleich zu einer dreidimensionalen Auslegung in einem CAD-Programm. So können keine Analysen der ergonomischen Auslegung sowie des Bedienungskomforts durchgeführt werden. Die in den zweidimensionalen Schnitten getätigten Aussagen zu Bein- und Kopffreiheiten sind gute Anhaltspunkte, verlangen jedoch für eine weitergehende Konzept-auslegung eine detaillierte CAD-Analyse.
- **Wirtschaftlichkeit:** Die Anschaffungskosten werden mittels eines Grundbetrags für das Basisfahrzeug sowie den Kosten für die Antriebskomponenten abgeschätzt. Viele Kostentreiber, wie Ausstattung oder verbaute Assistenz-systeme, werden ausschließlich über den Betrag des Basisfahrzeugs berücksichtigt und somit nicht direkt betrachtet. Bei den Unterhaltskosten könnten zusätzlich zu den Energiekosten Versicherungs- und Instandhaltungs-kosten implementiert werden, wovon aufgrund der geringen Konzeptrelevanz abgesehen wurde.
- **Alltagstauglichkeit:** Die Abbildung des Kofferraumvolumens sowie der verfügbaren Anzahl an Sitzplätzen auf Basis des Längsschnitts und der Ober-ansicht ist einer CAD-Analyse deutlich unterlegen. Zugunsten der Automatisierbarkeit wird diese Unschärfe akzeptiert.
- **Reichweite und Batterieladen:** Die Verbrauchsbestimmung auf Basis einer Rückwärtssimulation vernachlässigt die Einflüsse des Fahrers. Zudem werden

bei der Implementierung, wie bereits bei der Längsdynamik, feste durchschnittliche Wirkungsgrade der Antriebskomponenten verwendet. Auch für die Bestimmung der Fahrwiderstände werden Vereinfachungen vorgenommen. So ist z.B. die Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Reifendurchmesser nicht abgebildet.

Bei zukünftiger Steigerung der Rechenleistung oder der Verwendung von Rechenclustern ist eine Erhöhung der Abbildungstiefe der jeweiligen Modelle bei Einhaltung der maximalen Rechenzeit von einer Sekunde umsetzbar.

8.1.4 Einschränkungen der Validierung des Optimierungsprozesses

Eine Überprüfung der Abbildung der Eigenschaftsbewertungsmodule konnte anhand von Realfahrzeugen erfolgreich durchgeführt werden (Kapitel 5.5). Da die Anzahl sich auf dem Markt befindlicher Elektrofahrzeuge, die zur Plausibilisierung herangezogen werden können, begrenzt ist, kann keine vollständige Validierung für alle Fahrzeugsegmente und -derivate durchgeführt werden. Auf Basis der validierten Fahrzeuge können jedoch bei begrenzten Änderungen des Fahrzeugkonzepts realistische Eigenschaftswerte erzielt werden.

Die Ergebnisse der Gesamt-Optimierungsschleife sind aufgrund der frei parametrierbaren Eigenschaftskorrelationen und der Bewertungsfunktion angreifbar. So liegen dafür nicht für alle Eigenschaften Punktbewertungen aus der AMS zur Orientierung vor. Der Einfluss der Parameter der Bewertungsfunktion wurde in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, um sinnvolle Werte der Parameter für spitze sowie ausgeglichene Positionierungen zu erhalten (Kapitel 6.1.4). Die gewählten Werte bestimmen das Optimum maßgeblich, weshalb allein durch die Wahl der Parameter der Bewertungsfunktion, sowie der Korrelationsfunktion, die Optima mit einer Unschärfe belegt werden. Diese Unschärfe wird akzeptiert, weil es das Ziel der Eigenschaftsoptimierung ist, eine grobe Abschätzung eines möglichen sinnvollen Konzepts für die frühe Entwicklungsphase zu erhalten und keine Detailauslegung vorzunehmen.

8.2 Potentiale des aufgezeigten Ansatzes

Neben den Grenzen gibt es viele Potentiale, die durch Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Entwicklungsmethodik ermöglicht werden. Der Nutzen liegt vor allem in der Unterstützung des Entwicklers in der frühen Phase, Konzepte in Hinblick auf Eigenschaftsziele möglichst ganzheitlich auszulegen.

8.2.1 Erfassen komplexer Zusammenhänge

Fahrzeuge sind in ihrer hohen Komplexität selbst für den erfahrenen Entwickler kaum noch ganzheitlich zu erfassen. Das entwickelte EOKET bietet dem Nutzer Unterstützung, diese komplexen Zusammenhänge sowie die Auswirkungen von technischen Änderungen auf kundenrelevante Eigenschaften zu verstehen.

- Das EOKET kann zur Nachbildung von Realfahrzeugen und vorgestellten Konzeptfahrzeugen mit Elektroantrieb genutzt werden. Mit Hilfe der Eigenschaftskorrelationen besteht die Möglichkeit, Stärken und Schwächen von Wettbewerbsfahrzeugen zu analysieren.
- Die Analyse der Änderung von Eigenschaften bei Parametervariation ermöglicht dem Nutzer, die Auswirkungen einzelner Parameter auf das Konzept zu verstehen. Einige der technischen Stellhebel beeinflussen bereits bei kleiner Änderung eine Vielzahl von Eigenschaften, so dass eine eindeutige Optimierungsrichtung nur für die wenigsten Parameter besteht.
- Die Versuchsplanung wird durch eine intelligente Lösungsraumeingrenzung unterstützt. Unter Berücksichtigung der Mindest erfüllungen und technischen Restriktionen können ungültige Parameterkombinationen bereits vor der Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden. Dadurch wird das Verständnis des Entwicklers für sinnvolle und nicht zielführende Parameterkombinationen gestärkt.

Über diese Funktionalitäten erhält der Entwickler Unterstützung, die Komplexität des Fahrzeugs besser zu erfassen und somit bereits in der frühen Phase die richtigen Entscheidungen für eine hohe Kundenzufriedenheit zu fällen.

8.2.2 Ableiten von ganzheitlichen Optima aus Eigenschaftssicht

Im EOKET sind zahlreiche Zusammenhänge zwischen Technik und Eigenschaften abgebildet. Darüber können die vielfältigen Auswirkungen von Parametervariationen auf die Eigenschaften des Fahrzeugs analysiert werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsfunktion erlaubt, möglichst ganzheitlich die Güte verschiedener Konzepte aus Eigenschaftssicht zu vergleichen. Die strategisch gesetzten Gewichtungen und Ausprägungen der Eigenschaften werden als Basis der Bewertungsfunktion und als Maßstab für die Güte der Konzepte verwendet. Durch die überlagerte Modifikationsfunktion können ausgeglichen oder spitz positionierte

Konzepte in der Bewertungsfunktion begünstigt werden. Das Ergebnis der Bewertungsfunktion wird durch Variationen der technischen Stellhebel optimiert.

Besonders für Zielkonflikte, die bei der Auslegung von Fahrzeugkonzepten auftreten, kann der gezeigte Ansatz unter Berücksichtigung der gesetzten Gewichtungen und Rahmenbedingungen ganzheitliche Optima und folglich gute Kompromisslösungen finden.

8.2.3 Analyse von Technologiepotentialen und Szenarien

Eine weitere mögliche Anwendung der Methodik ist die Analyse des Potentials von Technologieentwicklungen. So können beispielsweise die Auswirkungen von Weiterentwicklungen in der Batterietechnologie untersucht werden. Verbesserung des Verhaltens bei einer plastischen Verformung der Batteriezellen führt etwa zu deutlich reduziertem Volumen und Gewicht der gesamten Batterie. Dadurch ermöglichte Freiheiten im Gesamtpackage und der Gewichtsverteilung tragen zu einer erheblichen Steigerung der Konzeptgüte bei.

Werden zusätzlich zu Technologieentwicklungen Änderungen der Rahmenbedingungen prognostiziert, können Zukunftsszenarien gebildet und untersucht werden. Neben Prognosen der Strompreise oder steuerlichen Subventionen, sind in besonderem Maße Annahmen zum Wertewandel in der Gesellschaft zu treffen. Diese werden über die Eigenschaftskorrelationen im EOKET abgebildet. Eine Reduzierung der Mindest erfüllung in Bezug auf Reichweite würde z.B. die Verwendung von Batterien mit einer geringeren Kapazität erlauben. Diese Zukunftsszenarien ermöglichen es, Aussagen zu geeigneten Konzepten für einen bestimmten Zeithorizont zu generieren.

8.2.4 Szenarien zur Vergrößerung der Reichweite

Einer der kritischsten Aspekte bei der Einführung von Elektromobilität ist die eingeschränkte Reichweite im Vergleich zu konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen. Kurzfristige Lösungen, wie Plug-in Hybride oder Range-Extender Konzepte, erreichen über Erweiterung des Antriebs durch einen Verbrennungsmotor gute Reichweitenwerte. Dies erhöht jedoch die Systemkomplexität und damit Kosten und Gewicht. Zudem ist eine vollständig lokale Emissionsfreiheit nicht mehr gegeben. Da rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge als eine der zukunftsträchtigsten Technologien angesehen werden, müssen auf lange Sicht andere

Wege gefunden werden. Drei mögliche Ansätze für die Vergrößerung der Reichweite sollen unter Anwendung der entwickelten Methodik analysiert werden.

Als erste Maßnahme sollen die Auswirkungen von Leichtbau auf die Reichweite und das Gesamtkonzept untersucht werden. Es wird versucht, über ein reduziertes Fahrzeugleergewicht die Fahrwiderstände zu minimieren, um dadurch bei konstantem Speicher größere Reichweiten darzustellen. Ein hoher Aufwand wird für Entwicklung und neue verwendete Materialien akzeptiert. Es werden beispielsweise bereits innovative und kostspielige Lösungen wie eine Karosserie aus Karbon angedacht [Kes11]. Weiterhin ist die funktionale Integration der Batterie in die Trägerstruktur als Leichtbaupotential denkbar.

Ein weiteres Potential zur Vergrößerung der Reichweite liegt in der Verbesserung der Zelltechnologie. Es wird erwartet, dass die gravimetrische und volumetrische Energiedichte in den nächsten Jahren deutlich ansteigen. Möglich wäre eine Erhöhung der Kapazität der aktuell als Standard bevorzugten prismatischen Zelle von 27 Ah auf 40 Ah bei Erhaltung der Abmaße und des Gewichts der aktuellen Zelle. Dies entspricht einer Steigerung der gravimetrischen Energiedichte von 110 Wh/kg auf 178 Wh/kg, bezogen auf das komplette Batteriesystem.

Die naheliegendste Möglichkeit der Reichweitenvergrößerung besteht in einer Ausweitung der Batteriekapazität über eine erhöhte installierte Zellenanzahl. Diese Variante ist nur umsetzbar, wenn genügend Bauraum zur Verfügung steht.

Aufbauend auf einem Basisfahrzeug mit 20 kWh Batteriekapazität werden die Auswirkungen der drei möglichen Maßnahmen zur Vergrößerung der Reichweite verglichen. In Abbildung 8-1 sind die jeweils erzielten Reichweiten über dem DIN-Leergewicht dargestellt. Dabei zeigen die drei Geraden die Gewichtsänderung bei Steigerung der Reichweite, die sich bei Anwendung der Maßnahmen ergeben.

Deutlich erkennbar ist, dass allein über Leichtbau keine signifikante Reichweitenvergrößerung möglich ist. Bei einer Gewichtseinsparung von 100 kg werden mit dem gewählten Basisfahrzeug nur eine um 8 km erhöhte Reichweite geschaffen. Die gleiche Reichweitensteigerung ist auch über eine Erweiterung der Kapazität um nur eine Kilowattstunde über zusätzliche Batteriezellen möglich. Bei zehn Kilowattstunden gesteigerter Kapazität wird im dargestellten Beispiel ein Zusatz von 74 km Reichweite erreicht. Allerdings ist das Mehrgewicht mit 91 kg erheblich. Im Fall der Erhöhung der Zellkapazität von 27 Ah auf 40 Ah wird die Reichweite um 98 km

vergrößert. Prämisse ist, dass die Kapazitätserhöhung ohne eine Gewichtserhöhung möglich ist.

Neben den Auswirkungen auf die Reichweite werden die gezeigten Maßnahmen mit der ganzheitlichen Bewertungsmethodik, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurde, analysiert. Die Ergebnisse der Bewertungsfunktion sind über die Werte des GEEG in Abbildung 8-1 eingetragen. Die Anschaffungskosten werden nicht berücksichtigt, weil die Mehrkosten für die Leichtbaumaßnahmen, als auch für die energiedichtere Batteriezelle nur unzureichend genau angenommen werden können.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der ganzheitlichen Eigenschaftsbewertung fällt auf, dass durch Erhöhung der Reichweite über zusätzliche Zellen der GEEG sogar um 1 % von 70 % auf 69 % abfällt. Der kundenwerte Vorteil über die gewonnene Reichweite wird in diesem Fall über Einschränkungen in der Längsdynamik und dem höheren Stromverbrauch mehr als kompensiert. Trotz der gestiegenen Reichweite sinkt in diesem Fall die Konzeptgüte.

Beim Konzept der höheren Energiedichte der Zellen steigt der GEEG um 3 % auf 73 %, weil das Fahrzeug in den kundenrelevanten Eigenschaften, mit Ausnahme einer besseren Erfüllung in der Eigenschaft Reichweite, identisch ist.

Trotz der nur geringfügig gesteigerten Reichweite, erhält das Leichtbaukonzept den höchsten GEEG mit 79 %. Über bessere Werte in Längsdynamik, Querdynamik und den Stromkosten kann dieses Konzept neben Zunahme der Reichweite den GEEG am stärksten erhöhen.

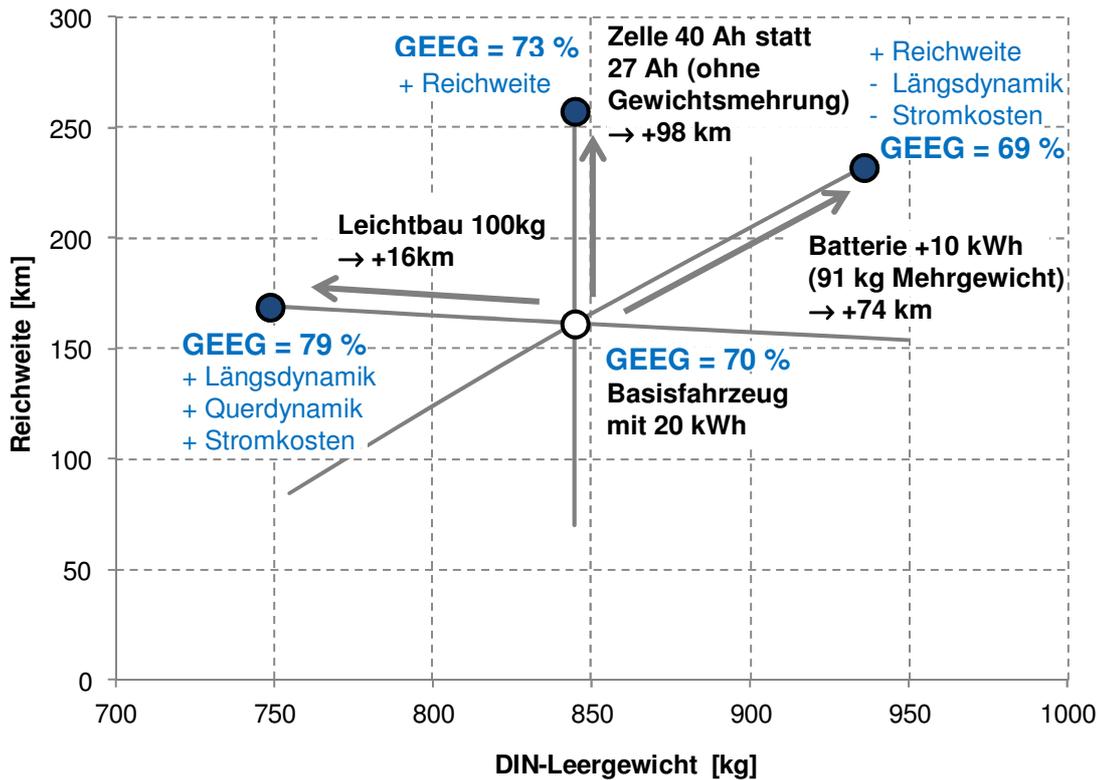


Abbildung 8-1 Möglichkeiten der Reichweitenvergrößerung und deren Werte des GEEG ohne Berücksichtigung der Anschaffungskosten

Als Schlussfolgerung dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass über Leichtbau allein keine hohen Reichweitenvergrößerungen realisiert werden können. Die ganzheitliche Konzeptgüte wird allerdings über Leichtbau signifikant verbessert. Eine Erhöhung der Batteriezellen ermöglicht eine gute Steigerung der Reichweite, kann jedoch aus Kundensicht sogar zu einem Konzeptnachteil führen. Einzig die zukünftige Verbesserung der Zelltechnologie bringt eine wesentliche Reichweitenvergrößerung ohne Einschränkungen in anderen Eigenschaften. Soll mit der aktuellen Zelltechnologie eine Erhöhung der Reichweite erzielt werden, wird empfohlen, das Mehrgewicht aus einer schweren Batterie über Leichtbaumaßnahmen wieder zu kompensieren, um ein Optimum aus Eigenschaftssicht zu erzielen. Eine Einbeziehung der Anschaffungskosten in die Bewertung ist bei Konzeptdetaillierung zudem zwingend nötig, um die wirtschaftliche Darstellbarkeit sicher zu stellen.

8.2.5 Verallgemeinerungen des gezeigten Ansatzes

Der entwickelte Prozess der ganzheitlichen Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten auf Basis von Eigenschaftszielen ist in seiner Grundidee nicht nur für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen gültig. So könnten auch konventionell verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge nach dem gezeigten Vorgehen ausgelegt werden. Eine

beispielhafte Anwendung wäre die Auslegung der Übersetzung des Differentials im Zielkonflikt zwischen Verbrauch, Beschleunigungswerten und der Höchstgeschwindigkeit. Im Vergleich zu Elektrofahrzeugen sind jedoch die Freiheitsgrade bei der Entwicklung konventionell angetriebener Fahrzeuge aufgrund der langjährigen Erfahrung deutlich geringer.

Weiter verallgemeinert kann der entwickelte Prozess als eine Art virtuelle Erstellung und Analyse von Produktprototypen angesehen werden. Dies ist für die Entwicklung eines jeden technischen Produkts gültig. Wie bei einem realen Prototypen ist es möglich, das virtuelle Produkt in sich zu plausibilisieren und gemäß den verschiedenen kundenrelevanten Eigenschaften zu analysieren. Folglich wird bereits in der frühen Phase die Marktfähigkeit des Produkts auf Basis seiner Eigenschaftsausprägung validiert.

9 Abschließende Betrachtungen

9.1 Zusammenfassung

Die der Arbeit zugrunde liegende Problemstellung besteht in der Herausforderung, Elektrofahrzeuge zu entwickeln, die neben der Fähigkeit emissionsfrei zu fahren, Eigenschaften mit hohem Kundennutzen aufweisen. Die sich daraus ergebende Zielsetzung beinhaltet die Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung der eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung von Elektrofahrzeugen. Dafür waren die komplexen Interaktionen zwischen technischem Fahrzeugkonzept und kundenrelevanten Eigenschaften systematisch aufzuzeigen. Weiterhin war eine Möglichkeit zu schaffen, das bestmögliche technische Elektrofahrzeugkonzept für ein gesetztes Eigenschaftsziel automatisiert abzuleiten.

Zur Erreichung der genannten Ziele wurden spezifische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen identifiziert und in die bestehende Struktur von Fahrzeugeigenschaften integriert. Zudem wurden alle relevanten Fahrzeugeigenschaften entsprechend ihrer Quantifizierbarkeit und Objektivierbarkeit analysiert und klassifiziert. Über ein House of Quality konnten die Zusammenhänge zwischen technischen Stellhebeln und den Eigenschaften aufgezeigt und somit ein systematischer Überblick über die komplexen Beeinflussungsmöglichkeiten von Eigenschaften geschaffen werden.

Aus dem Vorgehen der realen Eigenschaftsentwicklung von Fahrzeugen in der frühen Phase wurde ein Entwicklungsprozess abstrahiert. In diesem werden auf Basis von strategisch gesetzten Eigenschaftszielen technische Fahrzeugkonzepte entwickelt. Über ein iteratives Vorgehen werden die Größen des technischen Konzepts variiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung der Ist- zur Ziel-Ausprägung in den Eigenschaften zu erhalten. Die Automatisierung dieses Entwicklungsprozesses ist Kern dieser Arbeit.

Dafür musste eine Auswahl von objektivierbaren Eigenschaften getroffen werden, die über Korrelationsfunktionen auf der Eigenschaftswerteskala bewertet werden können. Zudem wurden Simulationsmodelle entwickelt, die auf einem möglichst einheitlichen Abstraktionsniveau in kürzester Zeit eine ganzheitliche Bewertung eines Fahrzeugkonzepts zulassen. Bei Parametervariationen wird jedes Fahrzeugkonzept stets automatisiert in sich plausibilisiert, um die Realisierbarkeit zu gewährleisten. Zusätzlich wurde das auf die Ziele bezogene Fällen von Grundkonzeptentscheidungen in die

Simulationsumgebung integriert. Dadurch konnte die Basis für die Umsetzung des eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozesses geschaffen werden.

Für die Realisierung der Automatisierung des zyklischen Entwicklungsprozesses wurde eine ganzheitliche Bewertungsfunktion entwickelt. Über Werte dieser Funktion ist es möglich, Aussagen über die Güte verschiedener Konzepte in Bezug auf die Erfüllung der gesteckten Eigenschaftsziele und -gewichtungen zu treffen. Das Ziel der zyklischen Parametervariation ist es, den Wert dieser Bewertungsfunktion zu optimieren. Dafür wurde eine klassische Versuchsplanung inklusive einer intelligenten Lösungsraumeingrenzung implementiert, um möglichst effizient die verschiedenen Kombinationen mehrerer Parameter zu untersuchen. Damit selbst für eine größere Anzahl an technischen Variationsparametern die Simulationszeit nicht zu stark ansteigt, wurden zusätzlich algorithmusbasierte Optimierer implementiert. Mittels dieser Optimierer ist es möglich, die optimalen Parameterkombinationen zu ermitteln, ohne eine vollständige Lösungsraumanalyse durchführen zu müssen. Abschließend wurde die Plausibilität des entwickelten Vorgehens am Beispiel der Optimierungsergebnisse eines Elektrostadtfahrzeugs demonstriert und die Anwendbarkeit in ihren Grenzen und Potentialen diskutiert. Zu den Einschränkungen zählen die Eingrenzung auf quantifizierbare Eigenschaften und der hohe Abstraktionsgrad der Simulationsmodelle. Die größten Potentiale liegen darin, mit Hilfe mathematischer Modelle in kurzer Zeit Aussagen zu den Eigenschaften zu treffen und ganzheitliche Optima abzuleiten.

9.2 Ausblick

Das Feld der eigenschaftsorientierten Konzeptoptimierung von Elektrofahrzeugen lässt eine Vielzahl weiterer Forschungsarbeiten zu. Die Weiterentwicklung des gezeigten Modells bietet großes Potential, wobei ebenso angrenzende Forschungsfelder viele offene Fragestellungen bieten.

Als mögliche Ausbaustufe des gezeigten Ansatzes kann das bisher auf reine Elektrofahrzeuge konzipierte Tool um hybride Antriebsstränge erweitert werden. So wären zur Darstellung größerer Gesamtreichweiten die Integration von Range-Extendern oder Brennstoffzellen sinnvoll. Umfassend kann eine Erweiterung um parallele oder leistungsverzweigte Plug-In Hybride angesehen werden. Eine auf Eigenschaften optimierte Komponentenauslegung von Plug-In Hybriden sowie eine damit verbundene intelligente Betriebsstrategie stellen eine weitere Herausforderung dar.

Eine modulare Gestaltung des Gesamtsimulationsmodells ist eine effektive Weiterentwicklung. Dadurch könnten die in der frühen Entwicklungsphase verwendeten abstrakten Simulationsmodelle in späteren Entwicklungsphasen, also vor allem im Bereich der Realisierung, durch detailliertere Modelle ausgetauscht werden. So könnte bei erhöhtem zeitlichem Simulationsaufwand die Abbildungsschärfe der in der jeweiligen Entwicklungsphase geforderten Aussagegenauigkeit angepasst werden. Bei unverändertem Ablauf des entwickelten Prozesses könnte die Anwendbarkeit des EOKET von der frühen Phase auf spätere Entwicklungsphasen ausgeweitet werden.

Zudem wäre eine Vertiefung der Betrachtung des Package auf dreidimensionaler Ebene möglich. Eine Einbeziehung von CAD-Tools würde jedoch die automatisierte iterative Untersuchung von vielen Parameterkombinationen unterbinden, weil bei jeder Iteration manuelle Eingriffe erforderlich wären.

Für die Vision eines zukünftigen Baukastens, der die Komponenten für sämtliche Elektro- und Hybridfahrzeuge eines Automobilherstellers enthält, lassen sich mittels des EOKET weitere Untersuchungen durchführen. So wurde in [Old11] bereits anhand des EOKET gezeigt, wie sich Synergieeffekte über Reduzierung der Komponentenzahl auf die Gesamteigenschaftserfüllungen der einzelnen Baukastenteilnehmer auswirken können. Weitere Untersuchungen zur detaillierteren Analyse der Kosteneinsparungen bei Änderung der Baukastenteilnehmer könnten darauf aufbauend durchgeführt werden.

Eine angrenzende Untersuchung könnte sich zudem mit der Überprüfung der Eigenschaftskorrelationen beschäftigen. Über Studien mit Kundenbefragungen lassen sich die Mindesterfüllungen, Optimalerfüllungen sowie die möglichen Korrelationskurvenverläufe an die angestrebten Zielgruppen anpassen. Über das detailliertere Verständnis der Eigenschaftsbeurteilung durch den Kunden könnte die Aussagekraft der gewonnenen Optimierungsergebnisse weiter erhöht werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Struktur der Arbeit	2
Abbildung 2-1 Einteilung von Produktmerkmalen	4
Abbildung 2-2 Fahrzeugeigenschaftsfelder der AUDI AG.....	6
Abbildung 2-3 Eigenschaften der zweiten Ebene des Eigenschaftsfelds Alltagstauglichkeit	6
Abbildung 2-4 Kano-Modell zur Klassifizierung von Eigenschaften.....	7
Abbildung 2-5 Eigenschaftsbewertung Beschleunigung 0-100 km/h	8
Abbildung 2-6 Automobil-Produktentwicklungsprozess.....	10
Abbildung 2-7 Einflüsse auf die Positionierung über Eigenschaften	11
Abbildung 2-8 Beispiel eines Eigenschaftsprofils.....	12
Abbildung 2-9 Ausschnitt eines Eigenschaftskatalogs	13
Abbildung 2-10 Schritte zum Aufbau und zur Nutzung eines House of Quality.....	15
Abbildung 2-11 Eigenschaftsfrüherkennung	16
Abbildung 2-12 V-Modell zur Entwicklung von Eigenschaften.....	17
Abbildung 2-13 Auslegungsmodell für Fahrzeugkonzepte.....	19
Abbildung 2-14 a) Conversion Design: Smart ed b) Purpose Design: BMW i3.....	23
Abbildung 2-15 a) Konvexe Zielfunktion b) Konkave Zielfunktion.....	24
Abbildung 2-16 Pareto-Front als bester Kompromiss zwischen Ziel 1 und Ziel 2	26
Abbildung 2-17 Pareto-Front unter Berücksichtigung von Restriktionen.....	30
Abbildung 3-1 Auszug der Ergebnisse einer Studie zur Differenzierbarkeit von Hybridfahrzeugen.....	34
Abbildung 3-2 Eigenschaften bei Elektrifizierung	35
Abbildung 3-3 Eigenschaften von Elektrofahrzeugen.....	36
Abbildung 3-4 Klassifizierung der Objektivierbarkeit von Eigenschaften.....	38
Abbildung 3-5 Beeinflussung von Eigenschaften.....	39
Abbildung 3-6 Grundkonzeptentscheidungen für Package und Module.....	41

Abbildung 3-7 Einflüsse auf die elektrifizierungsspezifische Eigenschaft „Konstanz der Leistungsfähigkeit“	43
Abbildung 3-8 Beeinflussungen der Einflussgröße „Selbstentladung“ der Batterie	43
Abbildung 3-9 Klassifizierung von Einflussgrößen entsprechend ihrer technischen Bedeutung.....	44
Abbildung 3-10 Wechselwirkungen der technischen Stellhebel im Hochdach des House of Quality	45
Abbildung 4-1 In der Praxis angewandter Prozess der Konzeptentwicklung	49
Abbildung 4-2 Prozess der eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklung	51
Abbildung 5-1 Bewertbarkeit der Eigenschaften über Zielwerte auf Basis der Audi-Eigenschaftsstruktur	54
Abbildung 5-2 Abbildung von Eigenschaften über das EOKET.....	55
Abbildung 5-3 Eigenschaftsfelder und Eigenschaften im EOKET	56
Abbildung 5-4 Bereiche zur Definition einer Korrelationsfunktion.....	59
Abbildung 5-5 Vorgehen für eigenschaftsorientierte Grundkonzeptentscheidungen.....	61
Abbildung 5-6 Automatisierte Positionierung der E-Maschine und der Leistungselektronik	63
Abbildung 5-7 Mögliche Bauräume zur Positionierung der Batterie	64
Abbildung 5-8 Batterie-Auslegung in Abhängigkeit von der Spannungslage	65
Abbildung 5-9 Regressionsanalyse Fahrzeugleergewicht in Abhängigkeit vom Volumen	67
Abbildung 5-10 Geometrisches Fahrzeugmodell im EOKET	72
Abbildung 5-11 Bestimmung der Kopffreiheit.....	77
Abbildung 5-12 Bestimmung der Basisfahrzeugkosten	80
Abbildung 5-13 Berechnung des Wendekreises in Abhängigkeit von a) I_{RS} und b) b_{SW} und I_{UEV}	83
Abbildung 5-14 Bestimmung der mittleren Ladeleistung.....	88

Abbildung 5-15 Vorgehen der Validierung anhand von Realfahrzeugen.....	89
Abbildung 5-16 Validierungsergebnisse der Eigenschaftsbewertungsmodule 1/2	91
Abbildung 5-17 Validierungsergebnisse der Eigenschaftsbewertungsmodule 2/2	92
Abbildung 5-18 Analyse der erreichten Eigenschaftswerte eines technischen Konzepts.....	93
Abbildung 6-1 Abweichungen der Eigenschaftserfüllungen als Basis der Bewertungsfunktion	96
Abbildung 6-2 Modifikationsfunktion: Verhältnis Über- zu Untererfüllung	97
Abbildung 6-3 Modifikationsfunktion: Positionierung über Formfaktor.....	98
Abbildung 6-4 Verlauf Optimum bei Fuzzy Decision Making im Vergleich zu gewichteter Summe	101
Abbildung 6-5 Minimum Operator bei Fuzzy Decision Making	102
Abbildung 6-6 Übersicht Einflüsse technischer Stellhebel auf Eigenschaften	104
Abbildung 6-7 Lösungsraumeingrenzung durch technische Restriktionen	107
Abbildung 6-8 Lösungsraumeingrenzung durch Mindesterfüllungen in den Eigenschaften.....	108
Abbildung 6-9 Vereinfachtes Vorgehen der Lösungsraumeingrenzung bei klassischer Versuchsplanung.....	110
Abbildung 6-10 Vergleich der Vorgehensschemata von klassischer Versuchsplanung und algorithmusbasierten Optimierern.....	112
Abbildung 6-11 Vergleich der Optimierungsalgorithmen bei drei Variationsparametern	113
Abbildung 6-12 Vergleich der Optimierungsalgorithmen bei fünf Variationsparametern	114
Abbildung 6-13 Problem zu großer Schrittweiten bei klassischer Versuchsplanung	115
Abbildung 6-14 Sensitivität der Faktoren der Bewertungsfunktion auf das Optimum	117

Abbildung 6-15 Plausibilisierung der Optimierungsalgorithmen	118
Abbildung 7-1 Gewichtung der Eigenschaften und Ausprägungen des MUTE	122
Abbildung 7-2 Punktebewertung der AMS und festgelegte Korrelationen für ein Elektrostadtfahrzeug.....	123
Abbildung 7-3 Getroffene Grundkonzeptentscheidungen für ein Elektrostadtfahrzeug.....	124
Abbildung 7-4 Lösungsraum bei gegebenen Mindest erfüllungen und technischen Restriktionen	125
Abbildung 7-5 Pareto-Front für Beschleunigung 0-100 km/h und Reichweite.....	126
Abbildung 7-6 Ganzheitliches Optimum bei spitzer Kostenfunktion.....	127
Abbildung 7-7 Ganzheitliches Optimum bei ausgeglichener Kostenfunktion	127
Abbildung 7-8 Vergleich der Ausprägungen der Einflussgrößen der abgeleiteten Optima	128
Abbildung 7-9 Vergleich der Packages und Positionierungen der abgeleiteten Optima	131
Abbildung 8-1 Möglichkeiten der Reichweitenvergrößerung und deren Werte des GEEG ohne Berücksichtigung der Anschaffungskosten.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Eigenschaftswerteskala	9
Tabelle 2-2 Überblick Optimierungsverfahren für nichtlineare und nichtdifferenzierbare Optimierungsprobleme	27
Tabelle 5-1 Bewertbare Eigenschaften im EOKET	55
Tabelle 5-2 Einflussgrößen zur Variation im EOKET	62
Tabelle 5-3 Plausibilisierung Regressionsfunktion zur Ableitung des Fahrzeuggewichts nach Yanni.....	68
Tabelle 5-4 Volumenfaktoren von Leichtbaufahrzeugen.....	69
Tabelle 5-5 Stufen des Leichtbaufaktors $S_{M,Leichtbau}$	69
Tabelle 5-6 Spezifisches Gewicht Batteriezellen und Faktor zur Berücksichtigung von Package und Kühlung	70
Tabelle 5-7 Kraftschlussbeiwert und dynamischer Massenfaktor.....	75
Tabelle 5-8 Derivatabhängige Werte der Bodenfreiheit.....	78
Tabelle 5-9 H30-Maß in Abhängigkeit vom Derivat	78
Tabelle 5-10 Bestimmung der derivatabhängigen Gewinnmarge	79
Tabelle 5-11 Faktor S_{KV} zur Bestimmung des Kofferraumvolumens.....	82
Tabelle 5-12 Bezugsfahrzeuge zur Ermittlung des Wendekreises.....	83
Tabelle 5-13 Durchschnittliche Wirkungsgrade Antriebsstrang	86
Tabelle 5-14 Segmentspezifische Leistung der Nebenverbraucher im KUV.....	87
Tabelle 6-1 Faktoren der Bewertungsfunktion	117

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Grundkonzeptentscheidungen	ix
Anhang B: Eigenschaftswerte der Optimierungsergebnisse MUTE	xi
Anhang C: Faktor Kofferraumvolumen	xiii
Anhang D: Oberflächen des entwickelten EOKET	xv

Anhang A: Grundkonzeptentscheidungen

Antrieb		Batterie	
Antriebsanordnung		Batterietyp	
Aggregatelage und Kraftübertragung		NiMeH	
Frontmotor mit Vorderradantrieb		NaNiCl	
Frontmotor mit Heckantrieb		LiTiO	
Heckmotor mit Heckantrieb		LiCoO	
Allradantrieb		LiNiCoMnO	
Aggregateeinbau		LiFePO	
Zentral (längs / quer)		LiPoly	
Radnah (2 Motoren je Achse)		Zellkonzept	
Radnabe (2 Motoren je Achse)		Rundzelle	
		Prisma	
		Coffee-Bag	
Motor		Batteriepositionierung	
Motortyp		Vorderwagen	
PGM		Unterboden	
FGM		Tunnel	
PSM		Hinten quer	
FSM		Hinterwagen	
ASM		Thermomanagement der Batterie	
GRM		Verstärkte Luftkühlung	
HSM		Flüssigkeitskühlung	
Motorabtrieb		Siedekühlung	
Innenläufer			
Außenläufer			
Motor Kühlung		Elektrik	
Natürliche Kühlung		Energieversorgung	
Verstärkte Luftkühlung		NV-Bordnetz	
Flüssigkeitskühlung		12V	
Siedekühlung		>12V	
		Elektronische Datenübertragung	
Leistungselektronik		Buskonzept	
Leistungselektroniktyp		CAN / LIN / MOST	
Gleichstromsteller		CAN / LIN / MOST + Flexray	
Wechselrichter und Gleichrichter			
Leistungsbereitstellung			
Hohe Spannung			
Hohe Stromstärke			
Elektronische Bauelemente			
IGBT			
MOSFET			
Leistungselektronikkühlung			
Natürliche Kühlung			
Verstärkte Luftkühlung			
Flüssigkeitskühlung			
Siedekühlung			
Ladegerät			
Ladekonzept			
Konduktiv			
Induktiv			
Wechselbatterie			
Getriebe		Grundstruktur	
Getriebestufen		Komponente	
Einstufig		Grundkonzept	
Zweistufig / Mehrstufig		Konzeptalternative	
Getriebetyp			
Stirnrad-Handschatgetriebe			
Automatisiertes Stirnradgetriebe			
Doppelkupplungsgetriebe			
Planetengertriebe			
CVT-Getriebe			

□	EOKET: bisher nicht berücksichtigt
■	EOKET: fest hinterlegt
■	EOKET: manuell wählbar
■	EOKET: Optimierung möglich

Fahrwerk		
Achse		
Achskonzept Vorderachse		
McPherson		
Doppelquerlenker		
Achskonzept Hinterachse		
Verbundlenker		
Mehrlenker		
Stabilisatorconcept		
Nicht-aktiv / passiv (mechanisch)		
Aktiv (hydraulisch)		
Aktiv (elektromechanisch)		
Räder / Reifen		
Breitendimensionierung Reifen		
Breit		
Schmal		
Durchmesserdimensionierung Reifen		
Groß		
Klein		
Bremse		
Bremskraftübertragung		
HB		
EHB		
EMB		
EHC		
Lenkung		
Lennkraftübertragung		
Hydraulisch		
Elektrohydraulisch		
Elektromechanisch		
Aktivlenkung		
Steer-by-Wire		
Feder / Dämpfer		
Federconcept		
Schraubenfeder		
Luftfeder		
Hydropneumatische Feder		
Nivomat		
Federsteuerung		
Passiv		
Aktiv		
Dämpferconcept		
Einrohrdämpfer		
Zweirohrdämpfer		
Dämpfersteuerung		
Passiv		
Aktiv		

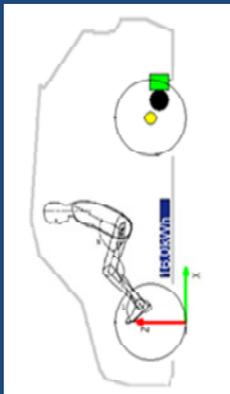
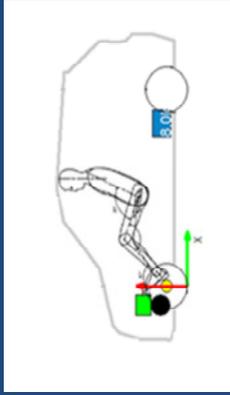
Karosserie		
Exterieur		
Segment		
Mini/Mega-City		
Kompaktklasse		
Mittelklasse		
Oberklasse		
Van / MPV		
SUV		
Sportwagen		
Karosserieform / Derivat		
Kombi / Steilheck		
Limousine / Schrägheck		
Coupé / Fließheck		
Cabriolet		
Anzahl Türen		
2		
4		
Interieur		
Sitzigkeit		
2 Sitze		
4 / 5 Sitze		
6 - 8 Sitze		
Innenraumvariabilität		
Keine / kaum Variabilität		
Rücksitze klappbar		
Ausbau von Sitzen		
Heiz- / Klimaconcept		
Energierückgew. Fahrzeuggabine		
Energierückgew. Außenluft		
Wärmepumpe Kältemittel		

Grundstruktur	
Komponente	
Grundconcept	
Conceptalternative	

<input type="checkbox"/>	EOKET: bisher nicht berücksichtigt
<input type="checkbox"/>	EOKET: fest hinterlegt
<input type="checkbox"/>	EOKET: manuell wählbar
<input type="checkbox"/>	EOKET: Optimierung möglich

Anhang B: Eigenschaftswerte der Optimierungsergebnisse MUTE

	MUTE	„Ausgeglichen“	„Spitz“
Längsdynamik			
Beschleunigung 0-60 km/h [s]	7	4,6	10,1
Beschleunigung 0-100 km/h [s]	20,5	11,1	25,7
Elastizität 40-60 km/h [s]	3,3	1,8	4
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	120	167	124
Anfahrsteigfähigkeit [%]	26	26	16
Dauersteigfähigkeit [km/h]	55	88	52
Querdynamik			
Kippsicherheit [-]	1,54	1,48	1,54
Charakt. Geschwindigkeit [km/h]	117	110	93
Schwimmwinkelgradient [$^{\circ}$ s ² /m]	0,62	0,61	0,45
Gierdämpfungsmaß [-]	1,51	1,48	0,69
Wirtschaftlichkeit			
Stromkosten [€/100km]	2,19	2,29	2,17
Anschaffungskosten [€]	16900	21450	12700
Leergewicht [kg]	550	610	470



	MUTE	„Ausgeglichener“	„Spitz“
Reichweite/Batterie			
Reichweite [km]	86	132	70
Ladezeit [h]	3,4	5,5	2,7
Betriebszeit [h]	8,5	13,6	6,8
Komfort			
Kopffreiheit [mm]	935	1052	885
Beinfreiheit hinten [mm]	-	-	-
Kopffreiheit hinten [mm]	-	-	-
Alltagstauglichkeit			
Kofferraumvolumen [l]	395	535	320
Zuladung [kg]	215	155	295
Anzahl der Sitze [-]	2	2	2
Wendekreis [m]	9	8,2	7,6
Design			
Überhang vorne [mm]	740	710	500
Überhang hinten [mm]	720	910	500
Radstand [mm]	2100	1880	1800
Verhältnis Höhe/Breite [-]	0,75	0,97	0,64
Raddurchmesser [mm]	570	700	410

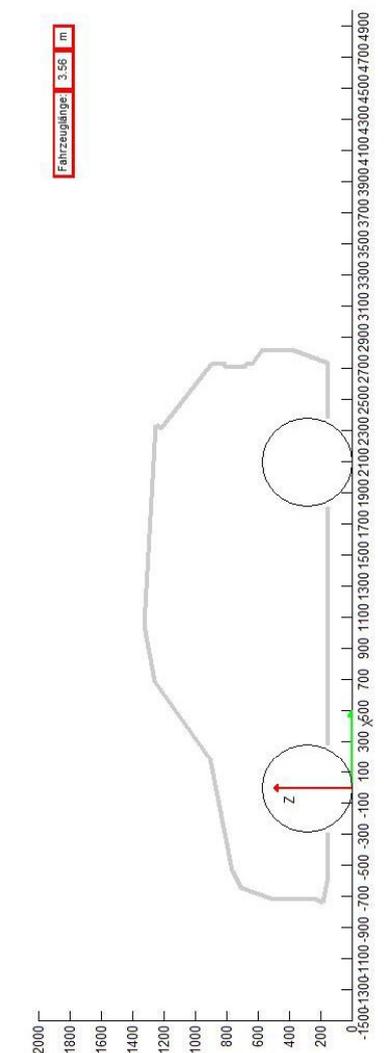
Anhang C: Faktor Kofferraumvolumen

		Kompakt				Limousine			Coupé			Cabrio			SUV			Sportwagen	
		A1	A3	A4	A6	A4	A6	A8	A5	A7	A3	TT	A5	Q3	Q5	Q7	TT	R8	
Länge L103	mm	3954	4238	4703	4927	4915	5137	4711	4969	4238	4187	4625	4385	4629	5089	4187	4431		
Karosseriebreite W116	mm	1740	1765	1826	1855	1874	1949	1854	1911	1765	1842	1854	1831	1880	1983	1842	1904		
Höhe H101-M	mm	1416	1421	1436	1463	1455	1460	1391	1420	1424	1358	1383	1608	1653	1737	1352	1252		
Überhang vorn L104	mm	808	881	866	994	912	1003	860	936	881	911	860	901	895	962	911	999		
Überhang hinten L105	mm	677	779	1029	1090	1091	1142	1041	1119	779	808	1014	881	927	1125	808	782		
Radstand L101	mm	2469	2578	2808	2843	2912	2992	2810	2914	2578	2468	2751	2603	2807	3002	2468	2650		
Kofferraumvolumen V210	l	270	350	490	565	530	510	480	535	260	250	320	460	540	775	292	90		
Derivatfaktor	-	0,85				0,75			0,55			0,85			0,55				
Berechnetes Kofferraumvolumen	l	278	348	532	595	508	563	449	521	248	257	352	492	558	800	256	92		
Abweichung		2,9%	-0,5%	8,6%	5,2%	-4,1%	10,4%	-6,5%	-2,6%	-4,6%	3,0%	9,9%	7,0%	3,4%	3,2%	-12,3%	1,9%		

Anhang D: Oberflächen des EOKET

Weiter

Konzeptauswahl und Design MUTE



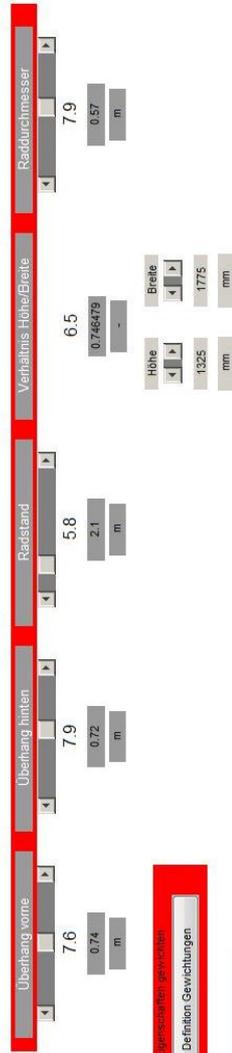
Neues Konzept / Konzept laden

Bezieht sich auf Fahrzeugtyp / -derivat sowie sämtliche Eigenschaftswerte und Gewichtungen

Neues Konzept
Konzept laden
Konzept speichern

Konzept anpassen

Fahrzeugsegment:
Fahrzeugderivat:



Aktualisieren nach Änderung von Korrelationen

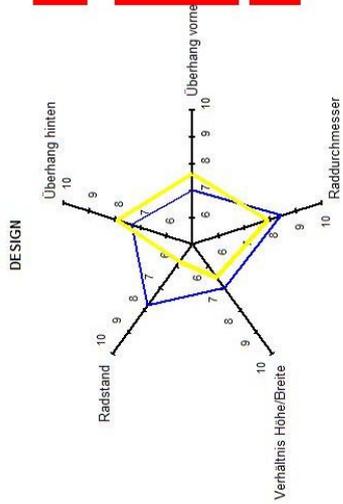
Eigenschaftswerte gewichten

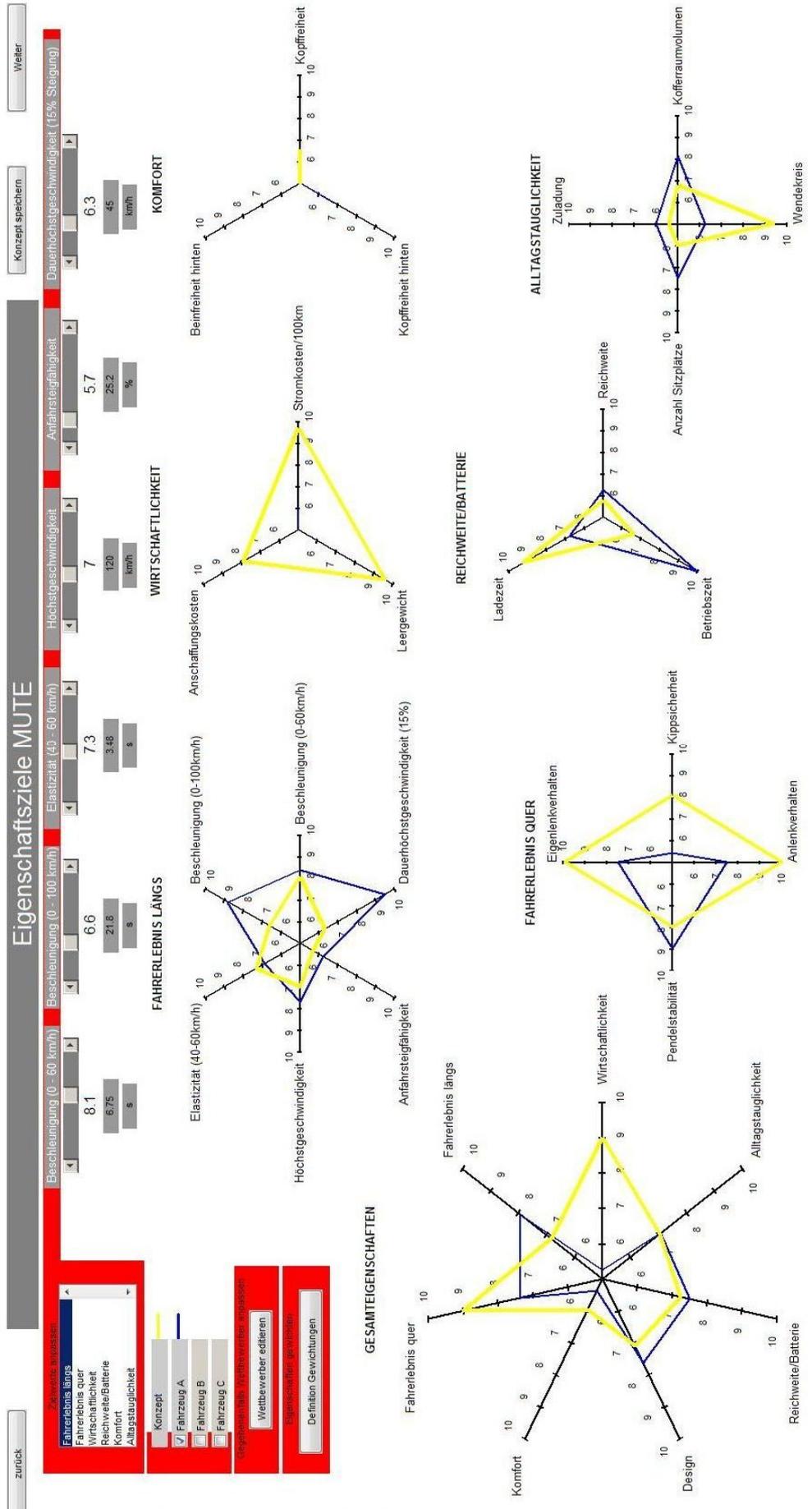
Definition Gewichtungen

Konzept
 Fahrzeug A
 Fahrzeug B
 Fahrzeug C

Gewichtungen des Wettbewerbers anpassen

Wettbewerber editieren





Grundkonzeptentscheidung MUTE

Zurück

Prämien Kosten

Grundkosten Basisfahrzeug [€mm ²]	90
Stromkosten [€kWh]	0.2
Getriebe [€]	517
Motorkosten [€]	601
Batteriesystemkosten [€kWh]	500

Gesamtfahrzeug Prämissen

getriebene Achsen	heck
Achslastverhältnis Soll Bereich	0.45
Achslastverhältnis EG leer	0.44
Achslastverhältnis vollbel.	0.45
max. Achslast VA [kg]	700
max. Achslast HA [kg]	700
eW-Wert []	0.27
Nebenverbraucherleistung im KUV [W] NEFZ = 250 kW	750

Getriebe

Art	1-Gang-Getriebe
Übersetzung 1.Gang	10.744

Fahrzeugdaten

max. Fahrzeuggewicht [kg]	968
Fahrzeuggew. vollbeladen [kg]	741
Achslast VA vollbeladen [kg]	335
Achslast HA vollbeladen [kg]	406
Basisfahrzeug Gewicht absolut [kg]	452
Basisfahrzeug Gewichts faktor Fläche	52

E-Motor

Motortyp	PSM
Motorhersteller	MUTE
Betriebsart	<input checked="" type="radio"/> Hochdrehmoment <input type="radio"/> Hochdrehzahl
Einstellung Verhältnis Eckdrehzahl zu max. Drehzahl	0.230
min	0.15
max	0.3

Batterie

Batteriehersteller	Master
Bezeichnung	Prismatisch_gross
Batterietyp	zylindrisch
Kühlung	Luftkühlung
Batterie in Vorderwagen verbauen?	<input type="checkbox"/>
Batterie in Mitteltunnel verbauen?	<input type="checkbox"/>
Volumenfaktor	2.50
min	2.3
max	3.3
Gewichtsfaktor	1.62
min	1
max	2.5
Energiedichte [Wh/kg]	215
Energiedichte [Wh/l]	565
Leistungsdichte [W/kg]	551
Kapazität Zelle [Ah]	2.6
Energieinhalt Zelle [Wh]	6.12

manuelle Auslegung

Manuelle Auslegung Aus

Sinnvoller Bereich

Erweiterte Fahrzeugdaten

Motor Berechnung manuell

Einstellung Soll-Spitzenleistung [kW]	18.00
Spitzenleistung [kW]	33.4
Nennleistung [kW]	29.8
Spitzendrehmoment [Nm]	60.9
Nenn-Drehmoment [Nm]	36.56
Maximale Drehzahl [U/min]	12000
Eckdrehzahl max [U/min]	5300
Eckdrehzahl nenn [U/min]	7392
Gewicht [kg]	14.4
Durchmesser [mm]	186
Länge [mm]	163
Basismotor	berechnet
Spitzenleistung [kW]	18
Nennleistung [kW]	16.1
Spitzendrehmoment [Nm]	63
Nenn-Drehmoment [Nm]	39.9
Maximale Drehzahl [U/min]	12000
Eckdrehzahl max [U/min]	1955
Eckdrehzahl nenn [U/min]	2727
Gewicht [kg]	7.8
Durchmesser [mm]	186
Länge [mm]	88

Batterie Berechnung manuell

Einstellung Soll-Energieinhalt [kWh]	10.00
min. Spannungslage [V]	273
max. Spannungslage [V]	370
Zellen seriell/parallel	88 / 14
min Packgröße in [%]	0
SOC [%]	80
SOH [%] Gesundheitszustand	100
Ist-Energieinhalt Batteriemodul [kWh]	10
Anzahl Zellen	1232
Nennleistung [kW]	31
Spitzenleistung [kW]	37
Batteriemodulgewicht [kg]	91

manuelle Auslegung

Nächstes

Berechne E-Motor

Berechne Batterie

Optimierungseinstellungen MUTE

Zurück

Auswahl Optimierung oder Klassische Versuchsplanung

- Optimierung
- Multifunktionaler Versuchsplan (Intelligent)
- Klassische Versuchsplanung

Excel Export generieren (Dauer ca. 10s)

Anpassung der Kostenfunktion

Vernhältnis Ober/Untereff

Krümmungsfaktor

ausgeglichen steil

Gewichtungspötenz

Status

Anzahl Iterationen

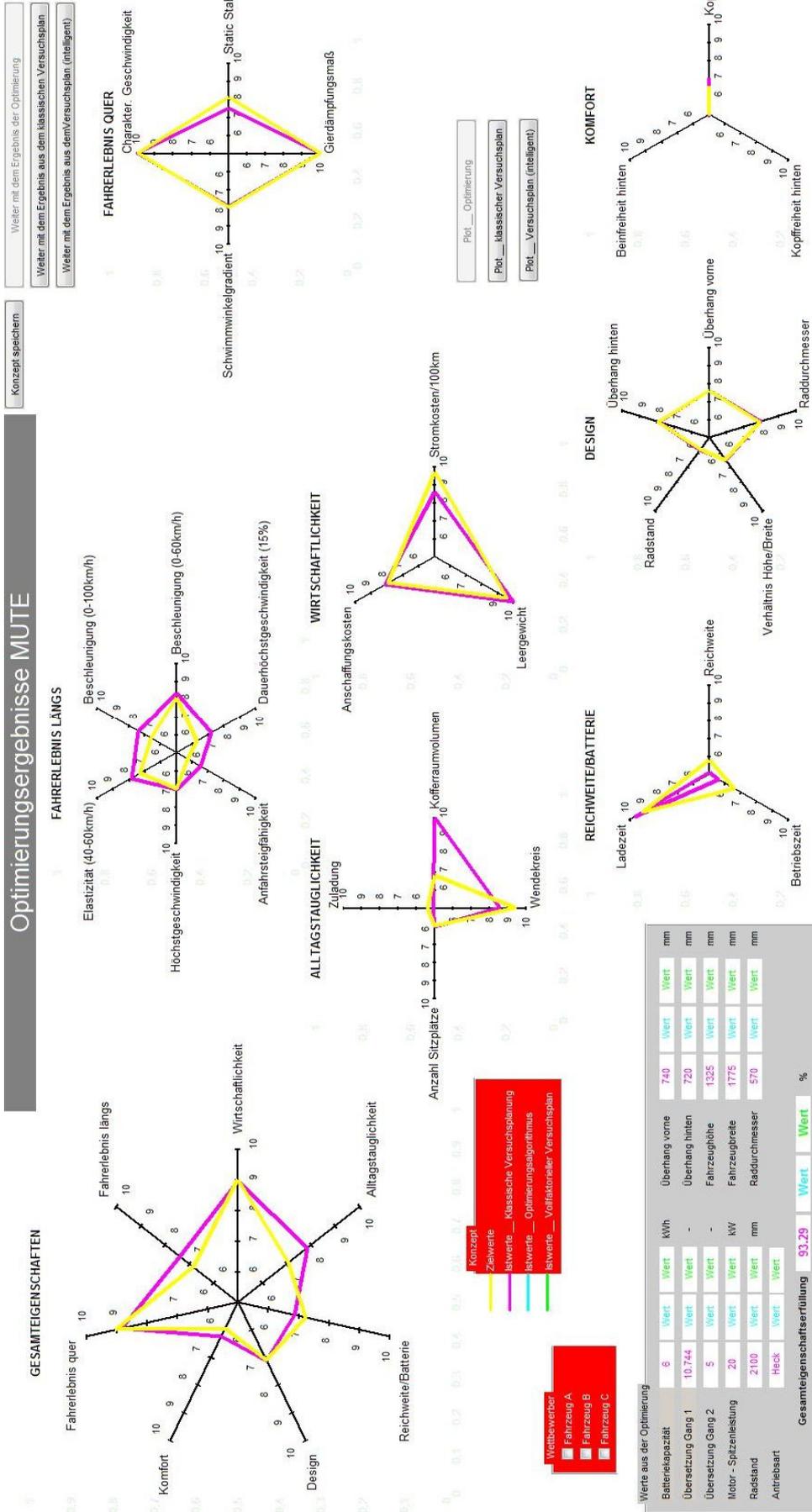
Start Berechnung

Startwert für die Optimierung	untere Grenze Parameterbereich	obere Grenze Parameterbereich	Schrittweite beim faktoriellen Versuch
-	5	35	5
-	10	80	5
-	min. 0,68 10,744	10,744 max. 13	1
-	min. 1800	190 max. 3150	100
-	min. 500	740 max. 1000	1
-	min. 400	720 max. 1150	1
-	min. 1250	1310 max. 1750	1
-	min. 1500	1775 max. 2000	1
-	min. 350	570 max. 720	1

Fronttrieb

Hecktrieb

Allrad



Verzeichnis studentischer Arbeiten

Während der Anfertigung dieser Dissertation wurden diverse studentische Arbeiten betreut. Im Folgenden sind die für die Entwicklung des EOKET relevanten Studienarbeiten aufgeführt. Vielen Dank an die Bearbeiterinnen und Bearbeiter für die Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojekts.

[Bla12]

BLANKE, S.: *Validierung eines Tools zur eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2012.

[Eng11]

ENGERT, O. und KRAPP, S.: *Umsetzung von Optimierungsansätzen für eine eigenschaftsorientierte Konzeptentwicklung von Elektrofahrzeugen*. Garching b. München, TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2011.

[Gia11]

GIANNANTONIO, M.: *Erarbeitung und Implementierung von technischen Restriktionen zur automatisierten Grobauslegung von Elektrofahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2011.

[Gra12]

GRAF, P.: *Automatisierte Lösungsraum Eingrenzung in der Optimierung von E-Fahrzeugkonzepten*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Lüc12]

LÜCKE, S.: *Integration von Optimierungsansätzen in ein eigenschaftsorientiertes Konzeptentwicklungstool für Elektrofahrzeuge*. Garching b. München, TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Mat12]

MATROS, K.: *Eigenschaftsbeeinflussung durch Grundkonzeptentscheidungen in der frühen Entwicklungsphase von Elektrofahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Old11]

OLDEMEYER, B.: *Eigenschaftsorientierte Grobauslegung eines Baukastens für elektrifizierte Fahrzeuge*. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrwesen, Unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2011.

[Schl11]

SCHLEICHER, A.: *Entwicklung einer Methode zur kundenwertorientierten Zielwertdefinition für die Konzeptentwicklung von Elektrofahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2011.

[Zit10]

ZITZELSBERGER, F. und FRIEBE, M.: *Entwicklung eines eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklungstools für Elektrofahrzeuge*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2010.

Verzeichnis eigener Veröffentlichungen im Kontext eigenschaftsorientierter Konzeptentwicklung von Elektrofahrzeugen

[Wie11]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J. und LIENKAMP, M.: *Vom Kundenwunsch zum elektrifizierten Fahrzeugkonzept* in 2. Automobiltechnisches Kolloquium, Garching b. München, 2011.

[Wie12a]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J., BLANKE, S. und LIENKAMP, M.: *Ableitung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen*. in 5. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 2012.

[Wie12b]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J. und LIENKAMP, M.: *Optimization of Electric Vehicle Concepts Based on Customer Relevant Characteristics*. in SAE World Conference, Detroit, 2012.

Literaturverzeichnis

[A123Sy13]

A123 SYSTEMS: *AMP20 Lithium Ion Prismatic Cell*. verfügbar unter: <http://www.a123systems.com/prismatic-cell-amp20.htm>; entnommen am 10.08.2013.

[ADAC]

ADAC (Hrsg.): *ADAC Motorwelt*. monatlich erscheinende Zeitschrift, München, ADAC Verlag.

[Aig82]

AIGNER, J.: *Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 84, 1982, S. 447-450.

[Aka92]

AKAO, Y.: *QFD - Quality Function Deployment*. Landsberg am Lech, Moderne Industrie, ISBN: 3-478-91020-6, 1992.

[AMS11]

AMS: *Audi A2 Concept - So sieht der A2-Nachfolger aus*. verfügbar unter: <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/audi-a2-concept-au-der-iaa-so-sieht-der-a2-nachfolger-aus-3990142.html>; entnommen am 26.06.2013.

[And00]

ANDERSSON, J.: *A survey of multiobjective optimization in engineering design*. Linköping University, Department of Mechanical Engineering, Technical Report LiTH-IKP-R-1097, 2000.

[Aut]

AUTO BILD (Hrsg.): *Auto Bild*. Wöchentlich erscheinende Fachzeitschrift, Springer Verlag.

[AMS]

AUTO MOTOR UND SPORT (Hrsg.): *Auto Motor und Sport*. 14-tägig erscheinende Fachzeitschrift, Stuttgart, Vereinigte Motor-Verlage & Co. KG.

[AVL13]

AVL-GMBH: *Cruise - Berechnungswerkzeug für Fahrleistungs- und Verbrauchswerte*. verfügbar unter: <https://www.avl.com/cruise1>; entnommen am 26.06.2013.

[Bai03]

BAI, H. und KWONG, C. K.: *Anwendung der Fuzzymethodik zur Analyse, Gewichtung und Berücksichtigung der Kundenforderungen bei der qualitätsorientierten Begleitung der Produktgestaltung* in *Intelligent Manufacturing*, Jahrgang 13, 2003, S. 367-377.

[Bai11]

BAIER, H.: *Multidisciplinary Design Optimization*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Leichtbau, Unveröffentlichtes Vorlesungsskript, 2011.

[Ban10]

BANGEMANN, C.: *Neue Stromlinie - Mitsubishi i-MiEV und Smart Ed*. in *Auto Motor und Sport*, Nr. 6 / 2010, S. 58-64.

[Ber94]

BERGE, O. E.: *Anwendungen der Reibungsphysik*. in *NiU-Physik*, Jahrgang 5, Nr. 25 / 1994, S. 10 f.

[Ber99]

BERNARD, R.: *Early Evaluation of Product Properties*. Technische Universität München, Dissertation, 1999.

[Ber00]

BERNARD, T.: *Ein Beitrag zur gewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making*. Universität Karlsruhe(TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2000.

[Bla12]

BLANKE, S.: *Validierung eines Tools zur eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2012.

[Ble06]

BLEFGEN, R.: *Kfz-Zulassungsklassen im Rahmen der EU-Neuregelungen*. Dortmund, Fachhochschule, Diplomarbeit, 2006.

[BMW13a]

BMW AG: *Aufsehenerregend innovativ. Das Design des neuen BMW i3*. verfügbar unter: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2013/design.html>; entnommen am 08.08.2013.

[BMW13b]

BMW AG: *i3 Preisliste und technische Daten*. verfügbar unter: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2013/fakten.html>; entnommen am 10.08.2013.

[Böc12]

BÖCKER, J.: *Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge*. Universität Paderborn, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Skript zur Vorlesung, 2012.

[Bra93]

BRAESS, H.-H.: *"Nichts steigt so schnell wie die Ansprüche" - Gedanken zur weiteren Entwicklung des Personenwagens*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 95, Nr. 9 / 1993.

[Bra07]

BRAESS, H.-H. und SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden:, Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch), 5. überarb. und erw. Aufl., ISBN: 3834802220, 2007.

[Bra85]

BRAESS, H.-H., STRICKER, R. und BALDAUF, H.: *Methodik und Anwendung eines parametrischen Fahrzeugauslegungsmodells*. in Automobil Industrie, Nr. 5 / 1985.

[Bra12]

BRAUNER, G., GERINGER, B. und SCHRÖDL, M.: *Forschungsbedarf für das Elektrofahrzeug der Zukunft*. in Elektrotechnik und Informationstechnik, Jahrgang 129, Nr. 3 / 2012, S. 110-117.

[Bru13]

BRUSA: *On-Board-Schnellladegerät*. verfügbar unter:
<http://www.brusa.biz/index.php?id=334>; entnommen am 10.08.2013.

[Bur13]

BURKERT, A.: *Zweckorientiertes Design für Elektroautos*. in Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Jahrgang 115, Nr. 03 / 2013, S. 184-189.

[Das13]

DASSAULT SYSTEMS: *Catia - Das digitale Produkterlebnis*. verfügbar unter:
<http://www.3ds.com/de/products/catia/>; entnommen am 26.06.2013.

[Eck10]

ECKSTEIN, L., SCHMITT, F. und HARTMANN, B.: *Leichtbau bei Elektrofahrzeugen*. in Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Jahrgang 112, Nr. 11 / 2010, S. 788-795.

[Egh11]

EGHTESSAD, M. und KÜCÜKAY, F.: *Customer Oriented Dimensioning of Electrified Drivetrains*. in 8th Symposium of Hybrid and Electric Vehicles, Braunschweig, 2011.

[Ehr06]

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München Wien, Carl Hanser Verlag, ISBN: 3446407336, 2006.

[Ehr07]

EHRENSPIEL, K., KIEWERT, A. und LINDEMAN, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Berlin, Springer Verlag, ISBN: 3540742220, 2007.

[Eil98]

EILETZ, R.: *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte - am Beispiel PKW-Entwicklung*. Garching b. München, TU München, Lehrstuhl für Konstruktion und Maschinenbau, Dissertation, 1998.

[Ele12]

ELEMENTENERGY: *Cost and performance of EV batteries*. Cambridge, Element Energy Limited, Studie, 2012.

[Eng11]

ENGERT, O. und KRAPP, S.: *Umsetzung von Optimierungsansätzen für eine eigenschaftsorientierte Konzeptentwicklung von Elektrofahrzeugen*. Garching b. München, TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2011.

[Fra94]

FRANTZESKAKIS, P., KREPEC, T. und SANKAR, S.: *Specific Analysis on Electric Vehicle Performance Characteristics with the Aid of Optimization Techniques*. SAE Technical Paper 940336, 1994.

[Fuc13]

FUCHS, J. und LIENKAMP, M.: *Technologie und Architektur für elektrifizierte Fahrzeuge*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 115, Nr. 3 / 2013, S. 164-170.

[Gia11]

GIANNANTONIO, M.: *Erarbeitung und Implementierung von technischen Restriktionen zur automatisierten Grobauslegung von Elektrofahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2011.

[Gol07]

GOLBUFF, S.: *Design Optimization of a Plug-In Hybrid Electric Vehicle*. SAE Technical Paper 2007-01-1545, 2007.

[Gor12]

GORBEA, C. E.: *Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis In a New Age of Architectural Competition*. München, Dr. Hut, Dissertation, 2012.

[Gra11]

GRAF, M., WIESBECK, F. und LIENKAMP, M.: *Fahrdynamikauslegung eines E-Fahrzeugs - Fahrwerks- und Torque-Vectoring-Entwicklung für das Fahrzeug MUTE*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 113, Nr. 6 / 2011, S. 452-457.

[Gra12]

GRAF, P.: *Automatisierte Lösungsraum Eingrenzung in der Optimierung von E-Fahrzeugkonzepten*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Haa01]

HAAN, P. und KELLER, M.: *Real-world driving cycles for emission measurements: ARTEMIS and Swiss cycles*. Bern, Swiss Agency for Environment, Forests and Landscape (SAEFL), 2001.

[Han12]

HANNA, R., HAZIMEH, O. und KUHNERT, F.: *Charging forward - PwC's 2012 electric vehicle survey*. PricewaterhouseCoopers, Studie, 2012.

[Hei94]

HEINKE, O.: *Fahrzeugauslegung mit Hilfe von Eigenschaftsparametern - Möglichkeit oder Utopie*. TU Berlin, Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik Fahrzeugtechnik, 229, 1994.

[Hei02]

HEIBING, B. und BRANDL, H. J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Würzburg, Vogel Verlag, ISBN: 3834332526, 2002.

[Hei07]

HEIßING, B., ERSOY, M. und GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, ISBN: 3834808210, 2007.

[Hil12]

HILLEBRAND, A., HIRZ, M. und DIETRICH, W.: *ConceptCar: Ein Werkzeug für die frühe Konzeptphase zur Konzipierung und Bewertung von Fahrzeugen* in 5. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 2012.

[Hül09]

HÜLSEBUSCH, D., UNGETHÜM, J., BRAIG, T. und DITTUS, H.: *Multidisziplinäre Simulation von Fahrzeugen*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 111, Nr. 10 / 2009, S. 772-779.

[IPG13]

IPG: *CarMaker - die simulierte Testfahrt!* verfügbar unter:
<http://www.ipg.de/index.php?id=609&L=1>; entnommen am 26.06.2013.

[Ips03]

IPSEN, S.: *IT-unterstützte Methoden zur Erstellung und Bewertung von PKW-Konzepten. Erfassung und Evaluierung von existierenden rechnergestützten Werkzeugen zur Konzeptgenerierung mittels parametrischer Baukastenelemente*. Technische Universität München, Dissertation, 2003.

[Ise06]

ISERMANN, R. H.: *Fahrdynamik-Regelung – Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme*. Mechatronik Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, ISBN: 3834801097, 2006.

[JDP13]

J.D.POWER: *J. D. Power - A Global Market Research Company*. verfügbar unter:
<http://www.jdpower.com>; entnommen am 26.06.2013.

[Jun12]

JUNG, M., MERWERTH, J., UEBERLE, H. und VOGEL, F.: *Der elektrische Antrieb des BMW Active E*. in MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Jahrgang 73, Nr. 07 - 08 / 2012, S. 602-607.

[Kam06]

KAMISKE, G. F. und BRAUER, J. F.: *Qualitätsmanagement von A-Z*. München, Hanser Verlag, ISBN: 3446402845, 2006.

[Kam13]

KAMPKER, A., VALLÉE, D. und SCHNETTLER, A.: *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2013.

[Kan84]

KANO, N., SERAKU, N., TAKAHASHI, F. und TSUJI, S.: *Attractive Quality and Must Be Quality*. in Quality Magazine, Jahrgang 14, Nr. 2 / 1984, S. 39-48.

[Kas12]

KASPER, R. und SCHÜNEMANN, M.: *5. Elektrische Fahrtriebe Topologien und Wirkungsgrad*. in MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Jahrgang 73, Nr. 10 / 2012, S. 802-807.

[Kes11]

KESSLER, F., HOCKGEIGER, E., SCHRÖDER, J., STROBL, D., TACHTLER, J. und VOGEL, F.: *The new BMW Electric Powertrain in the ActiveE* in 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2011.

[Kin94]

KING, B.: *Doppelt so schnell wie die Konkurrenz – Quality Function Deployment*. St. Gallen, gfmt, 1994.

[Kle07]

KLEIN, B.: *Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shanin-Methodik*. Oldenbourg, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, ISBN: 3486583522, 2007.

[Kle11]

KLEIN, B., MÖRITZ, M. und WELKE, K.: *Efficient propulsion for mass production Electric Vehicles*. in 8th Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Braunschweig, 2011.

[Kna10]

KNAUER, P.: *Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahn-anregung*. Technische Universität München, Dissertation, 2010.

[KBA13]

KRAFTFAHRT BUNDESAMT: *Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Dezember 2012 nach Marken und Modellreihen*. verfügbar unter: <http://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/issues/kfz/sonst/2012/4377.pdf>; entnommen am 20.08.2013.

[Kuc12]

KUCHENBUCH, K.: *Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge*. Berlin, Logos Verlag, Dissertation, AutoUni – Schriftenreihe Band 25, ISBN: 978-3-8325-3262-8 2012.

[Kuc11a]

KUCHENBUCH, K., STIEG, J. und VIETOR, T.: *Individual concepts for electric vehicles: Interaction between battery package and vehicle concept* in 11. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, Stuttgart, 2011.

[Kuc11b]

KUCHENBUCH, K., VIETOR, T. und STIEG, J.: *Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von Elektrofahrzeugen*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 113, Nr. 07-08 / 2011, S. 549-551.

[Lie11]

LIENKAMP, M.: *Fahrzeugkonzepte: Entwicklung und Simulation*. Garching bei München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München, Vorlesungsskriptum, 2011.

[Lie12]

LIENKAMP, M.: *Elektromobilität: Hype oder Revolution?*, Springer, VDI Buch, ISBN: 3642285481, 2012.

[Lin09]

LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Heidelberg, Springer, ISBN: 3642014224, 2009.

[Lüc12]

LÜCKE, S.: *Integration von Optimierungsansätzen in ein eigenschaftsorientiertes Konzeptentwicklungstool für Elektrofahrzeuge*. Garching b. München, TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Lun09]

LUNANOVA, M.: *Optimierung von Nebenaggregaten: Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN: 3834807304, 2009.

[Mag13]

MAGNASTEYR: *Concept Factory – Parametrisches Konzeptmodell* verfügbar unter: http://www.magna.com/xchg/en/223-1364/complete_vehicle/Innovation+%26+Styling/Innovation+Fields/Efficient+Processes/Concept+Factory?rdeLocaleAttr=de entnommen am 26.06.2013.

[Mat11]

MATHWORKS INC. (Hrsg.): *Global Optimization Toolbox User's Guide*. Natick,, The MathWorks, Inc., 2011.

[Mat12]

MATROS, K.: *Eigenschaftsbeeinflussung durch Grundkonzeptentscheidungen in der frühen Entwicklungsphase von Elektrofahrzeugen* Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2012.

[Meu09]

MEURLE, J. und MUIGG, A.: *Fahrzeugeigenschaften - Erwartungshaltung des Kunden und technische Umsetzbarkeit*. in Vortragsreihe: Innovationen in der Fahrzeugtechnik, Graz, 2009.

[Mya11]

MIYAMOTO, T., WATANABE, Y., HIRAI, T. und SASAKI, T.: *New Nissan Electric Vehicle LEAF and Battery Technologies* in 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2011.

[MSC12]

MSC SOFTWARE (Hrsg.): *MSC Adams/Car - Real Dynamics for Vehicle Design and Testing* 06.02.2012). 2012.

[MUT11]

MUTE: *MUTE - TUM Electric Mobility*. verfügbar unter: <http://www.mute-automobile.de>; entnommen am 26.06.2013.

[Nau07]

NAUNIN, D.: *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Renningen, Expert Verlag, W. J. Bartz and E. Wippler, 2007.

[NCBS06]

NCBS (Hrsg.): *New Car Buyers Survey*. München, TNS Infra-Test, 2006.

[Neu10]

NEUMEISTER, D., WIEBELT, A. und HECKENBERGER, T.: *Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 112, Nr. 04 / 2010, S. 250-255.

[Old11]

OLDEMEYER, B.: *Eigenschaftsorientierte Grobauslegung eines Baukastens für elektrifizierte Fahrzeuge*. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrwesen, Unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2011.

[Pal13]

PALM, H., HOLZMANN, J., SCHNEIDER, S.-A. und KÖGELER, H.-M.: *Die Zukunft im Fahrzeugentwurf - Systems-Engineering-basierte Optimierung*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 115, Nr. 6 / 2013, S. 512-517.

[Pan13]

PANASONIC: *NCR 18650 Data Sheet*. verfügbar unter: <http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/ACI4000/ACI4000CE17.pdf>; entnommen am 10.08.2013.

[Pau07]

PAUS, H. J.: *Physik in Experimenten und Beispielen*. vol. 3. Hanser Verlag, ISBN: 3446411429, 2007.

[Pie11]

PIETSCH, R., ZIMMER, M., LIENKAMP, M. und WANGENHEIM, F.: *Kooperative Konfrontation - E-Mobility aus Markt- und Entwicklersicht*. in 2. *Automobiltechnisches Kolloquium*, München, 2011.

[Pon11]

PONN, J. und LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. vol. 2. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-20579-8, 2011.

[Pri11]

PRINZ, A.: *Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2011.

[Ren13]

RENAULT: *Renault Z.E. - Twizy*. verfügbar unter: <http://www.renault.de/renault-modellpalette/ze-elektrofahrzeuge/twizy/twizy>; entnommen am 26.06.2013.

[Ren07]

RENZ, M.-J.: *Die Marke als Plattform zur Nutzung von Preispotenzialen*. in 17. *GfM Marketing-Trend-Tagung*, Zürich, 2007.

[Ren09]

RENZ, S.: *Renault Fluence Z.E. im Fahrbericht - Stufenhecklimousine mit Elektro-Antrieb*. verfügbar unter: <http://www.auto-motor-sport.de/fahrberichte/renault-fluence-z-e-im-fahrbericht-stufenhecklimousine-mit-elektro-antrieb-2747431.html>; entnommen am 26.06.2013.

[Res11]

RESCH, S.: *TÜV SÜD E-Car Cycle (TSECC)*. in 3. eCarTec Kongress, München, 2011.

[Rie40]

RIEKERT, P. und SCHUNCK, T.-E.: *Zur Fahrmechanik des gummbereiften Kraftfahrzeugs*. in Ingenieur-Archiv Nr. XI / 1940, S. 210-224.

[Rob10]

ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, ISBN: 3834814401, 2010.

[Ros09]

ROSSBACHER, P., HIRZ, M., HARRICH, A., DIETRICH, W. und THEISS, N.: *The Potential of 3D-CAD Based Process-Optimization in the Automotive Concept Phase*. in SAE World Congress, Detroit, 2009.

[Rou08]

ROUSSEAU, A.: *PSAT Training. Part 01 PSAT Overview*. verfügbar unter: http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/PSAT/psat_training.html; entnommen am 26.06.2013.

[Saa97]

SAATWEBER, J.: *Kundenorientierung durch Quality Function Deployment*. München Wien, Carl Hanser Verlag, ISBN: 3446190112, 1997.

[Saf13]

SAFT: *20 V & 40 V SLFP MODULE*. verfügbar unter: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/20-v-40-v-slfp-module>; entnommen am 10.08.2013.

[Sat13]

SATTLER, H.: *E-Mobility – Batteriesystem*. verfügbar unter: <http://www.vde.com/de/e-mobility/fahrzeugtechnik/batteriesystem/seiten/default.aspx>; entnommen am 10.08.2013.

[Schi13]

SCHICKRAM, S., TILL, Z. und LIENKAMP, M.: *Auslegung von elektrischen Fahrzeugkonzepten für Megacities in Asien*. in *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Jahrgang 115, Nr. 2 / 2013, S. 126-130.

[Schi10]

SCHIMMEL, C.: *Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*. Technische Universität München, Dissertation, 2010.

[Schl11]

SCHLEICHER, A.: *Entwicklung einer Methode zur kundenwertorientierten Zielwertdefinition für die Konzeptentwicklung von Elektrofahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Semesterarbeit, 2011.

[Schö11]

SCHÖNEBURG, R. und JUSTEN, R.: *Elektromobilität als Herausforderung und Chance für die Fahrzeugsicherheit* in 2. Automobiltechnisches Kolloquium, Garching b. München, 2011.

[Schr10]

SCHRAMM, D., HILLER, M. und BARDINI, R.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2010.

[Sei08]

SEIFFERT, U. und GOTTHARD, R.: *Virtuelle Produktenstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz*. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 3834803456, 2008.

[Sma13]

SMART: *Smart Fortwo Electric Drive*. verfügbar unter: http://www.smart.de/produkte-electric-drive/bf408e3f-8998-5bf8-b237-7f58fbb574f4?pid=ed_2011__t3__home; entnommen am 26.06.2013.

[Son13]

SONY CORPORATION: *Lithium Ion Rechargeable Batteries Technical Handbook*. verfügbar unter: <http://www.sony.com.cn/products/ed/battery/download.pdf>; entnommen am 10.08.2013.

[Sta13]

STATISTISCHES BUNDESAMT: *Daten zur Energiepreisentwicklung*. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt, 2013.

[Ste97]

STEINMEIER, E.: *Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der PKW-Entwicklung* München, TU München, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, Dissertation, 1997.

[Sti08]

STIEGELER, M.: *Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge*. Universität Ulm, Dissertation, 2008.

[Stö07]

STÖCKER, R.: *Untersuchung von Optimierungsverfahren für rechenzeitaufwändige technische Anwendungen in der Motorenentwicklung*. Chemnitz, Fakultät für Mathematik Technische Universität Chemnitz, Diplomarbeit, 2007.

[Tes13]

TESIS DYNWARE: *DYNA4 Framework: Modulare Simulationssoftware für die Fahrzeugentwicklung*. verfügbar unter: <http://www.thesis-dynaware.com/>; entnommen am 26.06.2013.

[Tes11]

TESLA MOTORS: *The Electric Tesla Roadster*. verfügbar unter: <http://www.teslamotors.com/roadster>; entnommen am 15.02.2011.

[Tes13]

TESLA MOTORS: *The Model S*. verfügbar unter: <http://www.teslamotors.com/modelx>; entnommen am 26.06.2013.

[Tüb11]

TÜBKE, J.: *Batterie-Technologien für E-Mobile: Stand heute und Zukunftsperspektiven in Mobility 2.0*, Fraunhofer ICT, Nr. 7 / 2011.

[Val09]

VALENTINE-URBSCHAT, M. und BERNHART, W.: *Powertrain 2020 - The Future Drives Electric*. Roland Berger, Studie, 2009.

[VDI04]

VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2004.

[Wal10]

WALLENTOWITZ, H., FREIALDENHOVEN, A. und OLSCHESKI, I.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, ISBN: 3834814121, 2010.

[Wal05]

WALZ, M. C.: *Trends in the Static Stability Factor of Passenger Cars, Light Trucks and Vans*. Springfield, Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2005.

[Wie12a]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J., BLANKE, S. und LIENKAMP, M.: *Ableitung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen*. in 5. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 2012.

[Wie11]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J. und LIENKAMP, M.: *Vom Kundenwunsch zum elektrifizierten Fahrzeugkonzept* in 2. Automobiltechnisches Kolloquium, Garching b. München, 2011.

[Wie12b]

WIEDEMANN, E., MEURLE, J. und LIENKAMP, M.: *Optimization of Electric Vehicle Concepts Based on Customer Relevant Characteristics*. in SAE World Conference, Detroit, 2012.

[Wil01]

WILHELM, B.: *Konzeption und Bewertung einer modularen Fahrzeugfamilie*. Aachen, Shaker Verlag, ISBN: 3826588428, 2001.

[Wyr07]

WYMAN, O.: *Auto und Umwelt 2007*. München, Studie, 2007.

[Yan10]

YANNI, T. und VENHOVENS, P. J. T.: *Impact and Sensitivity of Vehicle Design Parameters on Fuel Economy Estimates*. in SAE World Congress, Detroit, 2010.

[Zie06]

ZIEMANN, A.: *Zielsystemmanagement für die Produktentstehung von PKW*. Norderstedt, Books on Demand, Dissertation, 2006.

[Zit10]

ZITZELSBERGER, F. und FRIEBE, M.: *Entwicklung eines eigenschaftsorientierten Konzeptentwicklungstools für Elektrofahrzeuge*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2010.

