

# Technische Universität München

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

## **Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte**

Dipl.-Ing. Stephan Fuchs M. Sc.

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

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Hornung

Prüfer der Dissertation:

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

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Die Dissertation wurde am 29.04.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.07.2014 angenommen.



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in den Jahren 2011 bis 2014.

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, für die Betreuung meiner Arbeit und die fachlichen Anregungen und Diskussionen. Seine persönliche Unterstützung und Erfahrung waren ein wichtiger Beitrag zum Gelingen meiner Dissertation. Gemeinsam mit ihm entstand die Idee dieses Forschungsprojekts, und er ermöglichte die Durchführung am Lehrstuhl als eigenständiges Thema, unabhängig von externen Forschungsaufträgen und fremden Zielsetzungen.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Baier für die Zweitprüfung und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Mirko Hornung für den Prüfungsvorsitz.

In der vorliegenden Form wäre diese Arbeit ohne detaillierte Benchmarkdaten von Fahrzeugen nicht möglich gewesen. Für die unkomplizierte Bereitstellung entsprechender umfangreicher Daten geht mein herzlicher Dank an die Firma A2Mac1 Automotive Benchmarking, namentlich Herrn Wilhelm König und Herrn Benoît Pigenel.

Ich danke auch meinen Kollegen am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, die mit Anregungen und in kritischen Diskussionen dazu beitrugen, mein Forschungsprojekt anwendungsbezogen umzusetzen und in Details zu ergänzen. Mein Dank gilt ebenfalls den von mir betreuten Studenten, die mit ihren Arbeiten und einem hohen persönlichen Engagement das Forschungsvorhaben bereicherten.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen, und die mich bei all meinen bisherigen Plänen und Zielen unterstützt haben. Ohne sie würde ich diese Zeilen heute nicht schreiben.

Garching, im April 2014

Stephan Fuchs

*Hinweis zur Verwendung der Begriffe Gewicht und Masse: Im Deutschen, sowohl in der Fachsprache innerhalb des Automobilbaus als auch in der Umgangssprache, haben sich die Begriffe Gewicht und Fahrzeuggewicht etabliert. Sie werden in dieser Dissertation gleichbedeutend zu Masse und Fahrzeugmasse verwendet.*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation für diese Arbeit .....	3
1.2	Vorgehen .....	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
2.1	Sekundäreffekte einer Gewichtsveränderung .....	9
2.1.1	Technischer Ansatz zur Ermittlung der Sekundäreffekte .....	10
2.1.2	Empirischer Ansatz zur Ermittlung der Sekundäreffekte .....	11
2.2	Fahrzeuggewicht im Entwicklungsprozess .....	12
2.3	Gewichtsschätzer in Fahrzeugkonzept-Werkzeugen .....	14
2.4	CO <sub>2</sub> -Emissionen von Fahrzeugen .....	14
2.5	Kosten von Fahrzeugen .....	17
2.6	Kritische Betrachtung des Stands der Technik .....	18
2.6.1	Gewicht .....	18
2.6.2	CO <sub>2</sub> -Emissionen und Kosten .....	19
2.7	Zielsetzung dieser Arbeit .....	20
<b>3</b>	<b>Lösungsansatz zur parametrischen Bestimmung der Fahrzeugmasse</b> .....	<b>23</b>
3.1	Ansatz für die Gewichtsspirale .....	24
3.2	Ansatz für das Ausgangsgewicht .....	25
3.3	Ansatz für die fahrzeugspezifischen Kenngrößen .....	26
<b>4</b>	<b>Umsetzung im Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell</b> .....	<b>29</b>
4.1	Struktur des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells .....	29
4.2	Vorgehen und Methodenwahl .....	31
4.2.1	Physikalische Modellierung .....	32
4.2.2	Empirische Modellierung .....	33
4.3	Auswahl der Modellparameter .....	34
4.4	Gewichtsberechnung der Komponenten .....	37
4.4.1	Struktur .....	37
4.4.2	Fahrwerk .....	41
4.4.3	Antriebsstrang .....	43
4.4.4	Energiespeicher .....	46
4.4.5	Exterieur .....	48

4.4.6	Interieur.....	51
4.4.7	Elektrik und Elektronik.....	52
4.4.8	Sonstiges .....	53
4.5	Simulation der Fahrzeuglängsdynamik.....	54
4.6	Modelle für fahrzeugspezifische Kenngrößen.....	57
4.6.1	Luftwiderstandsbeiwert.....	57
4.6.2	Rollwiderstandsbeiwert .....	58
4.6.3	Drehmassenzuschlagsfaktor .....	59
4.6.4	Energiebedarf der Klimatisierung .....	61
4.7	Aufbau und Anpassung der Motorkennfelder .....	62
4.7.1	Elektromotor.....	63
4.7.2	Verbrennungsmotor .....	64
4.8	Validierung von Eingabewerten und Package .....	66
4.8.1	Grenzen der empirischen Modelle.....	67
4.8.2	Realisierbarkeit des Package.....	67
<b>5</b>	<b>Plausibilisierung des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells.....</b>	<b>69</b>
5.1	Plausibilisierung anhand von Benchmarkstudien.....	69
5.1.1	Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge .....	69
5.1.2	Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge.....	70
5.2	Plausibilisierung anhand aktueller Fahrzeuge .....	73
5.2.1	Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge .....	74
5.2.2	Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge.....	77
<b>6</b>	<b>Erweiterung des Modells um CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten .....</b>	<b>81</b>
6.1	Ansatz für eine parametrische Beschreibung .....	82
6.2	Modellierung der CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen.....	83
6.2.1	Produktion.....	84
6.2.2	Betrieb .....	88
6.2.3	Recycling .....	89
6.3	Modellierung der Gesamtkosten.....	89
6.3.1	Produktion.....	90
6.3.2	Betrieb .....	93
6.3.3	Fahrzeugverkauf oder Recycling.....	93
6.4	Plausibilisierung .....	93
6.4.1	CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen.....	94
6.4.2	Gesamtkosten.....	96

---

<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiele und Erkenntnisse</b>	<b>99</b>
7.1	Allgemeine Erkenntnisse aus Parametervariationen	99
7.2	Verhältnis des sekundären zum primären Gewichtseffekt	104
7.3	Variation des Strukturmaterials: Stahl, Aluminium oder CFK	107
7.4	Variation des Antriebskonzepts: BEV oder ICEV	108
7.5	Variation des Passagierkonzepts: Zwei- oder Fünfsitzer	109
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>111</b>
8.1	Anwendbarkeit des Verfahrens	111
8.2	Ergebnisse des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells	112
8.2.1	Gewichte der Fahrzeugkomponenten	113
8.2.2	Längsdynamiksimulation	114
8.2.3	Konvergenz und Grenzen des Verfahrens	115
8.2.4	Vergleich der Ergebnisse mit einem bestehenden Schätzverfahren	115
8.3	Ergebnisse der CO <sub>2</sub> -Emissions- und der Kostenberechnung	116
8.3.1	CO <sub>2</sub> -Emissionsmodell	117
8.3.2	Gesamtkostenmodell	117
8.4	Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens	117
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>121</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
	<b>Verwendete Formelzeichen</b>	<b>vii</b>
	<b>Zugrunde liegende Veröffentlichungen</b>	<b>xi</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>xiii</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
	<b>Anhang</b>	<b>xxx</b>



# 1 Einleitung

„Das Fahrzeuggewicht ist bei der Gestaltung von Fahrzeugkonzepten eine der wesentlichen Zielgrößen.“ [Bra13, S. 148]

Die Fahrzeugmasse entscheidet maßgeblich über die fahrdynamischen Eigenschaften und den Komfort von Fahrzeugen; des Weiteren bestimmt sie die Auslegung von Komponenten. Bei konventionellen Fahrzeugen ist die Masse je nach Fahrzyklus für mehr als 50 Prozent des Kraftstoffverbrauchs verantwortlich [Mic05, S. 28; Wie09]. Sowohl Produktions- und Betriebskosten als auch CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen hängen von der Masse eines Fahrzeugs ab [Fuc14a, Fuc14b].

In den vergangenen Jahrzehnten ist die Fahrzeugmasse kontinuierlich angewachsen [Eck10a]. Verantwortlich dafür sind gestiegene Sicherheitsanforderungen, höhere Komfortansprüche, zusätzliche Funktionen im Interieur, gestiegene Qualität und Anforderungen seitens des Gesetzgebers [Goe05, S. 3].

Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung anhand von drei Fahrzeugen aus dem Volkswagen-Konzern. Innerhalb derselben Produktlinie hat sich die Fahrzeugmasse von der ersten bis zur aktuellen Baureihe jeweils um rund 55 Prozent erhöht. Zugleich sind die Fahrzeuge größer geworden. Doch selbst bei ungefähr gleicher Fahrzeuglänge des Golf II aus 1983 mit 3.985 mm und des Polo V aus 2009 mit 3.970 mm ist die Masse um rund 30 Prozent angestiegen. Erst bei Fahrzeugen der neuesten Generation schwächt sich der Massezuwachs ab, oder die Masse geht gegenüber dem jeweiligen Vorgängerfahrzeug leicht zurück.

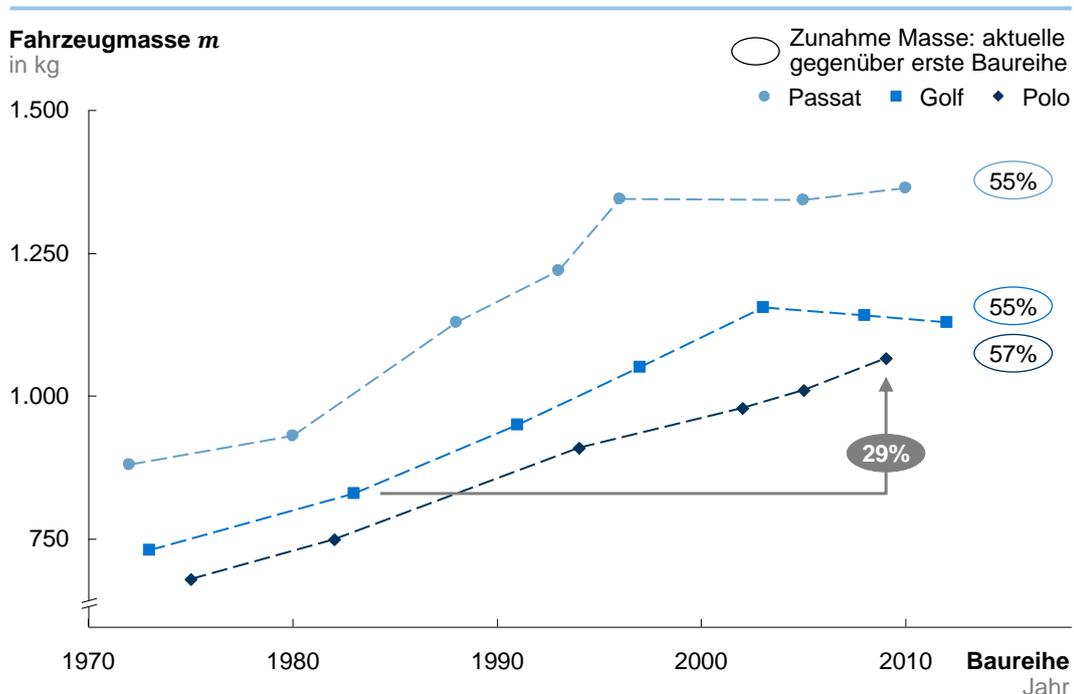


Abbildung 1.1: Fahrzeugmasse des Volkswagen Polo, Golf und Passat verschiedener Baureihen

vgl. [Eck10a]; aktualisiert mit [Vol13c] und [Vol13d]

Die Auswirkung der Masse und des Masseanstiegs auf den Kraftstoffverbrauch lässt sich bei der Betrachtung der geleisteten Fahrwiderstandsarbeit im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) anhand eines Beispiels abschätzen, Abbildung 1.2. Die Fahrwiderstandsarbeit für den Audi A4 aus 2007 ist rund 10 Prozent höher als diejenige für den Audi 80 aus 1978. Dabei gilt:

- Die Zusammensetzung der Fahrwiderstandsarbeit hat sich zunehmend in Richtung der masseabhängigen Beschleunigungsarbeit verschoben.
- Der Anteil der ebenfalls masseabhängigen Rollwiderstandsarbeit ist ungefähr konstant geblieben, weil der Masseanstieg durch einen reduzierten Rollwiderstand moderner Reifen kompensiert wird.
- Das Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche bestimmt die masseunabhängige Luftwiderstandsarbeit, deren Anteil an der gesamten Fahrwiderstandsarbeit gesunken ist. Die optimierte Aerodynamik führt zu einem geringeren Luftwiderstandsbeiwert und gleicht den Anstieg in den Fahrzeugabmessungen und damit der Stirnfläche aus.

Fahrzeug	Audi 80 B2	Audi A4 B5	Audi A4 B8
Jahr	1978	1994	2007
Leergewicht <sup>1</sup> in kg	930 [Wik13]	1.170 [Wik13]	1.410 [Koh07]
Rollwiderstandsbeiwert in kg/t	13,4 [Anhang A]	11,4 [Anhang A]	10,0 [Roh13]
Luftwiderstandsbeiwert dimensionslos	0,380	0,285	0,270
Stirnfläche in m <sup>2</sup>	1,86	2,02	2,20

} [Schü13, S. 365]

**Fahrwiderstandsarbeit im NEFZ, bezogen auf 100 km**  
in Prozent

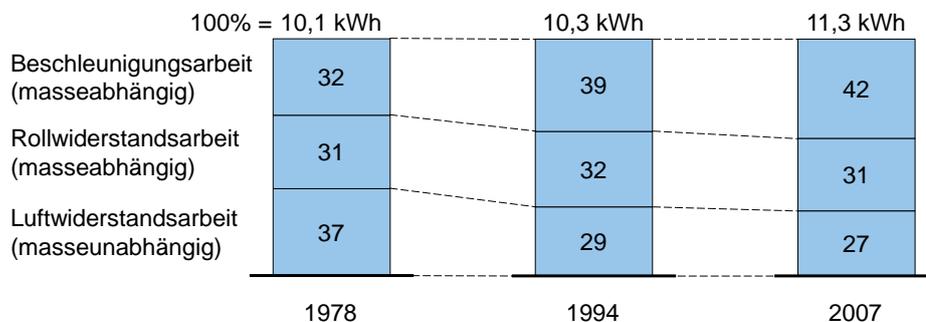


Abbildung 1.2: Fahrwiderstandsarbeit des Audi 80 und des Audi A4 aus 1978, 1994 und 2007

<sup>1</sup> Jeweils leichtestes Fahrzeug, nach DIN 70020 mit 90 Prozent gefülltem Tank und ohne Fahrer

Eigene Berechnung; Berechnungsverfahren nach [Roh13]; Annahmen siehe Anhang A

Trotz signifikanter Verbesserungen bei Aerodynamik und Rollwiderstand ist die Fahrwiderstandsarbeit bei diesem Beispiel in den letzten Jahren angestiegen. Der Anstieg ist fast vollständig auf die gestiegene Fahrzeugmasse zurückzuführen.

Gesetzliche Vorgaben zur Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Fahrzeugen [Eur09] zwingen Automobilhersteller zunehmend, über Leichtbaumaßnahmen zur Masse- und Verbrauchssenkung nachzudenken. Gründe für das Eingreifen des Gesetzgebers sind beispielsweise die Erkenntnis über den Zusammenhang von Klimawandel und anthropo-

genem CO<sub>2</sub>-Ausstoß [IPC07, S. 36 ff.] und die nicht unerschöpflich zur Verfügung stehenden Mineralölreserven. Hinzu kommt eine immer größer werdende Sensitivität des Kunden gegenüber dem Kraftstoffverbrauch.

Für den 2012 vorgestellten Golf VII hat Volkswagen hohe Anstrengungen zur Reduktion der Fahrzeugmasse unternommen [Roh12; Vol12a]. Dennoch: Das Vorgängermodell Golf VI wiegt in der leichtesten Variante 1.217 kg (59 kW Ottomotor) [Vol12b, S. 30], der Golf VII 1.205 kg (63 kW Ottomotor; Masse beider Fahrzeuge ohne Fahrer und Gepäck für die Vergleichbarkeit der Werte) [Vol13c, S. 26]. Die Einsparung beträgt 12 kg, also noch nicht einmal ein Prozent. Dies zeigt: Die Fahrzeugmasse ist nach wie vor ein aktuelles Thema; ein deutlicher Abwärtstrend ist noch nicht zu erkennen.

## 1.1 Motivation für diese Arbeit

Trotz der großen Bedeutung der Masse für die Auslegung von Fahrzeugen werden in frühen Phasen der Konzeptfindung und Fahrzeugentwicklung überwiegend einfache Schätz- und Erfahrungswerte für die Masse verwendet; Beispiele finden sich in [Kuc12; Wie13; Fuc14d (J. Fuchs)].

Mit fortschreitender Entwicklung wird die Masse konkretisiert. Zu Beginn der Serienentwicklung werden Zielmassen für die einzelnen Komponenten des Fahrzeugs festgelegt und den Entwicklern als Richtvorgaben an die Hand gegeben. Dies erfolgt meist auf Basis eines Vorgänger- oder Referenzfahrzeugs, das um die veränderten Komponenten, Eigenschaften und Funktionen korrigiert wird.

Bei größeren Anpassungen oder vollständig neuen Fahrzeugkonzepten, wie beispielsweise aktuell bei Elektrofahrzeugen, funktioniert dieses Vorgehen jedoch nicht. Referenz- und Vorgängerfahrzeuge stehen noch nicht in ausreichender Variantenzahl zur Verfügung, um für ein neues Elektrofahrzeug ein ähnliches, älteres Fahrzeug als Ausgangspunkt zu finden. Zusätzlich entwickeln sich viele der Technologien im Bereich alternativer Antriebe derzeit noch mit einer hohen Geschwindigkeit weiter; deren Potenzial kann bei einer Bezugnahme auf ein älteres Fahrzeugmodell nicht vollständig genutzt werden.

Folgt man den Zielen der deutschen Regierung aus dem Jahr 2009 [Bun09, S. 18], werden Elektrofahrzeuge zukünftig deutlich an Bedeutung gewinnen – folglich auch der Prozess der Auslegung neuer Fahrzeugkonzepte.

Wird die Masse von Fahrzeugkomponenten reduziert, führt dies nicht nur zu einer unmittelbaren Verbrauchssenkung. Die reduzierte Masse einzelner Teile wirkt sich auch auf andere Komponenten aus und führt zu sekundären Masseeffekten: Für dieselbe Beschleunigung kann der Motor kleiner dimensioniert und für dieselbe Reichweite der Tank kleiner ausgelegt werden. Ohne eine eingehende Untersuchung kann heute auf die Höhe der sekundären Masseeffekte nur über Vergleichsstudien oder Erfahrungswerte geschlossen werden.

Wie kann also die Fahrzeugmasse im frühen Entwicklungsprozess möglichst genau abgeschätzt werden? Wie können dabei alternative Antriebskonzepte berücksichtigt und im Zusammenwirken mit anderen Fahrzeugeigenschaften betrachtet werden? Wie hoch sind die sekundären Masseeinsparungen bei einer konkreten Leichtbaumaßnahme? Eine Beantwortung dieser Fragen stellt die hauptsächliche Motivation für diese Arbeit dar.

Die Fahrzeugmasse steht über den Verbrauch in direktem Zusammenhang zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Betrieb, die die relevante Kenngröße für die gesetzlichen Regelungen ist

[Eur09]. Durch Leichtbaumaßnahmen werden zwar einerseits der Verbrauch und die CO<sub>2</sub>-Betriebsemissionen reduziert [Ele12; Kog12], andererseits können Leichtbaumaßnahmen, und dies betrifft insbesondere Leichtbaumaterialien, zu Mehremissionen in der Produktion führen. Diese Mehremissionen müssen über eine entsprechende Fahrleistung ausgeglichen werden; andernfalls geht die verbrauchssenkende Maßnahme letztlich zu Lasten der Umwelt. Dieser Aspekt fehlt vollständig in der aktuellen Gesetzgebung. Eine Möglichkeit zur ganzheitlichen Betrachtung aufzuzeigen ist eine zusätzliche Motivation für diese Arbeit.

Gleiches gilt auch für die Fahrzeugkosten: Leichtbaumaßnahmen führen meist zu zusätzlichen Produktionskosten bei den betroffenen Bauteilen; sekundäre Masseeffekte an anderen Bauteilen führen zu Einsparungen; ebenso führt ein verringerter Verbrauch zu geringeren Betriebskosten. Einen Ansatz für eine ganzheitliche Betrachtung und Bewertung zu entwickeln ist eine weitere Motivation.

## 1.2 Vorgehen

Abbildung 1.3 gibt eine Übersicht der Struktur dieser Dissertation.

Die unterschiedlichen Aspekte der Fahrzeugmasse als wichtiges Element im Entwicklungsprozess werden in Kapitel 2 untersucht. Bereits eingesetzte Methoden zur Abschätzung der Fahrzeugmasse im Entwicklungsprozess werden vorgestellt, und anhand deren Vor- und Nachteile wird das Thema der vorliegenden Dissertation definiert.

Kapitel 3 beschreibt den Lösungsansatz zur vollparametrischen Bestimmung der Fahrzeugmasse. Die Umsetzung des Lösungsansatzes in einem Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell wird in Kapitel 4 behandelt. Struktur, Aufbau und Realisierung des softwarebasierten Modells werden in Einzelschritten beschrieben. Unterschiedliche Modellierungsmöglichkeiten werden ebenso vorgestellt wie die berücksichtigten Fahrzeug- und Konzeptvarianten von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen (ICEV, Internal Combustion Engine Vehicle) und batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV, Battery Electric Vehicle). An den Modellaufbau schließt sich in Kapitel 5 die Simulation von bestehenden Referenzfahrzeugen und eine Plausibilisierung der Ergebnisse an.

Auf Basis der Gewichtsergebnisse lassen sich weitere fahrzeugrelevante Größen abschätzen und untersuchen. Kapitel 6 beschreibt die entsprechende Methodik und die vereinfachten Modelle für die CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung und die Kostenberechnung.

Eine der Anwendungsmöglichkeiten der Methode zur Masseabschätzung liegt in der Bewertung verschiedener Konzeptvarianten und Parametervariationen. In Kapitel 7 werden anhand der erstellten Modelle allgemeine Erkenntnisse für die Entwicklung von Fahrzeugen abgeleitet und Fallbeispiele untersucht.

Eine kritische Diskussion der Ergebnisse sowie der Grenzen und Einschränkungen des vorgeschlagenen Verfahrens dieser Arbeit erfolgt in Kapitel 8. Kapitel 9 gibt einen Ausblick auf aktuelle Forschungstätigkeiten und zukünftige Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Modelle. Hieran schließt sich in Kapitel 10 eine Zusammenfassung dieser Arbeit an.

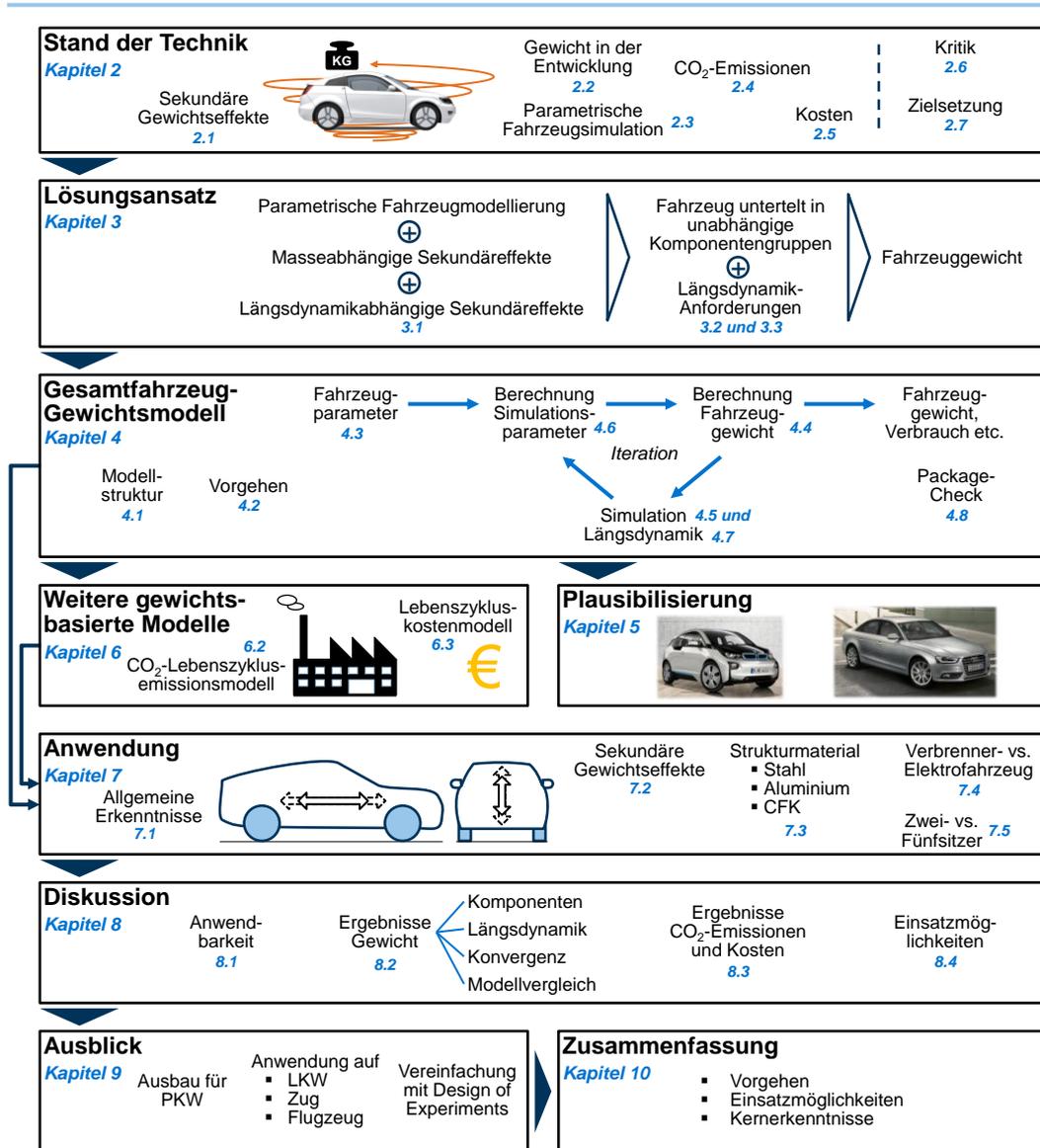


Abbildung 1.3: Übersicht über die Struktur dieser Arbeit

Bildquellen: [FTM11], [Bay13c], [Aud13]



## 2 Stand der Technik

Das Fahrzeuggewicht ist ein essenzieller Baustein in der Fahrzeugentwicklung. Die Auslegung vieler Komponenten, beispielsweise des Fahrwerks, hängt vom Gewicht, der Achslastverteilung und der Schwerpunkthöhe ab. Ebenso wirkt sich das Gewicht auf den Verbrauch des Fahrzeugs aus.

Das Fahrzeuggewicht wird im Wesentlichen durch die Parameter

- Fahrzeugklasse und Abmessungen,
- Aufbauausprägung und Konzeptsegment,
- Grundarchitektur des Fahrzeugs,
- Aggregate- und Antriebskonzept (inkl. Hybridisierung) und
- Werkstoffkonzept

beeinflusst [Bra13, S. 148].

Die Ausdrücke „Gewicht“ und „Fahrzeuggewicht“ sind im wissenschaftlichen Sinn streng genommen nicht korrekt. Stattdessen müsste es „Masse“ und „Fahrzeugmasse“ heißen, wie in der Einleitung verwendet. Im Deutschen, sowohl in der Fachsprache innerhalb des Automobilbaus als auch in der Umgangssprache, haben sich die Begriffe Gewicht und Fahrzeuggewicht etabliert. Sie werden in dieser Dissertation daher nachfolgend gleichbedeutend zu Masse und Fahrzeugmasse verwendet. Wenn von Gewicht gesprochen wird, ist damit ausdrücklich nicht die Gewichtskraft gemeint.

Die Fahrwiderstandskraft  $F_W$  setzt sich bei einer ungleichförmigen Bewegung in der Ebene aus der Luftwiderstandskraft  $F_L$ , der Rollwiderstandskraft  $F_R$  und der zu überwindenden Trägheitskraft  $F_B$  zusammen [Bra13, S. 50], Formel (2.1).

$$F_W = F_L + F_R + F_B \quad (2.1)$$

Die Luftwiderstandskraft  $F_L$  hängt entsprechend Formel (2.2) von der Dichte der Luft  $\rho$ , dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$ , der Stirnfläche  $A$  und der Geschwindigkeit  $v_{Fzg}$  ab [Bra13, S. 50].

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c_W A v_{Fzg}^2 \quad (2.2)$$

Die Rollwiderstandskraft  $F_R$  setzt sich in der Ebene aus der Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$  und dem reifenabhängigen Rollwiderstandsbeiwert  $c_{RR}$  zusammen [Bra13, S. 50], Formel (2.3).  $g$  ist die Erdbeschleunigung. Die Fahrzeugmasse wird in die Fahrzeugleermasse des Fahrzeugs  $m_L$  und die Masse der Zuladung  $m_Z$  unterteilt.

$$F_R = c_{RR} m_{Fzg} g = c_{RR} (m_L + m_Z) g \quad (2.3)$$

Die zu überwindende Trägheitskraft  $F_B$  berechnet sich aus der Fahrzeugmasse, der Fahrzeugbeschleunigung in Fahrzeuglängsrichtung  $a_{Fzg}$  und dem dimensionslosen Drehmassenzuschlagsfaktor  $e_i$  [Hei11, S. 48], Formel (2.4). Der Drehmassenzuschlagsfaktor berücksichtigt die bei einer Beschleunigung des Fahrzeugs wirkenden Trägheiten der rotierenden Bauteile im Fahrzeug (Reifen, Getriebe, Motor etc.) in der Gangstufe  $i$ ; er bezieht sich auf die Fahrzeugleermasse.

$$F_B = a_{Fzg} (e_i m_L + m_Z) \quad (2.4)$$

Die Luftwiderstandskraft ist unabhängig von der Fahrzeugmasse. Die Rollwiderstandskraft und die Trägheitskraft hängen linear von der Masse des Fahrzeugs und der Zuladung ab. Erst bei Geschwindigkeiten über rund 100 bis 120 km/h steigt die Rollwiderstandskraft mit zunehmender Geschwindigkeit an [Mic05, S. 13].

Der Zugkraftbedarf  $F_Z$  des Motors setzt sich aus der Fahrwiderstandskraft und der inneren Reibungskraft  $F_I$  zusammen, Formel (2.5). Die innere Reibungskraft, auch Antriebswiderstandskraft genannt, berücksichtigt die mechanischen Verluste des Motors, des Getriebes und der weiteren Komponenten des Antriebsstrangs [Bra13, S. 51].

$$F_Z = F_W + F_I = F_L + F_R + F_B + F_I \quad (2.5)$$

Abbildung 2.1 zeigt die Anteile der verschiedenen Kraftkomponenten für unterschiedliche Fahrzyklen für einen typischen Personenkraftwagen [Mic05, S. 28]. Bei einem Stadtkurs entfallen insgesamt rund 80 Prozent des Verbrauchs auf masseabhängige Bestandteile, bei Umgehungs- und Bundesstraßen sind es noch rund 40 bis 50 Prozent. Erst bei Autofahrten mit einer überwiegend konstanten Fahrgeschwindigkeit von 130 km/h treten die masseabhängigen Widerstandskräfte in den Hintergrund. Für einen besonders niedrigen Kraftstoffverbrauch optimierte Fahrzeuge können eine abweichende Zusammensetzung der Kraftkomponenten aufweisen.

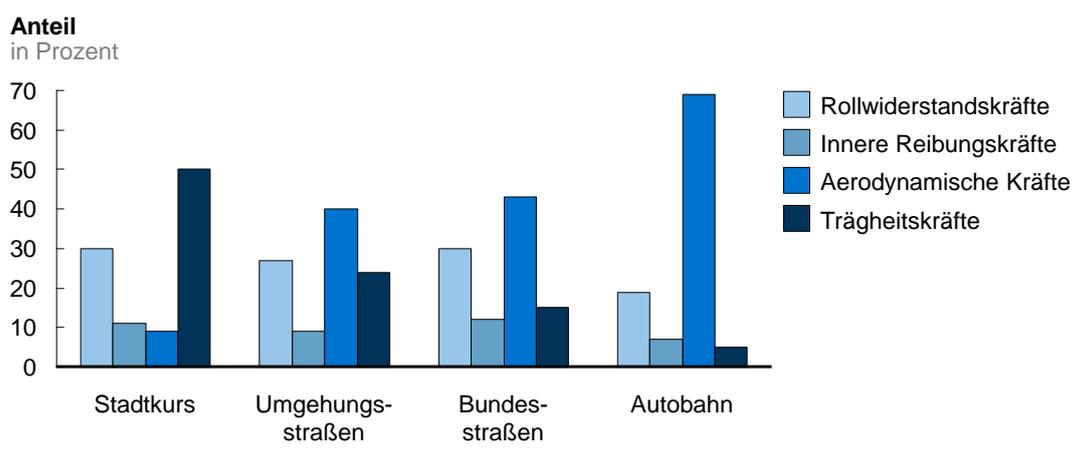


Abbildung 2.1: Zusammensetzung des Gesamtfahrwiderstands  
vgl. [Mic05, S. 28]

Dies zeigt: Abgesehen von Autofahrten ist die Masse in allen Fahrsituationen der größte Einflussfaktor der Fahrwiderstände. Vor dem Hintergrund des bereits erläuterten starken Gewichtsanstiegs von Fahrzeugen in den zurückliegenden Jahren und des Eingreifens der Gesetzgebung versuchen Automobilhersteller verstärkt, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren oder zumindest den weiteren Anstieg bei neuen Fahrzeugen zu begrenzen:

- Der Anteil höherfester Stähle in Serienfahrzeugen steigt von Modell zu Modell [Kle12; Bra13, S. 507 f.], unter anderem aus Gewichtsgründen. Das Leichtbau- und Kostenpotenzial wurde von [Por98] und [Wor11] mehrfach untersucht und nachgewiesen.
- Fahrzeugkarosserien, üblicherweise in Stahl gefertigt, entwickeln sich zunehmend zu Strukturen in Materialmischbauweise mit Leichtmetall- und Faserverbundwerkstoffen [Kog12].

- Radikale Leichtbauansätze ersetzen Stahl vollständig durch Leichtbaumaterialien: Audi entwickelte für den Audi A2 [Eng00] und den Audi A8 [Fid10] eine Aluminium-Karosserie in Space-Frame-Bauweise; die Heckklappe des 3L-Lupo von Volkswagen ist aus Magnesium und Aluminium gefertigt [Win99]; die Fahrgastzelle des BMW i3 besteht aus CFK [Bay13c].

## 2.1 Sekundäreffekte einer Gewichtsveränderung

Wird im Entwicklungsprozess ein Bauteil im Fahrzeug schwerer oder kommt ein neues hinzu, führt dies zu einem primären Gewichtseffekt. In Folge müssen weitere Bauteile in ihrer Auslegung angepasst werden. Meist geht dies mit einer Gewichtssteigerung dieser Bauteile einher, dem sekundären Gewichtseffekt, wodurch die Fahrzeugmasse nochmals ansteigt. Eine Gewichtsspirale setzt sich in Gang, Abbildung 2.2. [Mal07, S. 3, S. 5] fasst die Auswirkungen einer primären Gewichtssteigerung kurz mit „mass begets mass“ (Masse zeugt Masse) zusammen.

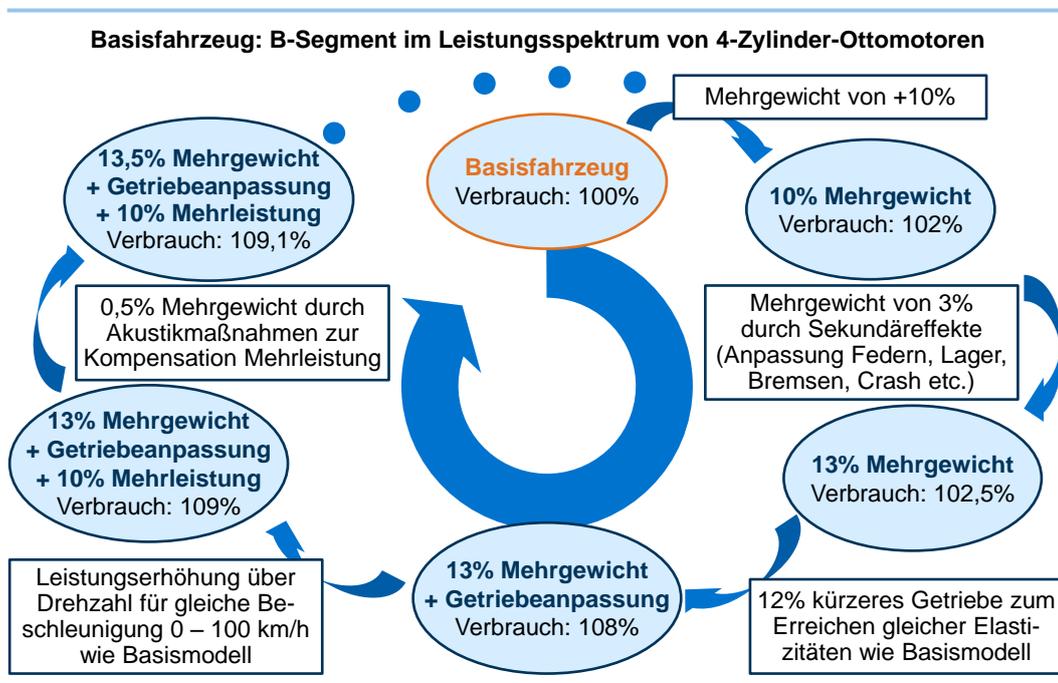


Abbildung 2.2: Gewichtsspirale – Kompensation der Gewichtssteigerung über eine Leistungssteigerung

vgl. [Bra13, S. 512]

Ist der primäre Gewichtseffekt eine Gewichtsreduktion, funktioniert die Gewichtsspirale ebenso in umgekehrter Richtung. Die sekundären Gewichtseffekte ermöglichen dann eine zusätzliche Gewichtseinsparung.

Gestiegene Anforderungen im Bereich Komfort, Fahrleistungen und Sicherheit treiben die Gewichtsspirale an [Chr00]. Der Gewichtszuwachs des Volkswagen Golf V aus 2004 gegenüber dem Volkswagen Golf I aus 1974 ist zu 30 Prozent auf Sicherheit, 25 Prozent auf Gesetzgebung, 22 Prozent auf Komfort, 15 Prozent auf Interieur und 8 Prozent auf Qualität zurückzuführen [Goe05, S. 3].

Das Verhältnis des sekundären zum primären Gewichtseffekt (VSPG) ist ein wichtiges Maß für den Verstärkungsfaktor einer primären Gewichtsveränderung. Das VSPG wurde

bereits in mehreren Studien untersucht, entweder auf Basis einzelner, konkreter Fahrzeuge (technischer Ansatz) oder anhand von physikalischen oder mathematischen Grundlagen (empirischer Ansatz).

In Vorgriff auf Abschnitt 2.6 sei angemerkt, dass sich mit Ausnahme von Vorveröffentlichungen dieser Dissertation (beispielsweise [Fuc13a], [Fuc13b], [Fuc13c]) alle bekannten Untersuchungen zum VSPG auf ICEV beziehen.

### 2.1.1 Technischer Ansatz zur Ermittlung der Sekundäreffekte

[FAT11] untersucht detailliert die erzielbaren sekundären Gewichtseinsparungen anhand eines Volkswagen Golf V und eines Opel Corsa C. Hierfür wird das Interieurgewicht um 100 kg reduziert und untersucht, welche Bauteile bei gleichen technischen Eigenschaften um welches Gewicht reduziert werden können. Durch das reduzierte Gewicht lassen sich Motorleistung und Antriebsstrangkomponenten unter Beibehaltung der Fahreigenschaften verkleinern. Im ersten Analyseschritt, ohne eine iterative Ausführung, wird eine sekundäre Gewichtsreduktion von 30,79 kg für den Volkswagen Golf V und 20,21 kg für den Opel Corsa C ermittelt, Abbildung 2.3.

	VW Golf V	Opel Corsa C
		
<b>Fahrzeugleergewicht</b>	1.390 kg	980 kg
<b>Zulässiges Fahrzeuggesamtgewicht</b>	1.910 kg	1.405 kg
<b>Primäre Gewichtsreduktion</b>	100 kg	100 kg
<b>Sekundäre Gewichtsreduktion</b>	30,79 kg	20,21 kg
<b>Verhältnis sekundärer zu primärer Gewichtsreduktion (<math>\hat{=}</math> VSPG)</b>	0,31	0,20

Abbildung 2.3: Sekundäre Gewichtsreduktion eines Volkswagen Golf V und eines Opel Corsa C ohne iterative Ausführung der Berechnung

vgl. [FAT11, S. 143]; Bildquelle [Aut14]

Durch die sekundären Gewichtseffekte reduziert sich das Fahrzeuggewicht weiter. Bei einer iterativen Ausführung der Berechnung ermittelt [FAT11, S. 144] nach drei Berechnungsschleifen ein VSPG von 0,46 für den Volkswagen Golf V und von 0,30 für den Opel Corsa C, Abbildung 2.4. Das maximal erzielbare VSPG für den Volkswagen Golf V gibt [FAT11, S. 144] mit 0,48 an.

Weitere Untersuchungen zu konkreten Fahrzeugen kommen, abhängig von Vorgehen, betrachtetem Fahrzeugtyp und Definition des Untersuchungsrahmens, zu anderen Ergebnissen:

- Für den Audi A2 weist [Geb00] eine primäre Gewichtseinsparung von 134 kg gegenüber einem Fahrzeug mit vergleichbarem Innenraumvolumen aus. Die primäre Gewichtseinsparung setzt sich aus einer Einsparung von 100 kg bei der Karosserie, 20 kg durch eine Größenbereinigung und 14 kg bei Ausstattung und Elektrik zusammen. Daraus resultieren sekundäre

Gewichtseinsparungen von 31 kg im Antriebsstrang und von 65 kg bei Fahrwerk und Tank, insgesamt also 96 kg. Aus den Angaben lässt sich ein VSPG von 0,72 errechnen.

- Ebenfalls für den Audi A2 nennt [EAA07, S. 6] eine primäre Gewichtseinsparung von 134 kg durch den umfangreichen Einsatz von Aluminium und, daraus resultierend, eine sekundäre Gewichtseinsparung von 75 kg. Das VSPG liegt bei 0,56.
- Für den Audi A8 gibt [IAI07, S. 23 f.] ein VSPG von 0,23 an. Durch den Einsatz einer Aluminium-Struktur mit 247 kg werden primär 194 kg Gewicht eingespart. Die sekundäre Gewichtseinsparung liegt bei 45 kg.
- Anhand von vier BMW-Fahrzeugen, je zwei der 5er- und zwei der 7er-Baureihe der Modelljahre 2002 bis 2010, ermittelt [Tra11] ein VSPG von 0,37.

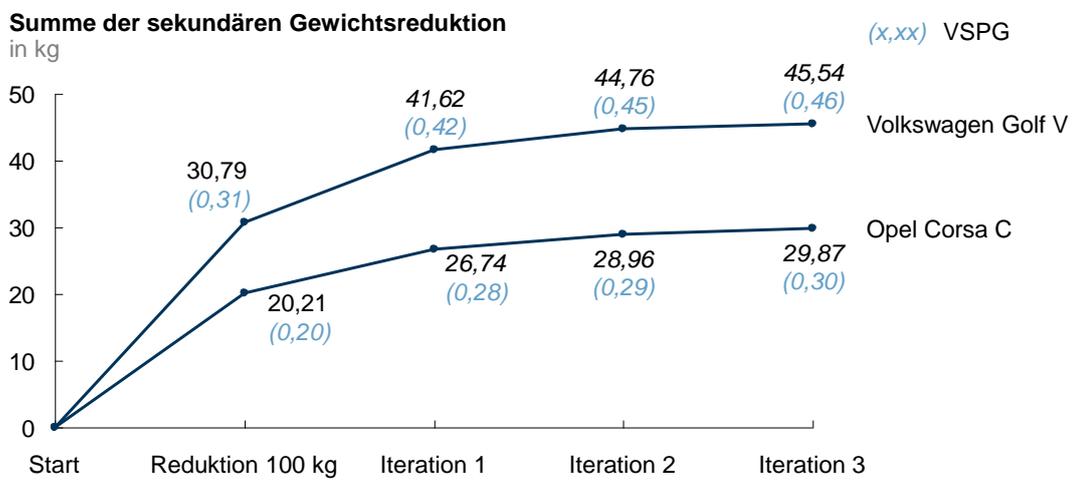


Abbildung 2.4: Sekundäre Gewichtsreduktion für einen Volkswagen Golf V und einen Opel Corsa C bei drei Iterationen der Berechnung

vgl. [FAT11, S. 144]

Das Verhalten einer Gewichtseinsparung ist, wie in den meisten Studien angenommen, nicht immer linear. Häufig weist der Gewichtsverlauf von Komponenten bei einer Steigerung der Leistungsparameter Sprungfunktionen auf [Tra11].

### 2.1.2 Empirischer Ansatz zur Ermittlung der Sekundäreffekte

[Bra99] drückt das Fahrzeuggewicht als Funktion der gewichtsabhängigen Teilgewichte Antriebssystem, Fahrwerk und Betriebsstoffe sowie der konstanten Teilgewichte Rohkarosserie und Karosserieausstattung aus. Anhand von Erfahrungswerten parametrisiert [Bra99] die Funktionen der Teilgewichte und ermittelt für eine Gewichtsveränderung der Rohkarosserie einen Verstärkungsfaktor von 1,16. Dies entspricht einem VSPG von 0,16.

Einen weiterführenden Ansatz beschreibt [Mal07]. Für eine große Datengrundlage von Benchmarkfahrzeugen wird deren Gewicht in 13 Fahrzeugkomponenten unterteilt und mit dem zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeuge korreliert. [Mal07, S. 22 - 23] unterscheidet verschiedene Fahrzeugaufbauten: Für Fahrzeuge der Kategorie Limousine liegt das VSPG bei 1,14, für SUVs bei 0,86 und für alle Fahrzeugkategorien zusammen (Limousine, SUV, Van und Pick-up) bei 1,28.

Mit einem ähnlichen Vorgehen ermittelt [Alo12] ein VSPG von 0,95 für Limousinenfahrzeuge. Werden nur diejenigen Komponenten für die Berechnung der Sekundäreffekte herangezogen, die einen Korrelationskoeffizienten  $R^2 > 0,5$  aufweisen, reduziert sich das VSPG auf 0,65.

## 2.2 Fahrzeuggewicht im Entwicklungsprozess

Die Zielgröße des Fahrzeuggewichts wird bereits zu Beginn der Produktdefinition festgelegt. In der frühen Konzeptphase werden alternative Konzeptansätze bewertet, gegenübergestellt und für eine Entwicklungsentscheidung Fahrzeuggewichte bestimmt.

Neben dem tatsächlichen Fahrverbrauch eines Fahrzeugs und den dynamischen Eigenschaften beeinflusst das Fahrzeuggewicht auch die Schwungmassenklasse, die für die Ermittlung des Normverbrauchs nach [Eur07] zugrunde gelegt wird. Ein Verfehlen der Zielschwungmassenklasse kann den Verbrauchswert und damit auch die gesetzlich geregelten CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich verändern. Im Laufe des Entwicklungsprozesses treten häufig Gewichtssteigerungen auf, beispielsweise durch Detailentscheidungen, die mit gezielten Maßnahmen zu korrigieren oder zu akzeptieren sind [Bra13, S. 148].

Das Gewicht eines Fahrzeugkonzepts wird in der Praxis oftmals auf Basis von Vorgänger- und Referenzfahrzeugen ermittelt. Das Vorgehen ist im Ansatz ähnlich dem in [Bra13, S. 546] vorgestellten Vergleich zweier Fahrzeuge aus 1957 und 2001. Bei großen Veränderungen oder gänzlich neuen Fahrzeugkonzepten, wie beispielsweise bei BEV, ist eine reine Differenzbetrachtung nicht mehr ausreichend.

Daneben gibt es Ansätze, das Fahrzeuggewicht über einfache Parameter abzuschätzen. Die im vorausgegangenen Abschnitt bereits erwähnte Arbeit [Mal07, S. 9 ff.] umfasst ein Werkzeug zur parametrischen Abschätzung der Fahrzeugleermasse und des Fahrzeugesamtgewichts für neue Fahrzeugkonzepte. Ausgangsbasis ist die projizierte Grundfläche des Fahrzeugs aus Länge und Breite. Anhand einer linearen Regressionsanalyse bestimmt [Mal07] den Zusammenhang zwischen der Grundfläche und dem Fahrzeugleergewicht für unterschiedliche Fahrzeugtypen.

[Yan10] verfeinert das Vorgehen und ermittelt das Fahrzeuggewicht anhand eines Ersatzvolumens aus Länge  $L$ , Breite  $B$  und Höhe  $H$  des Fahrzeugs, einer Ersatzdichte  $\rho_{Ersatz}$  und der Motorleistung  $P_{Motor}$ , Formel (2.6).

$$m_{Fzg} = 1,38 \frac{kg}{kW} P_{Motor} + \rho_{Ersatz} L B H \quad (2.6)$$

Für Fahrzeuge mit einer Stahlkarosserie gibt [Yan10]  $\rho_{Ersatz}$  mit 102 kg/m<sup>3</sup> an. [Kuc12, S. 67 f.] bestätigt diesen Wert und passt die Ersatzdichte für Fahrzeuge mit besonderen Leichtbaumaßnahmen an; der Audi A2 mit einem Aluminium-Space-Frame weist eine Ersatzdichte von 82 kg/m<sup>3</sup> auf.

Im automobilen Entwicklungsprozess wird heute eine Vielzahl computerbasierter Methoden eingesetzt, genannt Computer Aided Engineering (CAE) [Bra13, S. 1159]. Mit diesen Software-Werkzeugen lassen sich sowohl die Bauteilgewichte als auch die verbrauchsbestimmenden Fahrzeugparameter sehr genau abschätzen. Beispiele hierfür sind:

- Computer-Aided-Design(CAD)-Programme ermöglichen die detailgetreue Modellierung von Fahrzeugbauteilen am Computer. Über die Zuweisung von Materialdichten lassen sich Gewichte bestimmen [Bra05, S. 250 ff.].

- SFE Concept [SFE13] unterstützt bei der CAD-Modellierung von Fahrzeugkarosserien mit wenigen Parametern. Hieraus kann ein Gewicht für die Struktur abgeleitet werden.
- Computational-Fluid-Dynamics(CFD)-Programme ermöglichen die dreidimensionale Simulation reibungsbehafteter Strömungen mit numerischen Verfahren. So lassen sich aerodynamische Kenngrößen wie der  $c_W$ -Wert ohne eine experimentelle Untersuchung im Windkanal abschätzen [Schü13, S. 967 ff.].
- Design Advisor [Wor12] unterstützt den Konzept- und Entwicklungsprozess durch die Abschätzung von Bauteil- und Gesamtfahrzeuggewichten. Diese Software basiert auf [Mal07].

Viele der Programme und Methoden erlauben eine sehr genaue Prädiktion des untersuchten oder dargestellten Sachverhalts. Modellierung und Simulation erfordern jedoch meist einen hohen Zeitaufwand. Für genaue Ergebnisse bei CFD-Simulationen können beispielsweise die benötigten Rechenzeiten auf Hochleistungsrechnern größer als eine benötigte experimentelle Versuchszeit sein [Schü13, S. 969].

Für die Modellierung allgemein müssen bereits konstruktive Details eines Konzepts bekannt sein. Zusätzlich erfordern viele Simulationsprogramme einen manuellen Modellaufbau und eine manuelle Modellparametrierung, die ebenfalls entsprechend zeitaufwändig ist. Prinzipiell gilt: Je besser das Ergebnis mit der Realität übereinstimmen soll, desto mehr Modellierungszeit, Rechenzeit und Ressourcen sind erforderlich.

Soll in einem neuen Fahrzeugprojekt das Gewicht, beispielsweise gegenüber einem Vorgängerfahrzeug, reduziert werden, kann die Kenntnis über das VSPG im Entwicklungsprozess gezielt genutzt werden. Durch eine Vorwegnahme der Sekundäreffekte bei der Zielgewichtsdefinition lässt sich die erforderliche primäre Gewichtsreduktion bestimmen [Tra11]. Erfolgt dies früh im Entwicklungsprozess, können die sekundären Gewichtseffekte in vollem Umfang erzielt und die gesamte Gewichtseinsparung erreicht werden, Abbildung 2.5. Mit fortschreitender Entwicklung lassen sich immer weniger sekundäre Gewichtseffekte realisieren.

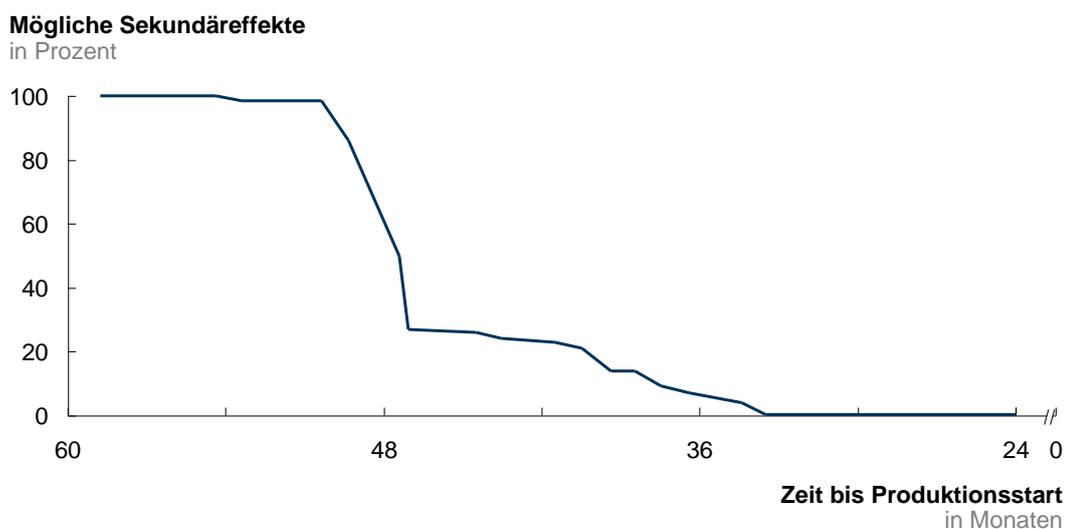


Abbildung 2.5: Abnehmende Realisierbarkeit sekundärer Gewichtseffekte mit Fortschreiten der Fahrzeugentwicklung  
vgl. [Tra11]

## 2.3 Gewichtsschätzer in Fahrzeugkonzept-Werkzeugen

Der hohe zeitliche Aufwand für eine Detailmodellierung und Simulation einzelner Aspekte steht im Widerspruch zu den Anforderungen von Fahrzeugkonzept-Werkzeugen, die sich auf das ganze Fahrzeug beziehen. Die Werkzeuge zur Konzeptoptimierung aus [Kuc12], [Mat13a], [Wie13] und [Fuc14d] berechnen die Eigenschaften von Tausenden von Fahrzeugvarianten. Eine schnelle Gewichtsabschätzung ist hier essenziell:

- [Kuc12, S. 67 - 68] verwendet für die Bestimmung des Fahrzeuggewichts den bereits beschriebenen Volumenansatz aus [Yan10].
- [Wie13, S. 66 - 71] erweitert die Berechnung von [Yan10] um einen Leichtbaufaktor, mit Hilfe dessen auf Leichtbau ausgerichtete Fahrzeugkonzepte beschrieben werden können. Zusätzlich berücksichtigt [Wie13] die Gewichtsberechnung für BEV ausgehend von einem Fahrzeugbasisgewicht, zu dem einzelne Komponentengewichte hinzuaddiert werden.
- [Fuc14d, S. 66 ff.] geht ebenfalls von einem Fahrzeugbasisgewicht aus und addiert Komponentengewichte. Diese werden als Teil des Modells von [Fuc14d] bestimmt.

Die zugrunde liegenden Verfahren zur Gewichtsabschätzung wurden ursprünglich auf Basis konventioneller Fahrzeuge mit ähnlichen Abmessungen und Eigenschaften ermittelt. Die Verfahren können nicht ohne Weiteres auf neue Fahrzeugkonzepte und Anwendungen übertragen werden. Dies zeigen die entsprechenden Adaptionen für die genannten Fahrzeugkonzept-Werkzeuge.

Der von Matz [Mat13a] entwickelte Konzeptoptimierer berücksichtigt auch sehr ungewöhnliche, von etablierten Fahrzeugkonzepten abweichende Fahrzeugvarianten. Hierfür liefern die bestehenden Schätzverfahren zu ungenaue Ergebnisse. Für die Gewichtsberechnung in der Konzeptoptimierung werden daher erste vorveröffentlichte Ergebnisse dieser Dissertation verwendet [Mat13b].

## 2.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen

Die Erkenntnis über den Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub>-Anteil in der Atmosphäre und dem Klimawandel [IPC07, S. 36 ff.] rückt die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen zunehmend in die gesellschaftliche Diskussion und das öffentliche Bewusstsein. Betriebsemissionen und Energieverbrauch hängen bei Fahrzeugen unmittelbar zusammen.

Im Gegensatz zu ICEV entstehen bei BEV die Betriebsemissionen am Ort der Stromerzeugung und nicht im Fahrzeug. Die Betriebsemissionen von BEV hängen sehr stark vom verwendeten Strommix zum Laden des BEV ab. BEV sind dabei nicht automatisch emissionsärmer als ICEV. Der Mitsubishi i-MiEV (BEV) hat, bei Betrieb mit konventionellem deutschem Strom, höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als die energieeffiziente Diesel-Variante eines Volkswagen Polo V gemäß Herstellerangabe [Eck11b].

Die EU-Verordnung Nr. 443/2009 [Eur09] führt für Fahrzeughersteller eine gesetzliche Begrenzung der Flottenemissionen innerhalb der EU ein und steuert damit unmittelbar die Entwicklungsausrichtung von Automobilherstellern. Beispiele für umgesetzte Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung der Fahrzeuge sind effizientere Motoren, die Einführung einer Start-Stopp-Automatik, verbesserte Luftwiderstands- und Rollwiderstandsbeiwerte und konsequenter Leichtbau.

Wie in [Fuc12a] gezeigt, stammen bei einer Laufleistung von 150.000 km bei ICEV 80 Prozent der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen (CO<sub>2</sub>-LZE) aus dem Fahrzeugbetrieb und 20 Prozent aus Produktion und Recycling, Abbildung 2.6. Durch eine kontinuierliche Verbrauchsreduktion und energieaufwändigere Materialien verschiebt sich dieses Verhältnis in Richtung der Produktion.

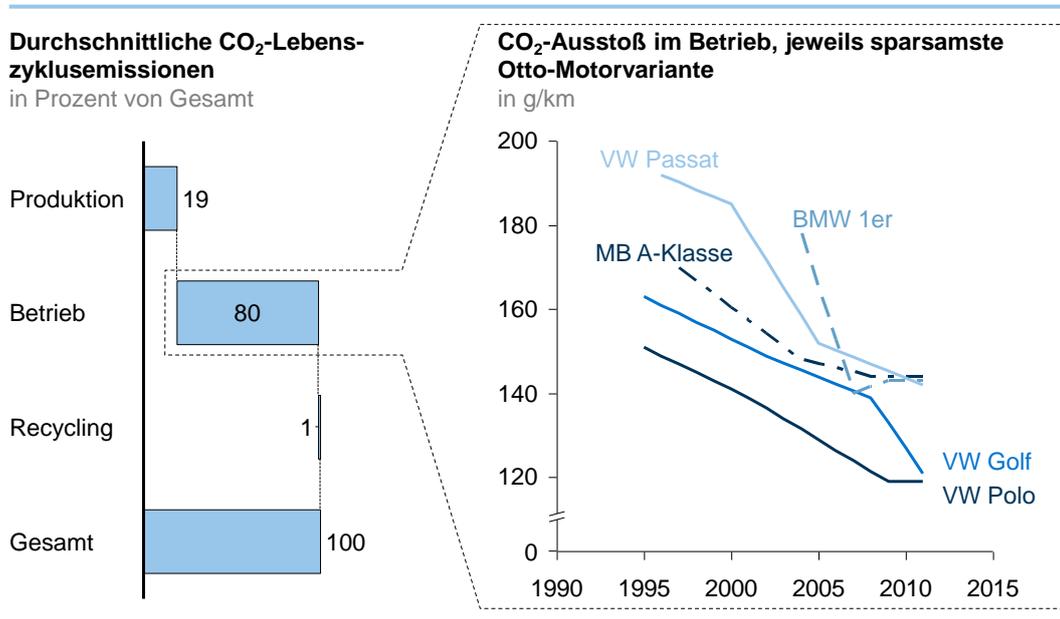


Abbildung 2.6: CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen von ICEV und zeitliche Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Betriebsemissionen

vgl. [Fuc12a; Bai12]

Bei BEV stammt ein noch größerer Anteil der Emissionen aus der Produktion. Bei dem BEV Mute der Technischen Universität München [Fuc12b; Mat11] stammen bei einem typischen Anwenderszenario rund 55 Prozent der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen aus dem Betrieb [Fuc12a; Bai12]. Wird für den Betrieb des Fahrzeugs Strom aus regenerativen Energiequellen verwendet, sinken die Betriebsemissionen auf weniger als 20 Prozent. Der mit rund 80 Prozent dann überwiegende Anteil der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen stammt aus Produktion und Recycling.

Die Normen ISO 14040 und ISO 14044 beschreiben das formelle Vorgehen der Erstellung einer Umweltbilanz (je nach Umfang auch Ökobilanz oder Sachbilanz genannt) zur Berücksichtigung aller Emissionen und Umwelteinflüsse des Produktlebenszyklus. Die Normung des Vorgehens soll einheitliche Standards bei der Erstellung der Ökobilanzen sicherstellen. Ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Ökobilanzen ist nur dann möglich, wenn die Annahmen und die inhaltliche Zielsetzung der Studien einander entsprechen. Bei der detaillierten Erstellung einer Ökobilanz für ein konkretes Produkt sind, je nach Komplexität des Produkts, mitunter mehrere Arbeitswochen erforderlich.

Softwaretools und Datenbanken unterstützen bei der Erstellung von Ökobilanzen. Beispiele hierfür sind:

- Die Software Umberto [Umb13] des Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IfEU) [IFE13] und des Institut für Umweltinformatik Hamburg [IFU13]
- Die Software GaBi von PE International [Gab13a]

- Die Datenbanken ecoinvent des Swiss Center for Life Cycle Inventories [Eco13a] und ELCD der Europäischen Kommission [ELC13].

Eine Erstellung von Umweltbilanzen ist für Automobilhersteller nicht verpflichtend. Umweltberichte gibt es beispielsweise von Volkswagen [Vol12c], allerdings nur für ausgewählte, meist sehr energieeffiziente Fahrzeuge.

[IFE11] vergleicht die Treibhausgasemissionen von ICEV und BEV, Abbildung 2.7. Aufgrund der Batterie weisen BEV höhere Produktionsemissionen auf als ICEV. Bei „mittleren PKW“ [IFE11, S. 4] liegt der Break-even von Otto-ICEV und mit konventionellem Strom entsprechend dem deutschen Strommix (Bezugsjahr 2010) betriebenen BEV bei rund 100.000 km Fahrleistung; der von Diesel-ICEV mit BEV liegt deutlich jenseits der 200.000 km. Bei Betrieb der BEV mit Strom aus Windenergie liegt der Break-even mit Otto- und mit Diesel-ICEV bei rund 30.000 km. [IFE11, S. 22] geht von durchschnittlich 1,5 Batteriesätzen über die Lebensdauer des BEV aus, die in den Produktionsemissionen berücksichtigt werden.

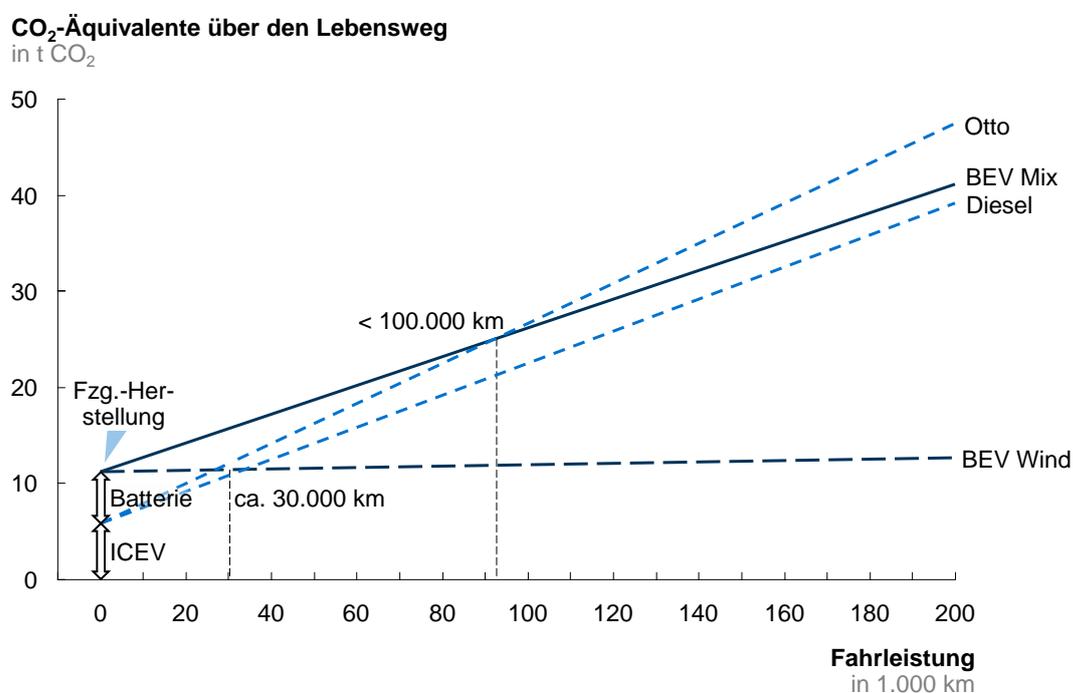


Abbildung 2.7: Treibhausgasemissionen eines „mittleren PKW“ nach Fahrleistung  
vgl. [IFE11, S. 4]

Die Fuhrparkanalyse [Fra12] untersucht den Einsatz von BEV gegenüber ICEV in der Praxis. Im Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer wird sowohl zwischen konventionellem Strom entsprechend dem deutschen Strommix aus 2011 und Ökostrom als auch zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Produktion und Emissionen im Betrieb unterschieden [Fra12, S. 11]. Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer sind bei BEV sowohl für Ökostrom (alle BEV) als auch für konventionellen Strom (bis auf ein BEV) niedriger als bei ICEV. Die Emissionen der Produktion sind bei BEV höher als bei ICEV.

Die bereits erwähnte Software Design Advisor [Wor12] erlaubt eine einfache Abschätzung der Auswirkungen von Konstruktionsentscheidungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Anhand des Design Advisor kann beispielsweise untersucht werden, welche Auswirkungen eine Materialumstellung der Tür von Stahl auf Aluminium auf das Fahrzeuggewicht, den Ver-

brauch und damit auf die Produktionsemissionen und die Betriebsemissionen hat. Die Software bezieht sich auf im Modell hinterlegte Referenzwerte. Spezifische Eigenschaften von Fahrzeugkonzepten, beispielsweise Anzahl der Türen,  $c_W$ -Wert oder Stirnfläche, werden nicht berücksichtigt. Die Auswahlmöglichkeiten bezüglich der Teile sind beschränkt.

## 2.5 Kosten von Fahrzeugen

Der Kaufpreis und die Betriebskosten eines Fahrzeugs sind häufig kaufentscheidende Kriterien für den Kunden. Die Summe aus Anschaffungskosten, Nutzungskosten und Restwert eines Fahrzeugs nach einer bestimmten Haltedauer bilden die Lebenszykluskosten (Total Cost of Ownership, TCO) [Gab13c].

Ausgerichtet auf die Verbraucher veröffentlicht der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) regelmäßig die Kosten für die meisten gängigen Fahrzeuge in Deutschland [All13a, All13b]. Der ADAC unterteilt in Fixkosten, Werkstattkosten, Betriebskosten und Wertverlust pro Monat.

Die den Kunden betreffenden Kosten sind relativ gut zu ermitteln. Anders sieht es bei den tatsächlichen Herstellkosten eines Fahrzeugs und der Zusammensetzung des Kaufpreises aus. Diese sehr sensiblen Daten werden meist nicht veröffentlicht [IKA12, S. 75].

Für eine Abschätzung der Kosten eines Produkts oder Bauteils im Vorhinein nutzen Kostenplaner verschiedene Ansätze und Methoden. [Schl04] stellt verschiedene Kalkulationsmodelle für die Kostenberechnung vor und beschreibt die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung. Die Referenzwertkalkulation geht von einem direkten Zusammenhang der Herstellkosten eines Produkts und einem spezifischen Funktionswert aus. Funktionswerte sind häufig das Gewicht oder die Leistung [Schl04, S. 13 - 21]. Weitere Berechnungsmöglichkeiten bieten Cost-Engineering-Verfahren und eine Zuschlagskalkulation. Der Kennzahlenkompass vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) [VDM13] enthält Stundenlöhne und Kostensätze für eine Zuschlagskalkulation.

Design-to-Cost- und Cleansheet-Werkzeuge, beispielsweise Windchill Cost von PTC [Par11] und Cleansheet Solution von McKinsey & Company [McK13], erlauben deutlich detailliertere Kostenabschätzungen und -aussagen bei jedoch auch gleichzeitig höherem Modellierungsaufwand des betrachteten Produkts. Im Softwarewerkzeug Cleansheet Solution wird jede einzelne Komponente modelliert, ausgehend vom Rohmaterial, den erforderlichen Fertigungsschritten, Fügeprozessen und Zuschlägen.

Leichtbaumaßnahmen führen oftmals zu einem Anstieg der Herstellkosten. Eine wichtige Größe zur Entscheidung für oder gegen eine Leichtbaumaßnahme sind die maximalen Mehrkosten pro Kilogramm Gewichtseinsparung, bei denen die Herstellkosten unverändert bleiben. [Che10, S. 3] geht von tolerierbaren Mehrkosten von 3 bis 4 USD pro eingespartes Kilogramm aus. [Eck10b] gibt für ICEV tolerierbare Leichtbaukosten von 3 bis 5 EUR/kg an und ermittelt für BEV ein Kosteneinsparpotenzial für das Batteriesystem von rund 12 bis 13 EUR pro eingespartes Kilogramm Fahrzeuggewicht für spezifische Batteriesystemkosten von 1.000 EUR/kWh und eine Auslegungreichweite von 150 km. Die Einsparung pro Gewichtsreduktion bei BEV hängt von den spezifischen Batteriesystemkosten, der Batterieenergiedichte und der Auslegungreichweite ab. Für spezifische Batteriesystemkosten von 550 EUR/kWh und eine Auslegungreichweite von 150 km liegen die eingesparten Batteriesystemkosten bei rund 7 EUR/kg Fahrzeuggewicht [Eck10b].

## 2.6 Kritische Betrachtung des Stands der Technik

Mit den in den vorausgegangenen Abschnitten vorgestellten Ansätzen und Methoden lassen sich prinzipiell Gewicht, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten von Fahrzeugen abschätzen oder relativ genau bestimmen. Insbesondere das Fahrzeuggewicht und die Gewichtsspirale wurden in der Vergangenheit oftmals untersucht. Allerdings weisen die bestehenden Methoden und Modelle eine Vielzahl von Einschränkungen auf.

### 2.6.1 Gewicht

Abbildung 2.8 zeigt die ermittelten VSPG der zuvor vorgestellten Studien. Hinzugefügt wurden Ergebnisse der Literaturrecherchen aus [FAT11, S. 21] und [Alo12]. Die sehr große Bandbreite der VSPG-Werte verdeutlicht, dass das VSPG sehr stark von der Methodik, dem Untersuchungsrahmen und dem Referenzfahrzeug abhängt. Über diese Zusammenhänge geben die Studien keine Auskunft. Die Ergebnisse lassen sich nicht vergleichen, und die Quellen sind hinsichtlich der Annahmen oftmals intransparent. Eine allgemeine Aussage kann auf dieser Basis nicht getroffen werden.

	VSPG	Gegenstand der Untersuchung	Quelle
<b>Technischer Ansatz</b>	0,23	Audi A8	[IAI07, S. 23 f.]
	0,30	Opel Corsa C	[FAT11, S. 145]
	0,37	BMW 5er- und 7er-Baureihe	[Tra11]
	0,46	Volkswagen Golf V	[FAT11, S. 145]
	0,56	Audi A2, Fokus Aluminium-Einsatz	[EAA07, S. 6]
	0,72	Audi A2, allgemein	[Geb00]
<b>Empirischer Ansatz</b>	0,16	Physikalischer Ansatz	[Bra99]
	0,65	Empirischer Ansatz, Alternative, Cut-Off bei R <sup>2</sup> = 0,5	[Alo12]
	0,95	Empirischer Ansatz, allgemein	[Alo12]
	0,86 ... 1,49	Empirischer Ansatz, je nach Fahrzeugart und Methode	[Mal07, S. 8]
<b>Literatur-Ref.</b>	0,16 ... 1,0	Werte aus Literaturrecherche von 1.300 Quellen	[FAT11, S. 21]
	0,5 ... 1,4	Zusammenfassung von Veröffentlichungen	[Alo12]

Abbildung 2.8: VSPG-Werte aus der Literatur

Die Verfahren zur Gewichtsschätzung gehen von konventionellen Fahrzeugformen aus. Abweichende Fahrzeugkonzepte, insbesondere Antriebskonzepte, können nicht ohne Weiteres berücksichtigt werden. Die Batteriesysteme von BEV haben eine vielfach geringere Energiedichte als die Flüssigkraftstoffsysteme von ICEV [Bar11, S. 8]. Zusätzlich ist die Batterie neben der Fahrzeugstruktur die schwerste Komponente eines BEV und macht beispielsweise beim Mitsubishi i-MiEV rund 21 Prozent des Fahrzeuggewichts aus [Eck11b]. Diese Unterschiede zu ICEV machen eine direkte Anwendung der Verfahren zur Gewichtsschätzung oder eine Übertragung der Erkenntnisse zum VSPG unmöglich.

Darüber hinaus besteht generell keine Möglichkeit, auch nicht für konventionelle Fahrzeugkonzepte, das Fahrzeuggewicht unter Berücksichtigung der Gesamtfahrzeugeigenschaften wie der Aerodynamik, dem Rollwiderstand, einzelnen Leichtbaumaßnahmen etc. schnell und einfach abzuschätzen. CAE-Werkzeuge ermöglichen zwar sehr detaillierte und genaue Berechnungen von Gewicht und Fahrzeugeigenschaften; ein Fahrzeugkonzept muss dazu jedoch bereits sehr detailliert ausgearbeitet sein. Zudem erfordern die

Berechnungen einen hohen zeitlichen Aufwand. In frühen Phasen der Entwicklung, insbesondere bei der Bewertung unterschiedlicher Konzepte, stehen selten alle benötigten Informationen zur Verfügung.

Als Fazit lässt sich zusammenfassen:

- Die bestehenden Gewichtsmodelle gelten für konventionelle ICEV üblicher Bauformen.
- Der Detaillierungsgrad der Gewichtsmodelle beschränkt sich meistens auf die erste Gliederungsebene einer Stückliste oder betrachtet sogar nur das Fahrzeug als Ganzes.
- Abweichende Konzepte und technologische Aspekte können in den bestehenden Ansätzen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere innovative Konzepte mit neuen Proportionen, einer Ausrichtung auf neue Marktsegmente und Kundenzielgruppen.
- Die bestehenden Ansätze berücksichtigen keine konzeptionellen Gesamtzusammenhänge, beispielsweise eine Veränderung des Verbrauchs durch den Luftwiderstand bei anderen Proportionen eines Fahrzeugs.

### 2.6.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten

Die aktuelle Gesetzgebung [Eur09] betrachtet nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Betriebs von Fahrzeugen und zwingt die Hersteller zur Senkung des Flottenverbrauchs. Allerdings müssen zusätzliche mechanische und/oder elektrische Bauteile, die zu einer Emissionsreduzierung im Betrieb führen, produziert werden. Leichtbaumaterialien, wie beispielsweise Aluminium oder CFK, erfordern einen deutlich höheren Energieaufwand in der Produktion im Vergleich zu Stahl. Einige Materialien lassen sich nur schwer oder gar nicht recyceln und führen dann noch einmal zu hohen Emissionen bei einer Entsorgung. Die Emissionen der Produktion und des Recycling werden bei den gesetzlichen Vorgaben nicht berücksichtigt.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Produktion lassen sich auf einem konzeptionellen Stand momentan nicht ganzheitlich abschätzen. Erste Ansätze gehen in die richtige Richtung, erlauben allerdings keinen vollparametrischen und modularen Modellaufbau. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung werden zukünftig eine immer größere Bedeutung bekommen. Vor allem für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen als umweltfreundliche Mobilitätsalternative dürfen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung nicht außer Acht gelassen werden.

Ganzheitliche Konzeptuntersuchungen, auch im Hinblick auf Package- und Materialalternativen, sind, wie beim Gewicht, nicht möglich. Ist ein Konzept erst einmal soweit ausgereift, dass Umweltauswirkungen mit derzeitigen Methoden bewertet werden können, ist eine Konzeptänderung nur noch mit hohem Aufwand möglich.

Ähnlich verhält es sich bei den Kosten. Während die Auswirkungen von konstruktiven Entscheidungen auf die Herstellkosten eines Fahrzeugs heute bereits sehr genau abgeschätzt werden können, sind die Auswirkungen auf die TCO eines Fahrzeugs nur wenig untersucht. Automobilhersteller greifen bei der Entscheidung über Leichtbaumaßnahmen auf bewährte Kostenfaktoren zurück. Bei neuen Fahrzeugkonzepten kann jedoch noch keine allgemeingültige und schnelle Aussage getroffen werden.

Eine ganzheitliche Betrachtung der TCO in der Entwicklung findet heute nur selten statt. Mitunter führen konstruktive Entscheidungen zu Mehrkosten in der Herstellung, zahlen sich über ein Fahrzeugleben jedoch in Form von Verbrauch, Verschleißteilen oder Wiederverkaufswert letztlich aus. Eine parametrische, einfache Abschätzung in einer frühen Phase der Entwicklung ist derzeit nicht möglich.

## 2.7 Zielsetzung dieser Arbeit

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Abschätzung des Fahrzeuggewichts. Die aufgezeigten Lücken der Verfahren und Werkzeuge im heutigen automobilen Entwicklungsprozess sollen anhand der neuen Methodik geschlossen werden. Folgende Aspekte sind dabei besonders wichtig:

### 1. *Berücksichtigung des Fahrzeugs aus ganzheitlicher Sicht*

Bisherige Werkzeuge und Verfahren zur schnellen und einfachen Masseabschätzung konzentrieren sich häufig nur auf einzelne Aspekte. Die physikalischen Zusammenhänge des Gesamtfahrzeugs werden dabei nicht erfasst. Die zu entwickelnde Methode soll das Zusammenspiel zwischen Fahrzeugmasse, Längsdynamik, Energieverbrauch und geometrischen Parametern gemeinsam mit dem zugrunde gelegten Fahrprofil berücksichtigen.

### 2. *Optimierung der Rechendauer*

Auslegungswerkzeuge mit langen Rechenzeiten und einer komplizierten und aufwändigen Bedienung sind nicht geeignet, eine Konzeptidee oder Konzeptvariante schnell und kurzfristig zu überprüfen oder abzuschätzen. Über eine softwaretechnische Umsetzung der Methode soll versucht werden, einen praxisnahen Kompromiss zwischen Rechendauer, abgebildeten Details und Aussagekraft zu finden.

### 3. *Beschreibung des Fahrzeugkonzepts anhand gängiger Fahrzeugparameter*

Die zu entwickelnde Methode soll auf unterschiedliche Fahrzeugkonzepte anwendbar und allgemein einsetzbar sein. Um Fahrzeugkonzepte in der Anfangsphase des Entwicklungsprozesses abbilden zu können, müssen einfache Fahrzeugparameter, die bereits zu einem frühen Zeitpunkt feststehen oder abgeschätzt werden können, die Grundlage für die Methodik bilden.

### 4. *Erweiterung der Methodik für zukünftige Technologien*

Mit der Methode sollen unterschiedliche Fahrzeugkonzepte, Antriebskonzepte, Energiespeichertechnologien, Package-Varianten und Ausstattungsvarianten berücksichtigt werden. Als Startumfang werden BEV sowie ICEV mit einigen Ausstattungsoptionen berücksichtigt. Die zu entwickelnde Methode soll eine einfache Erweiterung für zukünftige Technologien und zusätzliche Untersuchungsaspekte erlauben.

Die Umsetzung des Verfahrens in einem computerbasierten Programm soll einerseits als eigenständiges Werkzeug nutzbar, andererseits auch im Rahmen anderer Simulationen, die auf das Fahrzeuggewicht zurückgreifen, einsetzbar sein – zum Beispiel in Konzeptoptimierern. Das Werkzeug wird bewusst nicht als Optimierungs-, sondern als Berechnungsverfahren entworfen. Dies schließt eine nachgelagerte Anwendung auf Optimierungsfragen anhand einer Parametervariation nicht aus.

Der Schwerpunkt dieser Dissertation wird auf dem Fahrzeuggewicht als wichtigste Zielgröße der Fahrzeugentwicklung liegen. Dennoch hängen, wie gezeigt, auch andere, übergeordnete und ebenfalls wichtige Größen mehr oder weniger direkt vom Fahrzeuggewicht ab. Dies führt zu einem weiteren Punkt:

*5. Nutzung der Erkenntnisse zum Fahrzeuggewicht für weitere Kenngrößen*

Anhand der erzielbaren Ergebnisse in Bezug auf das Gewicht soll geprüft und gezeigt werden, wie das Gewicht für die Abschätzung weiterer, fahrzeugübergreifender Kennwerte genutzt werden kann. Dazu zählen insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten.



### 3 Lösungsansatz zur parametrischen Bestimmung der Fahrzeugmasse

Das Fahrzeuggewicht hängt von mehreren Fahrzeugeigenschaften ab und beeinflusst die Fahrzeugeigenschaften zugleich, Abbildung 3.1. Die gegenseitige Abhängigkeit stellt die eigentliche Herausforderung für eine Gewichtsschätzung unter Berücksichtigung des gesamten Fahrzeugs dar.

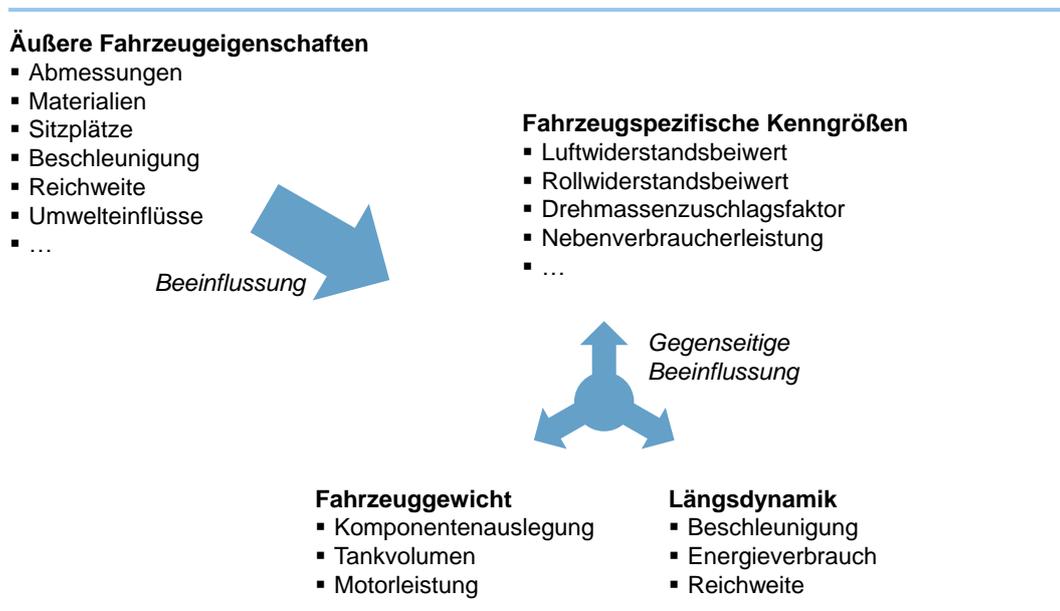


Abbildung 3.1: Gegenseitige Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht, Längsdynamik und fahrzeugspezifischen Kenngrößen

Die in Abbildung 3.1 aufgezeigten Abhängigkeiten und die in Abschnitt 2.1 erläuterte Gewichtsspirale lassen eine direkte vollparametrische Gewichtsbestimmung eines Fahrzeugs anhand der äußeren Fahrzeugeigenschaften, die von außen direkt messbar und vom Kunden wahrnehmbar sind, nicht zu. Teilweise hängt das Bauteilgewicht, wie bereits erwähnt, von dem Gewicht anderer Bauteile oder des gesamten Fahrzeugs ab. Leistung und Reichweite beeinflussen ebenfalls das Gewicht. Umgekehrt hängt die Längsdynamik neben dem Gewicht auch von Konzeptparametern ab.

Die Vielzahl an Abhängigkeiten kann für eine vollparametrische Modellierung nur über ein iteratives Vorgehen bei der Gewichtsberechnung berücksichtigt werden. Dabei soll einerseits das Fahrzeuggewicht bestimmt, andererseits der Effekt der Gewichtsspirale mit berücksichtigt werden. Für die Berechnung des Fahrzeuggewichts ohne ein Referenzfahrzeug als Ausgangsbasis muss zusätzlich die Abhängigkeit der fahrzeugspezifischen Kenngrößen von einem Fahrzeugkonzept bekannt sein.

Ein Lösungsansatz für diese Problemstellung wird nachfolgend beschrieben. Dieses Kapitel und die Übertragung des Lösungsansatzes in ein konkretes Modell, erläutert in Abschnitt 4.1, sind die Kernelemente dieser Dissertation in Bezug auf die parametrische Gewichtsberechnung.

### 3.1 Ansatz für die Gewichtsspirale

Abbildung 2.2 des vorausgegangenen Kapitels verdeutlicht die Auswirkungen der Gewichtsspirale im Fahrzeugentwicklungsprozess für eine primäre Gewichtszunahme. Der Lösungsansatz zur Berücksichtigung der Gewichtsspirale für eine konzeptionelle Auslegung umfasst zwei Erkenntnisse:

1. *Der Effekt der Massesteigerung in der Gewichtsspirale kann auf zwei unmittelbare Ursachen zurückgeführt werden.*
  - Massesteigerung *unmittelbar* durch das Fahrzeuggewicht: Die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit eines Bauteils hängen *unmittelbar* vom Fahrzeuggewicht ab. Diese Abhängigkeit überträgt sich direkt auf das Gewicht des Bauteils.
  - Massesteigerung *unmittelbar* durch die Forderung gleichbleibender Längsdynamik: Die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit eines Bauteils hängen *unmittelbar* von den längsdynamischen Vorgaben Beschleunigungsvermögen und Reichweite ab. Sollen diese längsdynamischen Vorgaben bei einer Gewichtsveränderung konstant bleiben, wirkt sich dies unmittelbar auf die Motorleistung und die Energiespeicherkapazität und damit auf das Gewicht des Motors und des Energiespeichers aus.
2. *Die Fahrzeuglängsdynamik mit den zwei Kenngrößen Beschleunigungsvermögen und Reichweite hängt von der Fahrzeugmasse ab und beeinflusst diese wiederum. Werden Beschleunigungsvermögen und Reichweite als konstante Anforderung vorgegeben, ist die Fahrzeuglängsdynamik das Bindeglied zwischen der Massesteigerung unmittelbar durch das Fahrzeuggewicht und der Massesteigerung unmittelbar durch die Forderung gleichbleibender Längsdynamik.*

Das Beschleunigungsvermögen hängt direkt mit der Motorleistung zusammen. Die gängige Größe für das Beschleunigungsvermögen ist die erforderliche Zeit für eine Beschleunigung von einer Anfangs- auf eine Zielgeschwindigkeit, meist von 0 auf 100 km/h. Die Reichweite ergibt sich direkt aus dem Energieverbrauch für eine bestimmte Fahrvorgabe, beispielsweise dem NEFZ, und der Energiespeicherkapazität.

Abbildung 3.2 verdeutlicht die Umsetzung dieser Erkenntnisse. Die primäre Gewichtsveränderung kann positiv oder negativ sein. Werden, ausgehend von einem Referenzfahrzeug, nacheinander die drei Schritte

- Bestimmung Motorleistung und Energiespeicherkapazität anhand der Längsdynamik für gleichbleibende Beschleunigung und Reichweite,
- Berücksichtigung der Masseveränderung durch die angepasste Motorleistung und Energiespeicherkapazität und
- Berücksichtigung der Masseveränderung durch das angepasste Fahrzeuggewicht

iterativ durchlaufen, wird die Gewichtsspirale vollständig erfasst. Für dieses Vorgehen ist jedoch ein Ausgangsgewicht bzw. Referenzfahrzeug erforderlich.

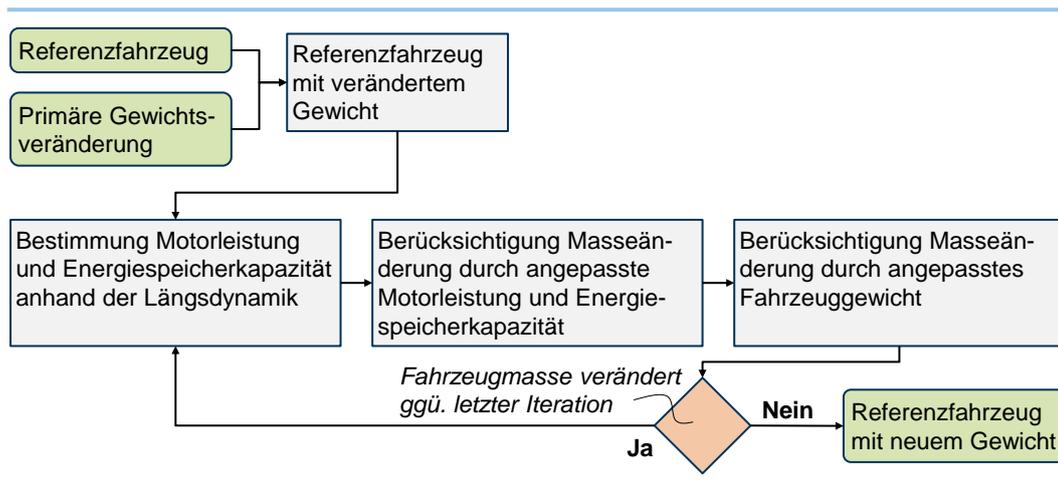


Abbildung 3.2: Ansatz zur Berücksichtigung der Gewichtsspirale ausgehend von einem Referenzfahrzeug

### 3.2 Ansatz für das Ausgangsgewicht

Die im vorausgegangenen Kapitel vorgestellten Schätzverfahren für das Fahrzeuggewicht wurden nach und nach und je nach Einsatzzweck detailliert und um zusätzliche Bestandteile ergänzt:

- Das einfachste Modell nutzt die projizierte Grundfläche eines Fahrzeugs [Mal07, S. 9 ff.] als Ausgangsbasis; zusätzlich wird das Gewicht von Komponentengruppen in Abhängigkeit der Fahrzeuggesamtmasse ausgedrückt.
- Ein weiterführendes Modell geht von einem Ersatzvolumen des Fahrzeugs aus und berücksichtigt zusätzlich die Motorleistung [Yan10].
- Der Konzeptoptimierer aus [Kuc12, S. 67f.] nutzt das Ersatzvolumen und berücksichtigt Leichtbaufahrzeuge über eine gesonderte Parametrierung.
- [Wie13, S. 66 ff.] ergänzt das Ersatzvolumen um einen Leichtbaufaktor und zusätzliche BEV-spezifische Komponenten.
- [Fuc14d, S. 66] fügt weitere Komponenten, auch für Hybridfahrzeuge, hinzu.

Die konsequente logische Fortführung (und das Überspringen mehrerer evolutionärer Zwischenschritte) dieses Trends der Detaillierung führt zu folgender Hypothese:

*Ein Fahrzeug kann vollständig in grundlegende funktionelle Einheiten zerlegt werden. Anhand charakteristischer Auslegungsparameter jeder funktionellen Einheit kann deren Gewicht bestimmt werden. Die Summe aller Gewichte ergibt das Fahrzeuggewicht.*

Bei diesem neuen Ansatz für das Ausgangsgewicht, ausgehend von funktionellen Einheiten, muss nach wie vor die Gewichtsspirale berücksichtigt werden. Mit den Überlegungen im vorausgegangenen Abschnitt ist dies einfach möglich, wie Abbildung 3.3 zeigt:

- Ohne die Berücksichtigung der Gewichtsspirale ist das Fahrzeuggewicht, das durch Summieren der Gewichte einer jeden funktionellen Einheit berechnet wurde, falsch. Dies trifft genauso auf das Referenzfahrzeug aus Abbildung 3.2 zu, nachdem dessen Gewicht mit einer primären Gewichts-

veränderung beaufschlagt wurde. Das Referenzfahrzeug mit der primären Gewichtsveränderung kann somit durch das Fahrzeugkonzept und das Gewicht aus den funktionellen Einheiten ersetzt werden.

- Einige funktionelle Einheiten hängen vom Fahrzeuggewicht ab. Damit diese berechnet werden können, wird ein beliebig gewähltes Startgewicht vorgegeben.
- Durch die anschließende iterative Ausführung der drei Rechenschritte
  - Bestimmung Motorleistung und Energiespeicherkapazität anhand der Längsdynamik,
  - Berücksichtigung der Massesteigerung durch die Längsdynamik und
  - Berücksichtigung der Massesteigerung durch das Fahrzeuggewicht
 wird die echte Fahrzeugmasse bestimmt und die Effekte der Gewichtsspirale werden vollständig berücksichtigt.

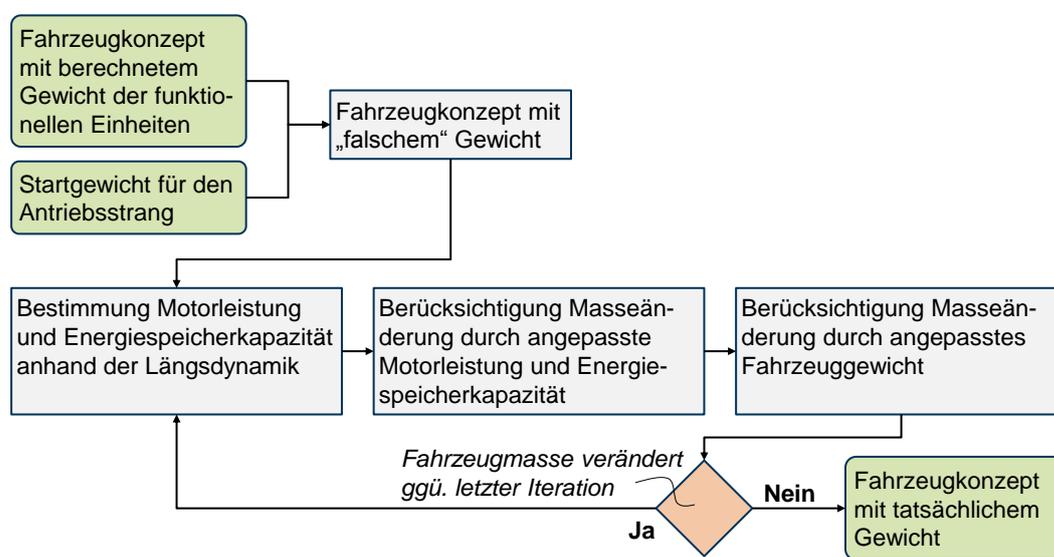


Abbildung 3.3: Ansatz zur Berücksichtigung der Gewichtsspirale ausgehend von einem neuen Fahrzeugkonzept ohne ein bekanntes Referenzfahrzeug

### 3.3 Ansatz für die fahrzeugspezifischen Kenngrößen

Die Längsdynamiksimulation in Abbildung 3.2 und 3.3 erfordert für die Berechnung der Fahrwiderstände die entsprechenden fahrzeugspezifischen Kenngrößen und einen Motorwirkungsgrad für jeden Betriebspunkt. Viele fahrzeugspezifische Kenngrößen lassen sich anhand von CAE-Methoden relativ präzise ermitteln, benötigen jedoch eine detaillierte Kenntnis des Fahrzeugkonzepts und viel Berechnungszeit.

Für viele Größen gibt es auch Erfahrungs- oder Schätzwerte. Beispiele hierfür sind (eine eingehendere Erläuterung folgt in den entsprechenden Abschnitten von Kapitel 4):

- Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$  von Fahrzeugen hängt von der Fahrzeugform ab. Eine Limousine hat einen besseren  $c_W$ -Wert als ein Steilheck, ein längeres Fahrzeug hat einen besseren  $c_W$ -Wert als ein kurzes Fahrzeug.
- Der Rollwiderstand  $c_{RR}$  von Reifen nimmt mit zunehmender Reifenbreite zu, mit zunehmendem Reifendurchmesser und -druck ab.

- Der Wärmeeintrag und damit die Klimatisierungsleistung erhöht sich mit der Größe und der Schrägstellung der Fensterflächen sowie mit dem Volumen der Fahrgastzelle; eine Wärmeschutzverglasung reduziert den Wärmeeintrag.

Für eine vollparametrische Fahrzeugmodellierung und eine realitätsnahe Längsdynamiksimulation muss die Abhängigkeit der Kenngrößen vom Fahrzeugkonzept mit berücksichtigt werden – nur so lassen sich Fahrzeugkonzepte miteinander vergleichen. Die Herausforderung besteht darin, die wesentlichen fahrzeugspezifischen Kenngrößen zu identifizieren und entweder

- ausgehend von Erfahrungs- und Schätzwerten sowie Werten von Benchmarkfahrzeugen ein parametrisches Schätzmodell aufzubauen, oder
- bestehende, komplizierte Detailmodelle auf das Wesentliche zu reduzieren, um eine schnelle und einfache Abschätzung zu ermöglichen.



## 4 Umsetzung im Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell

Das vorausgegangene Kapitel 3 beschreibt abstrakt den Lösungsansatz für eine parametrische Bestimmung der Fahrzeugmasse und der Komponentenmassen. Nachfolgend werden die Schritte beschrieben, mit denen, ausgehend von dem Lösungsansatz, ein konkretes Simulationsmodell aufgebaut wird.

Die Übertragung des Lösungsansatzes in ein Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell und die übergeordnete Struktur des Modells wird in Abschnitt 4.1 beschrieben. Abschnitt 4.2 zeigt das Vorgehen und die Methodenwahl zur praktischen Umsetzung des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells auf. Abschnitt 4.3 beschreibt die Auswahl der relevanten Parameter für die äußeren Fahrzeugeigenschaften aus Abbildung 3.1. Diese Parameter stellen die Grundlage für die Gewichtsbestimmung mit dem Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell dar. Abschnitt 4.4 erläutert die Gewichtsbestimmung für Komponentengruppen.

Einige Fahrzeugkomponenten hängen in ihrer Auslegung direkt von dem zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht ab, wie zuvor in Abschnitt 2.1 dargestellt. Indirekt beeinflusst das Gewicht noch weitere Komponenten, die in ihrer Auslegung mit der Längsdynamik verknüpft sind. Diese finden sich im Bereich des Energiespeichers (beeinflusst durch die Reichweite) und des Antriebsstrangs (beeinflusst durch das Beschleunigungsvermögen). Folglich muss die Längsdynamik des Fahrzeugs berücksichtigt werden, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Die fahrzeugspezifischen Kenngrößen aus Abbildung 3.1, die für die Simulation der Längsdynamik erforderlich sind, werden von den äußeren Fahrzeugeigenschaften, dem Fahrzeuggewicht und der Längsdynamik beeinflusst. Abschnitt 4.6 beschreibt die Bestimmung der fahrzeugspezifischen Kenngrößen. Werden die äußeren Fahrzeugeigenschaften Reichweite und Beschleunigung nicht erfüllt, müssen die Motoreigenschaften angepasst werden. Das Vorgehen dazu wird in Abschnitt 4.7 beschrieben. Mit den Abschnitten bis einschließlich 4.7 ist der Lösungsansatz vollständig abgedeckt.

Um fehlerhafte oder nicht realisierbare Ergebnisse zu identifizieren und zu vermeiden, beschreibt Abschnitt 4.8 einen Ansatz zur Prüfung der Eingabewerte und des Fahrzeugpackage. Die Diskussion der Vorteile, Nachteile und Grenzen des in dieser Dissertation beschriebenen Verfahrens und der Umsetzung im Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell erfolgt in Kapitel 8.

Einzelne Aspekte des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells wurden im Rahmen von Vorveröffentlichungen zu dieser Dissertation bereits vorgestellt, beispielsweise in [Fuc13a; Fuc13b; Fuc13c]. Das Kapitel „Zugrunde liegende Veröffentlichungen“ auf Seite xi listet alle Vorveröffentlichungen auf.

Die operative Umsetzung der Konzepte zur Parameterauswahl in Abschnitt 4.3 und zum Aufbau von Teilmodellen in den Abschnitten 4.4 bis 4.6 und 4.8 erfolgte teilweise mit Unterstützung studentischer Arbeiten. Das Kapitel „Betreute studentische Arbeiten“ auf Seite xiii führt diese Arbeiten und den jeweils bearbeiteten Umfang an.

### 4.1 Struktur des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells

Die Übertragung des Lösungsansatzes in ein konkretes Modell wird in Abbildung 4.1 dargestellt; nachfolgend kursiv geschriebene Worte beziehen sich auf die Modellblöcke dieser Abbildung. Das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* setzt sich aus vier Untermodellen

zusammen. Das Fahrzeugkonzept und die zur Simulation erforderlichen Angaben werden im Datensatz *Parametrisiertes Fahrzeug* zur Verfügung gestellt und die Ergebnisse der Berechnung im Datensatz *Simulationsergebnisse* abgelegt.

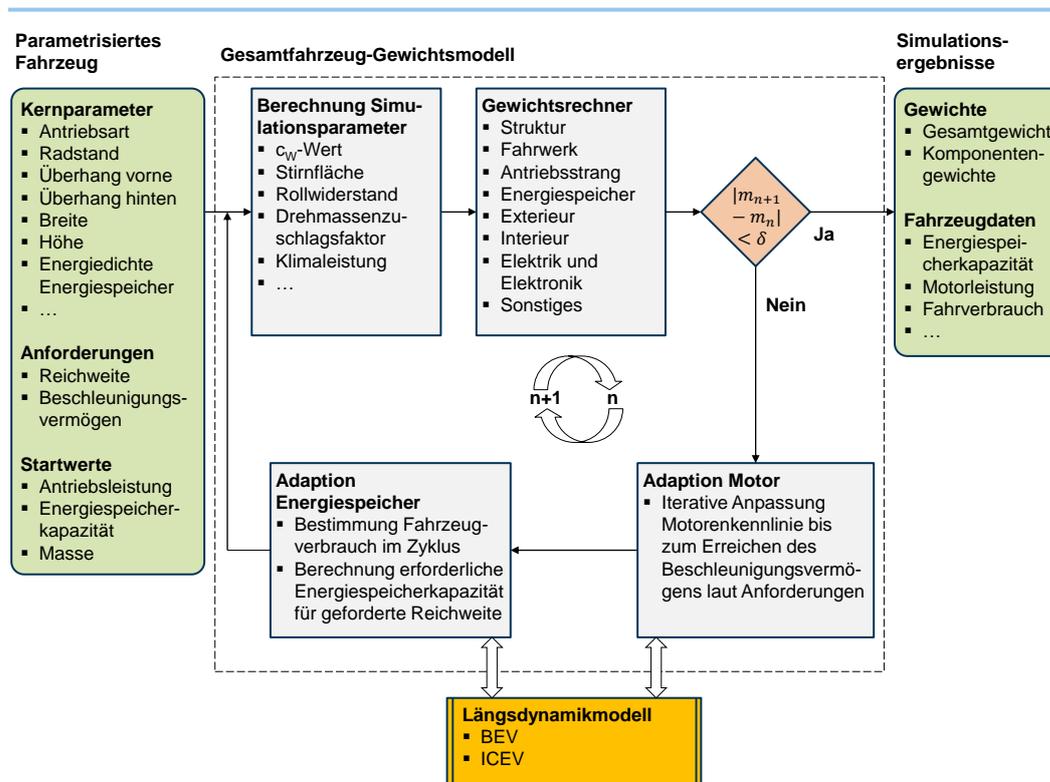


Abbildung 4.1: Übersicht über das Gewichtsmodell  
vgl. [Fuc13a]

Zu den Konzepteigenschaften im Eingabeblock *Parametrisiertes Fahrzeug* zählen die Kernparameter des Fahrzeugs, wie Abmessungen, Aufbauform und Antriebsart, Energiedichte des Energiespeichers etc., und die Anforderungen an Reichweite und Beschleunigungsvermögen. Hinzu kommen Startwerte für die Antriebsleistung und die Energiespeicherkapazität, die für den Simulationsablauf erforderlich sind, sowie eine Startmasse. Letztere ersetzt das Startgewicht aus Abbildung 3.3. Die Eingabewerte werden im Folgenden Fahrzeugparameter genannt und in Abschnitt 4.3 hergeleitet.

Mit den Fahrzeugparametern kann das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* ausgeführt werden. Das erste Untermodell *Berechnung Simulationsparameter* bestimmt die in Abschnitt 3.3 beschriebenen fahrzeugspezifischen Kenngrößen, die für die spätere Simulation der Fahrzeuglängsdynamik erforderlich sind. Mit Ausnahme des Drehmassenzuschlagsfaktors  $e_i$  erfolgt die Berechnung einmalig, weil die Werte unabhängig vom Fahrzeuggewicht sind.

Das Untermodell *Gewichtsrechner* umfasst:

- Die Gewichtsrechnung der funktionellen Einheiten (im Folgenden Komponentengruppen genannt) aus Abschnitt 3.2
- Die Berücksichtigung der Massesteigerung durch die Längsdynamik und durch das Fahrzeuggewicht aus Abschnitt 3.1 und Abbildung 3.3.

Der *Gewichtsrechner* umfasst eigenständige Komponentengewichtsmodelle für alle Komponentengruppen eines Fahrzeugs, die in Summe die Gesamtfahrzeugleermasse  $m_{L,n}$

ergeben. Der Index  $n$  dient als Zähler für die Anzahl der Iterationsschleifen. Zusammen mit dem Untermodell *Berechnung Simulationsparameter* ist der *Gewichtsrechner* der Hauptbestandteil des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells*.

Im Untermodell *Adaption Motor* wird überprüft, ob mit der ermittelten Fahrzeugleermasse  $m_{L,n}$  zuzüglich Fahrer Masse und der Motorleistung die in *Parametrisiertes Fahrzeug* geforderte Beschleunigungszeit erreicht wird. *Adaption Motor* greift für die Überprüfung auf ein *Fahrzeuglängsdynamikmodell* zurück (siehe Abschnitt 4.5). Wird die Beschleunigungszeit unter Berücksichtigung von Toleranz nicht erreicht, erfolgt eine entsprechende Anpassung des maximalen Motormoments und der Motoreigenschaften, bis der Beschleunigungswert den Daten aus *Parametrisiertes Fahrzeug* entspricht.

Das Untermodell *Adaption Energiespeicher* ermittelt nun mit der Fahrzeugleermasse  $m_{L,n}$  zuzüglich Fahrer Masse den Energieverbrauch des Fahrzeugs in einem wählbaren Fahrzyklus, beispielsweise dem NEFZ oder einem kundenindividuellen Zyklus, anhand der neuen Motoreigenschaften. Mit dem Energieverbrauch und der geforderten Reichweite berechnet *Adaption Energiespeicher* die entsprechend erforderliche Energiespeicherkapazität zur Erfüllung der Reichweitenvorgabe.

Die Bestimmung von Motorleistung und Energiespeicherkapazität anhand der Längsdynamik aus Abschnitt 3.1 und Abbildung 3.3 wird durch die beiden Untermodelle *Adaption Motor* und *Adaption Energiespeicher* erfüllt. Mit den neuen Motoreigenschaften und der neuen Energiespeicherkapazität ändern sich:

- Unmittelbar das Gewicht von Komponenten, die von der Antriebsleistung abhängen – inklusive des Motors selbst
- Unmittelbar das Energiespeichergewicht
- In weiterer Folge das Gewicht der gewichtsabhängigen Fahrzeugbauteile.

Eine erneute Ausführung des *Gewichtsrechners* ergibt eine neue Fahrzeugmasse  $m_{L,n+1}$ .

Unterscheidet sich die Fahrzeugleermasse  $m_{L,n+1}$  innerhalb eines festlegbaren Toleranzbandes  $\delta$  von der Fahrzeugleermasse  $m_{L,n}$ , werden die vier Simulationsblöcke *Adaption Motor*, *Adaption Energiespeicher*, *Berechnung Simulationsparameter* und *Gewichtsrechner* erneut durchlaufen. Dies wird so lange wiederholt, bis die Bedingung aus Formel (4.1) erfüllt ist.

$$|m_{L,n+1} - m_{L,n}| < \delta \quad (4.1)$$

*Simulationsergebnisse* enthält neben der Fahrzeugleermasse  $m_L$ , unterteilt in die Gewichte der Komponentengruppen, alle weiteren während der Simulation erzeugten Werte, wie Motorleistung und Motoreigenschaften, Energieverbrauch im Fahrzyklus und berechnete fahrzeugspezifische Kenngrößen. An die standardisierte Ausgabe des Blocks *Simulationsergebnisse* lassen sich weitere Berechnungen anknüpfen. Diese werden in Kapitel 6 beschrieben.

## 4.2 Vorgehen und Methodenwahl

Für die Modellbildung der eigenständigen Komponenten-Gewichtsmodelle und der anderen Teilmodelle bieten sich prinzipiell zwei Vorgehensweisen an: eine empirische und eine physikalische Modellbildung. Welche Methode zur Modellbildung gewählt wird, hängt von der Art des Bauteils und den verfügbaren Informationen für die Modellierung ab.

Bei beiden Arten der Modellbildung wird die Zielvariable, auch abhängige Variable genannt, anhand von Kovariablen, auch bezeichnet als erklärende Variablen oder Einflussgrößen, beschrieben [Fah09, S. 19; vgl. auch Pes13, S. 33]. Die zugehörige Berechnungsvorschrift wird als Zielfunktion bezeichnet.

#### 4.2.1 Physikalische Modellierung

Ein physikalisches Modell beschreibt die Zielvariable auf Grundlage von physikalischen Gegebenheiten und Zusammenhängen. Die physikalischen Zusammenhänge müssen dafür bekannt sein. Dieses Vorgehen bietet sich für weitgehend technikbestimmte Komponenten an. Dazu zählen Komponenten des Antriebsstrangs, wie beispielsweise die Antriebswellen.

Im Fall der Antriebswellen ist die Betriebsfestigkeit entscheidend für die Dimensionierung der Welle. Für einen bestimmten Betriebsfestigkeitswert hängt die Wellenauslegung maßgeblich von dem zu übertragenden Drehmoment, also dem maximalen Motormoment unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung im ersten Gang und einem Sicherheitsfaktor, ab. Der erforderliche Wellendurchmesser zur Vermeidung eines Versagens für ein bestimmtes Material kann anhand der zulässigen Torsionswechselfestigkeit und des Drehmoments berechnet werden [Nau11, S. 293 f.]. Das Gewicht einer Antriebswelle wird bei einer physikalischen Modellierung somit über Durchmesser, Wandstärke (nur bei einer Hohlwelle), Materialdichte und Länge der Antriebswelle bestimmt. Hinzu kommen die Gewichte der Gelenke und Anbindungen.

Abbildung 4.2 zeigt als Beispiel eine physikalische Modellierung der Antriebswellen und einen Vergleich mit Referenzpunkten realer Fahrzeuge. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an das Vorgehen aus [FAT11, S. 104 - 106]. Für die Torsionswechselfestigkeit wird ein Wert von 235 N/mm<sup>2</sup> zuzüglich 15 Prozent Erhöhung durch induktives Oberflächenhärten angenommen.

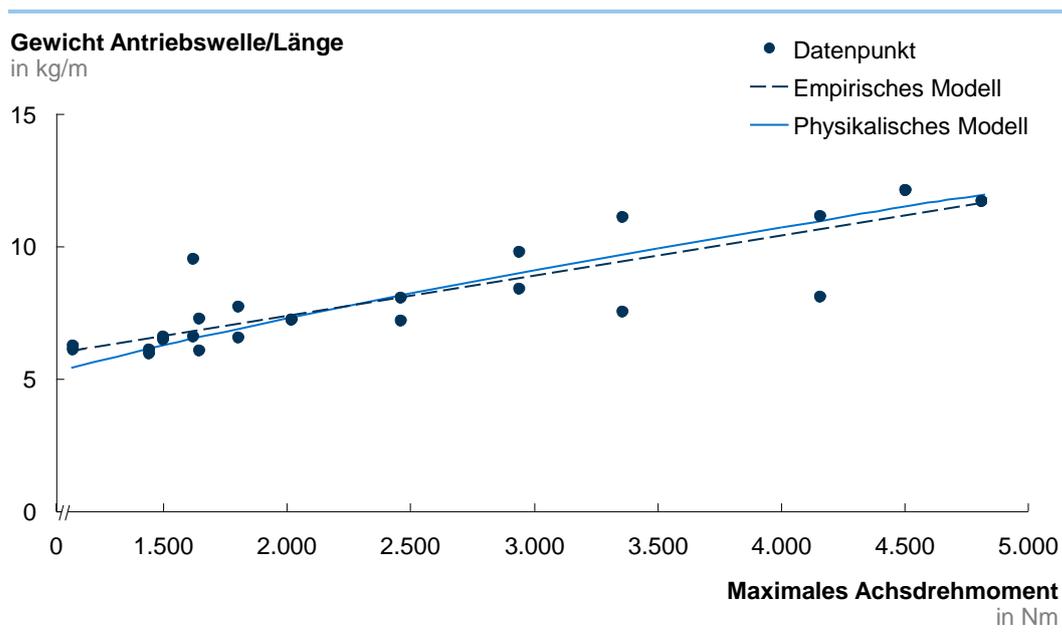


Abbildung 4.2: Möglichkeiten zur Modellierung von Komponenten, Beispiel Antriebswellen

Spielen nicht-technische Einflüsse für die Auslegung einer Komponente eine Rolle, beschreibt eine physikalische Modellierung das System nicht mehr hinreichend genau. Im

Automobilbau ist das praktisch bei allen designbestimmten Bauteilen der Fall. Frontscheinwerfer und Heckleuchten sind markante Designelemente; diese Bauteile werden beispielsweise häufig deutlich größer ausgelegt, als dies für die technische Integration des Leuchtmittels, des Reflektors und der elektrischen Bauteile erforderlich wäre. Hier liefert eine empirische Modellierung der Bauteile bessere Ergebnisse. Der Einsatz der physikalischen Modellierung beschränkt sich somit fast ausschließlich auf nicht-sichtbare Komponenten.

#### 4.2.2 Empirische Modellierung

Ein empirisches Modell beschreibt die Abhängigkeit zwischen Zielvariable und den Einflussgrößen anhand beobachteter Werte. Dies erfordert Referenzwerte existierender Fahrzeuge bzw. Bauteile innerhalb des Betrachtungsbereichs. Die Referenzwerte können beispielsweise über Benchmarkuntersuchungen gewonnen werden.

Ein lineares Regressionsmodell stellt nach [Has09, S. 43 ff.] die einfachste Art der empirischen Modellierung dar, bei der die Zielvariable linear von einer Kovariable abhängt. Die Kovariable kann mehrere Eingangsvariablen umfassen, die miteinander multipliziert, oder auf die bestimmte mathematische Operationen (Wurzelfunktionen, Logarithmus, Quadratur etc.) angewendet werden dürfen. Lineare Regressionen lassen sich schnell erzeugen, geben ein leicht zu interpretierendes Bild des Zusammenhangs zwischen Kovariable und Zielvariable und zeigen ein konservatives Verhalten bei einer Extrapolation über die Grenzen der zugrunde liegenden beobachteten Werte hinaus. Bei nur beobachteten Werten, sogenannten Stützstellen, wird eine Über- oder Fehlinterpretation vermieden. Die lineare Regressionsfunktion einer empirischen Modellierung der Antriebswellen ist in Abbildung 4.2 ebenfalls eingetragen.

Aufgrund der genannten Vorteile werden für die empirischen Modelle in dieser Arbeit lineare Regressionsfunktionen verwendet. Sofern die Beobachtungspunkte ein deutlich anderes Verhalten erkennen lassen oder physikalische Grundlagen eine andere Regressionsfunktion nahelegen, wird in Einzelfällen davon abgewichen.

Die Kovariablen der empirischen Modelle werden so gewählt, dass das Modell die beobachteten Werte möglichst gut beschreibt. Um Fehlinterpretationen und Scheinkorrelationen zu vermeiden, erfolgt die Festlegung der Kovariablen jedoch immer unter Berücksichtigung der auslegungsrelevanten Sachverhalte auf Basis von Entwicklungserfahrung und grundlegendem fahrzeugtechnischen Konstruktionswissen.

Als Beobachtungspunkte in dieser Arbeit dienen die detaillierten Gewichtsbenchmarkdaten von 24 Fahrzeugen. Die Daten stammen aus der Datenbank des Fahrzeugbenchmarkanbieters A2Mac1 Automotive Benchmarking [A2M12]. Abbildung 4.3 gibt eine Übersicht über die Fahrzeuge.

Hersteller	Modell	Jahr	Länge	Breite	Höhe	Benchmark-
			in mm	in mm	in mm	Gewicht
			in kg			
Audi	A1 1.4 TFSI S-Tronic Ambition	2011	3.954	1.740	1.417	1.177
Audi	A4 1.8 TFSI Attraction	2008	4.703	1.826	1.427	1.455
Audi	A6 2.8 FSI	2011	4.915	1.874	1.455	1.643
BMW	118i	2012	4.324	1.765	1.421	1.330
BMW	320d Efficient dynamics	2012	4.624	1.811	1.429	1.441
BMW	523i	2010	4.899	1.860	1.464	1.645
Fiat	500 1.2 Lounge	2008	3.546	1.627	1.488	1.002
Ford	Fiesta 1.6 TDCI Titanium	2008	3.950	1.709	1.481	1.147
Ford	Focus 1.6 TDCI Titanium	2005	4.342	1.840	1.454	1.375
Honda	Jazz 1.4 Comfort	2010	3.800	1.695	1.525	1.066
Hyundai	i10 1.1 CRDI Comfort	2009	3.565	1.595	1.640	1.077
Kia	Picanto 1.0 Active	2012	3.595	1.595	1.480	929
Mercedes	C 180 K Classic	2008	4.581	1.770	1.447	1.448
Mercedes	E 200 CGI Blue Efficiency	2010	4.868	1.854	1.417	1.568
Mini	Cooper S	2007	3.714	1.683	1.407	1.190
Nissan	Leaf	2011	4.445	1.770	1.550	1.520
Opel	Astra 1.4 T Cosmo	2010	4.419	1.814	1.510	1.446
Opel	Corsa 1.3 CDTI	2007	3.999	1.713	1.488	1.252
Suzuki	Alto 1.0 GL	2009	3.500	1.630	1.470	877
Suzuki	Swift 1.3 GL	2011	3.850	1.720	1.510	1.035
Volkswagen	Golf VI 2.0 TDI Comfortline	2008	4.199	1.786	1.479	1.345
Volkswagen	Passat 1.9 TDI	2005	4.765	1.820	1.472	1.558
Volkswagen	Polo 1.2 12V	2002	3.926	1.650	1.465	920
Volkswagen	up! 1.0 Take up!	2012	3.540	1.641	1.478	879

Abbildung 4.3: Übersicht über die 24 Benchmarkfahrzeuge von A2Mac1  
 Benchmarkgewicht und Jahr aus [A2M12]; Abmessungen laut Herstellerangabe

### 4.3 Auswahl der Modellparameter

Die Identifikation der richtigen Modellparameter ist ein wichtiger Schritt vor Beginn der eigentlichen Modellierung. Einerseits soll das Modell anhand der Parameter möglichst präzise beschrieben werden, andererseits erhöht jeder Parameter die Komplexität des Modells und die Rechendauer. Darüber hinaus sind viele Fahrzeugparameter nicht unabhängig wählbar, sondern hängen wiederum von anderen Parametern ab.

Eine erste Liste aller zu berücksichtigenden Parameter für ein Elektrofahrzeug wird aus der Stückliste des Mute [FTM11] abgeleitet, die rund 850 Posten umfasst. In dieser Liste werden ähnliche Komponenten zu 131 funktionellen Einheiten als Komponentengruppen zusammengefasst. Ein Beispiel für eine Komponentengruppe ist die Motorhaube mit Schloss, Fanghaken und Scharnieren.

Anschließend werden alle Komponentengruppen hinsichtlich dreier Aspekte analysiert:

- „Was bestimmt das Gewicht?“ – Das Bauteilgewicht wird maßgeblich von nur wenigen Faktoren bestimmt. In der Regel sind dies die Abmessungen, geforderten Steifigkeiten, Leistungsfähigkeit und Crasheigenschaften. Für alle Bauteile werden die auslegungsrelevanten Faktoren ermittelt, soweit möglich mit den verantwortlichen Bauteilentwicklern des Mute.

- „Wie sensitiv ist das Gewicht der Komponentengruppe?“ – Bei manchen Bauteilen führt eine Veränderung der auslegungsrelevanten Größen zu einer großen Gewichtsveränderung, beispielsweise eine Veränderung der Abmessungen der Motorhaube. Für alle Komponentengruppen wird eine entsprechende qualitative Bewertung vorgenommen.
- „Beeinflusst eine Änderung des Fahrzeugkonzepts das Gewicht einer Komponentengruppe?“ – Das Gewicht einiger Komponentengruppen ist innerhalb bestimmter Grenzen weitgehend unabhängig von dem Fahrzeugkonzept. Beispielsweise hängt das Gewicht eines Airbags deutlich stärker von den länderspezifischen gesetzlichen Anforderungen und der Sicherheitsstrategie des Fahrzeugherstellers ab als von dem Fahrzeugkonzept und der Innenraumgeometrie [Lan12].

Auf Basis dieser Analyse wird, wie in [Fuc13a] beschrieben, eine Unterteilung der Komponentengruppen in solche mit einem qualitativ mittleren bis hohen Einfluss auf das Gesamtgewicht und in solche mit eher geringem bis keinem Einfluss auf das Gesamtgewicht vorgenommen. Die auslegungsrelevanten Faktoren der Komponentengruppen mit Einfluss auf das Gesamtgewicht, genannt Haupteinflussgrößen, bilden einen ersten Umfang an Modellparametern, Abbildung 4.4.

Identifikation gewichtsbestimmender Haupteinflussgrößen je Bauteil	Annäherung Haupteinflussgrößen durch Fahrzeugkenngrößen	Reduktion auf Kernparameter
> 200 Parameter	~ 50 Parameter	< 25 Parameter
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrzeuggewicht</li> <li>▪ Antriebsleistung</li> <li>▪ Abmessungen Seitenscheibe</li> <li>▪ Abmessungen Seitentür</li> <li>▪ Abmessungen Türbeplankung</li> <li>▪ Bauteilsteifigkeiten</li> <li>▪ Zuladung</li> <li>▪ Maximalstrom</li> <li>▪ Spannung</li> <li>▪ Drehmoment Antriebsstrang</li> <li>▪ Drehzahl E-Maschine</li> <li>▪ Übersetzung Getriebe</li> <li>▪ Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Abmessungen Radhausausschnitt</li> <li>▪ Abmessungen Energiespeicher</li> <li>▪ Gewicht Energiespeicher</li> <li>▪ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Länge</li> <li>▪ Überhang vorne</li> <li>▪ Überhang hinten</li> <li>▪ Radstand</li> <li>▪ Breite</li> <li>▪ Fahrzeugvolumen</li> <li>▪ Spur</li> <li>▪ Stirnfläche</li> <li>▪ Seitenfläche</li> <li>▪ Leistung E-Maschine</li> <li>▪ Drehzahl E-Maschine</li> <li>▪ Drehmoment E-Maschine</li> <li>▪ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radstand</li> <li>▪ Überhang vorne</li> <li>▪ Überhang hinten</li> <li>▪ Höhe</li> <li>▪ Spur</li> <li>▪ Motorleistung</li> <li>▪ Energiedichte</li> <li>▪ Energiespeicher</li> <li>▪ ...</li> </ul> <div style="margin-left: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>} ~ Länge</li> <li>} ~ Volumen</li> <li>} ~ Stirnfläche</li> </ul> </div>

Abbildung 4.4: Ableiten der modellrelevanten Kernparameter  
vgl. [Fuc13a, S. 234]

Mit mehr als 200 Parametern ist die Liste der Haupteinflussgrößen für eine Modellierung zu umfangreich. Viele Parameter sind jedoch ähnlich oder hängen zusammen, beispielsweise bei angrenzenden Bauteilen wie der Tür und dem Fenster. Daher wurden die Haupteinflussparameter durch typische Fahrzeugkenngrößen angenähert, was die Liste auf einen Umfang von rund 50 Parametern reduziert. Werden nun noch Dopplungen eliminiert und physikalische Zusammenhänge genutzt – die Fahrzeuglänge kann beispiels-

weise als die Summe aus Radstand, Überhang vorne und Überhang hinten ausgedrückt werden – verbleiben noch rund 25 Kernparameter.

Diese Kernparameter stellen den Ausgangspunkt für die Modellierung dar. Während des Aufbaus der Teilgewichtsmodele werden zusätzliche Parameter identifiziert und mit aufgenommen. Dies betrifft insbesondere die Modellerweiterung um ICEV, weil die ursprüngliche Parameterliste auf Basis des BEV Mute gewonnen wird.

Bei der Verwendung des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* müssen nicht immer alle Parameter eingegeben werden; für viele Parameter können Standardwerte verwendet werden. Abbildung 4.5 zeigt den vollständigen Umfang aller Eingangsparameter für das Gewichtsmodell. Hierin enthalten sind auch die Simulationseinstellungen.

<b>Fahrzeugkonzept</b>	<b>Abmessungen</b>
Karosserieform	Radstand
Anzahl der Türen	Breite
Anzahl und Art Sitze zweite Sitzreihe	Höhe
Max. Zuladung	Überhang vorne
Antriebsart (ICEV/BEV)	Überhang hinten
	Spurweite vorne
	Spurweite hinten
	Windschutzscheibenwinkel
	Seitenscheibenwinkel
	Heckscheibenwinkel
<b>Komfort</b>	
Komfortfaktor Interieur	
Komfortfaktor Akustik	
<b>Sonderausstattung</b>	<b>Reifen und Fahrwerk</b>
Klimaanlage	Felgendurchmesser vorne
Mobilitäts-Kit	Reifenbreite vorne
Scheinwerferreinigungsanlage	Querschnittsverhältnis vorne
Nebelscheinwerfer	Felgendurchmesser hinten
Türfächer (Anzahl)	Reifenbreite hinten
Kofferraumfach	Querschnittsverhältnis hinten
Mittelablage	Reifentyp bzw. Rollwiderstandsklasse
LCD Screen	Art der Vorderachse
Subwoofer	Art der Hinterachse
<b>Motor, Getriebe und Energiespeicher (ICEV)</b>	<b>Motor, Getriebe (BEV)</b>
Kraftstoffart	Übersetzung
Zylinderanzahl	Wirkungsgrad Antriebsstrang (ohne Motor)
Antriebsart	Motorart
Getriebeart	Maximale Drehzahl
Turbolader	
Start-Stopp-System	<b>Energiespeicher (BEV)</b>
Übersetzung 1. Gang	Batterie-Typ
Übersetzung 2. Gang	Batterie-Form
Übersetzung 3. Gang	Energiedichte der Zelle
Übersetzung 4. Gang	Füllfaktor
Übersetzung 5. Gang	Energiedichte des Systems
Übersetzung 6. Gang	
Übersetzung Differenzial	
<b>Sicherheit</b>	<b>Materialien</b>
Seitenairbag	Karosserie: Stahl-Anteil
Kopfairbag	→ davon hochfester Stahl
Aktive Motorhaube	Karosserie: Alu-Anteil
Gurtstraffer	Karosserie: CFK-Anteil
	Türen: Material
	Motorhaube: Material
	Heckklappe: Material
	Kotflügel: Material
	Modulquerträger: Material
	Felge: Material
	Crashsystem: Material
	Fenster: Material
	Art der Verglasung
<b>Simulationseinstellungen</b>	
Reichweite	
Beschleunigungspotenzial	
Fahrzyklus	
Abbruchkriterium Konvergenz	
Max. Abweichung zur Soll-Beschleunigung	
Außentemperatur (bei Klimaanlage)	

Abbildung 4.5: Eingangsparameter für das Fahrzeuggewichtsmodell

## 4.4 Gewichtsrechnung der Komponenten

In dem Untermodell *Gewichtsrechner* des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* in Abbildung 4.1 erfolgt die eigentliche Gewichtsrechnung der Komponenten. Das Untermodell ist entsprechend Abbildung 4.6 in die üblichen Baugruppen von Fahrzeugen unterteilt.

	Baugruppe	Absatz
Gesamtfahrzeug	Struktur	4.4.1
	Fahrwerk	4.4.2
	Antriebsstrang	4.4.3
	Energiespeicher	4.4.4
	Exterieur	4.4.5
	Interieur	4.4.6
	Elektrik und Elektronik	4.4.7
	Sonstiges	4.4.8

Abbildung 4.6: Gliederung des Untermodells Gewichtsrechner in Baugruppen

Für die weitere Beschreibung wird folgende Nomenklatur eingeführt:

- Ausgehend von dem Gesamtfahrzeug wird die erste Gliederungsebene mit Baugruppe benannt (beispielsweise Struktur, Chassis, Antriebsstrang etc.).
- Die zweite Gliederungsebene wird mit Komponentengruppe bezeichnet (innerhalb der Baugruppe Fahrwerk beispielsweise Räder, Federn, Dämpfer etc.).
- Die dritte Gliederungsebene nennt sich Bauteil (innerhalb der Komponentengruppe Räder beispielsweise Felgen, Reifen, Radmuttern etc.).
- Sofern es sich bei einer Masse um die einer Komponentengruppe handelt, enthält der Index des Formelzeichens die ersten drei Buchstaben der zugehörigen Baugruppe ( $m_{Str,<KG-Name>}$  für die Masse der Komponentengruppe <KG-Name> der Baugruppe Struktur).

Die Zielfunktionen aller Komponenten- und anderen Teilmodelle sind in Anhang H einzeln angegeben, ohne dass im weiteren Verlauf extra darauf hingewiesen wird. Aufgrund der Vielzahl der Komponenten können nicht alle Zielfunktionen einzeln vorgestellt werden. Die wichtigsten Gewichtsfunktionen werden in den folgenden Absätzen erläutert.

### 4.4.1 Struktur

Die Fahrzeugstruktur ist bei konventionellen Fahrzeugen üblicherweise die schwerste Komponente [Bra13, S. 513; Goe05, S. 3]. Bei BEV kann die Masse des Batteriesystems je nach Auslegung größer als die Masse der Struktur sein. Dies ist beispielsweise beim Mitsubishi i-MiEV der Fall [Eck11b]. Der *Gewichtsrechner* unterteilt die Struktur in die Komponentengruppen entsprechend Abbildung 4.7.

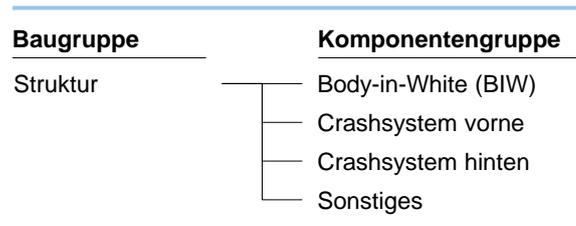


Abbildung 4.7: Gliederung der Baugruppe Struktur in Komponentengruppen

Nachfolgend wird das Body-in-White(BIW)-Modell im Detail erläutert. Dieses stellt den größten Anteil an der Baugruppe Struktur. Die Türen, Klappen und Deckel werden in dieser Arbeit getrennt als Teileumfang des Exterieurs betrachtet.

Für einen Vergleich von Fahrzeugkarosserien wird häufig die Leichtbaugüte  $LBG$  genutzt [Bra13, S. 513]; diese ist eine zentrale Leichtbau-Kenngröße im Karosseriebau. Die Leichtbaugüte berechnet sich aus der Masse des BIW  $m_{Str,BIW}$ , der Torsionssteifigkeit  $c_T$  und der Radaufstandsfläche  $A_R$  entsprechend Formel (4.2).

$$LBG = \frac{m_{Str,BIW}}{c_T A_R} \quad (4.2)$$

Durch Auflösen nach  $m_{Str,BIW}$  kann die Masse der Rohkarosserie berechnet werden, wenn  $LBG$ ,  $c_T$  und  $A_R$  bekannt sind oder vorgegeben werden. Dabei ergeben sich hinsichtlich einer empirischen Modellbildung zwei wesentliche Einschränkungen:

- $A_R$  lässt sich für jedes Fahrzeug aus den Herstellerangaben leicht berechnen. Für  $LBG$ ,  $c_T$  und  $m_{Str,BIW}$  gibt es aus der Literatur und anderen frei zugänglichen Quellen jedoch nur für sehr wenige Fahrzeuge verlässliche Werte. Diese sind nicht ausreichend, um ein empirisches Modell abzuleiten.
- Über  $LBG$  lassen sich jeweils nur ähnliche Karosserieformen vergleichen. Unterschiedliche Karosserieformen hingegen beeinflussen  $c_T$  und folglich  $m_{Str,BIW}$  deutlich stärker, als dies beispielsweise die geringe Zusatzmasse einer aussteifenden Strebe machen würde.

Aus diesen Gründen wird für das BIW-Modell ein neuer Weg gewählt. Ausgangspunkt ist der beschriebene volumetrische Ansatz aus Formel (2.6) und [Yan10], der vom Gesamtfahrzeug auf die Struktur übertragen wird. Wird die installierte Motorleistung vorerst nicht berücksichtigt, kann der Term zur Berücksichtigung der Motorleistung entfallen.

Durch eine Unterteilung des Fahrzeugs in drei Segmente entsprechend Abbildung 4.8 können der einfache volumetrische Ansatz detailliert und unterschiedliche Aufbauformen berücksichtigt werden:

- Der Mittelbereich  $V_M$  ist für alle drei Fahrzeugbauformen identisch. Das Volumen wird mit Radstand  $R$ , Breite  $B$  und Höhe  $H$  des Fahrzeugs berechnet.
- Der Frontbereich  $V_F$  wird ebenso für alle Aufbauformen als gleich angenommen; dessen Volumen wird mit der halben Fahrzeughöhe  $H$ , der Breite  $B$  und dem vorderen Überhang  $U_v$  angenähert.
- Der Heckbereich  $V_H$  unterscheidet sich bei den Aufbauformen. Bei einem Steilheckfahrzeug wird das Volumen mit Breite  $B$ , hinterer Überhang  $U_h$  und drei Viertel der Fahrzeughöhe  $H$  abgeschätzt. Bei einer Limousine

oder einem Schrägheckfahrzeug werden hingegen nur zwei Drittel der Höhe  $H$  verwendet.

Um die Einführung eines weiteren Parameters zur Beschreibung der Bodenfreiheit zu vermeiden, wird abweichend zu Abbildung 4.8 die Karosseriehöhe anhand der Fahrzeughöhe angenähert. Vorausgegangene Untersuchungen zur Parameterwahl für das BIW-Modell ergaben hinsichtlich Verwendung der Fahrzeughöhe oder der Karosseriehöhe keine bedeutende Auswirkung auf die Modellgüte [Ert12; Jak13].

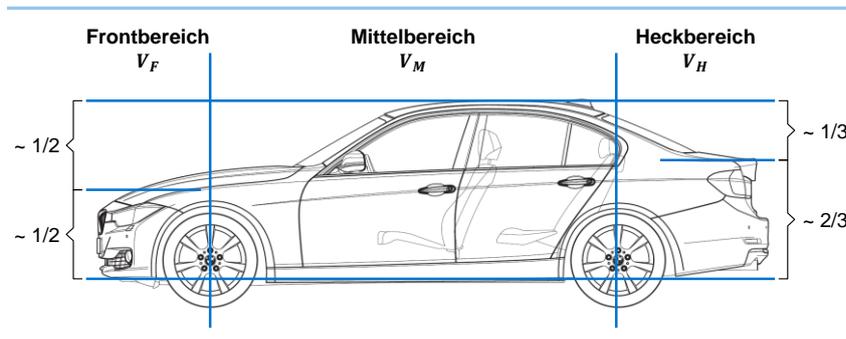


Abbildung 4.8: Fahrzeugbereiche für das BIW-Modell (Limousine)

Bildquelle: vgl. [Bay14, S. 73]

Formel (4.3) für die Limousine und das Schrägheckfahrzeug und Formel (4.4) für das Steilheckfahrzeug drücken die Berechnung des Ersatzvolumens mathematisch aus. Abbildung 4.9 zeigt die Ergebnisse für die entsprechende Berechnung des Ersatzvolumens und die Korrelation mit den Benchmarkdaten aus [A2M12]. Für Schrägheckfahrzeuge liegen keine Benchmarkdaten vor; die Ergebnisse aus Formel (4.3) können daher nicht überprüft werden.

$$V_{Ersatz,Lim} = V_{Ersatz,Sch} = \left( \frac{1}{2} U_v + R + \frac{2}{3} U_h \right) B H \quad (4.3)$$

$$V_{Ersatz,Ste} = \left( \frac{1}{2} U_v + R + \frac{3}{4} U_h \right) B H \quad (4.4)$$

Neben den Fahrzeugabmessungen beeinflusst das zulässige Fahrzeuggesamtwicht das BIW-Gewicht. Einerseits muss die Karosserie die Last der Fahrzeugkomponenten und der Zuladung tragen, ohne dass sich im üblichen Gebrauch die Fahrzeugeigenschaften zu stark ändern oder ein Bauteilversagen eintritt. Andererseits muss die Karosserie auch die Craschanforderungen erfüllen und eine intrusionsfreie Fahrgastzelle sicherstellen.

Anhand der Benchmarkdaten konnte eine Abhängigkeit des BIW-Gewichts von dem zulässigen Höchstgewicht eines Fahrzeugs allerdings nicht nachgewiesen werden. Dies liegt vermutlich daran, dass die in den Benchmarkdaten enthaltenen Fahrzeuge, bezogen auf ihre Abmessungen, alle ein ähnliches zulässiges Höchstgewicht haben. Die Fahrzeuge entsprechen ausnahmslos konventionellen Bauformen (fünf Insassen und Gepäck, Limousine oder Steilheck).

Um dennoch die Fahrzeuggesamtmasse für außergewöhnliche Konzepte, beispielsweise extremen Leichtbau oder große Fahrzeuge mit nur zwei Sitzplätzen und wenig Zuladung, berücksichtigen zu können, wird im Modell ein Korrekturwert eingeführt. In [FAT11, S. 51 - 62] wurde gezeigt, dass bei einer primären Verringerung des Fahrzeuggesamtwichts des analysierten Volkswagen Golf von 1.910 kg auf 1.810 kg (-5,2 Prozent) das Gewicht

des BIW von 277,82 kg auf 268,21 kg (-3,5 Prozent) gesenkt werden kann. Dies entspricht einem Übertragungsfaktor von 0,67.

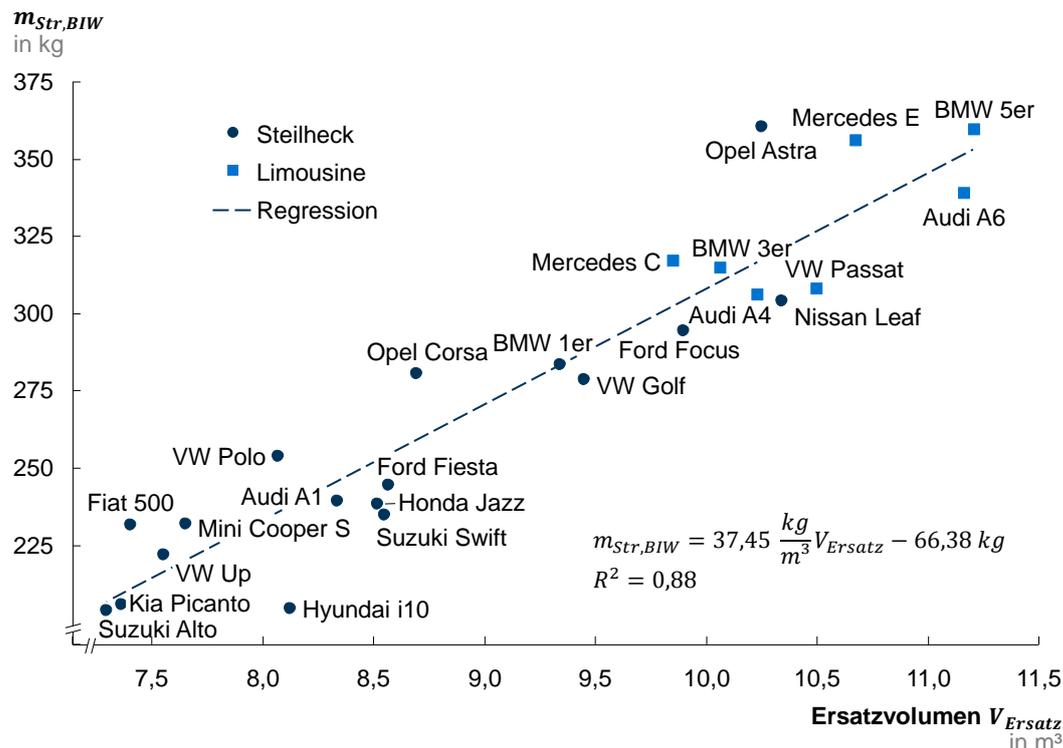


Abbildung 4.9: Modell für die BIW-Masse in Abhängigkeit des berechneten Ersatzvolumens

Entsprechend wird im BIW-Modell zusätzlich zu der bereits aus den Benchmarkdaten ermittelten Regressionsfunktion für die BIW-Masse eine Regressionsfunktion für das zulässige Fahrzeuggesamtgewicht  $m_{zGg}$  eingeführt, Abbildung 4.10. Die Modellbildung hierfür erfolgt ebenfalls anhand der Ersatzvolumen aus Formel (4.3) und (4.4). Über die prozentuale Abweichung der zulässigen Gesamtmasse eines im *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo*del simulierten Fahrzeugs und dem genannten Übertragungsfaktor wird der entsprechende prozentuale Korrekturwert für das BIW-Gewicht bestimmt.

Das ermittelte Gewicht gilt für eine Karosserie aus Stahl mit einem Anteil höherfester Stähle, wie diese im Produktionszeitraum der Benchmarkfahrzeuge von 2002 bis 2012 üblicherweise eingesetzt wurden. Die genaue Zusammensetzung der Stähle der Karosserien lässt sich nicht ermitteln.

Für die Berücksichtigung von Aluminium, CFK und Material-Mischbauformen, wie diese immer häufiger im Automobilbau vorkommen, und eines gestiegenen oder überdurchschnittlich großen Anteils höherfester Stähle wird das berechnete Gewicht der Stahl-Karosserie mit einem entsprechenden Leichtbaufaktor multipliziert, Abbildung 4.11. Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen verwenden einen konservativen Faktor für die Materialsubstitution, weil das Ausgangsmodell des BIW-Gewichts bereits einen Grundanteil höherfester Stähle umfasst und eine optimierte Ausgangsbasis darstellt.

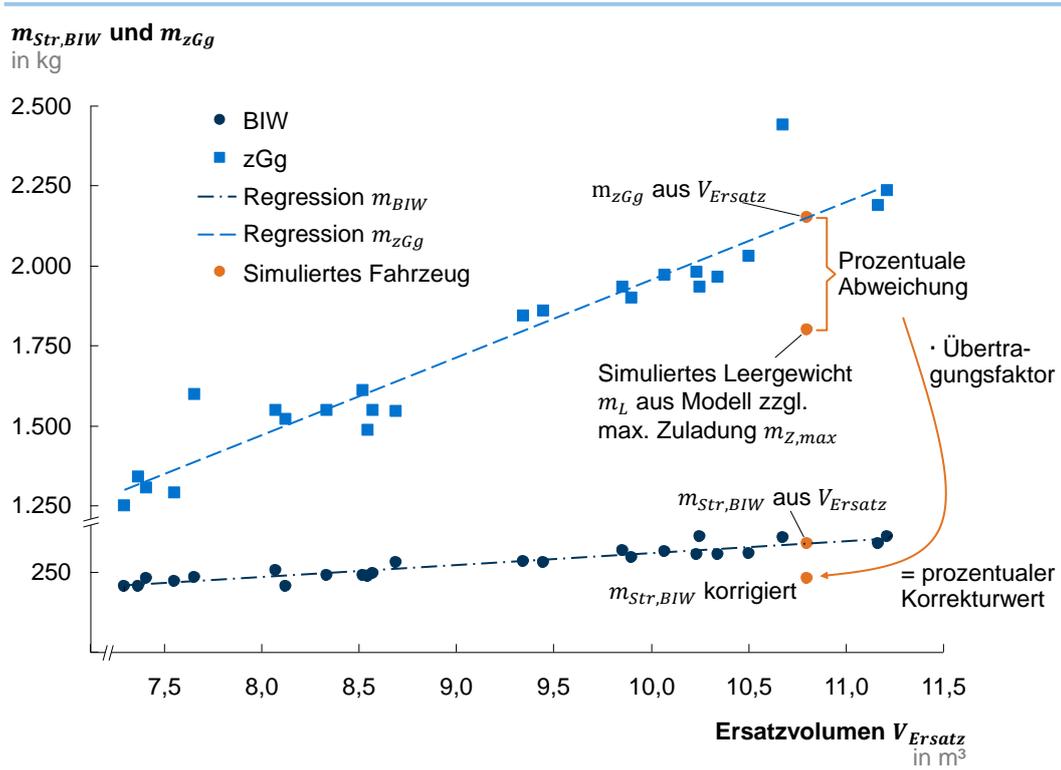


Abbildung 4.10: Korrektur des berechneten BIW-Gewichts in Abhängigkeit der zulässigen Gesamtfahrzeugmasse

Materialsubstitution Stahl durch	Gewicht von Stahl <sup>1</sup>	Quellen
Aluminium	70 Prozent	[ 60 Prozent [Kog12, S. 18] 56 Prozent [IAI07, S. 23 f.] 55 Prozent [Bra13, S. 513] 80 Prozent [Ben13]
CFK	56 Prozent	[ 48 Prozent [Kog12, S. 18] 60 ... 75 Prozent [Ben13] 40 Prozent [SGL12, S. 18] (46 Prozent ggü. Alu, bes. Eignung [Dur08])
Hochfester Stahl	90 Prozent	80 ... 90 Prozent [Bra13, S. 508]

Abbildung 4.11: Leichtbaufaktoren für von Stahl abweichende BIW-Materialien

<sup>1</sup> Bezugsbasis für den Substitutionsfaktor sind die Stahl-BIW der Benchmarkfahrzeuge aus dem Zeitraum 2002 bis 2012, die bereits über einen Anteil höherfester Stähle verfügen

#### 4.4.2 Fahrwerk

Das Modell für die Baugruppe Fahrwerk ist in die Komponentengruppen entsprechend Abbildung 4.12 unterteilt. In den Komponentengruppen Vorderachse (VA) und Hinterachse (HA) sind jeweils die Federn enthalten. Das Gewicht der Federn hängt sehr stark von der Bauform der Achse ab; eine eigenständige Betrachtung liefert daher keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Im Lenksystem ist das Lenkrad mit enthalten. Alle Komponentengruppen sind im Fahrwerk-Modell empirisch modelliert.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Fahrwerk	Vorderachse (VA)	McPherson-Achse, Mehrlenkerachse; jeweils mit/ohne Fahrschemel
	Hinterachse (HA)	Verbundlenker-, Mehrlenkerachse
	Stoßdämpfer vorne	
	Stoßdämpfer hinten	
	Lenksystem	
	Bremsanlage	
	Pedalerie	
	ABS-/ESP-Aggregat	ABS, ESP (inkl. ABS)
	Räder	Felge mit Standardreifen oder Run-Flat-Reifen

Abbildung 4.12: Gliederung der Baugruppe Fahrwerk in Komponentengruppen

Abbildung 4.13 zeigt als Auswahl die Ergebnisse für die Komponentengruppe Räder mit Standardreifen. Die Art der Felge (Stahlfelge, Aluminium-Druckguss) ist bei gleichen Dimensionen weitgehend gewichtsneutral; daher wurde das Felgenmaterial für das Gewicht nicht berücksichtigt und Reifen und Felge zusammen als Rad modelliert. Eine getrennte Berücksichtigung des Querschnittsverhältnisses des Reifens führt zu keiner Modellverbesserung.

Die Auswahl eines Reifentyps bei den Rädern (Standard oder Run Flat) beeinflusst das Gewicht des Reifens und des mitzuführenden Werkzeugs. Letzteres wird in der Baugruppe Sonstiges (Abbildung 4.6 bzw. Absatz 4.4.8) berücksichtigt. Bei Run-Flat-Reifen entfallen das wählbare Pannenset und das Ersatzrad.

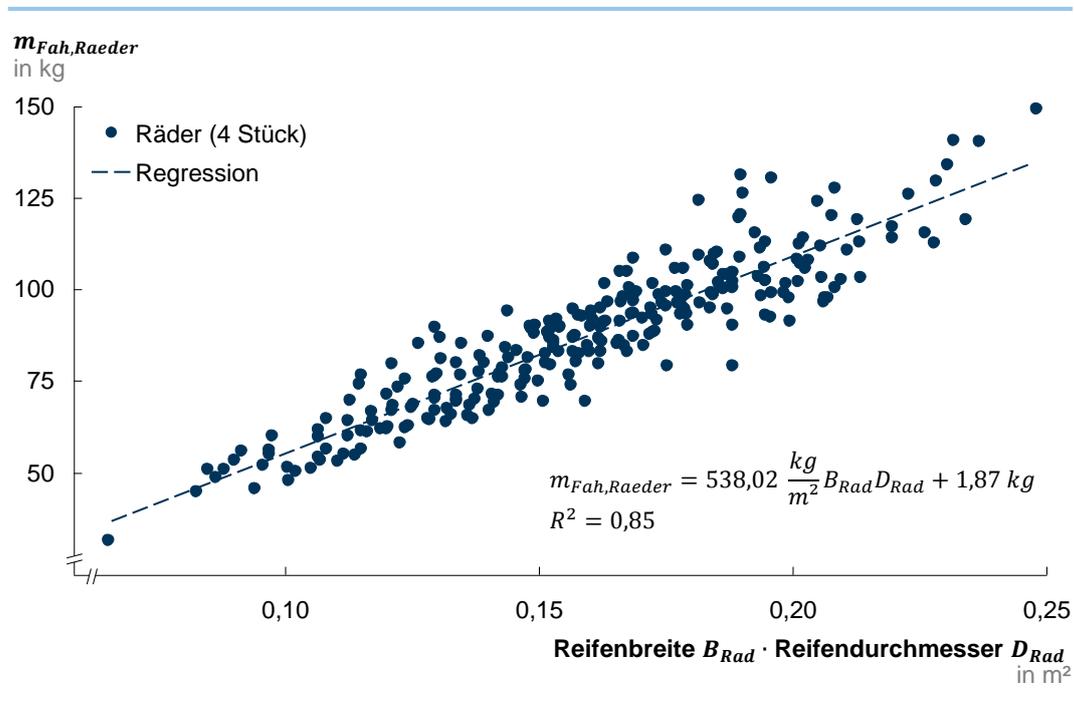


Abbildung 4.13: Modell für die Masse der Komponentengruppe Räder

### 4.4.3 Antriebsstrang

Der Antriebsstrang ist, neben dem Energiespeicher, eines der hauptsächlichen Unterscheidungsmerkmale von ICEV und BEV. Entsprechend gibt es im *Gewichtsrchner* zwei getrennte Teilmodelle. Innerhalb der Modelle werden verschiedene Topologien berücksichtigt.

#### 4.4.3.1 Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge

Abbildung 4.14 zeigt die Unterteilung des Antriebsstrangs für BEV in Komponentengruppen. Die berücksichtigte Topologie ist eine Bauform mit einem Heckmotor und direktem Hinterradantrieb. Eine Bauform mit Frontmotor und Vorderradantrieb bietet sich für BEV ebenfalls an, wird hier jedoch nicht betrachtet. Der Unterschied bei letztgenannter Bauform liegt, in Bezug auf das Gewicht, hauptsächlich in der Kabelführung des Hochvoltsystems (Absatz 4.4.7).

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Antriebsstrang	Motor	Synchron, asynchron
	Getriebe	Feste Übersetzung, optional Torque-Vectoring-Getriebe
	Differenzial	Nicht bei Torque-Vectoring-Getriebe
	Seitenwellen	
	Kühlsystem	
	Ölhaushalt	

Abbildung 4.14: Gliederung der Baugruppe Antriebsstrang in Komponentengruppen für BEV

Für den Elektromotor stehen eine permanenterregte Synchronmaschine (PSM) und eine Asynchronmaschine (ASM) zur Auswahl. Das Getriebe umfasst die Varianten eines konventionellen, zweistufigen Übersetzungsgetriebes und eines Torque-Vectoring(TV)-Getriebes [Höh09], wie dieses im Mute [Mat11] eingesetzt wird. Bei einem TV-Getriebe entfällt das Differenzial.

In einem ersten Schritt wurden aufgrund fehlender Daten für Elektrofahrzeuge alle Baugruppen, wie in [Fuc13a] und [Gar12] beschrieben, physikalisch modelliert mit entsprechenden physikalischen Schnittstellen zwischen den Baugruppen, Abbildung 4.15.

Der Vergleich mit Daten existierender Elektromotoren, beispielsweise von [Pes13], zeigt allerdings, dass das physikalische Modell des Elektromotors mit den zur Verfügung stehenden Modellparametern deutlich abweichende Ergebnisse liefert. Mit den bekannten und zugänglichen physikalischen Zusammenhängen kann kein zufriedenstellender Kompromiss aus parametrischer Modellierung, Rechengeschwindigkeit, Genauigkeit und manuellem Bedienungsaufwand gefunden werden.

Für die später gezeigten Simulationsergebnisse wird das physikalische Modell des Elektromotors durch ein empirisches Modell auf Basis von Datenblättern ersetzt, Abbildung 4.16.

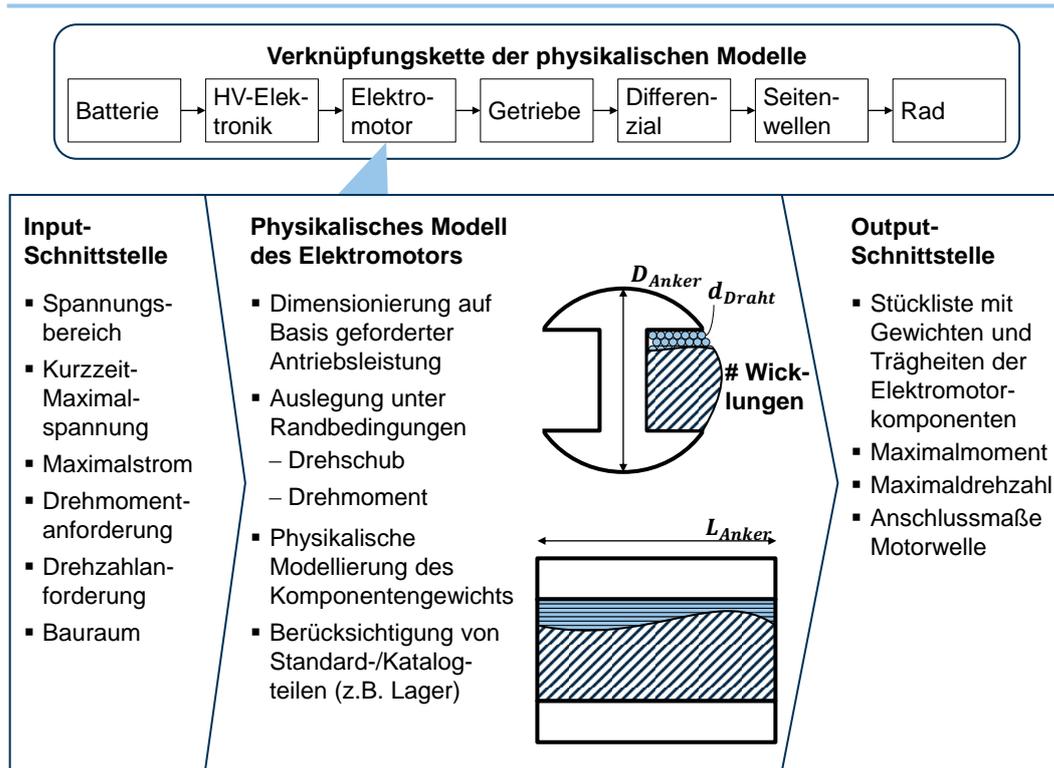


Abbildung 4.15: Physikalische Modellierung des Elektromotors  
vgl. [Fuc13a]

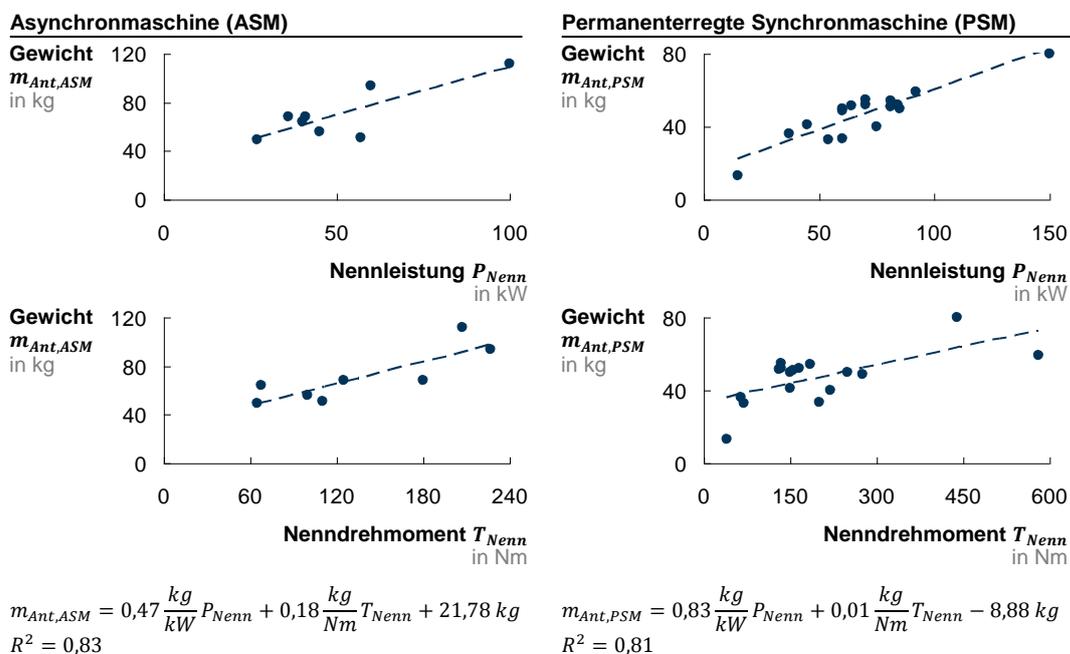


Abbildung 4.16: Modell für die Masse der ASM und PSM in Abhängigkeit von Leistung und Drehmoment  
Rohdaten aus Herstellerangaben (Anhang B, [Jak13, S. xxiv])

#### 4.4.3.2 Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge

Der Antriebsstrang für ICEV setzt sich aus den Komponentengruppen entsprechend Abbildung 4.17 zusammen. Die berücksichtigten Topologien umfassen einen Diesel- und Otto-Frontmotor mit Vorderrad- oder Hinterradantrieb. Für das Getriebe stehen ein manuelles Schaltgetriebe mit Kupplung und ein Automatikgetriebe zur Verfügung.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Antriebsstrang	Motor	Otto, Diesel
	Motoröl	
	Getriebe	Schaltgetriebe, Automatikgetriebe
	Getriebeöl	
	Kupplung	Nur bei Schaltgetriebe
	Differenzial mit Seitenwellen und ggf. Kardanwelle	Kardanwelle nur bei Hinterradantrieb
	Kühlsystem ohne Kühlmittel	
	Kühlmittel	
	Luftsystem	
	Abgasanlage	

Abbildung 4.17: Gliederung der Baugruppe Antriebsstrang in Komponentengruppen für ICEV

Die Modelle für alle Komponentengruppen unterscheiden die Bauformen Diesel und Otto, ohne dass dies in Abbildung 4.17 extra vermerkt ist. Für die Komponentengruppen Motor, Getriebe und Differenzial konnte anhand der Benchmarkdaten kein hinreichender Unterschied nachgewiesen werden; diese Komponentengruppen verwenden eine identische Regressionsfunktion für Otto- und Dieselmotoren. Abbildung 4.18 zeigt exemplarisch die empirische Modellierung des Verbrennungsmotors.

[FAT11, S. 77 ff.] untersucht ebenfalls ICEV-Motoren und kommt zu demselben Ergebnis, dass das Motorgewicht unabhängig von der Bauform des Motors ist und nur von dem maximalen Antriebsdrehmoment abhängt, Formel (4.5). [FAT11] betrachtet sowohl Reihen- als auch V-Motoren.

$$m_{Ant,Mot[Fat11]} = 0,2998 \frac{kg}{Nm} T_{max} + 59,24 kg \quad (4.5)$$

Ein Antriebsdrehmoment von 200 Nm ergibt auf Basis der Regressionsfunktion dieser Arbeit aus Abbildung 4.18 ein Motorgewicht von 105,7 kg. Dieses liegt rund 11 Prozent unter dem Wert von 119,2 kg, der mit Formel (4.5) aus [FAT11] für das gleiche Drehmoment berechnet wird. Allerdings ist die genaue Bauteilzuordnung in [FAT11] nicht bekannt; diese kann von der in dieser Arbeit vorgenommenen Bauteilzuordnung zu den Komponentengruppen abweichen.

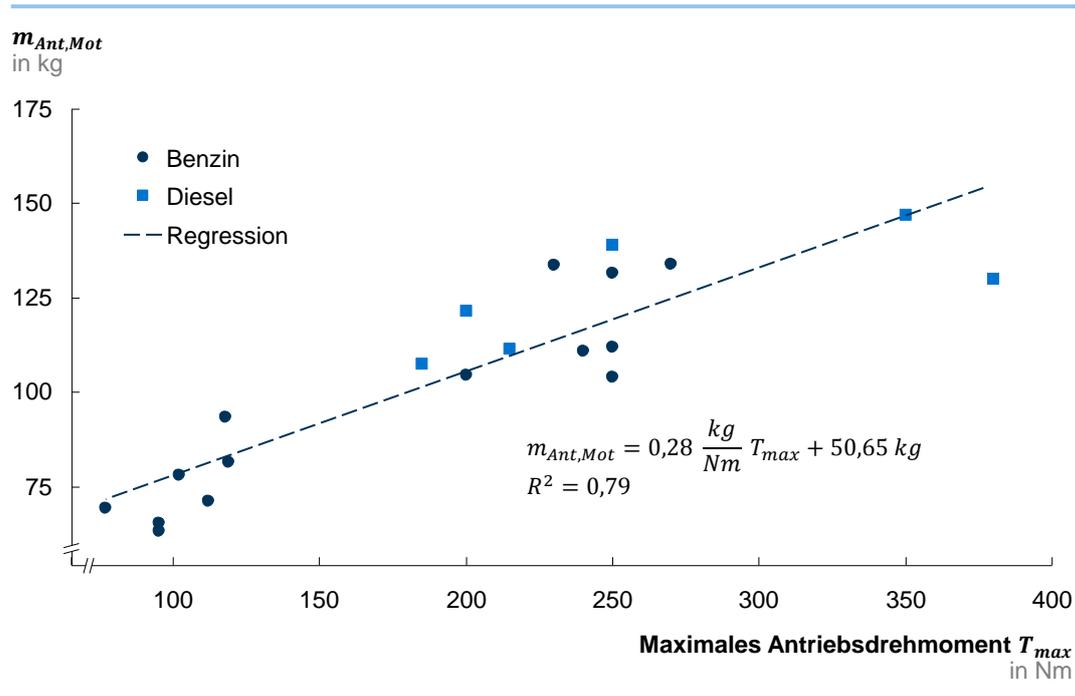


Abbildung 4.18: Modell für die Masse des Verbrennungsmotors  
vgl. [Kon13, S. 22]

#### 4.4.4 Energiespeicher

Das Energiespeichersystem für BEV wird vollständig getrennt von dem Energiespeichersystem für ICEV betrachtet. Konventionelle, mit Kraftstoff betriebene Systeme weisen eine deutlich höhere Systemenergiedichte auf als Batteriesysteme für BEV [Bar11, S. 8]. Die Energiedichte von Batteriezellen und -systemen ist in den letzten Jahren stark angestiegen, liegt aber dennoch deutlich unter der konventioneller Kraftstoffsysteme. Für beide Antriebsformen wird das Energiespeichergewicht auf Basis der erforderlichen Energiemenge zur Erfüllung der Auslegungreichweite berechnet (siehe Abschnitt 4.5).

##### 4.4.4.1 Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge

Für die Gewichts Berechnung des Batteriesystems bietet das Modell abhängig von dem Detaillierungsgrad der für die Modellierung zur Verfügung stehenden Informationen zwei Möglichkeiten. Das Batteriesystem wird im Modellblock *Simulationsergebnisse* nicht weiter unterteilt.

##### Berechnung über Systemenergiedichte

Das Gewicht eines Batteriesystems berechnet sich in der einfachsten Näherung aus der erforderlichen Batteriekapazität und der Systemenergiedichte. Die Systemenergiedichte wird frei eingegeben oder anhand eines Referenzwerts von bestehenden BEV entsprechend Abbildung 4.19 gewählt.

<b>Fahrzeug</b>	<b>Kapazität in kWh</b>	<b>Gewicht in kg</b>	<b>System- energiedichte in Wh/kg</b>	<b>Quelle</b>
Renault Twizy	6,1	99	62	[Ren13]
Renault Fluence	22	280	79	[Ren13]
Mitsubishi i-MiEV	16	200	80	[Mit12]
Mute	10	100	100	[FTM11]
Tesla Roadster	56	408	137	[Tes12]
Tesla Model S	85	544	156	[Bur14]
Conchifera (Visio.M, Prototyp)	13,5	82	165	[Ham13]
Conchifera (möglich, 2013)	16,5	82	202	[Ham13]

Abbildung 4.19: Energiedichte von Batteriesystemen bei BEV

### Berechnung über Zellenergiedichte

Als zweite Möglichkeit bietet das Modell die Berechnung ausgehend von der Zellenergiedichte und einem Füllfaktor an. Abbildung 4.20 zeigt eine Auswahl an Zellen.

<b>Hersteller, Bezeichnung</b>	<b>Zellchemie</b>	<b>Zellaufbau</b>	<b>Spannung in V</b>	<b>Kapazität in mAh</b>	<b>Zell- energiedichte in Wh/kg</b>
A123, ANR26650M1A	LiFePO <sub>4</sub>	Zylindrisch	3,3	2.300	103
A123, AMP20M1HD-A	LiFePO <sub>4</sub>	Pouch	3,3	20.000	135
Sony, Konion 1300	LiMn	Zylindrisch	3,8	1.300	118
Panasonic, CGR 18650 CG	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	Zylindrisch	3,6	2.250	184
Panasonic, CGA 103450 A	LiCo	Prismatisch	3,7	1.950	185
Varta, LIP 103450 SC	Li-Polymer	Prismatisch	3,7	1.880	174
Panasonic, NCR 18650 PF	LiNiCOMnO <sub>2</sub>	Zylindrisch	3,6	2.900	225
Panasonic, NCR 18650 B	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	Zylindrisch	3,6	3.400	263

Abbildung 4.20: Technische Daten von Batteriezellen  
Hersteller-Datenblätter

Für die Verschaltung der Batteriezellen und den Aufbau des Batteriepacks sind zusätzliche Teile erforderlich, beispielsweise das Batteriegehäuse, Zellhalterungen, Bauteile und ggf. Fluid zur Zellkühlung, Material für die Verschaltung und Kontaktierung der Zellen und Batteriemangement-Elektronik. Der Füllfaktor gibt an, wie groß das Gewicht der gesamten Batterie bezogen auf das Gewicht der Batteriezellen ist. Der Füllfaktor hängt von dem Zelltyp (Rundzellen, prismatische Zellen, Pouch-Zellen), der Aufbauform der Batterie, der konstruktiven Umsetzung und weiteren Faktoren ab. Bei der Batterie des Mute-Fahrzeugs beträgt der Füllfaktor beispielsweise 1,64 [FTM11]. Der Füllfaktor eines Conchifera-Batteriesystems liegt bei 1,41 [Ham13]. Abbildung 4.21 zeigt das mit diesem Verfahren berechnete Batteriegewicht für unterschiedliche Zellenergiedichten und einen Füllfaktor von 1,5 sowie die zuvor angegebenen Batteriegewichte von realen Fahrzeugen.

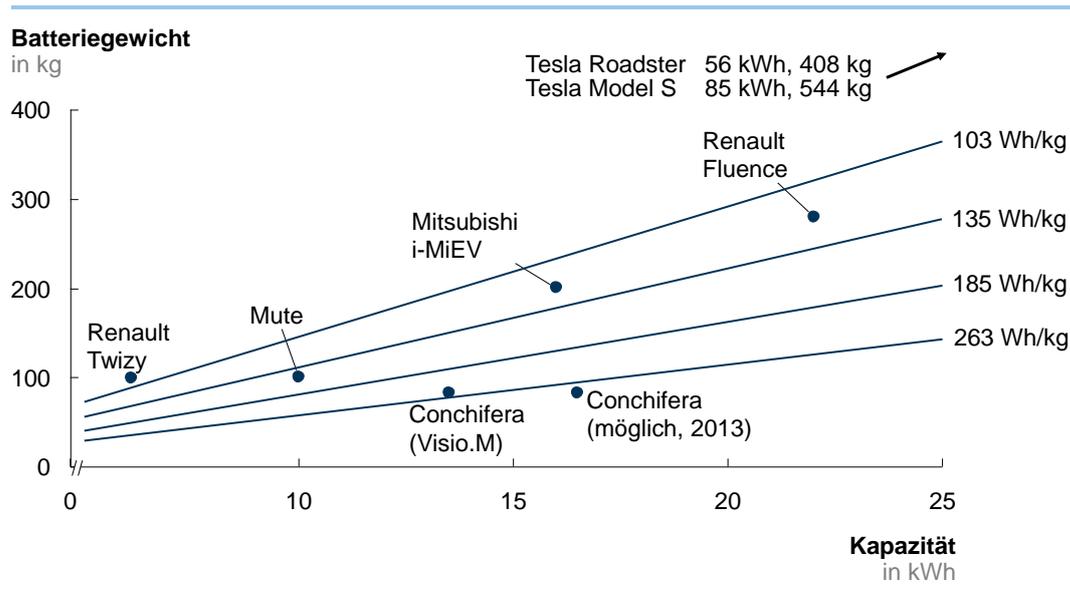


Abbildung 4.21: Masse des Batteriesystems in Abhängigkeit von der Kapazität bei BEV

Angenommener Füllfaktor von 1,5 für die Werte ausgehend von Zellenergie-dichten

#### 4.4.4.2 Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge

Das Energiespeichersystem für ICEV ist empirisch modelliert. Das Modell unterscheidet zwischen den Kraftstoffarten Diesel und Otto und unterteilt das Energiespeichersystem entsprechend Abbildung 4.22.



Abbildung 4.22: Gliederung der Baugruppe Energiespeicher in Komponentengruppen für ICEV

#### 4.4.5 Exterieur

Das Fahrzeugexterieur wird vom Design eines Fahrzeugs geprägt. Die technische Umsetzung von Designvorgaben führt häufig zu schwereren Bauteilen im Vergleich zu einer ausschließlich auf funktionelle Aspekte ausgerichteten, gewichtsoptimalen Verkleidung der Fahrgastzelle und entsprechender Integration der weiteren Komponenten. Zusätzlich verschieben sich die Gewichte zwischen den Komponenten je nach Betonung des Designs.

Abbildung 4.23 zeigt diese Aspekte anhand zweier Beispiele. In Abbildung 4.23 oben sind drei extreme Ausprägungen der Frontscheinwerfer dargestellt. Das Verhältnis von Scheinwerfer zu umgebendem Blech im Vorderwagen unterscheidet sich bei den drei Fahrzeugen deutlich. Abbildung 4.23 unten vergleicht die Kotflügel zweier Fahrzeuge. Das Fahrzeug links weist eine deutlich größere Fläche des Kotflügels auf. Hierbei ver-

schwimmen technische und designbestimmte Gründe: Das Fahrzeug links hat einen längs und das Fahrzeug rechts einen quer eingebauten Motor.



Abbildung 4.23: Beeinflussung des Fahrzeugexteriours durch das Design

Oben: Gestaltung der Frontpartie, insbesondere der Scheinwerfer; unten: Gestaltung der Seitenfläche, beispielsweise der Kotflügel und dem Verhältnis aus Fenster- zu Türfläche

[Nis13], [Fia09, S. 2], [Bay13b], [Bay13a], [Vol13a, S. 33]

Aufgrund der aufgezeigten Unterschiede erfolgt die Modellierung der Exterieurbauteile ausschließlich empirisch. Das Modell unterscheidet die Komponentengruppen entsprechend Abbildung 4.24.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Exterieur	Türen	2-, 4-Türer; Stahl, Aluminium, CFK
	Frontklappe	Stahl, Aluminium, CFK
	Heckklappe	Stahl, Aluminium, CFK
	Verglasung	
	Windschutzscheibe	Standard-, IR-Filter- und IR-Reflektions-Glas
	Seitenscheiben	Glas, PC (nur hintere Scheiben)
	Heckscheibe	Glas, PC; Standard-, IR-Filter- und IR-Reflektions-Glas (bzw. PC)
	Stoßstangen	
	Kotflügel	Stahl, Aluminium, CFK
	Scheibenwischer	
Außenspiegel		
Unterbodenverkleidung		

Abbildung 4.24: Gliederung der Baugruppe Exterieur in Komponentengruppen

Innerhalb der Komponentengruppen werden unterschiedliche Aufbauformen berücksichtigt: die Karosserieform für das Gewicht der Heckklappe und die Anzahl der Türen für das Gewicht der Türen.

Das für die Türen und Klappen verwendete Material beeinflusst deutlich deren Gewicht. Fahrzeughersteller nutzen oftmals Leichtbaumaterialien für diese Bauteile zur Reduzierung des Gesamtfahrzeuggewichts und zur Optimierung der Schwerpunktlage. Das Modell ermöglicht daher für die Komponentengruppen Türen, Frontklappe und Heckklappe die Auswahl zwischen den Materialien Stahl, Aluminium und CFK analog zur Materialvariation für die Struktur.

Abbildung 4.25 zeigt das Ergebnis der empirischen Gewichtsmodellierung für die Türen. Für eine empirische Modellierung von Fahrzeugen mit zwei Türen stehen nicht ausreichend Fahrzeuge zur Verfügung. Ausgehend von den vorhandenen Datenpunkten wurde daher ein Faktor für zwei Türen, ausgehend von dem empirischen Modell für vier Türen, ermittelt.

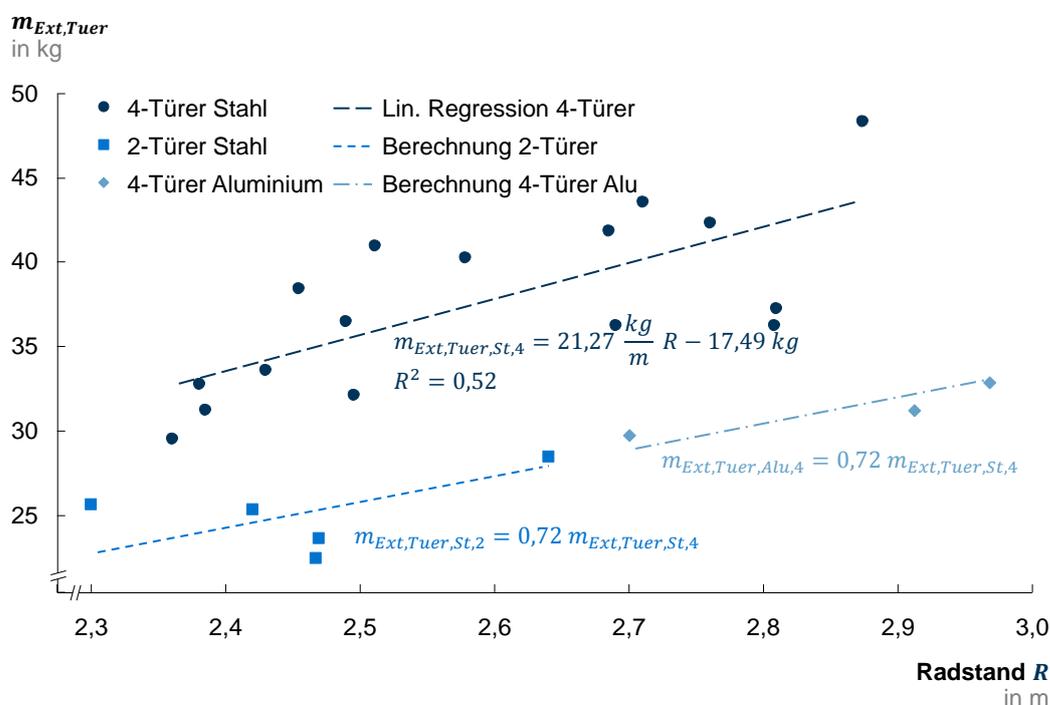


Abbildung 4.25: Modell für die Masse der Türen

Das Gewicht der Scheiben wird über die Fläche und Dicke der Scheibe sowie die Dichte des Glases berechnet. Nach [Her12] wird im europäischen Markt für die Windschutzscheibe (Verbundsicherheitsglas) und die Heckscheibe überwiegend nur eine Glasdicke verbaut. Für Seitenscheiben gibt es zwei Glasdicken; entweder einfaches Glas oder ein dreilagiger Aufbau mit einer Folie in der Mitte. Da die Fläche der Scheibe unabhängig von dem eingesetzten Material und der Scheibendicke ist, wird dieser Weg für die Modellierung gewählt. So können neue Materialien (beispielsweise Polycarbonat für feststehende Seitenscheiben) und abweichende Dicken berücksichtigt werden.

#### 4.4.6 Interieur

Die Modellierung des Interieurs erfolgt aus den gleichen Gründen wie beim Exterieur auf empirischer Basis. Das Gewichtsmodell unterteilt die in Abbildung 4.26 dargestellten Komponentengruppen.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Interieur	Sitze	
	└ Fahrer-/Beifahrersitz	Standard-Einzelsitz
	└ Rücksitzbank	Durchgehende Sitzbank, Einzelsitze
	Sicherheitssysteme	
	└ Airbags Fahrer/Beifahrer	Seitenairbags, Kopfairbag
	└ Airbags erweitert	
	└ Rückhaltesystem	
	└ Zus. Ausstattung	Aktive Motorhaube
	Innenverkleidung	
	└ Seitenverkleidung und Säulen	
	└ Dach	
	└ Türen	Inklusive Aktuatoren und Taster
	└ Heckklappe und Kofferraum	
	Modulquerträger	
	Klappen und Fächer	
	└ Handschuhfach	
	└ Hutablage	
	└ Türablage(n)	
	└ Mittelablage	
	└ Kofferraumablage	
Armaturenbrett		
Mittelkonsole		
Infotainment		
└ Radio		
└ Lautsprecher vorne		
└ Lautsprecher hinten		
└ Subwoofer		
└ LC Display		
Instrumentation und Bedienelemente		
HVAC		
└ Heizung		
└ Klima		
Dämmung und Teppich		

Abbildung 4.26: Gliederung der Baugruppe Interieur in Komponentengruppen

Im Interieur ist die funktionsbereinigte Zuweisung der Bauteile zu den Komponentengruppen und eine Berücksichtigung von Sonderausstattung wichtig, um eine Verfälschung des Bauteilgewichts zu vermeiden. Dies lässt sich anhand der Lautsprecher verdeutlichen: Die Anzahl der Lautsprecher variiert je nach Fahrzeug zwischen zwei und 16 Stück; die Lautsprecher werden teilweise in den Türen, unter oder auf dem Armaturenbrett und seitlich neben der Hutablage verbaut. Daher ist es unvermeidbar, die Bauteile neben der Position im Fahrzeug auch nach ihren funktionellen Eigenschaften zu sortieren. Im Vergleich zu den anderen Baugruppen führt dies zu einer sehr feinen Untergliederung des Gewichtsmodells für das Interieur.

Anhand der Informationen in den Stücklisten der Benchmarkfahrzeuge lassen sich die Bauteile nicht immer eindeutig zuweisen. Die größte Ungenauigkeit gibt es im Bereich Dämmung und Teppiche. Häufig sind Interieurmaterial und Dämmmaterial in einem Bauteil vereint, wie beispielsweise der Teppichboden im Fußraum. Getrennte Modelle liefern nur unzureichende Ergebnisse, so dass Dämmmaterial und Teppiche zu einer Komponentengruppe zusammengefasst werden.

Der Fahrkomfort und das Fahrzeugsegment spielen eine entscheidende Rolle bei dem Gewicht des Interieurs. Bei gleichem Funktionsumfang und gleicher Fahrzeuggröße sind Premiumfahrzeuge schwerer als Fahrzeuge aus dem Niedrigpreissegment, weil die Interieurbauteile aus hochwertigeren Materialien mit einer besseren Haptik gefertigt werden,

und mehr Geräuschkämmung verbaut wird. Im Modell wird dies über einen Komfortfaktor für die Sitze und einen Wertigkeitsfaktor  $WF$  für das Interieur berücksichtigt. Für die Benchmarkfahrzeuge werden diese Faktoren anhand der Bewertungsergebnisse für diese Fahrzeuge aus der Zeitschrift Auto Motor und Sport ermittelt. Abbildung 4.27 zeigt als Beispiel die Regressionsfunktion für das Gewicht der Mittelkonsole, für die der Wertigkeitsfaktor berücksichtigt wird.

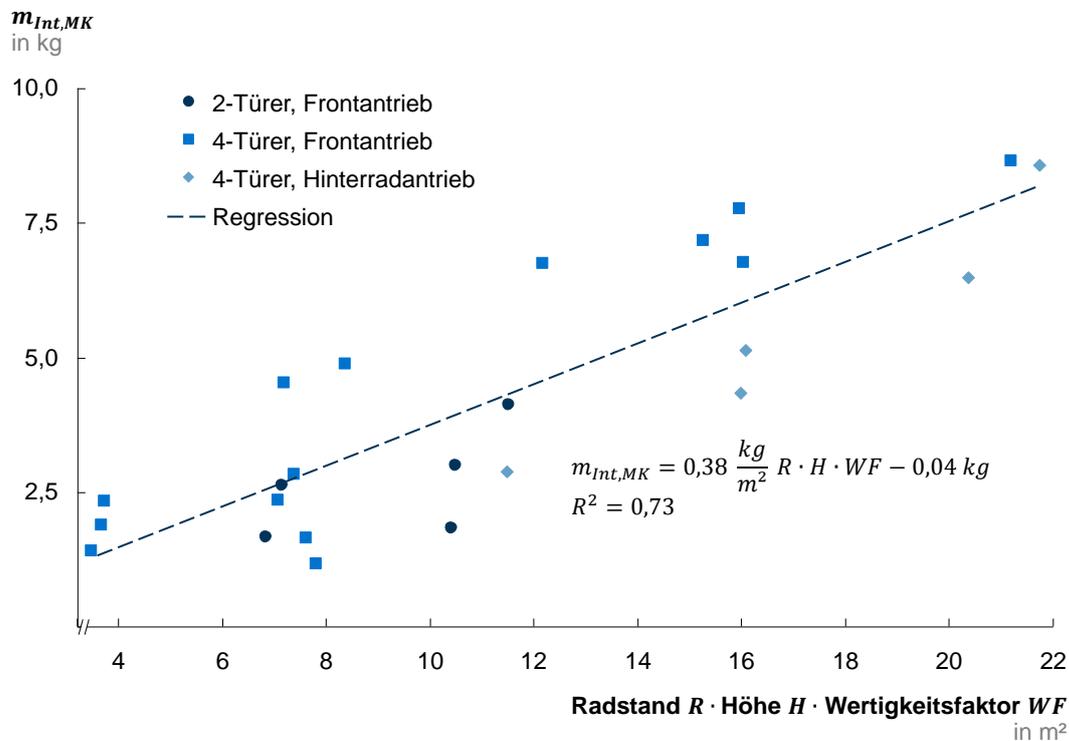


Abbildung 4.27: Modell für die Masse der Mittelkonsole

#### 4.4.7 Elektrik und Elektronik

In der Baugruppe Elektrik und Elektronik finden sich Bauteile, die bei BEV und ICEV ähnlich oder sogar gleich sind. Dazu zählen beispielsweise die Scheinwerfer und Teile des Niedervoltnetzes. Diese Komponentengruppen werden für BEV und ICEV einheitlich modelliert. Zusätzlich verfügen BEV über ein Hochvoltnetz. Dieses wird für BEV zusätzlich hinzugefügt. Die Baugruppe gliedert sich entsprechend Abbildung 4.28.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Elektrik und Elektronik	Hochvolt	
	Verkabelung	
	Leistungselektronik	
	Niedervolt	
	Verkabelung	
	Pufferbatterie	Li-Io- oder Bleibasis, 12 V
	Fahrzeugbeleuchtung	
	Außenbeleuchtung	Hauptscheinwerfer, Nebelscheinwerfer, Hecklichter, Scheinwerferwaschanlage
	Innenbeleuchtung	

Abbildung 4.28: Gliederung der Baugruppe Elektrik und Elektronik in Komponentengruppen

Für die Komponentengruppen Fahrzeugbeleuchtung und Niedervoltnetz wurden die empirischen Auswertungen der Benchmarkfahrzeuge verwendet, Abbildung 4.29. Im Bereich Hochvolt wurden die Regressionsfunktionen für das Gewicht des Leistungselektronik-Umfangs anhand von Komponentendaten aus [Gar12] abgeleitet.

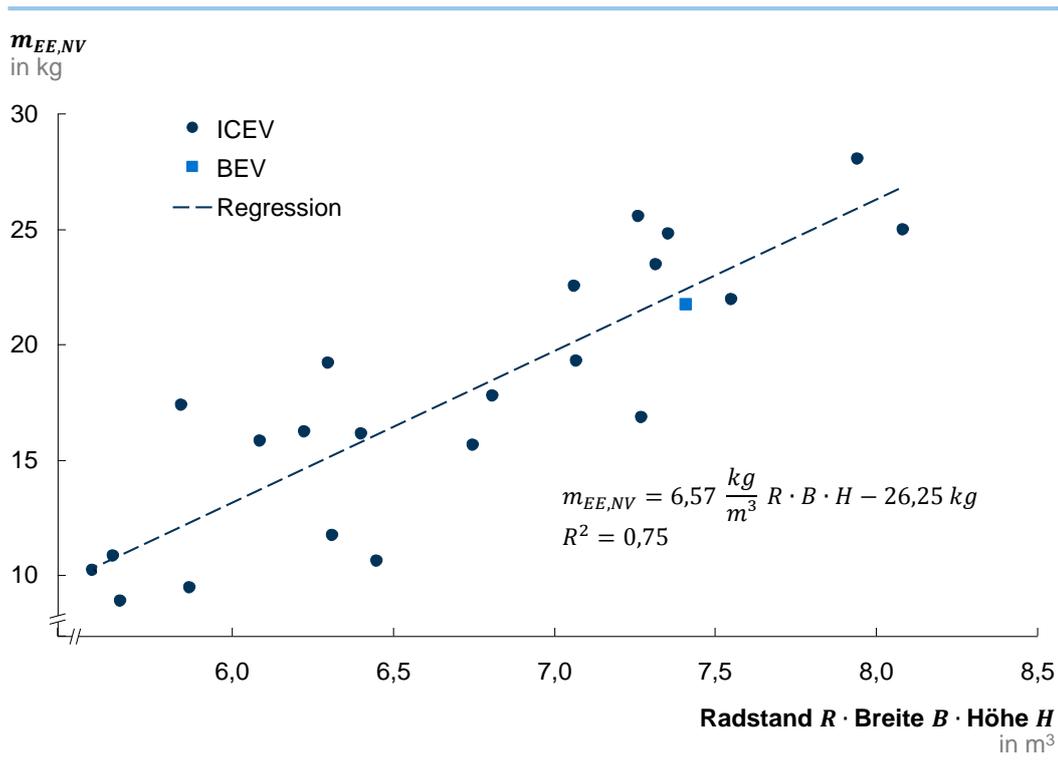


Abbildung 4.29: Modell für die Masse der Niedervoltverkabelung

#### 4.4.8 Sonstiges

Die Baugruppe umfasst Bauteile, die in jedem Fahrzeug aus praktischen Gründen oder aufgrund von gesetzlichen Vorschriften mitgeführt werden müssen. Hierzu zählen ein Erste-Hilfe-Set, ein Warndreieck und ein Mobilitäts-Kit, entsprechend Abbildung 4.30. Das Mobilitäts-Kit lässt sich im Modell wählen und umfasst entweder einen Ersatzreifen, ein

Reifen-Reparaturset oder vier Run-Flat-Reifen. Im Fall der Run-Flat-Reifen ist das Gewicht dieser Komponentengruppe null, dafür steigt das Gewicht der Reifen im Fahrwerk (Absatz 4.4.2) an; ebenso werden die Run-Flat-Reifen im Modell beim Rollwiderstand (Absatz 4.6.2) und für den Drehmassenzuschlagsfaktor (Absatz 4.6.3) berücksichtigt. Ersatzreifen, Reifen-Reparaturset, Warndreieck und Erste-Hilfe-Set werden jeweils mit einem konstanten Gewichtswert angenähert.

Baugruppe	Komponentengruppe	Bauformen
Sonstiges	Erste-Hilfe-Set	Pannenset, Ersatzrad, Run-Flat-Reifen
	Warndreieck	
	Mobilitäts-Kit	

Abbildung 4.30: Gliederung der Baugruppe Sonstiges in Komponentengruppen

## 4.5 Simulation der Fahrzeuglängsdynamik

Die Berechnung der sekundären Gewichtseffekte und die iterative Ausführung des *Gewichtrechners* erfordern ein Fahrzeuglängsdynamik-Modell, anhand dessen der Energieverbrauch in einem wählbaren Fahrzyklus und die Fahrleistungen bestimmt werden.

Abbildung 4.31 zeigt gängige Fahrzyklen. Derzeit ist der NEFZ [Eur07] der in Europa gesetzlich vorgeschriebene Fahrzyklus. Der NEFZ definiert ein Geschwindigkeits-Zeit-Profil, das nachgefahren wird. Die Schaltzeitpunkte und Gänge (bei ICEV mit Handschaltung) werden vom Zyklus ebenfalls vorgegeben.

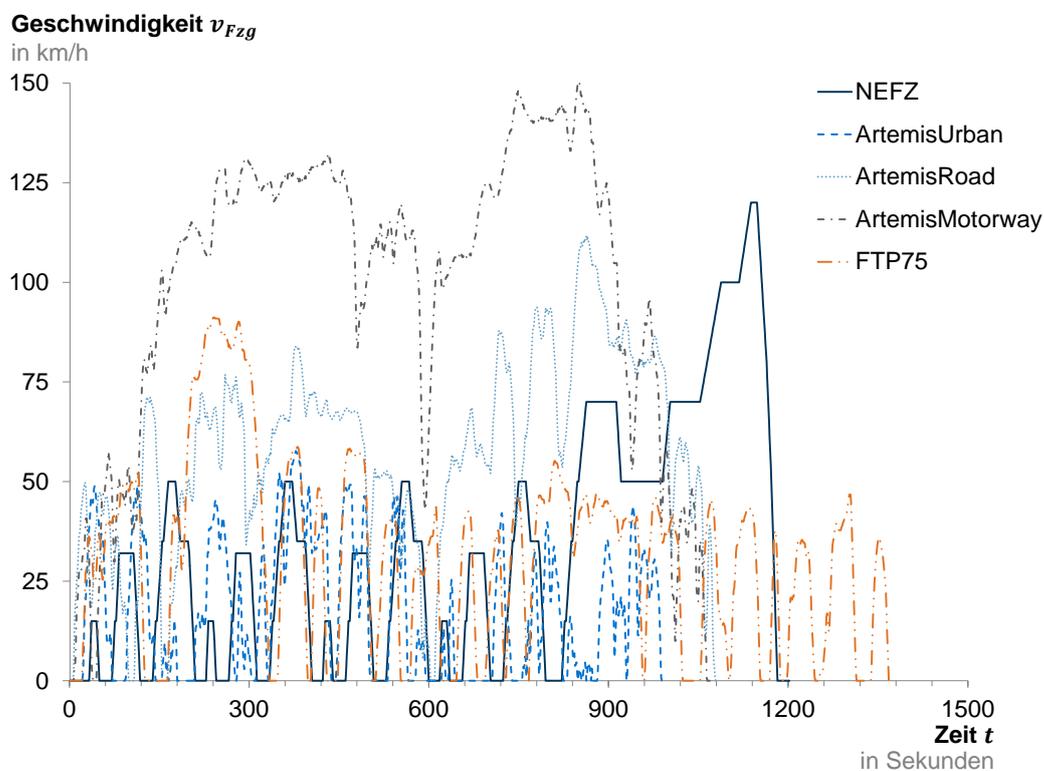


Abbildung 4.31: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ausgewählter Fahrzyklen  
Rohdaten aus [And04b]

Der NEFZ wird häufig kritisiert, das tatsächliche Verkehrsgeschehen nicht realistisch abzubilden und zu einem deutlich zu niedrigen Verbrauch zu führen [Tra13]. Dennoch bietet der NEFZ eine einheitliche Vergleichsbasis über Fahrzeuge hinweg und wird deshalb für die später gezeigten Simulationen verwendet.

Andere Fahrzyklen, wie beispielsweise die Artemis-Zyklen [And04a], versuchen, ein realistischeres Abbild des Verkehrsgeschehens zu geben. Der ArtemisUrban-Zyklus orientiert sich am Verkehrsgeschehen in der Stadt und weist eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit mit mehr Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen auf als der NEFZ.

Für das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo*dell können beliebige Fahrzyklen hinterlegt werden. Eine Berücksichtigung von kundenindividuellen Fahrzyklen ist genauso möglich. Um die Beschleunigungszeit des Fahrzeugs von einer Anfangs- auf eine Zielgeschwindigkeit zu bestimmen (als Standard hinterlegt ist von 0 auf 100 km/h), wird als Fahrzyklus die Zielgeschwindigkeit, multipliziert mit der Heaviside-Funktion (Sprungfunktion), vorgegeben. Der Zeitpunkt, zu dem die Fahrzeuggeschwindigkeit der Zielgeschwindigkeit entspricht, ist die gesuchte Beschleunigungszeit.

Aus der Geschwindigkeitsvorgabe eines Fahrzyklus lässt sich durch Ableiten die erforderliche Beschleunigung eines Fahrzeugs zum Folgen der Geschwindigkeitsvorgabe errechnen. Formel (2.2), (2.3) und (2.4) der Fahrwiderstandskräfte in die Zugkraftbedarfsgleichung (2.5) eingesetzt ergibt die resultierende Fahrwiderstandskraft. Formel (4.6) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Zugkraft  $F_Z$ , dem Motormoment  $T$ , dem Reifenradius  $r$  und der Gesamtübersetzung  $i_{ges}$  in einer gewählten Übersetzungsstufe vom Motor bis zum Rad.

$$F_Z = T \frac{i_{ges}}{r_{Rad}} \quad (4.6)$$

Mit Formel (4.6), ebenfalls in Formel (2.5) eingesetzt und nach  $T$  aufgelöst, lässt sich das Motormoment  $T_{erf}$  berechnen, das zum Folgen der Geschwindigkeitsvorgabe des Zyklus erforderlich ist, Formel (4.7).

$$T_{erf} = \frac{r_{Rad}}{i_{ges}} \left( \frac{1}{2} \rho c_W A v^2 + c_{RR} (m_L + m_Z) g + (e_i m_L + m_Z) a_{FZg} \right) \quad (4.7)$$

Mit Ausnahme der Luftdichte  $\rho$  und der Zuladung  $m_Z$  hängen alle Konstanten in Formel (4.7) von dem Fahrzeugkonzept ab und werden mit eigenen Modellen, wie in Abschnitt 4.6 beschrieben, angenähert.

Für einen Elektromotor wird die mechanische Leistung  $P_{mech}$ , die der Motor leistet, aus dem Motormoment  $T$  und der Motordrehzahl  $n_M$  mit Formel (4.8) berechnet. Über den Motorwirkungsgrad  $\eta_M$  und den Leistungselektronikwirkungsgrad  $\eta_{LE}$  wird mit Formel (4.9) die elektrische Leistung ermittelt. Integriert über die Zeit ergibt die elektrische Leistung den Energiebedarf, der aus dem Energiespeicher entnommen wird. Das Vorgehen für einen Verbrennungsmotor ist dabei ähnlich; statt des elektrischen Energiebedarfs wird der Kraftstoffbedarf ermittelt.

$$P_{M,mech} = 2\pi T n_M \quad (4.8)$$

$$P_{M,el} = \eta_M \eta_{LE} P_{M,mech} \quad (4.9)$$

Das maximale Motormoment hängt von der Drehzahl des Motors ab, der Motorwirkungsgrad von Moment und Drehzahl. Abschnitt 4.7 beschreibt detaillierter die Motorkennfelder und deren Verwendung. Mit Berücksichtigung eines Motorkennfeldes wird Formel (4.7)

zur Differenzialgleichung, weil nun die Beschleunigung vom Motormoment abhängt und das Motormoment wiederum von der jeweiligen Geschwindigkeit des Fahrzeugs, die die Motordrehzahl bestimmt.

Für den Leistungselektronikwirkungsgrad, der die elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs mit Ausnahme des Elektromotors abdeckt, wird in Anlehnung an die Werte aus [Hof10] ein durchschnittlicher Gesamtwirkungsgrad im Fahrzyklus von 89 Prozent angenommen.

Die numerische Umsetzung einer Längsdynamik-Simulation auf Basis von Formel (4.7) zeigt Abbildung 4.32. Die Fahrzyklen werden in diskrete Zeitschritte unterteilt. Für jeden Zeitschritt wird das erforderliche Motormoment zum Erreichen der Geschwindigkeitsvorgabe des Zyklus im nächsten Zeitschritt ermittelt. Liegt dieses angeforderte Motormoment über dem maximal lieferbaren Motormoment, wird stattdessen das maximale Motormoment entsprechend dem Motorkennfeld verwendet. Daraus werden die tatsächliche Beschleunigung und die Geschwindigkeit zum nächsten Zeitschritt errechnet.

Nebenverbraucher führen zu einem zusätzlichen Energieverbrauch, der im Modellblock *Berechnung Simulationsparameter des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* berücksichtigt wird.

Um im NEFZ einen möglichst geringen Verbrauchswert zu erzielen, kann bei ICEV die Lichtmaschine abgekoppelt werden; die Grundlast der elektrischen Energieversorgung des Fahrzeugs während des Testzyklus wird dann aus der Batterie entnommen. [Tra13, S. 23 ff.] und [Lie13, S. 2] legen nahe, dass dies gängige Praxis bei der Ermittlung der Hersteller-Verbrauchsangabe ist. Für die Simulationen in dieser Arbeit wird die elektrische Grundlast zwecks Vergleichbarkeit mit den Herstellerwerten für ICEV nicht berücksichtigt.

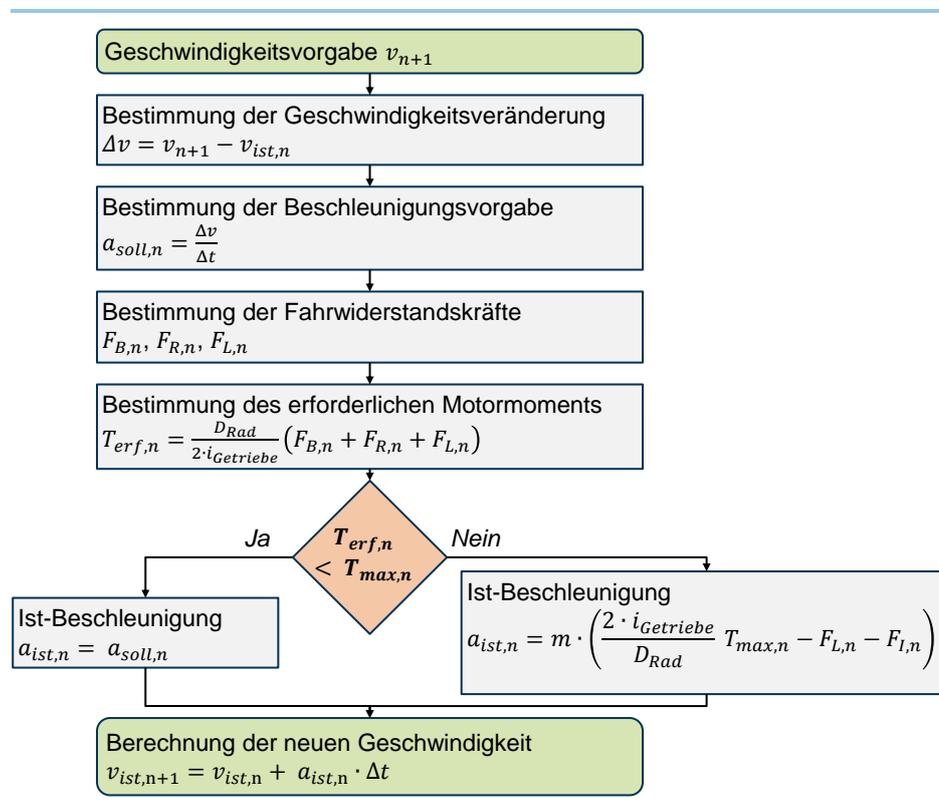


Abbildung 4.32: Ablauf der Längsdynamiksimulation

Für BEV wird im Modell eine Grundlast für die Energieversorgung von Bordnetz, elektronischen Systemen, Batteriekühlung und -überwachung etc. berücksichtigt und in Anlehnung an [Schi13] ein Pauschalwert von 700 W angenommen. Dieser wurde in [Schi14] erläutert und bestätigt.

Ein erwähnenswerter Aspekt von Elektrofahrzeugen ist die Rekuperationsfähigkeit in Verzögerungsphasen, durch die die Batterie wieder aufgeladen werden kann. Die maximal durch Rekuperation mögliche Verzögerungsrate kann im Modell eingestellt werden; der Standardwert beträgt 2 m/s<sup>2</sup>. Bei Verzögerungen über der Rekuperations-Verzögerungsrate wird die mechanische Bremse eingesetzt. Zusätzlich kann nicht die vollständige, rekuperierte elektrische Leistung gespeichert werden. Das verlustbehaftete Laden des Energiespeichers wird standardmäßig mit einem Wirkungsgrad von 60 Prozent berücksichtigt [FTM11].

## 4.6 Modelle für fahrzeugspezifische Kenngrößen

Die fahrzeugspezifischen Kenngrößen der Längsdynamiksimulation hängen von dem simulierten Fahrzeugkonzept ab. Die Kenngrößen der Fahrwiderstandsgleichungen werden durch eigene Modelle beschrieben, ebenso die Klimaleistung, sofern diese mit berücksichtigt werden soll.

### 4.6.1 Luftwiderstandsbeiwert

Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$  in Formel (2.2) bestimmt zusammen mit der Stirnfläche  $A$  eines Fahrzeugs den Luftwiderstand. Die Proportionen eines Fahrzeugs, beispielsweise Limousinen- oder Steilheckform, und andere konstruktive Merkmale bestimmen maßgeblich den  $c_W$ -Wert. [Bos02, S. 795] und [Bos10, S. 857 - 859] geben dazu relative Anhaltswerte.

$c_W$ -Werte aktueller ICEV dienen als Grundlage für ein empirisches Modell, um zu einem absoluten Wert für ein zu simulierendes Fahrzeug zu gelangen. Als Einflussgrößen dienen die von [Bos02] und [Bos10] genannten wichtigsten Parameter:

- Aufbauform (unterschieden wird Steilheck, Schrägheck und Limousine)
- Fahrzeuglänge
- Windschutzscheibenwinkel.

Abbildung 4.33 zeigt die ermittelten Regressionsfunktionen und die Beobachtungspunkte der ICEV. Für die Darstellung wurden die  $c_W$ -Werte der Referenzfahrzeuge anhand der Angaben aus [Bos02, S. 795] auf einen Windschutzscheibenwinkel von 40° normiert.

BEV können bessere  $c_W$ -Werte erzielen als in Größe und Leistung vergleichbare ICEV. Durch eine höhere Effizienz des Antriebsstrangs können die Kühlluftöffnungen verringert werden oder sogar ganz entfallen. Eine Motorraumdurchströmung ist nicht erforderlich. Mit Unterstützung der Bremsfunktion durch den Motor kann der Kühlluftstrom zu den Bremsen kleiner ausfallen. Diese Maßnahmen verbessern die Aerodynamik.

Zur Anpassung der Regressionsfunktionen an BEV werden die errechneten  $c_W$ -Werte für ICEV um jeweils einen Korrekturfaktor für Motorraumdurchströmung, Radverkleidung und Kühlluftstrom berichtigt. Der Korrekturfaktor wird anhand der Angaben aus [Bos10, S. 857] bestimmt.

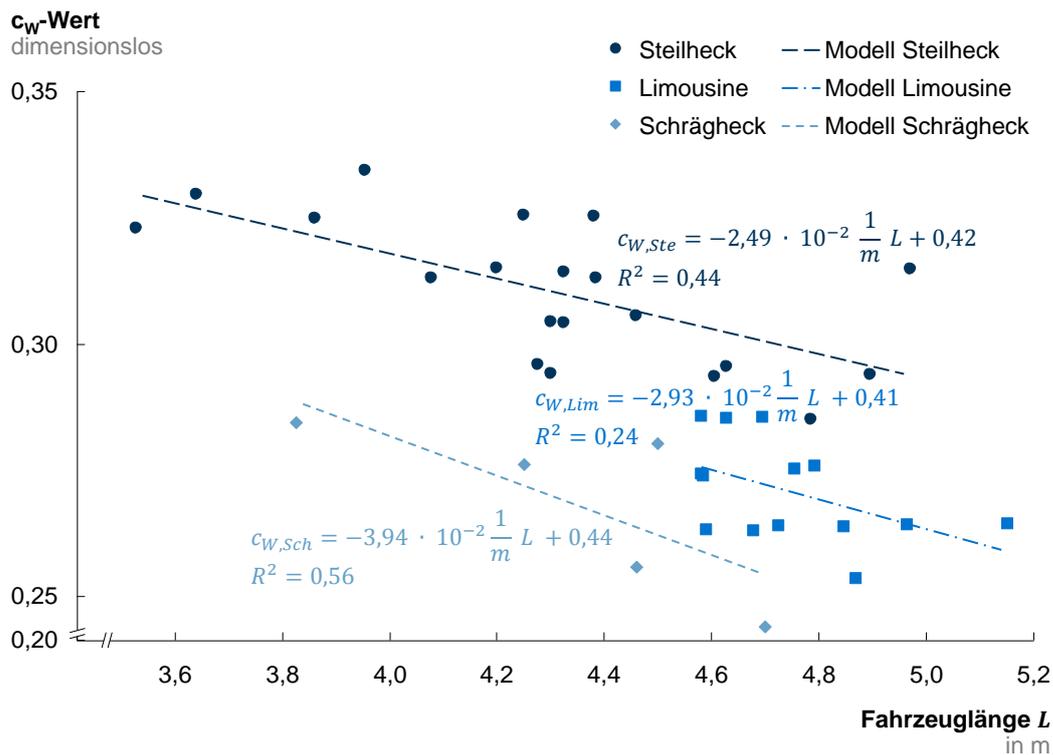


Abbildung 4.33: Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge für verschiedene Aufbauformen  
 Normiert auf einen Windschutzscheibenwinkel von 40°

#### 4.6.2 Rollwiderstandsbeiwert

Der Rollwiderstand eines Reifens steht im Zielkonflikt mit anderen Reifeneigenschaften, beispielsweise der Griffigkeit bei Nässe und dem Abrollgeräusch [Ove04, S. 21]. Der Rollwiderstandsbeiwert von gängigen PKW-Reifen aus 2012 liegt im Bereich von ca. 8 bis 12 kg/t. Spezielle Reifen, beispielsweise für Elektrofahrzeuge, können niedrigere Rollwiderstandsbeiwerte von bis zu 6 kg/t aufweisen [Ven13, S. 574]. Für die Klassifizierung von Reifen wurde 2012 ein EU-Label eingeführt. Das Label umfasst die Effizienzklassen A bis G und reicht von  $\leq 6$  kg/t (A) bis  $\geq 12,1$  kg/t (G).

Die wichtigsten den Rollwiderstand beeinflussenden Faktoren sind:

- Abmessungen, insbesondere Reifendurchmesser [Mic05, S. 89] und Reifenbreite [Lie12, S. 10]
- Luftdruck [Rei88, S. 173]
- Radlast [Rei88, S. 173]
- Geschwindigkeit [Rei88, S. 171]

Für das Rollwiderstandsmodell werden nur die Abmessungen und unterschiedlichen Effizienzklassen von Reifen betrachtet. Für die meisten Geschwindigkeitsbereiche der gängigen Fahrzyklen ist der Rollwiderstandsbeiwert weitgehend konstant. Erst bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten steigt der Rollwiderstandsbeiwert an, nach [Mic05, S. 13] ab etwa 100 bis 120 km/h und nach [Rei88, S. 171] ab rund 110 bis 150 km/h. Der Rollwiderstandsbeiwert wird daher als geschwindigkeitsunabhängig angenommen. Wird davon ausgegangen, dass für den Luftdruck die empfohlenen Werte eingestellt werden, und der

gewählte Reifen zur Fahrzeuggröße und Radlast passt, können auch diese beiden Effekte vernachlässigt werden.

Ausgehend von einem durchschnittlichen Rollwiderstandsbeiwert  $c_{RR,ref}$  für existierende Referenzreifen einer bestimmten Reifendimension (Index  $ref$ ) wird anhand der Reifenbreite  $B_{Rad}$  und des Reifendurchmessers  $D_{Rad}$  ein Rollwiderstandsmodell erstellt, Formel (4.10). Abbildung 4.34 zeigt die für die Modellerstellung verwendeten Rollwiderstandsbeiwerte für unterschiedliche Reifendimensionen.

$$c_{RR} = c_{RR,ref} \left( 1 + \frac{D_{ref} - D}{10^3} \right) \left( 1 + \frac{B - B_{ref}}{0,58 \cdot 10^3} \right) \quad (4.10)$$

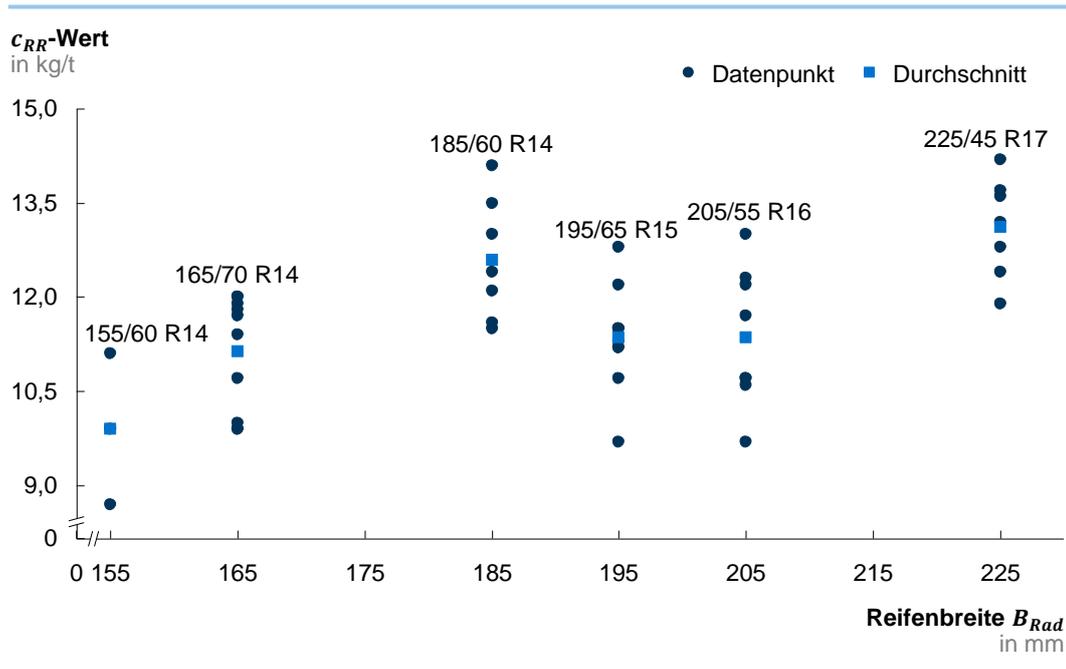


Abbildung 4.34: Rollwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der Reifenbreite für unterschiedliche Reifendimensionen  
Rohdaten aus [Rei02, S. 36 ff.]

### 4.6.3 Drehmassenzuschlagsfaktor

Der Drehmassenzuschlagsfaktor aus Formel (2.4) zur Berechnung des Beschleunigungswiderstands beschreibt den Masseffekt durch die rotatorische Beschleunigung der Komponenten des Antriebsstrangs und des Fahrwerks. Der Drehmassenzuschlagsfaktor  $e_i$  für die jeweilige Gangstufe  $i$  wird nach Formel (4.11) berechnet.  $\Theta_{red,i}$  ist das Massenträgheitsmoment des gesamten Antriebsstrangs, reduziert auf die Räder, das sich aus den Massenträgheitsmomenten der rotierenden Teile des Antriebsstrangs zusammensetzt [Hei11, S. 48].

$$e_i = \frac{\Theta_{red,i}}{m_L r_{Rad}^2} + 1 \quad (4.11)$$

Für BEV wird das Massenträgheitsmoment  $\Theta_{red,i}$  anhand der Massenträgheitsmomente der Antriebsstrangkomponenten

- Räder,
- Antriebswellen,

- Differenzial und
- Getriebe

auf Grundlage des physikalischen Antriebsstrangmodells errechnet. Der empirisch modellierte Elektromotor wird als rotierender Zylinder angenommen, für den sich das Massenträgheitsmoment mit Formel (4.12) berechnen lässt. Für den Antriebsmotor wird ein Masseanteil von 50 Prozent als rotierend angenommen. Über die Masse, die Materialdichte und die Zylinderlänge wird der Radius  $r$  ermittelt. Abbildung 4.35 links zeigt das reduzierte Massenträgheitsmoment für den BEV-Antriebsstrang bei einer Getriebeübersetzung von 9,4.

$$\theta = \frac{1}{2} m r^2 \quad (4.12)$$

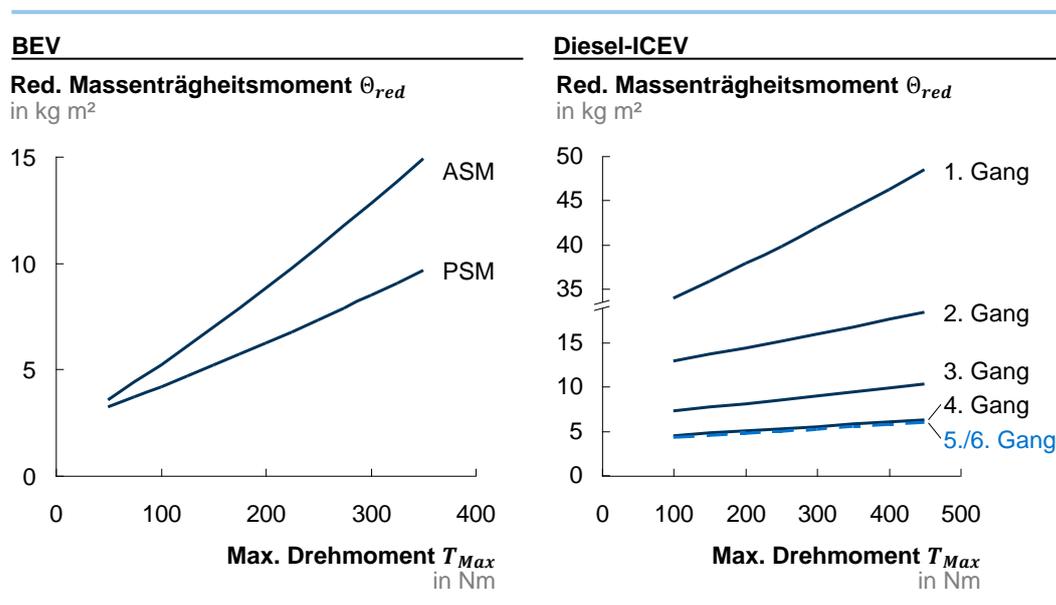


Abbildung 4.35: Reduziertes Massenträgheitsmoment des BEV- und des Diesel-ICEV-Antriebsstrangs

Für ICEV mit mehrstufigen, schaltbaren Getrieben hängt der Drehmassenzuschlagsfaktor sehr stark von der eingelegten Gangstufe ab. [Hak11, S. 158] gibt für typische Antriebsstränge einen Drehmassenzuschlagsfaktor im ersten Gang von 1,25 bis 1,50 und im sechsten Gang von 1,04 bis 1,06 an. Der Unterschied zwischen erstem und sechstem Gang kann bis zu 44 Prozent betragen und darf nicht vernachlässigt werden.

Für ICEV geht das Modell für den Drehmassenzuschlagsfaktor von den Standardwerten in [Hak11] aus. Diese werden je nach Gewicht des Antriebsstrangs skaliert:

- Für einen Referenz-Antriebsstrang mit 200 Nm Drehmoment werden die Gewichte der Antriebsstrangkomponenten anhand der Komponentengewichtsmodelle einmalig bestimmt.
- Über das Leergewicht des Referenzfahrzeugs und die Drehmassenzuschlagsfaktoren aus der Literatur wird das auf die Räder reduzierte Massenträgheitsmoment der Antriebsstrangkomponenten errechnet.
- Anhand der Massen der Antriebsstrangkomponenten und der Getriebeübersetzung wird, unter der Annahme von Vollzylindern für die Komponenten, das Massenträgheitsmoment den Antriebsstrangkomponenten zugewiesen.

- Für ein neu simuliertes Fahrzeug werden bei jeder Iteration die neuen Komponentengewichte des Antriebsstrangs zu denen des Referenzfahrzeugs in Bezug gesetzt und die Massenträgheitsmomente skaliert. Über die Getriebeübersetzung kann ein neues reduziertes Massenträgheitsmoment und damit  $e_i$  für das simulierte Fahrzeugkonzept berechnet werden.

Abbildung 4.35 rechts zeigt das reduzierte Massenträgheitsmoment für einen Diesel-ICEV-Antriebsstrang. Für ein heckgetriebenes Fahrzeug wird zusätzlich die Trägheit der Kardanwelle als Hohlzylinder berücksichtigt.

#### 4.6.4 Energiebedarf der Klimatisierung

Die Innenraumklimatisierung stellt bei der Entwicklung von BEV eine große Herausforderung dar. Eine Kühlung des Innenraums bei hohen Außentemperaturen, eventuell mit Sonneneinstrahlung, erfordert eine hohe Kühlleistung. Abhängig von den Umgebungsbedingungen kann der Einsatz einer Klimaanlage die Reichweite des Fahrzeugs deutlich reduzieren.

Bei ICEV fällt dank der höheren Dichte des Energieträgers der Einsatz einer Innenraumkühlung in Bezug auf die Reichweite nicht ganz so drastisch aus. [Bra13, S. 77] gibt den jahresbezogenen durchschnittlichen Kraftstoffmehrverbrauch einer Klimaanlage im mitteleuropäischen Klima mit 0,5 l/100 km an. Abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und gewünschter Innentemperatur kann der (kurzzeitige) Spitzenmehrverbrauch jedoch auch bis zu mehreren Litern pro 100 km betragen [Schü13, S. 164].

Bei ICEV stellt heute das Heizen (ohne Berücksichtigung eines Zuheizers) keinen Mehrverbrauch dar. Hierfür wird die Abwärme des Motors verwendet. Bei BEV steht Abwärme des Motors nur unzureichend zur Verfügung, zum Heizen ist ein elektrischer Zuheizung erforderlich. Insbesondere im Winter reduziert sich dadurch die Reichweite bei Elektrofahrzeugen deutlich – nach [Aut11a] im Fall des E-Smart um 47 Prozent bei -7°C gegenüber +23°C. Neben dem Mehrverbrauch für die Heizung sinkt bei niedrigen Temperaturen zugleich die nutzbare Batteriekapazität; letztgenannter Effekt wird für die Reichweitenberechnung mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmode*ll nicht berücksichtigt.

Für den NEFZ spielt die Klimatisierung keine Rolle, weil für diesen Zyklus die Klimaanlage und alle Nebenverbraucher ausgeschaltet werden. Im *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmode*ll kann eine Klimatisierung des Fahrzeugs optional mit berücksichtigt werden. Hierfür wird das Klimamodell aus [Kai10] genutzt, das das thermische Verhalten des Fahrzeugs Mute untersucht. Abbildung 4.36 zeigt schematisch das berücksichtigte Klimavolumen des Fahrzeugs.  $\dot{Q}$  sind die Wärmeströme und  $\dot{H}$  die Enthalpieströme. Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{IA}$ , dargestellt als Wärmequelle, entspricht dem Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung durch die Fensterflächen (orangener Hohlpfeil).

Die Strahlungsflächen des Klimamodells (Windschutzscheibe, Dach, Seitenfenster, Türfläche etc.) entsprechen in ihrer Ausgangsgröße den Flächen des Mute-Fahrzeugs. Die Parameter des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmode*lls ersetzen die festen Bemaßungen des Mute und ermöglichen so ein parametrisches Klimamodell.

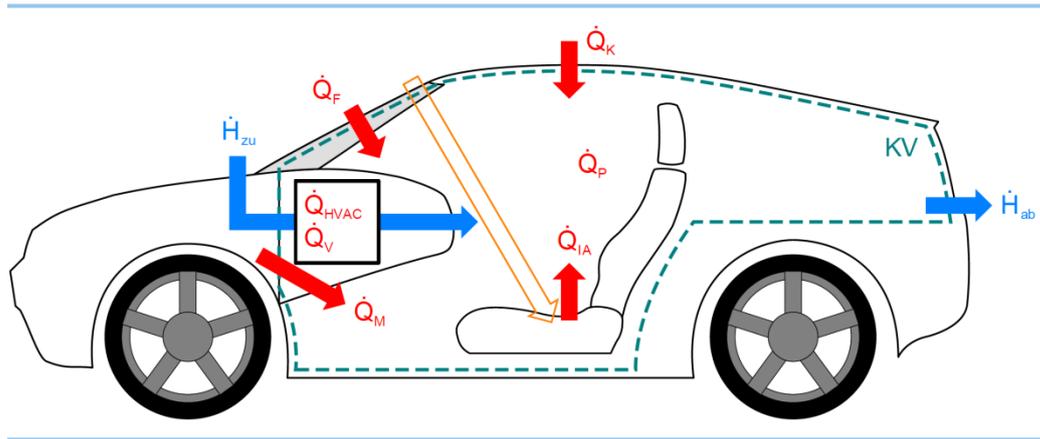


Abbildung 4.36: Klimamodell des Mute  
[Kai10, S. 43]

Abbildung 4.37 zeigt den ermittelten Leistungsbedarf für die Kühlung des Innenraums in Abhängigkeit des Windschutzscheibenwinkels bei unterschiedlichen Außentemperaturen und Wärmeschutzmaßnahmen. Betrachtet wird in dieser Darstellung der stationäre Fall.

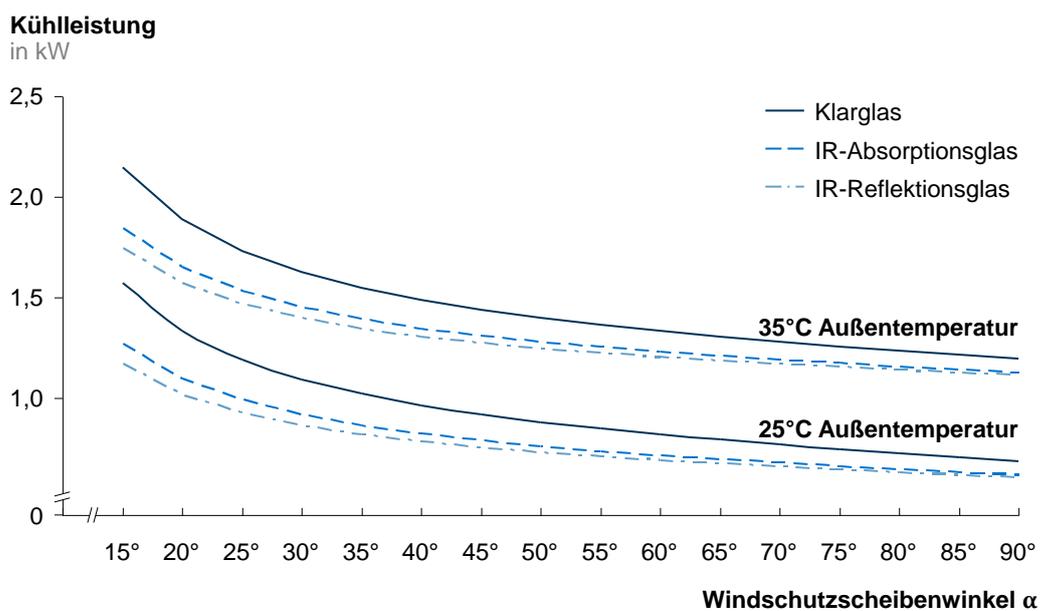


Abbildung 4.37: Leistungsbedarf für die Klimatisierung

Annahmen: Fahrzeugform Steilheck, Fahrzeuggröße untere Mittelklasse, Innentemperatur 21°C, Sonnenstand zur Mittagszeit eines Sommertages in Deutschland

## 4.7 Aufbau und Anpassung der Motorkennfelder

Die Längsdynamik-Simulation greift auf Motordaten zurück, anhand derer das zum Antrieb maximal zur Verfügung stehende Moment, der Energieverbrauch des Motors und, je nach Zyklus, die Schaltzeitpunkte bestimmt werden. Da innerhalb jeder Iterationsschleife des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* in *Adaption Motor* eine Anpassung des maximalen

Motormoments erfolgt, müssen die Motordaten dynamisch anpassbar sein und die realen Effekte bei einer Skalierung widerspiegeln.

Wirkungsgradkennfelder sind sowohl bei Elektromotoren als auch bei Verbrennungsmotoren ein gut gehütetes Geheimnis der Automobilhersteller. Detaillierte Wirkungsgradkennfelder aktueller Motoren, mit denen empirische Zusammenhänge untersucht werden könnten, sind öffentlich fast nicht zugänglich. Daher werden für den Aufbau und die Anpassung der Motorkennfelder einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen.

#### 4.7.1 Elektromotor

Für die Simulation von BEV wird das Wirkungsgradkennfeld des vermessenen Mute-Elektromotors als Ausgangsbasis genutzt, Abbildung 4.38. Dieses wird abhängig von dem geforderten Drehmoment in Richtung der Momentachse und entsprechend der Drehzahlvorgabe aus *Parametrisiertes Fahrzeug* entlang der Drehgeschwindigkeitsachse skaliert.

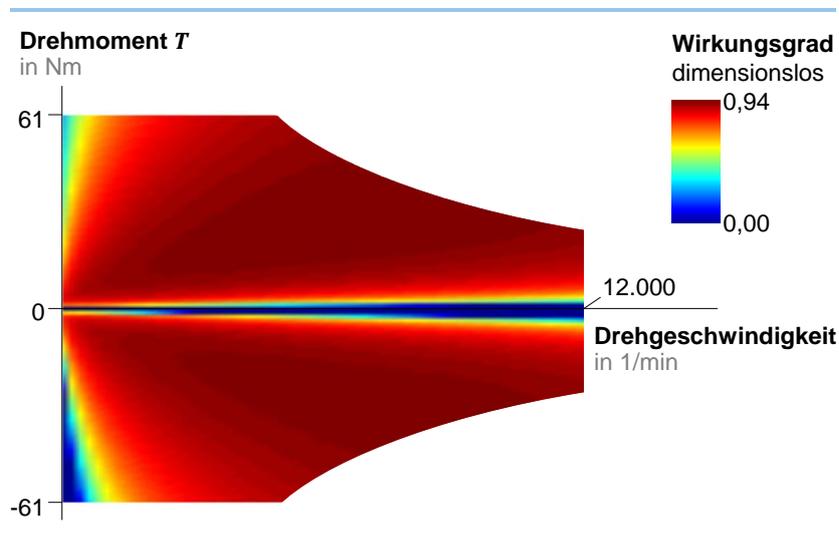


Abbildung 4.38: Wirkungsgradkennfeld des Mute-Elektromotors  
[FTM11]

Die absoluten Werte für den Wirkungsgrad werden bei der Skalierung als konstant angenommen. Bei einer Leistungssteigerung des Motors lässt sich üblicherweise auch der Wirkungsgrad steigern [Rei93, S. 17]. Dieser Effekt ist, bezogen auf die anderen Unsicherheiten in der Modellierung im Zusammenwirken von Motor und Getriebe, sehr gering: Die in DIN EN 60034-30 definierten Wirkungsgradklassen für Elektromotoren weisen in der höchsten Wirkungsgradklasse IE3 je nach Bauform einen Wirkungsgradunterschied von 3 bis 5 Prozentpunkten zwischen einem 15 kW- und einem 300 kW-Motor (Faktor 20; angenommenes, mit dem Modell abzudeckendes Leistungsspektrum automobiler Anwendungen) aus. Zusätzlich hat der Mute-Referenzmotor trotz vergleichsweise kleiner Leistung durch entsprechenden Optimierungsaufwand bereits einen sehr guten Wirkungsgrad. Zur Vereinfachung wird beim Motorkennfeld nicht zwischen Synchron- und Asynchronmaschinen unterschieden.

Für kurze Zeiträume können Elektromotoren ohne Einfluss auf das Motorgewicht oder das Kühlsystem ein höheres Drehmoment als das Nenndrehmoment zur Verfügung stellen. Dadurch ergibt sich eine Leistungssteigerung gegenüber der Nennleistung. Für die Bestimmung der Beschleunigungszeit in *Adaption Motor* wird die kurzzeitige Momentsteigerung mit einem Überlastfaktor berücksichtigt, dem Verhältnis aus Maximal- zu Nennleis-

tung. Abbildung 4.39 zeigt die Überlastfaktoren für BEV mit PSM, der Durchschnitt liegt bei 1,55. Für die Simulation von im Markt verfügbaren BEV mit PSM in Kapitel 5 wird dieser Durchschnittswert verwendet, sofern kein fahrzeugspezifischer Überlastfaktor bekannt ist. Für Fahrzeugneuentwicklungen mit weiterentwickelten Elektromotoren sind höhere Überlastfaktoren möglich. [Mat14] gibt einen Überlastfaktor von 2 für PSM und von 3 für ASM an.

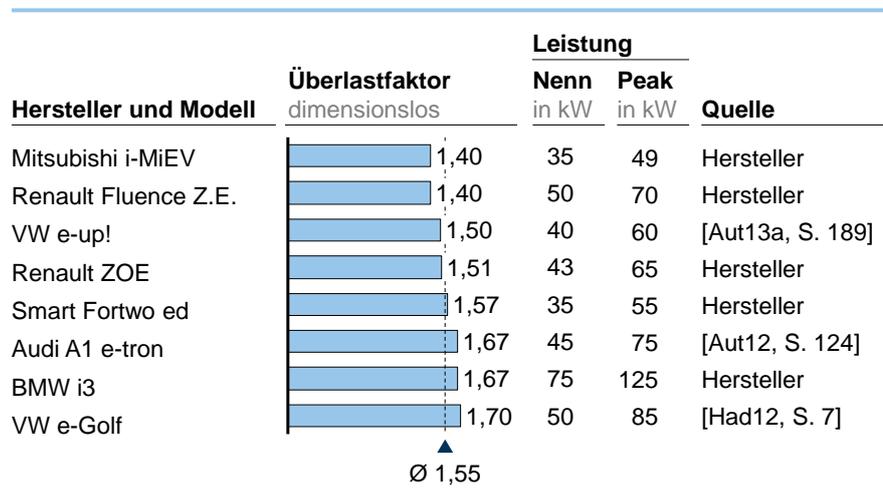


Abbildung 4.39: Überlastfaktor der PSM von BEV

#### 4.7.2 Verbrennungsmotor

Bei ICEV unterscheiden sich die Wirkungsgradkennfelder zwischen den Motorbauformen (Anzahl der Zylinder, Diesel oder Otto, Turbolader) weitaus stärker als bei BEV. Eine Skalierung von vollständigen Motorkennfeldern für eine Verbrauchsermittlung wurde untersucht, stellte sich jedoch als nicht zielführend heraus. Daher werden für die Beschleunigungsbestimmung in *Adaption Motor* und die Verbrauchsbestimmung in *Adaption Energiespeicher* des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* unterschiedliche Ansätze verwendet.

Die Beschleunigungsbestimmung erfordert das maximale Motormoment für jede Motordrehzahl. Der Verbrauch des Motors spielt für die Bestimmung der Beschleunigungszeit keine Rolle. In *Adaption Motor* sind für die drei auswählbaren Motortypen die charakteristischen Kurven des maximalen Motormoments von Referenzmotoren hinterlegt, Abbildung 4.40. Die Momentkurven werden in *Adaption Motor* so skaliert, dass das angeforderte maximale Drehmoment erreicht wird.

Die Verbrauchsbestimmung erfolgt mit dem sogenannten Willans-Verfahren bzw. über Willans-Kennlinien, welche ursprünglich für die Abschätzung der Reibleistung von Verbrennungsmotoren entwickelt wurden. Das Willans-Verfahren geht davon aus, dass sich der Kraftstoffverbrauch  $V$  in Liter pro Stunde aus einem Nulllastverbrauch  $V_{null}$  und einem Verbrauch durch die effektive Leistung  $V_{eff}$  zusammensetzt, Formel (4.13) [FAT11, S. 100 ff.; Roh13]. Die in beiden Veröffentlichungen angegebene Primärquelle [Roh96] zur Verbrauchsbestimmung über das Willans-Verfahren war nicht zugänglich.

$$V = V_{null} + V_{eff} \quad (4.13)$$

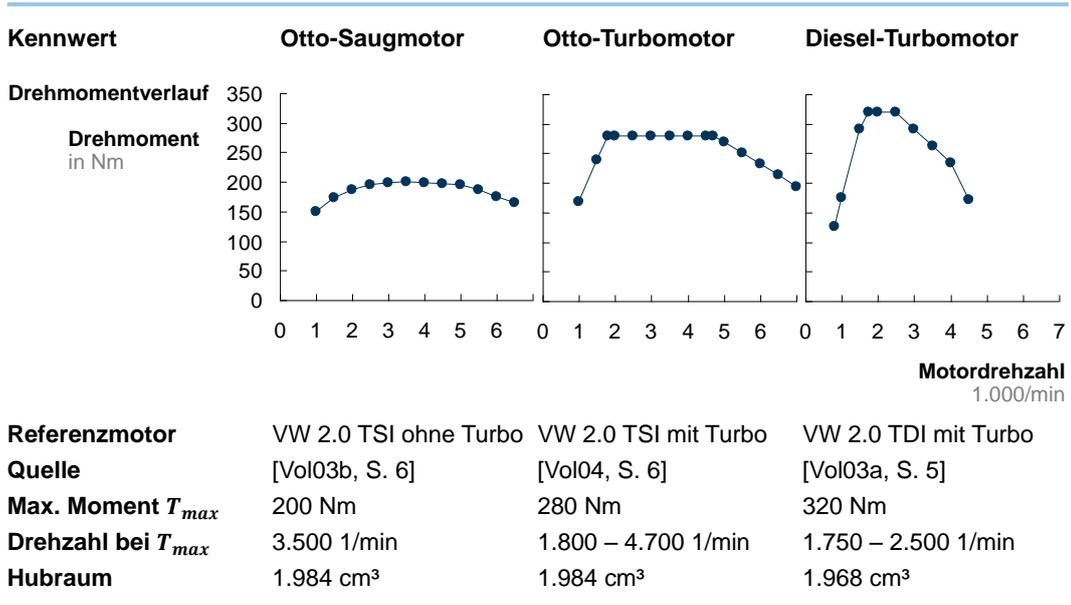


Abbildung 4.40: Referenzmotoren für die Bestimmung des maximalen Drehmoments

Der Nulllastverbrauch hängt nur von der Drehzahl des Motors ab und nicht von der effektiven Leistung. Der Verbrauch durch die effektive Leistung ist unabhängig von der Motordrehzahl und hängt linear von der effektiven Leistung ab. Abbildung 4.41 verdeutlicht schematisch das Willans-Verfahren anhand von zwei Betriebspunkten eines Motors; die Zahl im Index gibt die Motordrehzahl an.

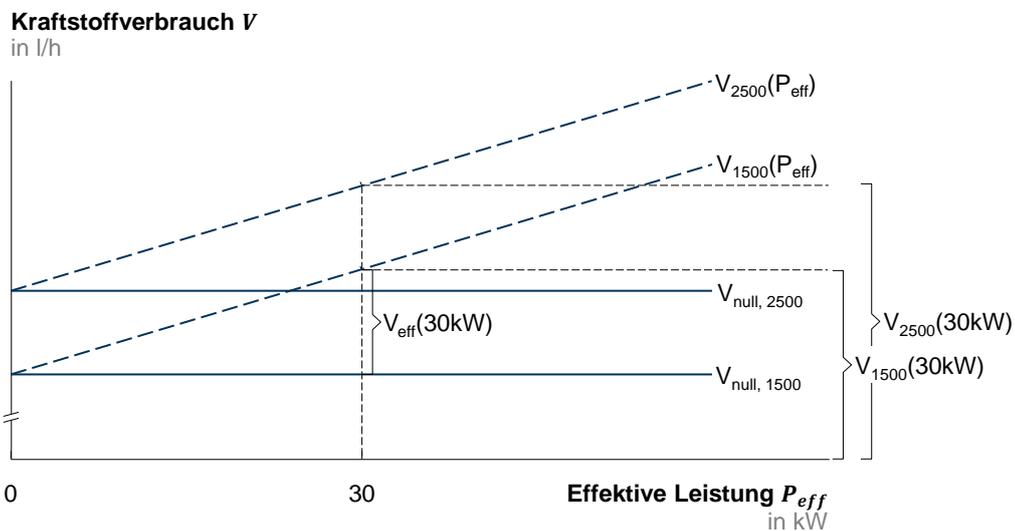


Abbildung 4.41: Systematik der Verbrauchsbestimmung anhand des Willans-Verfahrens  
vgl. [FAT11, S. 101]

Der Nulllastverbrauch lässt sich mit Formel (4.14) berechnen [FAT11, S. 101]. Darin sind  $v_{Fzg}$  die Fahrzeuggeschwindigkeit,  $v_{1000}$  die theoretische Fahrzeuggeschwindigkeit bei einer Motordrehzahl von 1.000 1/min in einem jeweiligen Gang und  $V_{Hub}$  das Hubvolumen des Motors. Die Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  in Formel (4.14) hängen von der Motorart ab, Abbildung 4.42 oben. Die Koeffizienten sind unabhängig von der Motorbauform.

$$V_{null} = \left( a \frac{v_{Fzg}^2}{v_{1000}^2} + b \frac{v_{Fzg}}{v_{1000}} + c \right) V_{Hub} \quad (4.14)$$

Der Verbrauch durch die effektive Leistung  $V_{eff}$  lässt sich aus der effektiven Leistung  $P_{eff}$  und einer Proportionalitätskonstanten  $k_{eff}$  berechnen [Roh13; FAT11, S. 102], Formel (4.15). Die Proportionalitätskonstante hängt von der Motorbauform ab, Abbildung 4.42 unten.

$$V_{eff} = k_{eff} P_{eff} \quad (4.15)$$

Koeffizient	Ottomotor	Dieselmotor
a	0,076	0,08
b	0,17	0,075
c	0,2	0,1

---

Motorbauform	$k_{eff}$
Otto-Saugmotor	0,264
Otto-Turbomotor	0,28
Diesel-Turbomotor	0,22

Abbildung 4.42: Koeffizienten zur Bestimmung von  $V_{null}$  und  $V_{eff}$

Oben: [FAT11, S. 101]; unten: [Roh13]

Das Hubvolumen  $V_{Hub}$  ist die einzige Größe, die sich nicht unmittelbar aus der Längsdyamiksimulation oder den Eingabeparametern ergibt. Aus der Beschleunigungsbestimmung ist jedoch das Motormoment bekannt. Aus realen Fahrzeugdaten wird der Zusammenhang zwischen maximalem Motormoment und Hubvolumen bestimmt, Formel (4.16) bis (4.18).

$$V_{Hub,Otto} = 10^{-3} \left( 9,1 \frac{l}{Nm} T_{max} + 215,6 l \right) \quad (4.16)$$

$$V_{Hub,Otto,Turbo} = 10^{-3} \left( 6,9 \frac{l}{Nm} T_{max} - 35,5 l \right) \quad (4.17)$$

$$V_{Hub,Diesel,Turbo} = 10^{-3} \left( 3,9 \frac{l}{Nm} T_{max} + 652,6 l \right) \quad (4.18)$$

## 4.8 Validierung von Eingabewerten und Package

Die vorherigen Abschnitte beschreiben den Modellaufbau und die Modellierung einzelner Komponenten. Die empirischen Modelle basieren auf Benchmarkdaten, innerhalb derer es jeweils einen kleinsten und einen größten Datenwert der beschreibenden Variablen gibt. Was passiert, wenn die Eingangsparameter jenseits dieser Grenzen liegen? Sind bestimmte Fahrzeugkonfigurationen überhaupt realisierbar und finden alle Komponenten im Package Platz? Diesen Fragen widmen sich die folgenden zwei Absätze.

#### 4.8.1 Grenzen der empirischen Modelle

Für Eingangsparameter jenseits der beschreibenden Variablen der Benchmarkwerte extrapoliert das Gewichtsmodell. Dies birgt das Risiko, dass in den empirischen Teilmodellen unrealistische, beispielsweise negative Gewichtswerte auftreten, was in der Modellierung begründet ist. Die Genauigkeit und das Vertrauen in die Werte nehmen bei einer Extrapolation zugleich ab. Anhang D listet den Wertebereich der Eingangsparameter für das Modell auf, die mit den Benchmarkdaten abgedeckt sind. Bei Eingabe eines Wertes außerhalb dieser Grenzen in das Modell wird eine Warnung ausgegeben.

Um im Fall einer Extrapolation negative Werte in den empirischen Teilmodellen zu vermeiden, werden alle Korrelationsfunktionen mit negativem Achsenabschnitt innerhalb ihres Wertebereichs begrenzt; dazu wird die empirische Funktion in Abschnitte unterteilt.

#### 4.8.2 Realisierbarkeit des Package

Selbst wenn die Eingangsparameter innerhalb definierter Grenzen liegen, können die auf das Gesamtfahrzeug bezogenen Simulationsergebnisse dennoch unrealistisch sein. Grund dafür ist das Fahrzeugpackage. Während ein kleines Elektrofahrzeug, wie beispielsweise der Mute, theoretisch mit einer Reichweitenanforderung von 500 km simuliert werden kann, ist das Package innerhalb der Fahrzeugabmessungen nicht darstellbar. Allein schon für die Batterie stünde bei heutigen Batteriesystemenergiedichten nicht genug Bauraum zur Verfügung.

Die Problematik der Package-Kollisionen tritt vorwiegend bei Bauteilen auf, deren Größe entweder sehr stark mit der Leistung oder der Reichweite wächst. Weil keine vollständige Package-Bewertung oder -Auslegung vorgenommen wird (hierfür gibt es beispielsweise Werkzeuge in [Kuc12] und [Fuc14d]), sondern nur eine Grobabschätzung zur Package-Realisierung durchgeführt werden soll, ist es ausreichend, sich auf diese Komponenten zu beschränken.

Hierfür werden alle Komponentengruppen des Gewichtsmodells anhand der Bauteilgröße und der Bauteilabhängigkeit vom Antriebsdrehmoment qualitativ bewertet. Das einzige Bauteil, das direkt von der Reichweite abhängt, ist der Energiespeicher; dieser wird zusätzlich mit aufgenommen. Abbildung 4.43 zeigt das Ergebnis der qualitativen Bewertung. Die Bauteile rechts oberhalb der Diagonalen sind dabei besonders kritisch; für diese wird im Modell eine genauere Bauraubetrachtung durchgeführt.

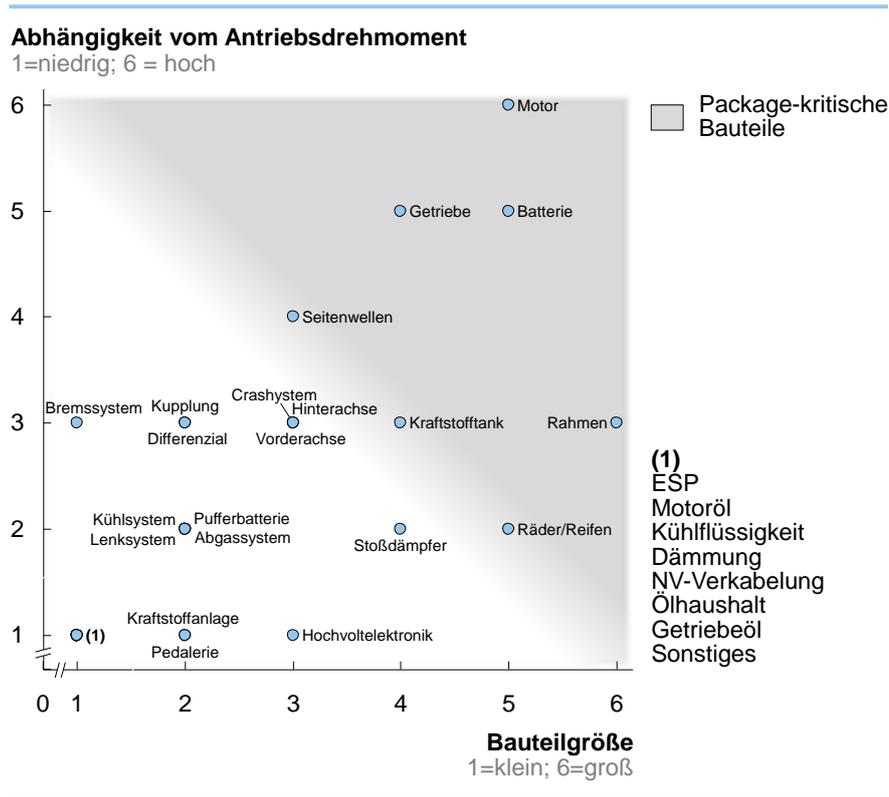


Abbildung 4.43: Auswahl der Package-relevanten Komponenten  
vgl. [Ant13, S. 27]

Die Bauraumbetrachtung erfolgt anhand der zur Verfügung stehenden Bauräume für die Komponentengruppen, die, ausgehend von den Fahrzeugabmessungen, geschätzt werden. Abbildung 4.44 zeigt als Beispiel den ermittelten Bauraum für die Batterie von BEV, für den folgende Bereiche zur Verfügung stehen:

- Unter den Sitzen bzw. bei zwei Sitzreihen unter den Sitzen der zweiten Sitzreihe
- Hinter der letzten Sitzreihe
- Im Mitteltunnel
- Im Unterboden, bei ausreichender Höhe des Fahrzeugs (ggf. Ausführung als Sandwichboden).

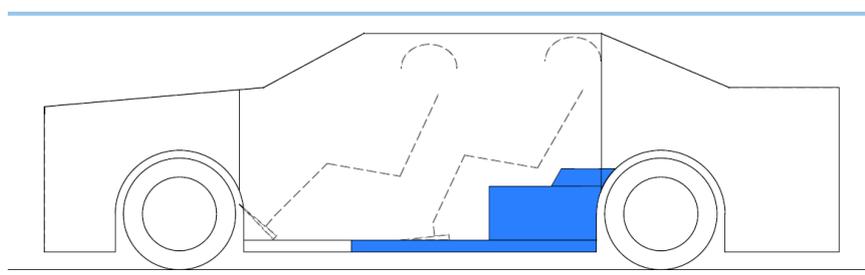


Abbildung 4.44: Batteriebaurraum im Unterboden, unter und hinter der Sitzbank der zweiten Sitzreihe  
[Ant13, S. 26]

## 5 Plausibilisierung des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells

Eine vollständige Validierung des Modells, d.h. eine Überprüfung der Richtigkeit der Ergebnisse für alle möglichen Parametervariationen, ist einerseits aufgrund der Komplexität des Modells und andererseits aufgrund nicht verfügbarer Realdaten nicht möglich. Stattdessen können die Modellergebnisse nur anhand weiterer Benchmarkdaten, die nicht in die Modellbildung einfließen, sowie öffentlich zugänglicher Daten realer Fahrzeuge plausibilisiert werden.

Für alle Simulationen dieses Kapitels wird der NEFZ verwendet. Im Vordergrund stehen hier die Plausibilisierung und nicht die mit dem Modell erzielbaren Ergebnisse und möglichen Analysen. Simulationen und Ergebnisse, Parametervariationen und Konzeptvergleiche werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Eine kritische Bewertung der Simulationsergebnisse der Plausibilisierung und möglicher Abweichungen erfolgt jeweils unmittelbar im Zusammenhang mit dem simulierten Fahrzeug. Eine allgemeinere Auseinandersetzung mit den Ergebnissen folgt in Kapitel 8.

### 5.1 Plausibilisierung anhand von Benchmarkstudien

Frei zugänglich sind nur wenige Benchmarkstudien verfügbar, anhand derer das berechnete Gesamtgewicht des Fahrzeugs, die Fahrzeugeigenschaften und auch die berechneten Komponentengewichte plausibilisiert werden können. Bei den verfügbaren Studien werden wiederum nur die aggregierten Ergebnisse veröffentlicht, jedoch nicht die zugrunde liegenden Rohdaten. Daher können nicht immer alle Fahrzeuge anhand der zuvor vorgestellten Aufteilung nach Komponentengruppen verglichen werden.

#### 5.1.1 Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge

Abbildung 5.1 vergleicht die Ergebnisse der Fahrzeugzerlegung eines Mitsubishi i-MiEV aus [Eck11b] mit den Simulationsergebnissen des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells*.

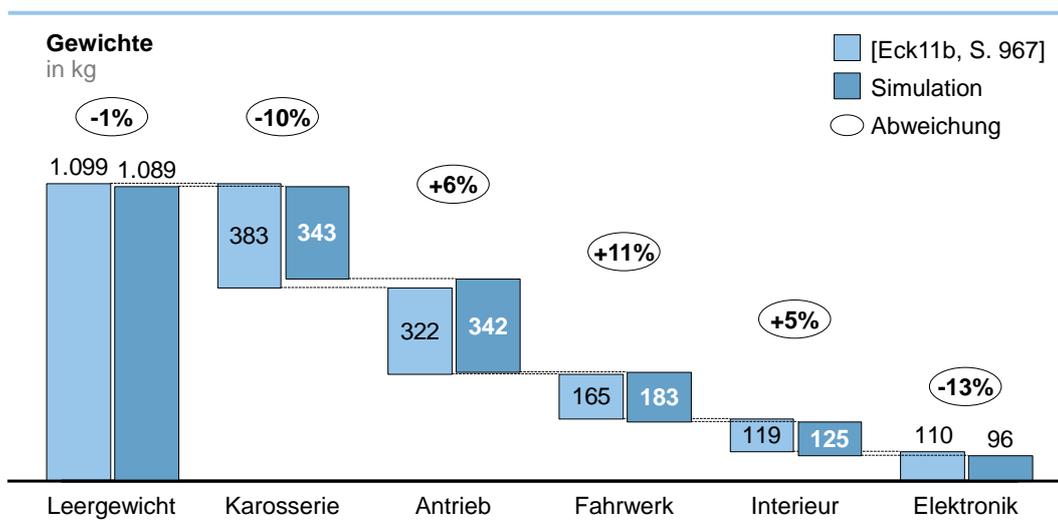


Abbildung 5.1: Vergleich Benchmark und Simulation des Mitsubishi i-MiEV

Einteilung der Bau- und Komponentengruppen entsprechend Anhang C abweichend zum Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell

Das Gewicht des Gesamtfahrzeugs liegt 1 Prozent unter dem Gewicht aus [Eck11b]. Innerhalb der Baugruppen ist die Abweichung teilweise größer. Die Bauteilzuordnung zu den Baugruppen aus [Eck11b] ist allerdings nicht bekannt. Anhang C dokumentiert die Zuordnung der Bauteile, wie sie für diesen Vergleich vorgenommen wird, und stellt die Gewichte innerhalb der Baugruppen aus [Eck11b] den Komponentengruppen des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* gegenüber. Komponentengruppen mit größeren Abweichungen sind (Daten aus Anhang C):

- *Elektronik*: Mit -14 kg (-13 Prozent) zeigt diese Baugruppe die größte relative Abweichung, die fast vollständig aus der Komponentengruppe *Hochvolt* (-12 kg Differenz) stammt. Die Abweichung bei *Niedervolt* ist mit -2 kg gering.
- *Karosserie* mit den Bestandteilen *Rohkarosserie* und *Türen/Klappen*: Während das Gewicht der *Rohkarosserie* bei [Eck11b] um 55 kg (35 Prozent) höher gegenüber der Simulation angegeben wird, fehlen bei *Türen/Klappen* 33 kg (35 Prozent). Die Summe der beiden Komponentengruppen aus [Eck11b] unterscheidet sich um +22 kg (+9 Prozent) gegenüber der Simulation.
- *Package Türen/Klappen*: Der Teileumfang dieser Kategorie aus [Eck11b] mit 18 kg ist unklar. Wird zum Vergleich das simulierte Gewicht für die Komponentengruppe *Klappen und Fächer* mit 6 kg verwendet, ergibt sich ein verbleibender Fehlbetrag von 12 kg.
- *Sonstiges*: Für die Komponentengruppen *Airbags* und *Sicherheitssysteme* des Gewichtsmodells findet sich bei [Eck11b] keine passende Kategorie. Die zwei simulierten Komponentengruppen werden in der Baugruppe *Sonstiges* ausgewiesen, die dadurch 19 kg höher als in [Eck11b] ausfällt.
- *Fahrwerk* und *Karosserie*: Die Zuordnung des Fahrschemels mit 12 kg (nicht gesondert ausgewiesen) ist nicht bekannt. Denkbar wäre eine Zuordnung zur Baugruppe *Karosserie* statt zur Baugruppe *Fahrwerk*; die Differenz zwischen [Eck11b] und dem Modell wäre dann bei *Karosserie* -28 kg (-7 Prozent) und bei *Fahrwerk* +6 kg (+4 Prozent).

### 5.1.2 Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge

Die Fahrzeugzerlegung aus [Eck11b] umfasst auch die Gewichtsdaten für einen Volkswagen Polo V; Abbildung 5.2 vergleicht diese mit der entsprechenden Gewichtssimulation. Die Quelle gibt nicht an, um welche Motor- und Ausstattungsvariante es sich bei dem Polo handelt. Anhand des angegebenen Gewichts lässt sich im Herstellerkatalog nicht auf ein bestimmtes Fahrzeug schließen. Für die Simulation werden die Daten eines Polo V TDI mit 66 kW, Ausstattungsvariante Highline, Zweitürer, verwendet [Vol13b, Mot10]. Die Bauteilzuordnung und die Aufschlüsselung der Ergebnisse nach Baugruppen sind in Anhang C dokumentiert.

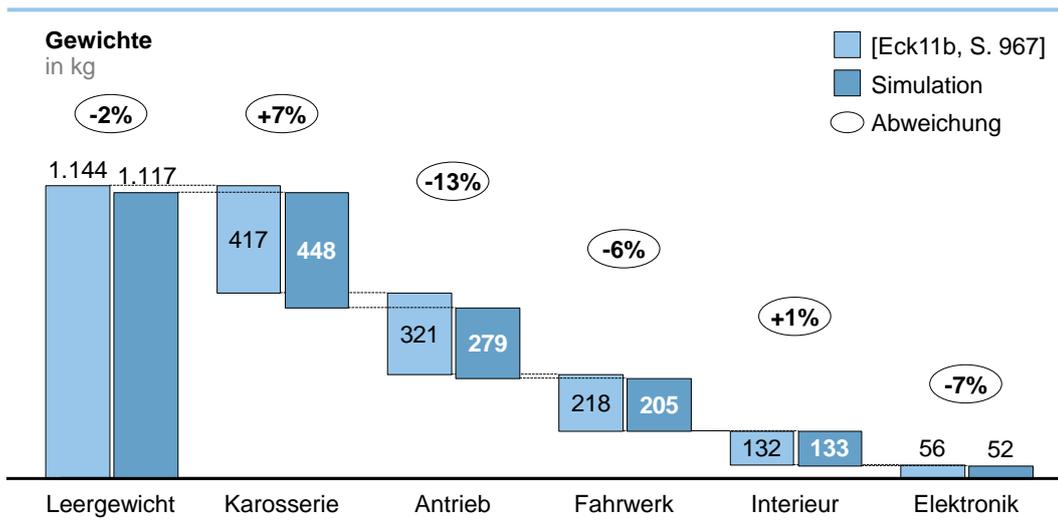


Abbildung 5.2: Vergleich Benchmark und Simulation des Volkswagen Polo V

Einteilung der Bau- und Komponentengruppen entsprechend Anhang C abweichend zum Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell

Das Gewicht des Gesamtfahrzeugs liegt 2 Prozent unter dem Leergewicht aus [Eck11b]. Die Baugruppe *Antrieb* weist mit 42 kg (13 Prozent) Mindergewicht die größte relative Abweichung im Vergleich der Baugruppen auf. Innerhalb der Baugruppe *Antrieb* kommt der überwiegende Anteil der Abweichung vom Energiespeicher mit 27 kg (38 Prozent) weniger Gewicht bei der Simulation. Die genaue Zuordnung der Antriebskomponenten und die Aufteilung zwischen Bauteilen für den Volkswagen Polo V aus [Eck11b] ist nicht bekannt.

Ein großer Teil der Differenz der Baugruppe *Fahrwerk* stammt aus der Komponentengruppe *Räder/Reifen*; [Eck11b] weist hierfür ein um 24 kg höheres Gewicht (40 Prozent) gegenüber den simulierten Werten aus. Da in diesem Fall die Bauteilzuordnung weitgehend eindeutig ist, legt die Höhe der Abweichung nahe, dass der in [Eck11b] untersuchte VW Polo nicht über die Standardbereifung verfügt. Gegenüber dem zuvor simulierten Mitsubishi i-MiEV aus Abbildung 5.1 ist das simulierte Gewicht der Baugruppe *Fahrwerk* des VW Polo 22 kg höher:

- Mit +11 kg stammt die Hälfte der Differenz aus der Komponentengruppe *Räder/Reifen*. Die Reifen des VW Polo der Dimension 185/60 R15 sind breiter und haben einen größeren Raddurchmesser als die des Mitsubishi i-MiEV der Dimension 145/65 R15 an der Vorder- und 175/55 R15 an der Hinterachse. Reifenbreite und Reifendurchmesser bestimmen die Radmasse (siehe auch Abbildung 4.13).
- Weitere +9 kg ergeben sich aus den Komponentengruppen, die die Achsbauteile betreffen. Für alle drei Eingangsvariablen der Masse der Verbundlenkerachse weist der VW Polo höhere Werte auf als der Mitsubishi i-MiEV: Gesamtfahrzeuggewicht +28 kg, Raddurchmesser +32 mm (gemittelt, unterschiedliche Reifen VA und HA mit geringfügigem Durchmesserunterschied beim Mitsubishi i-MiEV) und Fahrzeugbreite +207 mm. Die Masse der McPherson-Vorderachse hängt vom Gesamtfahrzeuggewicht und dem Raddurchmesser ab.

Wie bereits in Absatz 4.4.5 erwähnt und in Abbildung 4.23 gezeigt wurde, können sich die Gewichte zwischen Komponenten, insbesondere wenn diese stark durch das Design beeinflusst werden, verschieben. Weil das Exterieur eine geschlossene Oberfläche erfordert, müssen bei einer größeren Auslegung eines Bauteils die angrenzenden Bauteile automatisch kleiner ausfallen.

Abbildung 5.3 zeigt diese Bauteilkette und die sich teilweise ausgleichenden Fehler anhand der in der Seitenansicht sichtbaren Exterieurbauteile des BMW 320d Efficient Dynamics Limousine auf:

- Das empirische Modell für den Kotflügel basiert überwiegend auf Fahrzeugen mit angetriebener Vorderachse und quer eingebautem Motor. Durch den längs eingebauten Motor kann der Kotflügel bei dem realen Fahrzeug größer ausfallen und ist damit schwerer als das Gewicht des Modells.
- Das Gewicht der Türen (funktionsbereinigt, ohne Interieuranteile und Elektronikkomponenten) ist bei dem realen Fahrzeug kleiner als das mit dem Modell errechnete Gewicht. Bezogen auf die Längenproportionen anderer Benchmarkfahrzeuge fällt die vordere Tür etwas kürzer aus, bedingt durch den größeren Kotflügel. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich auch bei den Seitenfenstern, die vom Modell ebenfalls als etwas zu schwer berechnet werden.
- Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass das Gewicht der Türen und Fenster in diesem Beispiel auch durch die Fahrzeugform und die Antriebstopologie beeinflusst wird; diese führt ebenfalls zu einem niedrigeren Gewicht der realen Bauteile. Türmodell und Modell des hinteren Seitenfensters sind für alle Karosserieformen und Antriebstopologien identisch. Bei einer Limousine fällt die Dachlinie bereits im Bereich der Fondpassagiere stark ab und führt zu einer kleineren Fenster- und Türfläche gegenüber Steilheckfahrzeugen. Das Fenster- und Türmodell basiert auf allen Fahrzeugen, also auch auf Steilheckfahrzeugen mit einer vergleichsweise horizontalen Dachlinie, und berechnet das Tür- und Fenstergewicht etwas zu hoch. Der Heckantrieb des Fahrzeugs führt zu einem höheren Bau-raumbedarf an der Hinterachse, was zu einer Türeinschnürung im unteren Bereich der hinteren Tür und damit ebenfalls zu einer geringeren Türfläche führt.

	<b>Gewicht Benchmark (BMW 320d ED)</b> in kg, funktionsbereinigt	<b>Gewicht Modell</b> in kg	<b>Differenz</b> in Prozent
Stoßfänger vorne	9,4	8,4	-11
Kotflügel	6,6	4,6	-30
Türen	74,5	84,6	+14
Seitenfenster vorne	5,6	6,9	+23
Seitenfenster hinten	5,1	5,2	+2
Stoßfänger hinten	8,3	8,1	-2
<b>Gesamt</b>	<b>109,6</b>	<b>117,8</b>	<b>+7</b>

Abbildung 5.3: Fehlerkette der von den Abmessungen in Längsrichtung abhängigen Exterieurbauteile der Fahrzeugseitenansicht

Abbildung 5.4 zeigt das Simulationsergebnis für den Volkswagen Golf V und das ermittelte VSPG im Vergleich zu den Ergebnissen aus [FAT11, S. 141 ff.]. Nach drei Iterationen wird in [FAT11] ein VSPG von 0,46 ausgewiesen (siehe auch Abbildung 2.4), welches sich durch weitere Iterationen auf maximal 0,48 steigern lässt. Das mit dem Gewichtsmodell ermittelte VSPG ist mit 0,52 etwas höher. Die Verteilung der sekundären Gewichtseffekte anhand der Aufteilung von [FAT11] auf die Baugruppen Karosserie, Antriebsstrang und Fahrwerk ist in beiden Fällen ähnlich.

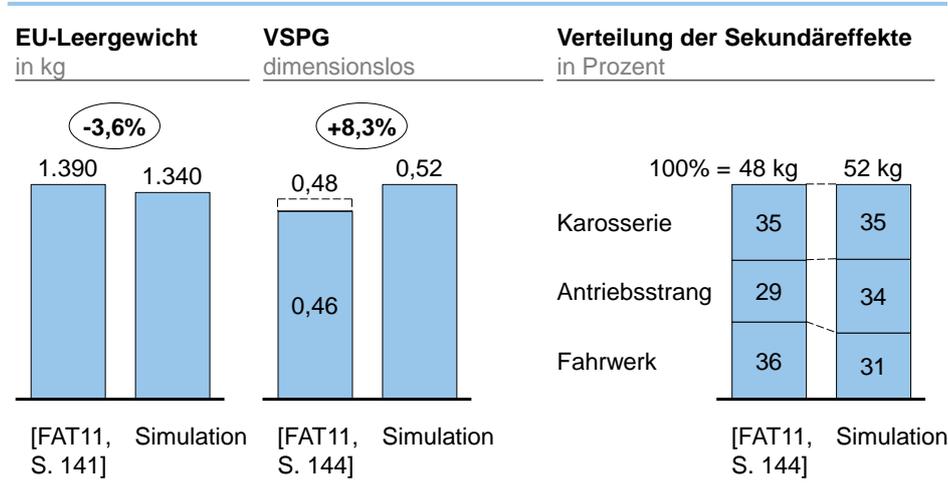


Abbildung 5.4: VSPG des Volkswagen Golf V, Vergleich Studie mit Simulationsergebnis

## 5.2 Plausibilisierung anhand aktueller Fahrzeuge

Das Gewichtsmodell kann ohne die Nutzung detaillierter Benchmarkangaben anhand von bestehenden, im Markt verfügbaren Fahrzeugen plausibilisiert werden. Über die Herstellerangaben und die öffentlich zugänglichen Informationen lassen sich alle erforderlichen Eingangsparameter ermitteln oder gut abschätzen. Als Plausibilisierung dienen dann das Fahrzeugleergewicht, der Zyklusverbrauch, die Energiespeichergröße und das maximale Motormoment. Bei der Berechnung mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* ergeben sich zwei Einschränkungen:

- Das vom Hersteller angegebene Leergewicht kann sich vom tatsächlichen Leergewicht eines Fahrzeugs unterscheiden. Die Zulassungsvorschriften erlauben eine Toleranz von 3 Prozent [Eur12, S. 56]. Da ein niedriges Leergewicht bei der Ermittlung des Fahrverbrauchs zu einem besseren Verbrauchswert führt, legt dies eine Ausnutzung der Toleranz durch die Hersteller nahe [Tra13, S. 23].
- Die Fahrzeuge der zugrunde liegenden Benchmarkdaten [A2M12] enthalten teilweise Sonderausstattung, die zu einem Mehrgewicht der Fahrzeuge gegenüber der einfachsten Basisversion des Herstellers führt. Die Sonderausstattung wurde, soweit möglich, identifiziert und als solche im *Gewichtsrechner* berücksichtigt. Bei Sonderausstattung, die nicht als zusätzliches Teil in ein Fahrzeug eingefügt wird, sondern ein einfacheres Bauteil der Grundausstattung ersetzt, ist dies jedoch nicht möglich. Daher beinhalten die Teilmodelle des *Gewichtsrechners* teilweise ein geringeres Zusatzgewicht gegenüber äquivalenten Basisfahrzeugen.

Um diese zwei Punkte zu berücksichtigen, wird ein Korrekturfaktor von 3,1 Prozent anhand des angegebenen Herstellergewichts und des Gewichts des Datensatzes [A2M12] ermittelt, Abbildung 5.5. Benchmarkfahrzeuge mit umfangreicher oder schwerer Sonderausstattung wurden nicht berücksichtigt, ebenso Fahrzeuge, bei denen Fehler im Datensatz identifiziert wurden (siehe auch Absatz 8.2.1).

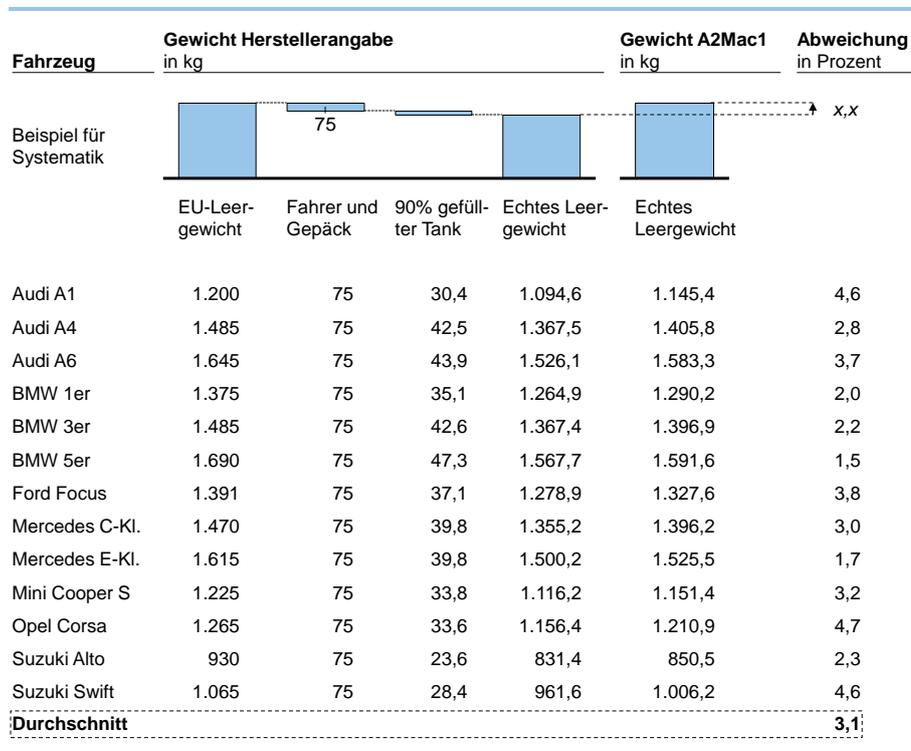


Abbildung 5.5: Abweichung zwischen Gewicht Herstellerangabe und Benchmark-Leergewicht

### 5.2.1 Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit kommen serienmäßig entwickelte Elektrofahrzeuge erst nach und nach auf den Markt. Dabei fallen nur wenige Elektrofahrzeuge in den zulässigen Parameterbereich des Gewichtsmodells und entsprechen einem ähnlichen Anforderungsspektrum (beispielsweise hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen) wie die hinterlegten Benchmarkfahrzeuge.

#### BMW Mini E

Eine elektrifizierte Variante des Mini E wird seit 2009 für Feldversuche zur Elektromobilität international eingesetzt, beispielsweise in Berlin [Vat13]. Das Mini E Fahrzeug basiert auf einem konventionellen Mini und ist ein Conversion Design. [Min13a] gibt das EU-Leergewicht des Fahrzeugs mit 1.465 kg und den NEFZ-Verbrauch mit 15 kWh/100 km an. Abbildung 5.6 zeigt das Ergebnis der Simulation.

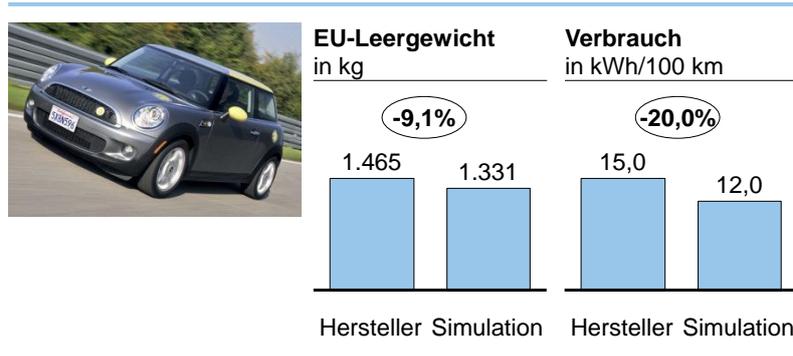


Abbildung 5.6: Simulationsergebnis Mini E  
 Herstellerangaben und Simulationsparameter aus [Min13a, Min13b]

Die hohe Abweichung zwischen der Herstellerangabe und den Simulationsergebnissen lässt sich mit dem weitgehend prototypischen Aufbau des Fahrzeugs erklären. Der Mini E wurde nur in sehr geringer Stückzahl gebaut und nicht verkauft. Das Fahrzeug durchlief nicht die üblichen Serienentwicklungsprozesse und verwendet prototypische Komponenten, die zu einem höheren Fahrzeuggewicht und einem höheren Verbrauch führen. Hinzu kommen Einschränkungen durch das Conversion Design, durch das Kompromisse bei der Integration des elektrischen Antriebsstrangs erforderlich sind.

### BMW i3

Der BMW i3 wurde von Grund auf als Elektrofahrzeug entwickelt und wird seit 2013 in Serie gebaut. Bei der Entwicklung wurde insbesondere Wert auf Leichtbau gelegt. Die Fahrzeugstruktur basiert auf einem neuartigen Konzept aus zwei Teilkomponenten. Das Drive-Modul aus Aluminium umfasst die Anbindung an das Fahrwerk, den Antriebsstrang und die Batterien. Auf das Drive-Modul wird die Fahrgastzelle, das Life-Modul, aufgesetzt. Das Life-Modul ist aus CFK gefertigt und wiegt unter 150 kg [Aut13b].

Ein solches neuartiges Konzept ist im Gewichtsmodell nicht modelliert. Für die Simulation wird daher für die Karosserie als Ganzes (BIW, ohne Crashsystem) ein volumetrischer Materialmix von 60 Prozent CFK und 40 Prozent Aluminium angenommen (der resultierende Gewichtsmix ergibt sich zu 55 Prozent CFK und 45 Prozent Aluminium). Ein weiterer deutlicher Unterschied ergibt sich bei dem Türkonzept, weil der i3 ohne B-Säule auskommt; die hinteren Türen sind heckseitig angeschlagen. Auch dieses Türkonzept ist nicht im Modell hinterlegt, für die Simulation wird ein konventionelles Türkonzept angenommen.

BMW gibt die NEFZ-Reichweite mit 190 km, die Batteriekapazität mit 22 kWh und die nutzbare Batteriekapazität mit 18,8 kWh an [Bay13c, Bay13d]. Das Energiespeichergewicht von 230 kg ergibt eine Energiedichte von rund 96 Wh/kg.

Abbildung 5.7 zeigt das Simulationsergebnis des Gewichtsmodells für den i3, das zu einem EU-Leergewicht von 1.260 kg kommt; dieses weicht nur geringfügig von dem von BMW angegebenen Leergewicht ab. Der Verbrauch des Gewichtsmodells liegt 7 Prozent unter der Herstellerangabe.

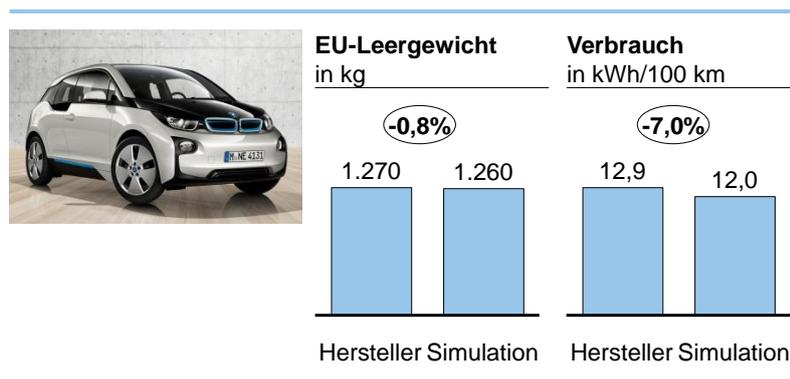


Abbildung 5.7: Simulationsergebnis BMW i3  
 Herstellerangaben und Simulationsparameter aus [Bay13c, Bay13d]

Der Elektromotor wird vom *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* mit 52,4 kg berechnet. Der Elektromotor des i3 ist eine Eigenentwicklung von BMW [Bay13c], dessen Gewicht mit 50 kg angegeben wird. BMW hat bei der Entwicklung des i3 und seiner Komponenten einen großen Leichtbauaufwand betrieben, so dass das etwas höhere Modellergebnis für den Elektromotor nicht überrascht.

### Weitere BEV

Abbildung 5.8 zeigt das simulierte Fahrzeuggewicht für weitere BEV. Die Abweichung gegenüber der Herstellerangabe beträgt zwischen -4 und -1 Prozent. Bei dem Purpose-Design-Fahrzeug (Tesla Model S) und den von Anfang an als BEV geplanten Conversion-Design-Fahrzeugen (VW e-up! und e-Golf) ist die Abweichung gering. Der Renault Fluence Z.E. weist ebenfalls nur eine sehr geringe Abweichung auf; dies überrascht, weil das Fahrzeug mit einem Batteriewechselsystem ausgestattet ist, welches im Gewichtsmodell nicht modelliert ist und vermutlich zu einem höheren Batteriesystemgewicht führt. Für das Conversion-Design-Fahrzeug Ford Focus Electric ermittelt das Gewichtsmodell ein um 4 Prozent geringeres Fahrzeuggewicht.

	Hersteller	Modell	Motorisierung	Gewicht		
				Hersteller in kg	Simuliert in kg	Differenz in Prozent
BEV	Ford	Focus Electric	107 kW	1.700	1.633	-3,9
	Renault	Fluence Z.E.	70 kW	1.605	1.594	-0,7
	Tesla	Model S	225 kW, 60 kWh-Version <sup>1</sup>	2.100	2.012 <sup>1</sup>	-4,2
	VW	e-Golf	85 kW	1.585	1.558	-1,7
	VW	e-up!	60 kW	1.214	1.185	-2,4

Abbildung 5.8: Simulationsergebnisse weiterer BEV  
<sup>1</sup> Erfordert Extrapolation jenseits des Wertebereichs der Eingangsparameter; zusätzlich wird physikalische Modellgrenze erreicht, weil Antriebschlupf und Traktion nicht modelliert sind  
 Herstellerangaben und Simulationsparameter aus Ende 2013 gültigen Produktkatalogen, Herstellerinformationen und Fachbeiträgen

### 5.2.2 Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge

ICEV stellen den überwiegenden Anteil an den verkauften Personenkraftwagen dar. Ein Fahrzeugmodell wird dabei mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Otto- und Dieselmotoren angeboten. In den letzten Jahren setzen Automobilhersteller zunehmend auf Modulbaukästen sowie Plattform- und Gleichteilestrategien über mehrere Fahrzeugmodelle hinweg. Einzelne Bauteile müssen damit für eine Reihe von Fahrzeugen einsatzfähig und entsprechend den auftretenden Lasten und Beschleunigungen dimensioniert sein. Dies kann dazu führen, dass Bauteile, insbesondere bei kleinen und schwach motorisierten Fahrzeugen, überdimensioniert sind, und das Gewicht dieser Fahrzeuge höher ist, als es tatsächlich sein müsste. Bei den nachfolgend simulierten Fahrzeugen werden daher mehrere Motorisierungsvarianten untersucht.

#### Audi A4

Abbildung 5.9 zeigt die Simulationsergebnisse für drei Diesel-Motorisierungsvarianten des Audi A4. Audi setzt bei diesen Motorisierungsvarianten einen 1.968 cm<sup>3</sup> Dieselmotor mit unterschiedlichen Leistungsstufen ein. Die 88 kW Variante gibt Audi mit 1.560 kg an, die 110 kW und 130 kW Varianten mit 1.555 kg, jeweils EU-Leergewicht. Alle Fahrzeuge haben ein einheitliches Tankvolumen von 63 l. [Aud13, S. 116]

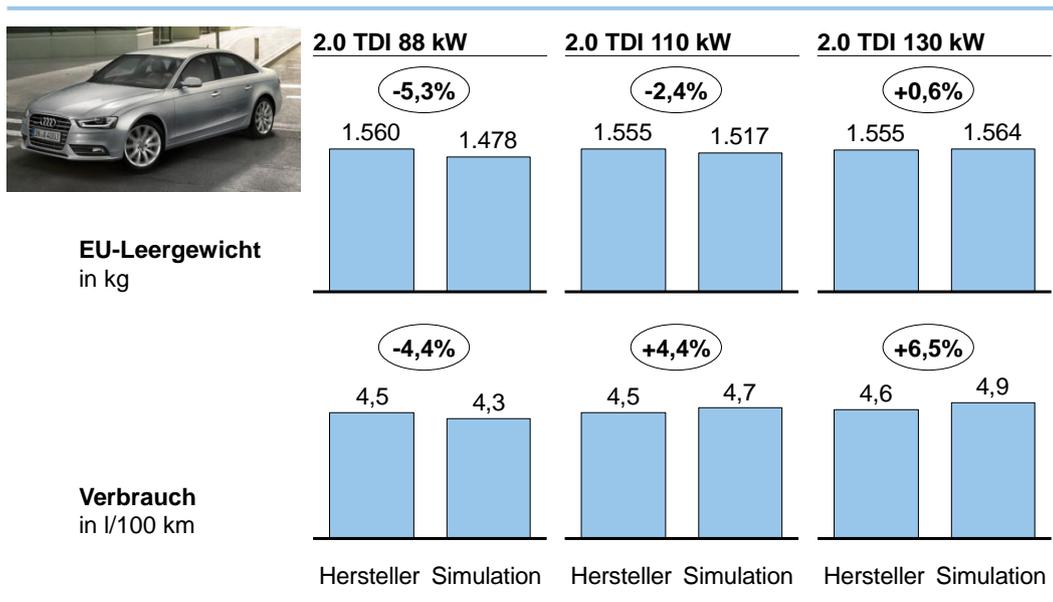


Abbildung 5.9: Simulationsergebnisse Audi A4 Limousine mit Dieselmotor [Aud13]

Der Audi A4 mit 88 kW hat in der Simulation ein um 5 Prozent geringeres Gewicht gegenüber der Herstellerangabe. Bei der Variante mit 130 kW stimmt das Simulationsergebnis fast genau mit der Herstellerangabe überein. Der Trend bestätigt die Annahme, dass wesentliche Komponenten von Fahrzeugen mit kleinem Motor tendenziell überdimensioniert und damit zu schwer sind. Beim Kraftstoffverbrauch beträgt die Abweichung zwischen -4 und +7 Prozent, die im Fall der leistungsärmsten Variante teilweise durch das als zu gering berechnete Gewicht erklärt werden kann.

Abbildung 5.10 zeigt das Simulationsergebnis für die drei Otto-Motorisierungsvarianten 1.8 TFSI mit 88 kW und 125 kW und 2.0 TFSI mit 132 kW. Audi gibt für alle drei Motorisierungsvarianten ein EU-Leergewicht von 1.505 kg an. Das Tankvolumen ist mit 63 l ge-

nauso groß wie bei der Diesel-Variante [Aud13, S. 114]. Bei den Fahrzeugen mit Ottomotor ergibt sich ebenfalls der Trend zu geringerem Gewicht der Simulation bei den Fahrzeugen mit kleinem Motor.

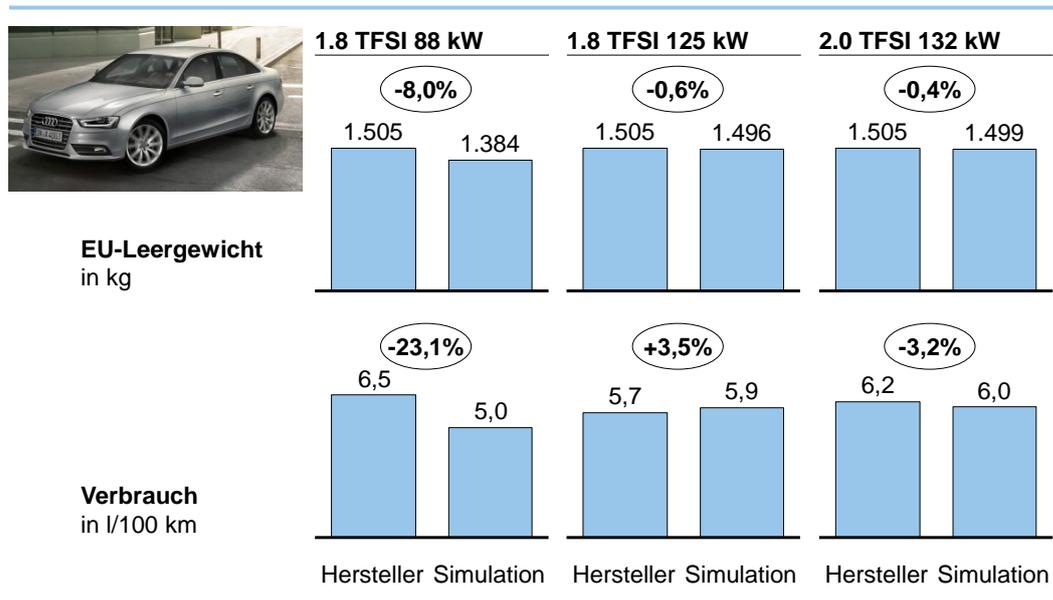


Abbildung 5.10: Simulationsergebnisse Audi A4 Limousine mit Ottomotor [Aud13]

Besonders fällt der deutlich höhere Kraftstoffverbrauch des 1.8 TFSI mit 88 kW in der Herstellerangabe sowohl im Vergleich mit der Angabe für die anderen Motorisierungsvarianten als auch mit dem Simulationsergebnis auf. Hier liegt neben einem überdimensionierten und zu schweren Fahrzeug offensichtlich eine unzureichende Motorwahl und Motor-Getriebe-Abstimmung bei dem realen Fahrzeug vor – anders lässt sich der sehr hohe Kraftstoffbedarf nicht erklären. Aus demselben Grundmotor können bei gleichem Hubraum auch 42 Prozent mehr Leistung herausgeholt werden, wie der 1.8 TFSI mit 125 kW zeigt. Für die Variante mit 88 kW scheint der 1.8 I-Motor überdimensioniert zu sein.

### Mini One

Einen Vergleich der simulierten Fahrzeuge mit den Herstellerangaben der Marke Mini für die Modelle Mini One mit 55 kW und 72 kW Ottomotor zeigt Abbildung 5.11. Das Fahrzeug mit weniger Leistung weist, wie bereits bei den zuvor vorgestellten Fahrzeugen von Audi, eine größere Abweichung gegenüber der Herstellerangabe auf als das Fahrzeug mit mehr Leistung. Bei dem Mini One mit 55 kW weichen das Gewicht um -10 Prozent und der Verbrauch um -14 Prozent ab. Das Simulationsergebnis des Mini One mit 72 kW weicht um -8 Prozent beim Gewicht und um -5 Prozent beim Verbrauch gegenüber der Herstellerangabe ab. Wie beim Audi A4 kann auch hier ein Grund für den höheren Verbrauch des realen Motors neben dem höheren Fahrzeuggewicht eine Überdimensionierung des Motors sein. Derselbe Grundmotor mit 1,6 l Hubraum wird, als doppelt aufgeladene Variante, auch mit 135 kW Leistung angeboten. Dies entspricht der 2,45-fachen Leistung des schwächsten Motors. Zusätzlich ist der Mini ein sehr stark designorientiertes Fahrzeug; dies ist ein weiterer Grund für das niedrigere Modellgewicht, weil ein ausgefallenes Fahrzeugdesign mit entsprechendem Mehrgewicht im Modell nur begrenzt berücksichtigt werden kann.

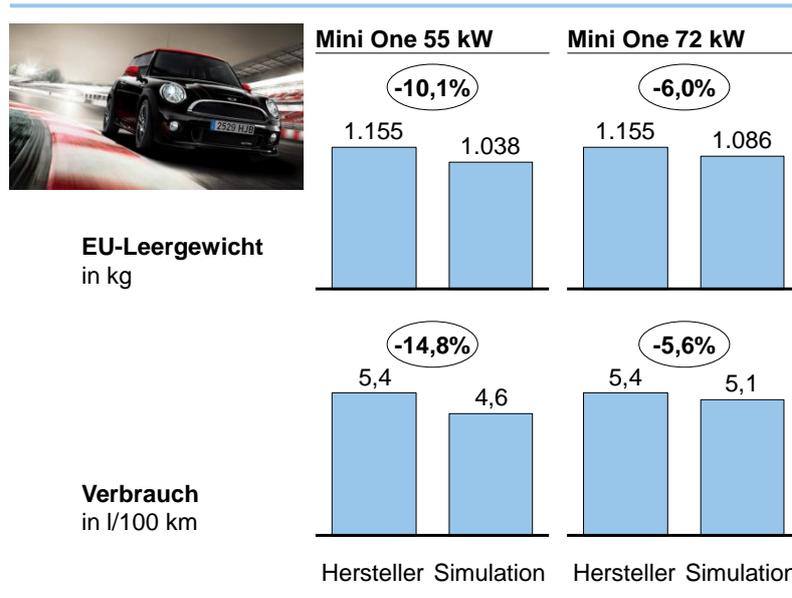


Abbildung 5.11: Simulationsergebnisse Mini One

[Min13c]

Abbildung 5.12 zeigt das Simulationsergebnis des Mini One D mit 66 kW. Das simulierte Gewicht liegt 4 Prozent, der Verbrauch 5 Prozent unter der Herstellerangabe.

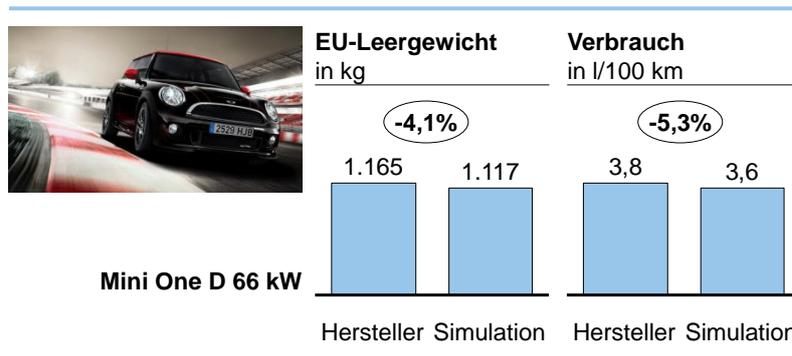


Abbildung 5.12: Simulationsergebnisse Mini One D

[Min13c]

### Weitere Fahrzeuge

Abbildung 5.13 zeigt das simulierte Gewicht weiterer ICEV im Vergleich mit der jeweiligen Herstellerangabe. Die Abweichung beträgt zwischen -7 und +3 Prozent. Der VW Beetle ist sehr stark designorientiert, daher liegt das Modellergebnis erwartungsgemäß unter der Herstellerangabe. Volvo, bekannt für eine hohe Fahrzeugsicherheit, liegt mit dem S60 bei einem höheren Gewicht als die Modellrechnung. Die vergleichsweise hohe Abweichung des Kia Ceed überrascht, kann jedoch anhand öffentlich verfügbarer Daten nicht weiter untersucht werden. Für den VW Golf VII stimmt das Modellergebnis sowohl für die Otto- als auch die Dieselfahrzeuge weitgehend mit der Herstellerangabe überein. Das simulierte Gewicht des Golf VII Dieselfahrzeugs liegt 90 kg über dem des Ottofahrzeugs; der Gewichtsunterschied zwischen den simulierten Motorisierungsvarianten ist genauso hoch wie der entsprechende Gewichtsunterschied laut Herstellerangabe.

	Hersteller	Modell	Motorisierung	Gewicht		
				Hersteller in kg	Simuliert in kg	Differenz in Prozent
<b>Otto- ICEV</b>	Audi	A3 Sportback	1.2 TFSI (77 kW)	1.255	1.264	0,7
	Chevrolet	Aveo	1.2 MT (51 kW)	1.145	1.160	1,3
	Fiat	Punto	1.4 16V (77 kW)	1.135	1.111	-2,1
	Hyundai	i30	1.4 (73 kW)	1.260	1.254	-0,5
	Kia	Ceed	1.4 CVVT (73 kW)	1.333	1.247	-6,5
	Mercedes	A-Kl.	A 180 (90 kW)	1.370	1.341	-2,1
	Opel	Insignia	1.4 Turbo (103 kW)	1.513	1.507	-0,4
	Toyota	Auris	1,33-I-VVT-i (73 kW)	1.225	1.230	0,4
	Toyota	Yaris	1,33-I-VVT-i (73 kW)	1.110	1.121	1,0
	Volvo	S60	T3 (110 kW)	1.573	1.484	-5,7
	VW	Beetle	1.2 TSI (77 kW)	1.280	1.232	-3,8
	VW	Jetta	1.4 TSI (90 kW)	1.345	1.352	0,5
	VW	Golf VII	1.2 TSI BMT (63 kW)	1.205	1.201	-0,3
<b>Diesel- ICEV</b>	Alfa Romeo	Giulietta	2.0 JTDM (103 kW)	1.395	1.404	0,6
	Ford	Mondeo	2,0I TDCi (103 kW)	1.578	1.614	2,3
	Skoda	Rapid	1.6 TDI (66 kW)	1.265	1.307	3,3
	VW	Golf VI	1.6 TDI (77 kW)	1.314	1.270	-3,3
	VW	Golf VII	1.6 TDI BMT (77 kW)	1.295	1.291	-0,3

Abbildung 5.13: Simulationsergebnisse weiterer ICEV Fahrzeuge

Herstellerangaben und Simulationsparameter aus Ende 2013 gültigen Produktkatalogen, Herstellerinformationen und Fachbeiträgen

## 6 Erweiterung des Modells um CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Gewichtsabschätzung von Fahrzeugen. Die Beschreibung, Umsetzung und Anwendung des Verfahrens ist Bestandteil der vorausgegangenen Kapitel, die die Gewichtsabschätzung als in sich geschlossenen Themenbereich vollständig behandeln.

Dieses Kapitel zeigt ergänzend die Möglichkeit für eine Modellerweiterung zur Abschätzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und von Kosten. Dabei stehen die methodische Vorgehensweise und die Beschreibung deren Anwendung im Vordergrund. Außerhalb eines Unternehmens nehmen Verfügbarkeit und Genauigkeit der erforderlichen Daten für eine präzise Modellierung der Realität deutlich ab; die zahlenmäßig exakte Modellierung ist in diesem Kapitel daher nur von untergeordneter Bedeutung. In den folgenden Abschnitten wird darauf an entsprechender Stelle jeweils detaillierter eingegangen.

Die vorausgegangenen Kapitel verdeutlichen die erhebliche Beeinflussung des Betriebsenergieverbrauchs durch das Fahrzeuggewicht. Der Energieverbrauch kann direkt in CO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet werden, Abbildung 6.1. Die pro Liter Kraftstoff entstehenden Emissionen unterscheiden sich für Otto und Diesel. Bei BEV hängen die Emissionen von dem zum Laden der Batterie verwendeten Strommix ab. Die Betriebskosten werden ebenfalls durch den Energieverbrauch eines Fahrzeugs beeinflusst.

Energiequelle	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor	Quelle
Diesekraftstoff EU4, nur Verbrennung	2.668 g/l (≅ 268 g/kWh)	[Bra13, S. 483]
Ottokraftstoff 95 ROZ, nur Verbrennung	2.309 g/l (≅ 264 g/kWh)	[Bra13, S. 483]
Diesekraftstoff, mit Vorkette, 2010	309 g/kWh	[Fri09, S. 63]
Ottokraftstoff, mit Vorkette, 2010	324 g/kWh	[Fri09, S. 63]
Strommix Deutschland, 2011 (vorläufiger Wert)	570 g/kWh	[Umw13, S. 3]
Strommix Deutschland, 2012 (erste Schätzungen)	601 g/kWh	[Umw13, S. 3]
Strommix Frankreich, 2005	102 g/kWh	[Fri09, S. 39]
Strommix Schweden, 2005	88 g/kWh	[Fri09, S. 39]
Strommix EU27, 2010	411 g/kWh	[IIN13]
Strommix China, 2010	790 g/kWh	[IIN13]
Strommix Indien, 2010	888 g/kWh	[IIN13]
Strom aus erneuerbaren Energiequellen	3,8 ... 55,9 g/kWh	[Gab13c]

Abbildung 6.1: Emissionsfaktoren für verschiedene Energiequellen

Die Kosten und der Ressourcenverbrauch in der Herstellung eines Fahrzeugs hängen gleichermaßen vom Fahrzeuggewicht ab. Jedes verbaute Kilogramm eines Materials muss als Rohmaterial gewonnen, vom Automobilhersteller oder einem Zulieferunternehmen eingekauft und zu einem Bauteil verarbeitet werden. Alle Schritte verbrauchen Ressourcen und führen zu Emissionen und Kosten. Es ist offensichtlich, dass ein leichteres Bauteil desselben Materials und bei gleichem Fertigungsverfahren weniger Kosten und Emissionen aufweist als ein vergleichbares, schwereres Bauteil, sofern die Rahmenbedingungen der Produktion, wie beispielsweise Stückzahl, gleich bleiben.

Wie können also die Emissionen und Kosten methodisch mit den Ergebnissen des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* verknüpft werden? Dieses Kapitel beschreibt einen möglichen Ansatz dazu. Die Grundsätze einer vereinfachten CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionsbetrachtung wurden bereits in [Fuc12a] erläutert, und die Verfahren der parametrischen CO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung und der parametrischen Kostenmodellierung in [Fuc14a] und

[Fuc14b] beschrieben. Details zu einzelnen Annahmen und Vorgehensweisen lassen sich anhand der studentischen Arbeiten von [Scha13] und [Lau13] nachvollziehen.

## 6.1 Ansatz für eine parametrische Beschreibung

[Bir07, S. 126] unterteilt den Produktlebenslauf in die fünf Lebenslaufphasen Werkstoffherstellung, Fertigung, Nutzung, Recycling und Entsorgung. Bezogen auf Emissionen und Kosten spielt das Gewicht eines physischen Produkts in jeder Lebenslaufphase eine Rolle, wie Abbildung 6.2 für die CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt (Recycling und Entsorgung sind in der Darstellung zu Recycling zusammengefasst). Die gleiche Überlegung gilt auch für die Kosten. In diesem Fall sind Emissionsfaktoren durch Kostenfaktoren und CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen durch TCO zu ersetzen.

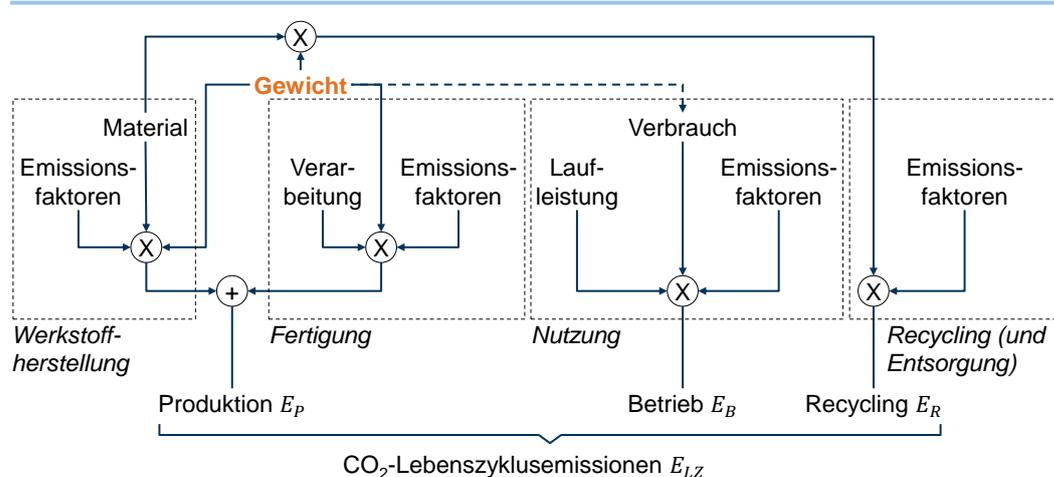


Abbildung 6.2: Untergliederung der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen in Lebenslaufphasen  
vgl. [Fuc13c, S. 25]

Werden Werkstoffherstellung und Fertigung zu einer Lebenslaufphase zusammengefasst, gelangt man zu der im Automobilbau für CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen  $E_{LZ}$  häufig verwendeten Unterteilung [beispielsweise Kog12; War12] in die drei Lebenslaufphasen Produktion  $E_P$ , Betrieb  $E_B$  und Recycling  $E_R$ , Formel (6.1) [Fuc12a]. Dieselbe Unterteilung gilt auch für TCO; ggf. tritt aus Kundensicht an die Stelle von Recycling ein Fahrzeugverkauf.

$$E_{LZ} = E_P + E_B + E_R \quad (6.1)$$

### Skalierungsfaktor Gewicht für die Emissionen

Jede Phase des Produktlebenslaufs ist mit verlustbehafteten Stoff- und Energieflüssen verbunden. Ein Stofffluss weist eine Masse auf. Für die Berechnung von Emissionen über Emissionsfaktoren ist die Masse ein allgemeiner Bezugswert, um die Emissionen von Prozessschritten in der Produktion oder während der Nutzungsphase zu bestimmen:

- In der Werkstoffherstellung beziehen sich die Emissionsfaktoren auf ein Kilogramm eines bestimmten Materials.
- In der Fertigung beziehen sich die Emissionsfaktoren entweder auf ein Kilogramm eines Materials für einen Prozessschritt (beispielsweise Tiefziehen von einem Kilogramm Stahlblech) oder auf einen Prozessschritt an sich (beispielsweise einen Schweißpunkt setzen).

Beziehen sich die Emissionsfaktoren auf einen gewichtsunabhängigen Prozessschritt, spielt das Gewicht dennoch zumindest eine indirekte Rolle. Je größer und damit schwerer ein Bauteil ist, desto häufiger oder länger wird der jeweilige Prozessschritt ausgeführt. Beispielsweise erfordert eine größere und bei gleichem Material somit schwerere Tür durchschnittlich mehr Schweißpunkte und eine längere Nahtabdichtungsraupe als eine kleinere Tür.

### **Skalierungsfaktor Gewicht für die Kosten**

Für die Kosten von Bauteilen gilt der gleiche Sachverhalt. Die Kosten eines Produkts lassen sich einerseits auf den Materialeinsatz zurückführen, andererseits auf die Verarbeitungsschritte zur Herstellung des Produkts. Je größer und schwerer das Produkt ist, desto mehr Material ist für die Herstellung erforderlich. Bei großen Einkaufsvolumen jenseits möglicher Skaleneffekte besteht zwischen dem Materialeinsatz und den Rohmaterialkosten ein proportionaler Zusammenhang. Ähnlich verhält es sich mit der Herstellung. Je größer und schwerer ein Bauteil ist, desto größer ist der zeitliche und technische Aufwand für die verarbeitenden Prozessschritte.

## **6.2 Modellierung der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen**

Das Treibhausgas Kohlendioxid CO<sub>2</sub> ist das wichtigste der anthropogenen Treibhausgase (Greenhouse Gas, GHG). Die Menge an anthropogenen GHG ist von 1970 bis 2004 um 70 Prozent gestiegen. Dreiviertel des Ausstoßes an GHG in 2004 stammen von CO<sub>2</sub> [IPC07, S. 36].

Die klimaschädliche Wirkung eines Gases hängt von den Eigenschaften und der Lebensdauer des Gases in der Atmosphäre ab. Sie lässt sich über das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in einem Bezugszeitraum (in dieser Arbeit 100 Jahre, wie in [IPC07]) in die äquivalente Menge CO<sub>2</sub>e umrechnen, die zu einem gleich hohen Treibhauseffekt geführt hätte [IPC07, S. 36]. In dieser Arbeit werden CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>e-Emissionen nicht getrennt ausgewiesen, sondern gemeinsam als CO<sub>2</sub>-Emissionen angegeben.

Neben GHG lassen sich eine Reihe weiterer Umweltwirkungen bestimmen, beispielsweise der kumulierte Energieaufwand, die Versauerung und die Feinstaubemissionen [IFE11, S. 8 ff.]. Sie werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Der parametrische Modellaufbau orientiert sich an dem in ISO 14040 und ISO 14044 beschriebenen Vorgehen zur Erstellung einer Ökobilanz (Life Cycle Analysis, LCA). Das Ziel der parametrischen Modellierung ist, eine pragmatische und allgemein anwendbare Abschätzung für ein parametrisches Fahrzeug zu ermöglichen – losgelöst von einem konkreten Einzelfahrzeug. Aus diesem Grund können die ISO-Normen nicht in allen Kriterien eingehalten werden, beispielsweise hinsichtlich der Definition des Untersuchungsrahmens oder einer detaillierten Abbildung aller Prozessschritte. Der hier vorgestellte Ansatz entspricht nicht einer Ökobilanz oder Sachbilanz und dient keinem konkreten, bewertenden Vergleich von Produkten, sondern soll lediglich eine Orientierung geben.

Für die Modellierung wird eine Fahrzeugproduktion innerhalb der Europäischen Union (Basis EU27-Strommix/-Emissionsfaktoren) und ein Fahrzeugbetrieb in Deutschland (wenn nicht anders angegeben; Basis Strommix/Emissionsfaktoren Deutschland) angenommen.

### 6.2.1 Produktion

Die Emissionen während der Produktion lassen sich in drei Bereiche unterteilen: Emissionen durch die Rohmaterialgewinnung und -bereitstellung, Emissionen der Verarbeitungsverfahren und Emissionen der Fügeverfahren, Abbildung 6.3. Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in jedem Bereich setzt die Kenntnis der Gewichte und der Materialien für die einzelnen Bauteile und die jeweiligen Emissionsfaktoren voraus.

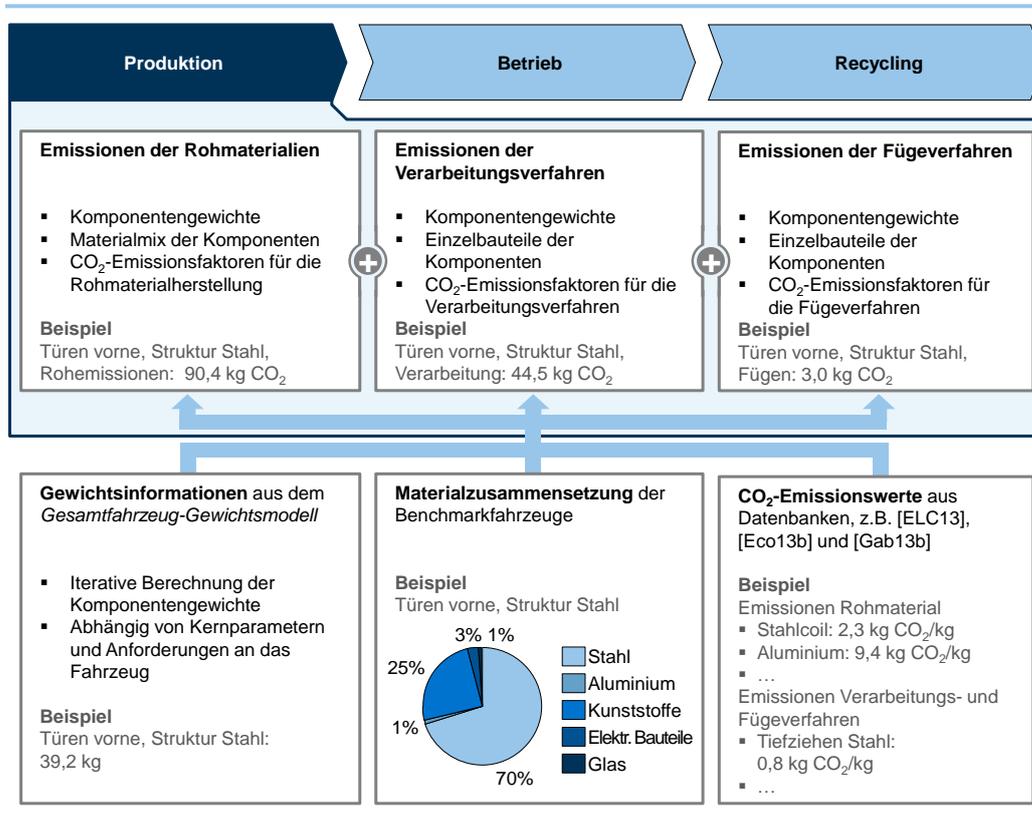


Abbildung 6.3: Detailbetrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion  
vgl. [Fuc14a]

Wie bereits in [Fuc12a] vorgestellt und zuvor erwähnt, sind die Bestandteile Gewinnung der Rohmaterialien und Verarbeitung masseabhängig. Sie lassen sich zu den spezifischen Emissionen  $\bar{M}$  zusammenfassen. Vereinfacht können die Emissionen der Produktion dann über die mittleren spezifischen Emissionen zur Gewinnung und Verarbeitung eines Materials  $\bar{M}$  und dessen Gewicht  $G$ , aufsummiert über alle Bauteile  $i$  des Fahrzeugs, ausgedrückt werden, Formel (6.2). Hinzu kommen die Füge- und Montageemissionen  $E_{Mont}$  und die Logistikemissionen  $E_{Log}$ .

$$E_P = \sum (\bar{M}_i \times G_i) + E_{Mont} + E_{Log} \quad (6.2)$$

Werte für die Emissionsfaktoren von Materialien und Prozessschritten finden sich in den bereits erwähnten Datenbanken und LCA-Modellierungsprogrammen [Gab13b, ELC13, Eco13a, u.a.] und in der Literatur.

Die für das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* genutzten Fahrzeugbenchmarkdaten [A2M12] enthalten neben dem Gewicht auch das Material des jeweiligen Bauteils. Dieses ist entweder als allgemeine Kategorie (beispielsweise Stahlguss, Aluminiumblech) angegeben oder als genaue Bezeichnung (beispielsweise PP-GF40). Für die modellierten

Komponentengruppen aus Abschnitt 4.4 kann über die Gewichtsanteile der Bauteile eine typische Materialzusammensetzung für jede Komponentengruppe erstellt werden, Abbildung 6.4.

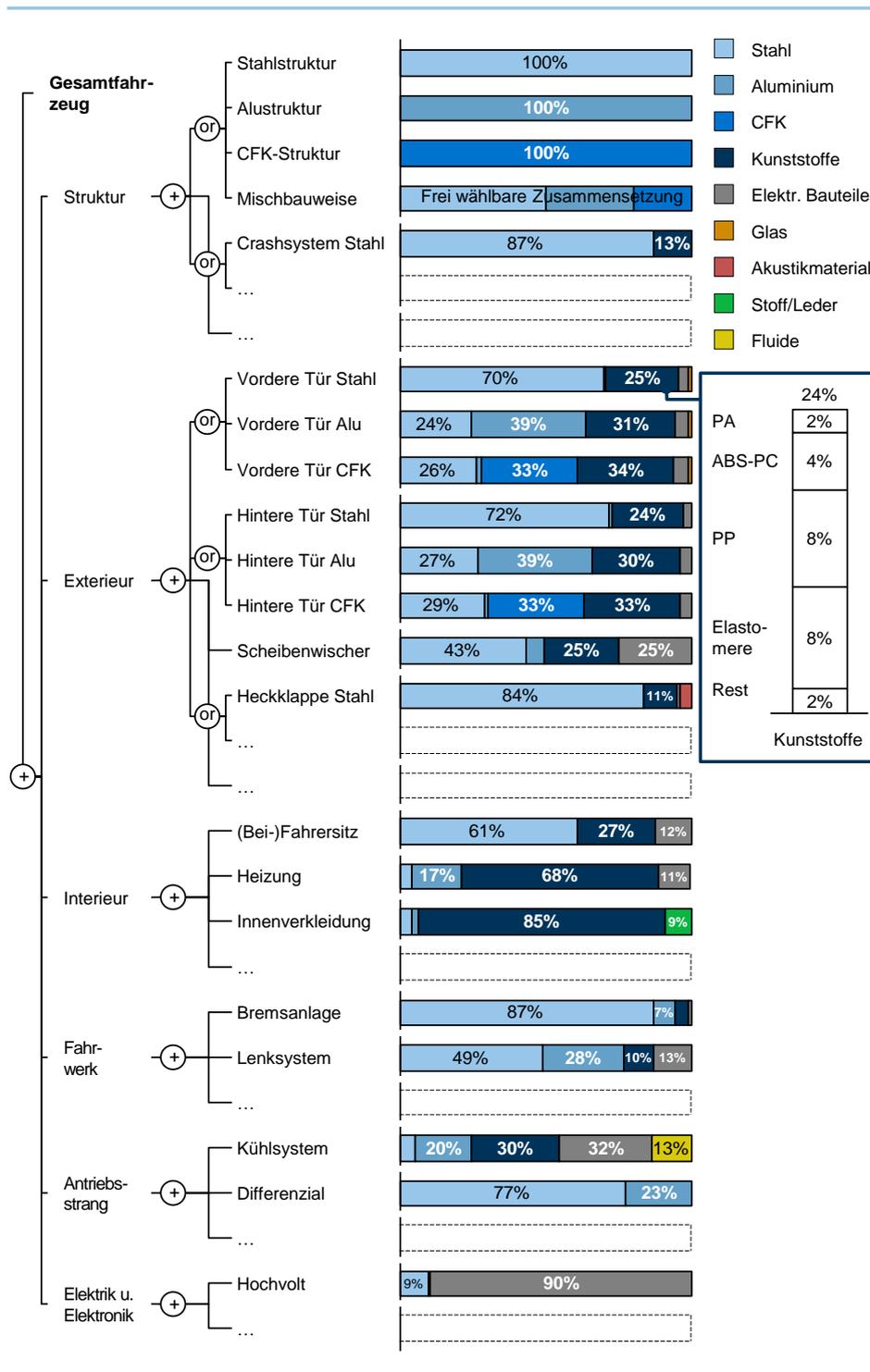


Abbildung 6.4: Durchschnittliche Materialzusammensetzung der Komponentengruppen des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells

Werte < 7 Prozent aus Gründen der Darstellbarkeit nicht ausgewiesen  
vgl. [Fuc14a]

Die Strukturierung in Abbildung 6.4 unterscheidet sich aus Modellierungsgründen in Details von der Bauteilstrukturierung des Gewichtsmodells; unter anderem wurden der Inte-

rieur- und Exterieuranteil der Türen sowie die Außenspiegel zur Gesamttür zusammengefasst. Die Scheiben werden weiterhin separat betrachtet. Für die Komponentengruppen Struktur, Türen, Motorhaube, Heckklappe, Kotflügel und Modulquerträger kann das Material der Grundstruktur über einen Leichtbaufaktor angepasst werden (Absatz 4.4.1 und 4.4.5); die Masse der übrigen Materialien der Komponentengruppe bleibt unverändert.

Auf der Grundlage der Materialinformationen lassen sich anhand einfacher Prozessmodelle die Materialien und Verarbeitungs- und Fügeverfahren der Komponentengruppen mit den zugehörigen Emissionsfaktoren untersuchen. Die Emissionsfaktoren für die Materialien hängen vom Einsatzzweck des Materials ab. Als Grauguss verarbeiteter Stahl mit 1,51 kg CO<sub>2</sub>/kg Material unterscheidet sich beispielsweise deutlich von Chromstahl 18/8 mit 3,85 kg CO<sub>2</sub>/kg [Eco13b].

In der parametrischen Modellierung werden folgende Emissionsfaktoren für Materialien unterschieden (Auswahl):

- Stahl – Stahl vom Stahlcoil (für Rohkarosserie, Exterieur etc.), Gusseisen (für Getriebegehäuse, Differenzial etc.), niedriglegierter Stahl (für sonstige Bauteile) und Chromstahl 18/10 (für Federn, Teile des Fahrwerks etc.)
- Aluminium – AA5182 und AA6016 als Standard-Aluminiumwerkstoffe im Automobilbau [Bra07, S. 388]; das Mischungsverhältnis von Primär- zu Sekundäraluminium des Rohmaterials hat, wie in [Fuc14a] gezeigt, großen Einfluss auf den Emissionsfaktor und wird ebenfalls berücksichtigt
- Kunststoffe – Polypropylen (PP) mit variablen Anteilen an Glasfaser (GF), Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyvinylchlorid (PVC), Acrylnitril-Styrol-Acrylester (ASA), Polyethersulfon (PES)
- Elektronik – Unterteilung in Materialbestandteile wenn möglich, andernfalls allgemeine Werte für Komponenten (Elektromotor, Platinen) oder Schätzwerte
- Antriebsbatterie bei BEV – Batteriekennwert für die eingesetzte Zellchemie, wenn hierfür ein Wert bekannt ist (für LiMn, LiFePO<sub>4</sub>, LiMO), andernfalls Durchschnittswerte.

Abhängig von der Bauteilkonstruktion und den verwendeten Materialien kommen unterschiedliche Verarbeitungsverfahren zum Einsatz. Die Emissionsfaktoren von Verarbeitungsverfahren beziehen sich meist auf ein Kilogramm des jeweils verarbeiteten Materials. Im parametrischen Modell werden folgende Verarbeitungsverfahren berücksichtigt (Auswahl):

- Tiefziehen, Presshärten, Stanzen, Kalt- und Warmfließpressen, Strangpressen, Druckgießen und Graugießen für metallische Werkstoffe
- Resin-Transfer-Moulding(RTM)- oder Sheet-Moulding-Compound(SMC)-Prozess für CFK-Bauteile
- Spritzgießen für Kunststoffbauteile.

Nach der Verarbeitung des Materials und der Herstellung von Halbzeugen werden diese zu Bauteilen und Komponenten und schließlich zu einem vollständigen Fahrzeug weiterverarbeitet. Hierfür wird eine Vielzahl von Fügeverfahren eingesetzt, deren Emissionsfaktoren sich häufig auf Längen, Flächen oder Anzahl der Einsatzstellen beziehen. Die berücksichtigten energieintensiven Fügeverfahren der Fahrzeugstruktur sind in etwa:

- 3.000 bis 5.000 Schweißpunkte je nach Fahrzeugtyp [Bra13, S. 507; Woh09, S. 10]; 0,003 kg CO<sub>2</sub> je Schweißpunkt [Gab13b]
- 2.000 mm Metallaktivgas(MAG)-Schweißstrecke je Karosserie [Woh09, S. 10]; 0,13 kg CO<sub>2</sub>/m [Eco13a Database]
- 3.000 mm Metallinertgas(MIG)-Schweißstrecke je Karosserie [Woh09, S. 10]; 0,16 kg CO<sub>2</sub>/m [Eco13 Database]
- 600 Stanznietpunkte, 2.800 mm lasergeschweißte und 1.700 mm gelötete Strecke [Woh09, S. 10]; aufgrund fehlender Emissionsfaktoren in den verfügbaren Datenbanken angenähert durch Punktschweißen und MAG-Schweißen [Scha13, S. 26]
- 56.000 mm Klebestrecke je Karosserie [Woh09, S. 10], Materialeinsatz 0,15 kg/m (Annahme); durchschnittlich 4,50 kg CO<sub>2</sub>/kg [Eco13a Database].

Die vorgenannten Referenzwerte werden im parametrischen Emissionsmodell auf Komponenten aufgeteilt und mit den Komponentenabmessungen eines Volkswagen Golf V verknüpft, welche anhand von Ansichten des Fahrzeugs bestimmt werden. Die Parameter des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* skalieren die Referenzwerte dann nach oben oder unten.

Abbildung 6.5 verdeutlicht das beschriebene Vorgehen anhand der vorderen Türen in Stahlbauweise eines vier-/fünftürigen Fahrzeugs. Anhang E umfasst eine Liste aller berücksichtigten Materialien sowie Verarbeitungs- und Fügeverfahren. Für alle Emissionsdatensätze wird der jeweils aktuellste verfügbare EU27-Strommix verwendet.

	Material	Verarbeitungsverfahren	Fügeverfahren
<b>Beispiel</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Türen vorne</li> <li>▪ Grundstruktur Stahl</li> <li>▪ Gewicht 39 kg</li> <li>▪ Ausgangspunkt: Ergebnis des <i>Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells</i></li> </ul>	<b>Grundstruktur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stahlcoil (50%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tiefziehen Stahl (100%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Punktschweißen</li> </ul>
	<b>Anbauteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Niedriglegierter Stahl (20%)</li> <li>▪ 80% Primär- und 20% Sekundär-Aluminium (1%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kaltmassivumgeformter Stahl (100%)</li> <li>▪ Kaltmassivumgeformtes Aluminium (100%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MIG-Schweißen</li> </ul>
	<b>Verkleidung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunststoffmix (25%)</li> <li>▪ Glas (1%)</li> <li>▪ Elektr. Bauteile (3%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Spritzguss (100%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kleben</li> <li>▪ Schrauben/Clips</li> </ul>
	$\sum = 90 \text{ kg CO}_2$		$\sum = 45 \text{ kg CO}_2$
<b>Produktionsemissionen <math>E_P = 138 \text{ kg CO}_2</math></b>			

Abbildung 6.5: Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Produktionsemissionen für die vorderen Türen aus Stahl

Der Term für die Logistikemissionen in Formel (6.2) berücksichtigt die Emissionen während des Produktionsprozesses für Transporte von Rohstoffen (sofern diese in den Emissionsfaktoren für die Rohmaterialien nicht bereits enthalten sind) und Zulieferteilen sowie die Auslieferung des Fahrzeugs. Die Transportpauschale wird anhand von zwei Referenzfahrzeugen mit 54,68 g CO<sub>2</sub>/kg Fahrzeugleermasse berechnet.

### 6.2.2 Betrieb

Die Emissionen der Lebensphase Nutzung bzw. Betrieb  $E_B$  setzen sich zusammen aus dem mittleren Streckenenergieverbrauch des Fahrzeugs  $\bar{V}$ , der Gesamtfahrleistung  $s_{LZ}$  und den in Abbildung 6.1 gezeigten mittleren spezifischen Emissionen des Energieträgers  $\bar{c}_{ET}$ , Formel (6.3) [Fuc12a]. Hinzu kommen Emissionen für die Fahrzeugwartung  $E_W$ , hauptsächlich in Form von Wartungs- und Verschleißteilen.

$$E_B = s_{LZ} \bar{V} \bar{c}_{ET} + E_W \quad (6.3)$$

Als mittlerer Streckenenergieverbrauch wird der mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo- dell* ermittelte Verbrauch zugrunde gelegt. Die spezifischen Emissionen des Energieträgers hängen bei BEV, wie gezeigt, sehr stark von dem Strommix des jeweiligen Landes ab. Das Emissionsmodell rechnet mit einem gemittelten Emissionsfaktor, ausgehend von dem vorläufigen Emissionsfaktor von 2011 in Deutschland und einer zeitlichen Entwicklung abhängig von dem Produktionszeitpunkt und der Lebensdauer des Fahrzeugs in Jahren. 2011 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix 20,4 Prozent; laut Bundesregierung sollen bis 2020 mindestens 35 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen stammen [Bun12, S. 13 und 9]. Für diesen Zeitraum wird eine lineare Interpolation zugrunde gelegt. Danach wird eine Reduktion des Emissionsfaktors um 2 Prozent p.a. angenommen. Für ein 2014 produziertes BEV mit einer Laufleistung von 15 Jahren ergibt sich so beispielsweise ein durchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 459 g CO<sub>2</sub>/kWh für den Betriebszeitraum. Abweichende CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für andere Länder oder alternative Stromquellen lassen sich ebenfalls im Emissionsmodell auswählen und für eine Simulation berücksichtigen.

Für die Emissionswerte der Wartungs- und Verschleißteile werden die entsprechenden Emissionswerte aus der Produktion genutzt. Folgende Annahmen werden hinsichtlich der Wartungsemissionen getroffen:

- Die Traktionsbatterie bei BEV stellt den gewichtigsten Emissionsposten dar. Anhand eines sehr vereinfachten Lebensdauer-Modells für den Antriebsakku in Abhängigkeit von Kapazität, Fahrzeugverbrauch, Ladungshub, Kapazitätsverlust über Zeit und Mindestreichweite zum Lebensende des Akkus wird die Lebensdauer abgeschätzt. Abhängig von der Wahl der Parameter ergibt sich für einen mittelgroßen Lithium-Ionen(Li-Io)-Akku eine Gesamtreichweite von 150.000 km.
- Die Starterbatterie bei ICEV muss alle 4 Jahre erneuert werden [Schw04, S. 23].
- Der Pufferakku in BEV wird höher belastet und muss alle 30.000 km oder alle 4 Jahre getauscht werden.
- Die Reifen müssen alle 43.000 km erneuert werden [Schw04, S. 23].
- Weitere Verschleißteile (Bremsbeläge, Ölwechsel bei ICEV etc.) fallen nicht sonderlich ins Gewicht, werden dennoch im Modell in regelmäßigen Intervallen berücksichtigt.

Die Betriebsemissionen und auch die gesamten Lebenszyklusemissionen können auch in Abhängigkeit des Parameters Gesamtfahrleistung berechnet werden. Eine grafische Darstellung ist dann als kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechend Abbildung 2.7 möglich. Alternativ bietet sich die in [Fuc12a] hergeleitete Darstellung der kilometerbezogenen Lebenszyklusemissionen an, wie sie in [Fuc12a], [Fuc13c, S. 28 ff.] und [Fuc14a] genutzt wird.

### 6.2.3 Recycling

Innerhalb der Europäischen Union liegt die gesetzlich geforderte Wiederverwertungs- und Recyclingrate seit 2006 bei mindestens 80 Prozent der Fahrzeugmasse. Ab 2015 steigt diese Rate auf 85 Prozent [Eur11]. Ob für eine Rückführung von Material in den Wertstoffkreislauf Gutschriften vergeben werden sollen, ist strittig. Häufig werden Fahrzeuge in das außereuropäische Ausland verkauft und unterliegen dann nicht mehr der EU-Gesetzgebung in Bezug auf eine Fahrzeugverwertung.

Der Umgang mit Gutschriften ist selbst innerhalb von Automobilkonzernen nicht einheitlich. Volkswagen beispielsweise berücksichtigt in den offiziellen Sachbilanzen zu einzelnen Fahrzeugen keine Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus Verwertungsprozessen und rechnet somit mit dem Worst-Case-Szenario [Vol12c, S. 6]. [War12] beschreibt die Bewertung von Leichtbaukonzepten innerhalb von Volkswagen und führt die Sekundärrohstoffe aus der Fahrzeugverwertung als zu berücksichtigenden Faktor an. Für eine ganzheitliche Betrachtung wird in dem hier vorgestellten parametrischen Ansatz die Rohstoffrückführung mit einbezogen.

Prinzipiell erfolgt das Recycling analog dem Vorgehen für die Emissionsabschätzung der Rohmaterialgewinnung. Für jeden Materialanteil in Kilogramm wird aus den Datenbanken ein Emissionsfaktor für das Recycling ermittelt. Dieser kann sowohl positiv, beispielsweise bei nicht recyclingfähigen Bestandteilen für eine Deponie, als auch negativ sein, beispielsweise bei in den Rohstoffkreislauf rückführbaren Materialien, die an Stelle von energieaufwändig zu gewinnendem Primärmaterial für andere Produkte wiederverwendet werden können.

Die Höhe des Emissionsfaktors hängt teilweise entscheidend von der eingesetzten Recyclingtechnologie ab. Als Beispiel sei das Pyrolyseverfahren für CFK genannt. CFK erfordert für die Herstellung der Kohlefasern einen hohen Energieaufwand und führt damit zu hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion. Nach derzeitigem Stand der Technik können CFK-Materialien nur mit großen Einbußen bei der Qualität der Fasern recycelt werden. Daher ist eine thermische Verwertung des CFK der gängige Weg des Recycling. Dies führt nach Abzug der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verbrennung zu einer Netto-Gutschrift von circa 0,9 bis 1,2 kg CO<sub>2</sub>/kg CFK abhängig von dem Verhältnis aus Fasern zu Matrixmaterial und dem Herstellungsprozess (RTM oder SMC). Mit Hilfe des in der Forschung befindlichen Pyrolyseverfahrens könnten die Fasern zukünftig mit nur geringen Qualitätseinbußen aus der Matrix herausgelöst und weiterverwendet werden. Nach Abzug des Prozessaufwands für die Pyrolyse könnte dann eine Netto-Gutschrift von rund 15 kg CO<sub>2</sub>/kg RTM- und 9 kg CO<sub>2</sub>/kg SMC-CFK erfolgen [Scha13, S. 49 ff.; Fuc14a].

## 6.3 Modellierung der Gesamtkosten

TCO lassen sich ebenfalls in drei Lebenszyklusphasen unterteilen, ähnlich denen der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen:

- Die Produktion umfasst die direkten Herstellkosten, indirekte Kosten als Umlage, Margen und alle weiteren Kostenpositionen bis zum Listenpreis eines Fahrzeugs. Quersubventionen innerhalb des Automobilherstellers oder Subventionen von anderer Seite werden nicht untersucht.
- Der Betrieb berücksichtigt die Kosten für den Energieträger und die Wartungs- und Verschleißteile. Nicht betrachtet werden die Kosten für Gara-

ge/Stellplatz, Parken, Waschen etc. Diese Kosten müssen zwar genau genommen für eine TCO-Betrachtung mit erfasst werden, fallen jedoch einerseits für alle Fahrzeugkonzepte (sowohl ICEV auch als BEV) mehr oder weniger in gleichem Umfang an und hängen andererseits sehr stark von dem Einsatzort und der Einsatzart des Fahrzeugs ab. So lange die TCO eines Fahrzeugkonzepts nicht mit den TCO anderer Verkehrsmittel verglichen oder Veränderungen des Mobilitätsverhaltens von ICEV gegenüber BEV untersucht werden sollen, sind die zuvor genannten nicht berücksichtigten Kosten ohne Bedeutung.

- Nach einigen Jahren Betrieb kann ein Fahrzeug entweder verkauft oder, bei entsprechend langer Nutzung, verschrottet werden. Bei einem Verkauf richtet sich der Erlös nach den ursprünglichen Anschaffungskosten abzüglich eines Wertverlusts durch Nutzung und Alterung.

Die nachfolgenden Absätze beschreiben die Modellierung der drei Lebensphasen. In dem Kostenmodell werden zukünftige Kosten nicht diskontiert, um betriebswirtschaftliche Effekte und technische Aspekte nicht zu vermischen. Die ermittelte TCO-Summe entspricht somit nicht dem Kapitalwert (Net Present Value, NPV).

### 6.3.1 Produktion

Herstellkosten von Produkten lassen sich, wie in Abschnitt 2.5 erwähnt, über einen spezifischen Funktionswert annähern [Schl04, S. 13]; in frühen Projektphasen kann dies das Gewicht sein. Wird jedes Bauteil eines Fahrzeugs als eigenständiges Produkt betrachtet, entsprechen die Gesamtkosten eines Fahrzeugs den Kosten aller Bauteile zuzüglich deren Montage, Abbildung 6.6.

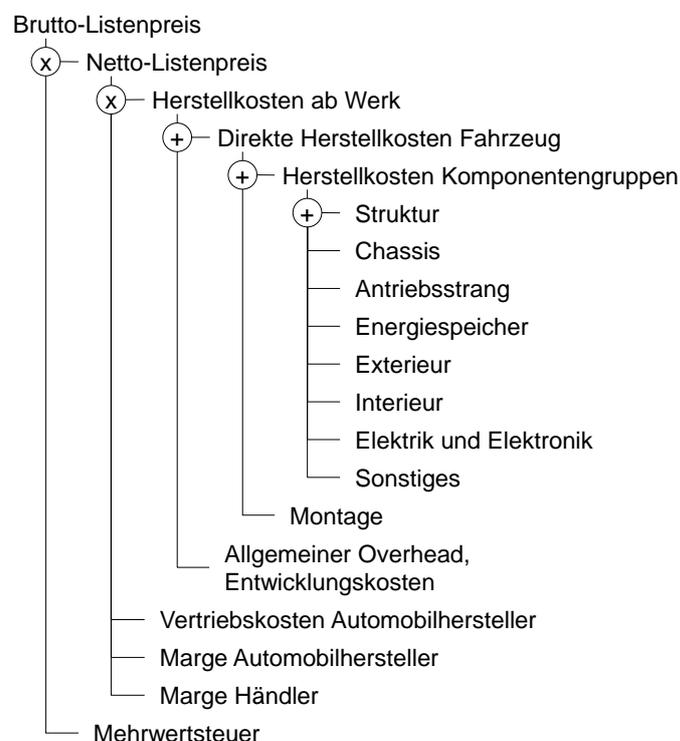


Abbildung 6.6: Abschätzung des Brutto-Listenpreises und der Herstellkosten eines Fahrzeugs  
Struktur ab Herstellkosten ab Werk vgl. [McK12, S. 72]

Die größte Herausforderung bei der Modellierung von Herstellkosten ist die Recherche verlässlicher Referenzwerte:

- Weil die Kostendaten für Automobilhersteller hochsensible Daten und praktisch nicht öffentlich verfügbar sind [IKA12, S. 75], weist von den bisher vorgestellten Modellen das Kostenmodell die größte Unsicherheit auf.
- Herstellkosten und Verkaufspreise sind zudem stark unternehmenspolitisch beeinflusst. Aus Gründen von Markenimage und strategischer Produktplatzierung werden einzelne Produkte trotz eines (anfänglich) negativen Deckungsbeitrags angeboten. 2012, knapp zwei Jahre nach Markteinführung, macht GM mit dem Chevrolet Volt angeblich 49.000 USD Verlust pro Fahrzeug. Toyota erzielt mit dem Prius erst seit der dritten Modellgeneration Gewinn [Woo12].
- Bei neu eingeführten Technologien kann der Verkaufspreis anfangs generell unter den Herstellkosten liegen, woraus sich für Hersteller zuerst ein negativer Deckungsbeitrag ergibt [IKA12, S. 74 ff.]. Bei elektrifizierten Fahrzeugen allgemein (xEV) realisieren Hersteller niedrigere Deckungsbeiträge als bei ICEV [Ber13, S. 4]. Beim Audi A2 mit einer Aluminiumkarosserie, dessen Produktion aufgrund schlechter Verkaufszahlen eingestellt wurde, liegt der geschätzte Verlust pro Fahrzeug bei rund 7.500 EUR [War13, S. 6].
- Auch bei klassischen, konventionellen Fahrzeugen wird immer wieder vermutet, dass ein Gewinn erst über den Verkauf von Sonderausstattung erfolgt. Bei Sonderausstattung können Automobilhersteller 50 bis 150 Prozent des Einkaufspreises als Gewinn verbuchen [Sei13].

Diese Aspekte gestalten den Aufbau und die Plausibilisierung eines Herstellkostenmodells für ein konkretes Fahrzeug entsprechend schwierig.

Die Kosten der Komponentengruppen, aufgeschlüsselt nach Bauteilen, werden mit unterschiedlichen Ansätzen modelliert – entweder über das Bauteilgewicht oder, wenn verfügbar und anwendbar, über konkrete Bauteilkosten und entsprechende Skalierungsparameter. Im Fall des Bauteilgewichts werden die Kosten anhand der in Abbildung 6.4 vorgestellten Materialzusammensetzung und Kostenfaktoren ermittelt. Für die bedeutenden Komponentengruppen und Materialien wird wie folgt vorgegangen:

- Für die üblicherweise in Stahl gefertigten Komponentengruppen von Struktur und Exterieur liefert [Wor13] eine Modellrechnung der Kosten für ein Mittelklassefahrzeug. Dieses wird in die Bauteile entsprechend dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo- dell* unterteilt, und anschließend werden für die jeweiligen Bauteile Kostenfaktoren pro Kilogramm Bauteil abgeleitet. Auf Basis der gemittelten Werte aus [VDI98] und [Koc14] wird für Aluminium ein Kostenfaktor von 3,5 gegenüber den Stahlkosten festgelegt.
- Die in der Literatur angegebenen Kosten für den Serieneinsatz von CFK schwanken sehr stark. [Läs12, S. 14] geht von 600 bis 800 Prozent Bauteilkosten für ein CFK-Bauteil im Vergleich zu einem Stahlbauteil aus. Das Gewicht des CFK-Bauteils gibt [Läs12, S. 14] mit 43 - 48 Prozent des Stahlbauteils an. Daraus lässt sich ein Kostenfaktor je kg CFK gegenüber Stahl von rund 14,6 bis 18,6 ableiten. Bis 2020 erwartet [Läs12, S. 18] eine Kostensenkung um 30 Prozent.

- Für verschiedene Kunststoffbauteile und -materialien werden anhand eines Cleansheet-Ansatzes die Sollkosten bestimmt und daraus durchschnittliche Kostenfaktoren je kg Material ermittelt. Die Berechnung der Sollkosten umfasst die typischen Maschinenstundensätze je nach Bauteil, Maschinenab-schreibung, Ausschuss etc. aus [VDM13].
- Für eine Vielzahl von Standardbauteilen, beispielsweise Airbags, Schei-benwischer, Sitze etc., enthält [Koc14] Referenzwerte. Je nach Bauteil werden diese entweder direkt und ohne Skalierung oder anhand von Pa-rametern des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* skalierbar gestaltet über-nommen.
- Die Kosten für die Batterie sind ein signifikanter Faktor für die Kosten von BEV. Zusätzlich zu der installierten Kapazität hängen die Kosten von der Leistungsfähigkeit der Zellen ab. In der Literatur werden sehr unterschiedli-che Werte angegeben, je nach betrachtetem Zeitpunkt; in den kommenden Jahren werden die Batteriekosten voraussichtlich stark sinken [Bur14, S. 14]. Für das Modell werden drei Szenarien in Anlehnung an die Werte von [Koc14] abgeleitet.

Abbildung 6.7 zeigt eine Auswahl an Kostenfaktoren (oben) und Komponenten mit hinterlegten Szenarien (unten). Für die nachfolgenden Simulationen werden nur die Kostenfak-toren der Bauteile Batteriesystem, Elektromotor und CFK variiert; alle weiteren Kostenfak-toren sind konstant. Anhang F umfasst eine Liste der berücksichtigten Materialien, Verar-beitungs- und Fügeverfahren und Einzelkomponenten.

<b>Auswahl an Basismaterialien</b>			
<b>Material</b>	<b>Kennzeichnung/zus. Informationen</b>	<b>Kosten in EUR/kg</b>	<b>Quelle</b>
Stahl	CP1000, Rohmaterial	0,95	[Thy13a]
Stahl	DP1000, Rohmaterial	1,08	[Thy13b]
Stahl	15 weitere Stahlsorten verschiedener Güte	0,81...1,39	[Thy13b], [Thy13c], [Hus12]
Stahl	Berechneter Rohmaterial-Durchschnittswert für ein Beispielfahrzeug, inklusive Verschnitt	1,76	Orientiert an [Wor13]
Aluminium	Aluminium allgemein, Rohmaterial, mit Verschnitt	6,16	Faktor 3,5 vs. Stahl [VDI98]
Kunststoff	PE, mit Verarbeitung	3,30	} Industrieangaben, } Untermodell
Kunststoff	ABS, mit Verarbeitung	4,05	

<b>Auswahl an Komponenten und Materialien mit hinterlegten Szenarien</b>				
<b>Komponente</b>	<b>Kosten in EUR/(...)</b>			<b>Quelle</b>
	<b>gegenwärtig</b>	<b>mittelfristig</b>	<b>langfristig</b>	
Batteriesystem VDA	300 (kWh)	180 (kWh)	150 (kWh)	} Orientiert an [Koc14]
Batteriesystem 18650	200 (kWh)	100 (kWh)	100 (kWh)	
PSM, Nennleistung	15 (kW)	10 (kW)	10 (kW)	
ASM, Nennleistung	12 (kW)	8 (kW)	8 (kW)	
CFK, mit Verarbeitung	50 (kg)	35 (kg)	/	Orientiert an [Läs12]

Abbildung 6.7: Auswahl an Kostenfaktoren für die Produktion von Fahrzeugen

Zu den Herstellkosten der Komponentengruppen in Abbildung 6.6 kommen die Montagekosten aus Anzahl der erforderlichen Montagestunden und dem Stundenlohn hinzu. Ebenso werden Zuschläge für allgemeine Overhead-Kosten, Abschreibung für die Maschinen und Abschreibung für die Entwicklungskosten berücksichtigt. Der so berechnete Kostenwert bildet die Herstellkosten des Automobilherstellers.

Die Herstellkosten des Automobilherstellers haben einen Anteil von rund 50 bis 60 Prozent am Brutto-Listenpreis des Fahrzeugs. Aufschläge auf die Herstellkosten umfassen die Herstellermarge, Händlermarge, Vertriebskosten und Mehrwertsteuer. Für alle Aufschläge werden Durchschnittswerte in Anlehnung an [IKA12, S. 75] und [McK12, S. 73] angenommen.

### 6.3.2 Betrieb

Die Kosten in der Betriebsphase setzen sich aus kontinuierlichen und diskreten Kosten zusammen. Die kontinuierlichen Kosten können mit Verbrauch und Kostenfaktor des Energieträgers und der Laufleistung berechnet werden. Die diskreten Kosten entstehen durch Wartungs- und Ersatzteile. Zusätzlich werden die anfallenden Kosten für Steuern und Versicherungen in Deutschland berücksichtigt. Hierfür wird auf die Werte aus [Lin12] zurückgegriffen. Für die Wartungs- und Ersatzteile gelten dieselben Intervallannahmen wie bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### 6.3.3 Fahrzeugverkauf oder Recycling

Bei den Fahrzeugkosten werden zwei Sichtweisen unterschieden: die Produktperspektive und die Nutzerperspektive. Die Produktperspektive umfasst den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs bis zu einem Fahrzeugrecycling. Beim Recycling erfolgt ein Erlös für die Materialbestandteile. Ein Fahrzeugverkauf ins Ausland zu einem Zeitpunkt, bei dem nach deutschen Standards ein Recycling erfolgen würde oder ein Ausschleppen des Fahrzeugs und ein Verkauf der Bestandteile als Ersatzteile, werden nicht berücksichtigt.

In der Nutzerperspektive erfolgt meist nach einigen Jahren Haltedauer eines Fahrzeugs ein Verkauf, bei dem ebenfalls ein Erlös erzielt wird. Die Differenz aus Anschaffungskosten und Erlös stellt den Wertverlust des Fahrzeugs dar. Diesen Ansatz verwendet [All13b] bei der Angabe der Fahrzeugkosten.

Der Wertverlust wird im Kostenmodell anhand des üblichen Wertverlusts von Referenzfahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen ermittelt [Lin12, S. 31]. Dabei wird angenommen, dass BEV einen ähnlichen prozentualen Wertverlust wie ICEV erfahren; bisher stehen nicht ausreichend Erfahrungswerte zur Verfügung, um einen Wertverlust-Verlauf für BEV zu ermitteln.

## 6.4 Plausibilisierung

Im Vergleich zum *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* ist der Anspruch für eine Plausibilisierung des CO<sub>2</sub>-Emissionsmodells und des Kostenmodells geringer. Das Emissions- und das Kostenmodell sind deutlich gröber modelliert, bilden nicht alle Details ab und treffen viele Annahmen. Dennoch soll sichergestellt werden, dass allgemeine Erkenntnisse auf Gesamtfahrzeugebene aus den Modellen abgeleitet werden können. Eine Diskussion der Simulationsergebnisse in einem übergeordneten Kontext erfolgt in Kapitel 8.

### 6.4.1 CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen

Abbildung 6.8 vergleicht die in [Vol12c] angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Umweltbilanzierung mit den Simulationsergebnissen des CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionsmodells für je einen Volkswagen Golf VII mit Otto- und mit Dieselmotor und einen Golf VI mit Dieselmotor. Folgende Annahmen und Aspekte sind dabei besonders hervorzuheben:

- Die Eingangsdaten für das CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionsmodell stammen aus dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo­dell*. Eine mögliche Abweichung zwischen Simulation und Herstellerangabe beim Fahrzeuggewicht und dem Fahrverbrauch führt auch im Emissionsmodell zu abweichenden Werten.
- Im Gegensatz zum CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionsmodell berücksichtigt [Vol12c] keine Gutschriften für die Rückführung von Materialien beim Recycling.
- Die Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Lebensphasen kann nur anhand der Grafiken in [Vol12c, S. 14] abgeschätzt werden; die genauen Werte sind nicht abgedruckt. Für das Recycling wird aufgrund des „sehr geringen Niveaus“ [Vol12c, S. 14] kein Wert dargestellt. Damit kann für die Plausibilisierung des Modells der zugehörige Wert nicht abgeschätzt werden.

Quelle		VW Golf VII 1.2 TSI BMT			VW Golf VI 1.6 TDI			VW Golf VII 1.6 TDI BMT		
		[Vol12c]	Modell	Differenz	[Vol12c]	Modell	Differenz	[Vol12c]	Modell	Differenz
Gewicht	in kg	1.205	1.200	-0,3%	1.314	1.270	-3,3%	1.295	1.291	-0,3%
Verbrauch	in l/100 km	4,9	4,3	-12,2%	4,5	3,8	-15,6%	3,8	3,9	+2,6%
Fahrleistung	in km	150.000			150.000			150.000		
Emissionen Produktion <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	4,9	5,3	+8,2%	5,7	5,5	-3,5%	5,1	5,6	+9,8%
Emissionen Betrieb <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	21,0 <sup>3</sup>	18,5	-11,9%	20,0 <sup>3</sup>	16,9	-15,5%	17,1 <sup>3</sup>	17,4	+1,8%
Emissionen Recycling <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	/ <sup>4</sup>	-1,2	n.v.	/ <sup>4</sup>	-1,2	n.v.	/ <sup>4</sup>	-1,3	n.v.
Gesamt ohne Recycling	in t CO <sub>2</sub>	25,9	23,8	-8,1%	25,7	22,4	-12,8%	22,2	23,0	+3,6%
<b>Gesamt mit Recycling<sup>2</sup></b>	<b>in t CO<sub>2</sub></b>	<b>25,9</b>	<b>22,6</b>	<b>-12,7%</b>	<b>25,7</b>	<b>21,2</b>	<b>-17,5%</b>	<b>22,2</b>	<b>21,8</b>	<b>-1,8%</b>

Abbildung 6.8: Simulationsergebnisse CO<sub>2</sub>-Emissionen für ICEV

<sup>1</sup> Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus [Vol12c] abgeschätzt anhand der grafischen Angabe der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, Zahlenwerte sind nicht angegeben; <sup>2</sup> [Vol12c] ohne Gutschriften für Rückführung von Sekundärmaterialien; <sup>3</sup> ohne Fahrzeugwartung; <sup>4</sup> lt. [Vol12c]: „Grafische Darstellung der Verwertung aufgrund des sehr geringen Niveaus nicht möglich.“

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Produktion weichen in der Simulation um -4 bis +10 Prozent von den abgeschätzten tatsächlichen Werten ab:

- Bei dem Golf VII Diesel aus 2012 sind die berechneten Emissionen höher als in [Vol12c] angegeben, bei dem Vorgängermodell Golf VI Diesel etwas niedriger.
- Im Vergleich der Herstellerangaben [Vol12c] weist das neuere Fahrzeug geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Volkswagen investierte zuletzt intensiv in die umweltfreundlichere Gestaltung der Produktion. Diese Optimierungen lassen sich im Modell nicht abbilden, weil entsprechende Emissionswerte nicht verfügbar sind.

Für die Abweichung bei den berechneten Betriebsemissionen gegenüber den Betriebsemissionen aus [Vol12c] gibt es mehrere Gründe:

- Die Betriebsemissionen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch. Die Abweichung bei den Betriebsemissionen lässt sich größtenteils durch den abweichend berechneten Kraftstoffverbrauch erklären.
- Bei dem von [Vol12c] für die Gegenüberstellung mit dem Nachfolgemodell verwendeten Golf VI handelt es sich nicht um die emissionsärmste Variante. Den Golf VI gibt es auch als Version 1.6 TDI BlueMotion mit 77 kW und einem angegebenen Normverbrauch von 3,8 l/100 km. Dieser Verbrauchswert bestätigt den vom Modell errechneten Verbrauchswert und zeigt, dass ein entsprechend geringer Verbrauch zu der Bauzeit des Golf VI technologisch bereits darstellbar war.
- [Vol12c] berücksichtigt keine Fahrzeugwartung, weil diese nur eine geringe Auswirkung auf die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen hat.

Den Vergleich zwischen simulierten und angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionen für BEV zeigt Abbildung 6.9 anhand des Volkswagen e-up! und des Nissan Leaf. Hier gelten die gleichen Annahmen und Aspekte wie für ICEV. Für den Nissan Leaf aus [Fra12] werden die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen ausgehend von den angegebenen kilometerbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der in dieser Studie zugrunde gelegten Gesamtfahrleistung von 180.000 km hochgerechnet. Die Aufteilung zwischen Produktion und Betrieb erfolgt ebenfalls anhand der Grafik. Über die Berücksichtigung des Recycling beim Nissan Leaf ist nichts bekannt. Für den Betrieb wird für den e-up! der EU27-Strommix entsprechend [Vol13e, S. 7] (angegeben ist Bezugsraum Europa) angenommen, für den Leaf wird der in [Fra12] angegebene Emissionsfaktor von 559 g/kWh berücksichtigt.

Quelle		VW e-up!		Differenz	Nissan Leaf		Differenz
		[Vol13e] Modell			[Fra12] <sup>4</sup> Modell		
Gewicht	in kg	1.214	1.185	-2,4%	1.580	1.483	-6,1%
Verbrauch	in kWh/100 km	11,7	11,4	-2,6%	13,7	13,2	-3,6%
Fahrleistung	in km	150.000			180.000		
Emissionen Produktion <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	7,2	7,3	+1,4%	9,9	9,8	-1,0%
Emissionen Betrieb <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	8,8 <sup>3</sup>	8,7	-1,1%	22,9	23,4 <sup>5</sup>	+2,2%
Emissionen Recycling <sup>1</sup>	in t CO <sub>2</sub>	0,7 <sup>2</sup>	-0,8	n.v.	<sup>6</sup>	-1,2	n.v.
Gesamt ohne Recycling <sup>2</sup>	in t CO <sub>2</sub>	16,0	16,0	0%	32,8	33,2	+1,2%
<b>Gesamt mit Recycling<sup>2</sup></b>	<b>in t CO<sub>2</sub></b>	<b>16,7</b>	<b>15,2</b>	<b>-9,0%</b>	<b>32,8</b>	<b>32,0</b>	<b>-2,4%</b>

Abbildung 6.9: Simulationsergebnisse CO<sub>2</sub>-Emissionen für BEV

<sup>1</sup> Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Quellen abgeschätzt anhand der grafischen Angabe der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, Zahlenwerte sind nicht angegeben; <sup>2</sup> [Vol13e] ohne Gutschriften für Rückführung von Sekundärmaterialien; Vorgehen diesbezüglich bei [Fra12] nicht angegeben; <sup>3</sup> ohne Fahrzeugwartung; <sup>4</sup> angegebene km-bezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen anhand der angegebenen Bezugsfahrleistung von 180 Tkm auf Fahrzeugleben umgerechnet; <sup>5</sup> berechnet mit Realverbrauch Sommer und Ladewirkungsgrad aus [Fra12] für Vergleichbarkeit; der für die Berechnung in [Fra12] zugrunde gelegte Verbrauch ist nicht angegeben; <sup>6</sup> keine Angabe

Die Emissionen der Produktion werden ungefähr genauso hoch berechnet wie der aus den Referenzquellen entnommene Wert, ebenso die Betriebsemissionen. Für eine bessere Vergleichbarkeit mit dem Modell werden beim Nissan Leaf für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der in der Studie [Fra12, S. 10] tatsächliche ermittelte Verbrauch im Sommer von 19,1 kWh/100 km und der angegebene Ladungswirkungsgrad von 0,9 zugrunde gelegt. Der ermittelte Verbrauch liegt deutlich über dem angegebenen Normverbrauch inklusive Ladeverlusten von 15 kWh/100 km. Der für die Berechnung in [Fra12] zugrunde gelegte Verbrauch ist nicht angegeben.

### 6.4.2 Gesamtkosten

Abbildung 6.10 vergleicht die berechneten Herstellkosten mit den Listenpreisen der Hersteller. Bei den Premium-Fahrzeugen von Audi liegt der Herstellerlistenpreis über dem berechneten Modellergebnis. Bei Massenherstellern mit einem auf günstigere Preise ausgerichteten Produktportfolio (Fiat, Kia) berechnet das Gewichtsmodell zu hohe Herstellkosten. Bei gehobenen Massenherstellern (Volkswagen, Mini, Ford) liegen die berechneten Preise ungefähr in der Größenordnung der Herstellerpreise. Eine Ausnahme bildet hier der im Vergleich extrem günstige Volkswagen up!. Ein solches, technisch sehr einfach gehaltenes Fahrzeugkonzept weicht offenbar so stark von typischen Werten gängiger Fahrzeuge ab, dass hier keine Aussage getroffen werden kann.

	Hersteller	Modell	Listenpreis			Marge <sup>1</sup> in Prozent
			Hersteller in EUR, 2013	Modell in EUR	Delta in Prozent	
<b>Otto-ICEV</b>	Audi	A4 1.8 TFSI (88 kW)	28.100	24.424	-13	10,5
	Audi	A4 1.8 TFSI (125 kW)	31.500	28.282	-10	10,5
	Audi	A4 2.0 TFSI (132 kW)	33.450	28.592	-15	10,5
	Fiat	Punto 1.4 (77 kW)	13.390	16.664	24	-1,0
	Kia	Ceed 1.4 (73kW)	14.590	18.849	29	7,6
	VW	up! 1.0 MPI BM (44 kW)	10.375	15.589	50	3,0
<b>Diesel-ICEV</b>	Audi	A4 2.0 TDI (88 kW)	30.500	25.057	-18	10,5
	Audi	A4 2.0 TDI (110 kW)	32.600	25.987	-20	10,5
	Audi	A4 2.0 TDI (130 kW)	34.700	27.607	-20	10,5
	Ford	Mondeo Lim. 2.0 (103kW)	27.950	25.340	-9	4,3
	Mini	One D (66 kW)	18.550	20.217	9	9,8
	VW	Golf 1.6 TDI BMT (77 kW)	20.975	20.058	-4	3,0

Abbildung 6.10: Simulationsergebnisse Kosten für ICEV

<sup>1</sup> [Car13]; Herstellerangaben und Simulationsparameter der Ende 2013 gültigen Produktkataloge

Der Vergleich zeigt auch, dass die Herstellkosten neben den Hersteller- und Händlermargen stark von dem Innovations- und Wertigkeitsanspruch des Fahrzeugs und der Zielkundengruppe abhängen. Diese Aspekte können im Kostenmodell derzeit nicht hinreichend berücksichtigt werden.

Abbildung 6.11 vergleicht die kilometerbezogenen Kosten für den Volkswagen Golf VII mit den Angaben aus [All13b]. Die Gründe für die sich mit der Laufleistung und der Haltedauer verändernde Abweichung des Modells können nicht weiter analysiert werden, weil die Annahmen aus [All13b] nicht bekannt sind. Dies betrifft insbesondere Kraftstoffpreis, Verbrauch und Wertverlust.

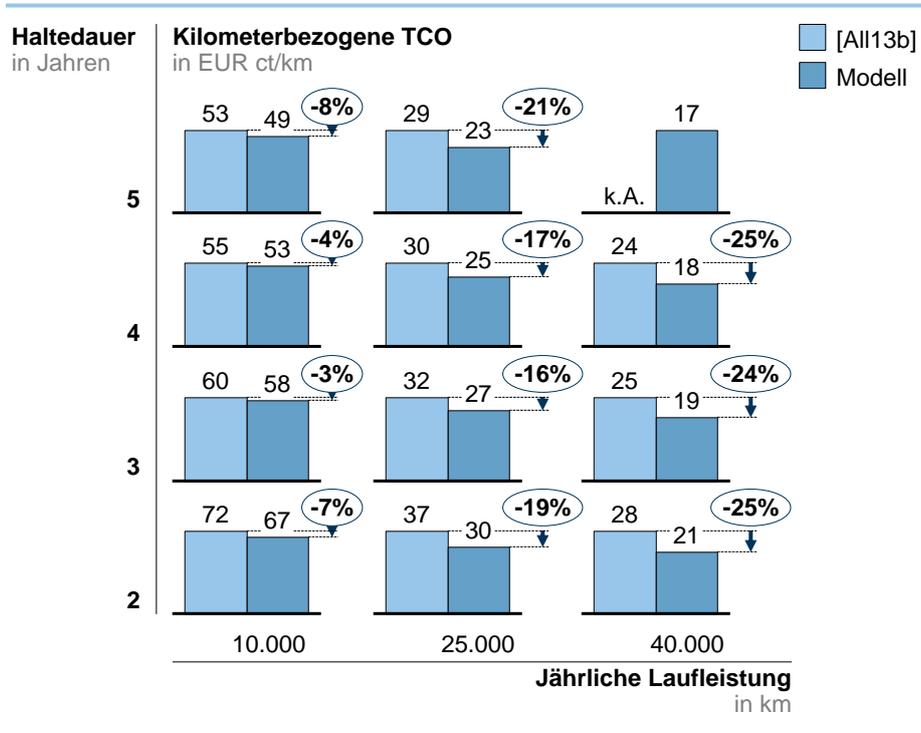


Abbildung 6.11: Kilometerbezogene Lebenszykluskosten für den Volkswagen Golf VII 1.6 TDI

Bei BEV ist eine Plausibilisierung anhand von Hersteller-Listenpreisen nicht möglich. Die Unsicherheiten bei den Batteriekosten und den Kosten für den Elektromotor sind zu groß. Ebenso ist nicht bekannt, ob und wie hoch BEV firmenintern quersubventioniert werden.



## 7 Anwendungsbeispiele und Erkenntnisse

Die Funktionsweise des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* wird detailliert in Kapitel 5 anhand von simulierten Referenzfahrzeugen verdeutlicht. Kapitel 6 beschreibt die an das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* anknüpfenden Modelle für die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die TCO. In diesem Kapitel werden das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* für neue Fahrzeugkonzepte eingesetzt und generelle Aspekte der Fahrzeugauslegung untersucht, zum Beispiel: Wie viel Mehrgewicht bringt ein verlängerter Radstand bei einem ICEV? Ist es bei einem BEV sinnvoller, die Struktur aus Stahl, Aluminium oder CFK zu fertigen?

Als Referenz für die Simulationen dieses Kapitels dient das Fahrzeug aus Abbildung 7.1, genannt Basisfahrzeug. Die Abmessungen des Basisfahrzeugs liegen zwischen den Abmessungen eines Volkswagen Polo V und eines Volkswagen Golf VII. Anhang G umfasst alle Parameter des Basisfahrzeugs. Wenn nachfolgend diese Parameter variiert werden, wird jeweils darauf hingewiesen. Angegebene Produktionskosten entsprechen den direkten Herstellkosten aus Abbildung 6.6 und beziehen sich auf das mittelfristige Kostenszenario.

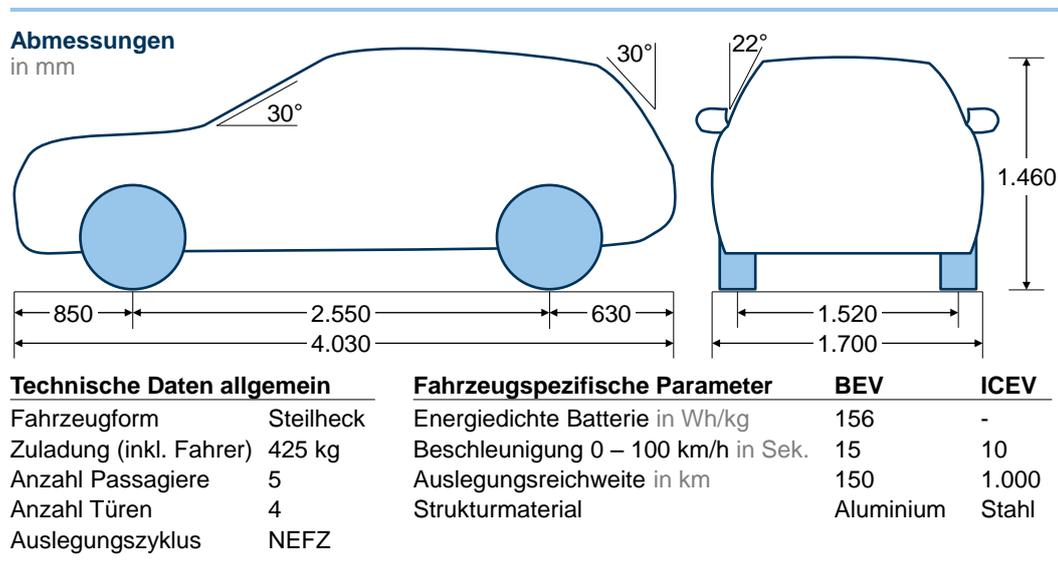


Abbildung 7.1: Basisfahrzeug für die Anwendungsbeispiele

### 7.1 Allgemeine Erkenntnisse aus Parametervariationen

Das ermittelte Fahrzeuggewicht für das ICEV-Basisfahrzeug beträgt 1.190 kg für einen Dieselmotor und 1.116 kg für einen Ottomotor, Abbildung 7.2. Im Unterschied zu auf dem Markt erhältlichen Diesel- und Otto-ICEV wird beiden Fahrzeugen eine einheitliche Reichweite (1.000 km) vorgegeben. Bei existierenden Fahrzeugen wird für Diesel- und Ottofahrzeuge häufig ein einheitliches Tankvolumen gewählt; die Reichweite unterscheidet sich in diesen Fällen für die beiden Motorarten.

Abbildung 7.2 zeigt auch die Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts von der Auslegungreichweite. Eine größere Reichweite erfordert einen größeren Energiespeicher, der mit einem entsprechenden Mehrgewicht verbunden ist. Bei einer Veränderung der Auslegungreichweite um 20 Prozent verändert sich das Fahrzeuggewicht des Diesel-ICEV um 0,9 Prozent und das des Otto-ICEV um 1,0 Prozent. Bei dem Diesel-ICEV ist die Auswir-

kung der geänderten Reichweite geringer, weil ein Dieselmotor einen höheren Wirkungsgrad als ein Ottomotor hat und somit weniger Kraftstoff verbraucht. Ebenfalls begünstigend wirken sich die höhere Dichte und der höhere Heizwert von Diesel (EU4) und damit ein volumenbezogen rund 14 Prozent höherer Energieinhalt gegenüber Ottokraftstoff (Super 95) aus [Bra13, S. 483]. Die prozentuale Auswirkung einer Veränderung der Reichweite nach oben oder unten ist ungefähr gleich; offenbar liegt in diesem Bereich eine näherungsweise lineare Abhängigkeit des Gewichts von der Reichweite vor.

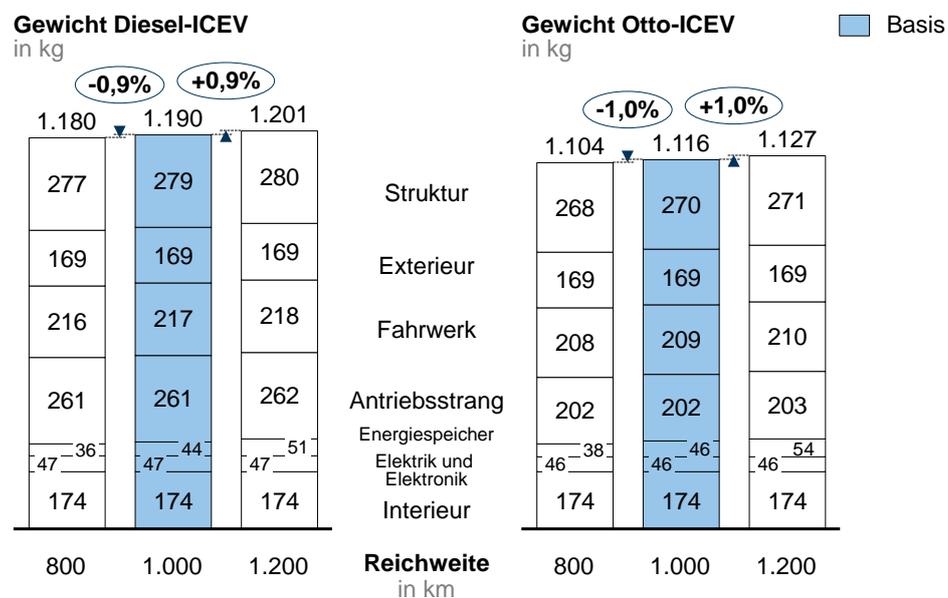


Abbildung 7.2: Gewicht von ICEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten

Gesamtgewicht und prozentuale Abweichung entsprechen dem genauen Simulationsergebnis; darstellungsbedingt sind Rundungsabweichungen möglich

Eine Veränderung der Beschleunigungsvorgabe von 0 auf 100 km/h um 20 Prozent führt bei dem ICEV-Basisfahrzeug zu einer stärkeren Gewichtsveränderung als die Veränderung der Reichweite um 20 Prozent, Abbildung 7.3. Bei einer Verringerung der Beschleunigungszeit um 2 Sekunden erhöht sich das Gewicht um 4,1 Prozent (Otto) bzw. um 5,4 Prozent (Diesel). Bei einer Erhöhung der Beschleunigungszeit verringert sich das Gewicht um 2,5 bzw. 3,2 Prozent. Auslöser für die Gewichtsveränderung ist das angepasste maximale Moment des Motors. Da sich die prozentualen Änderungen bei einer Erhöhung und bei einer Verringerung der Beschleunigungsvorgabe unterscheiden, liegt hier ein nicht linearer Zusammenhang vor.

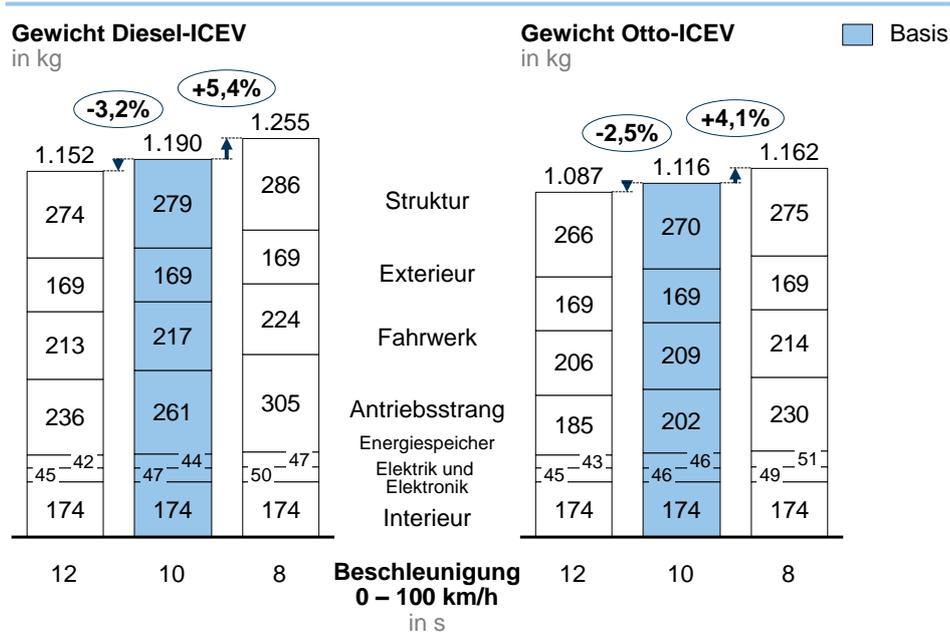


Abbildung 7.3: Gewicht von ICEV für unterschiedliche Beschleunigungsvorgaben  
Gesamtgewicht und prozentuale Abweichung entsprechen dem genauen Simulationsergebnis; darstellungsbedingt sind Rundungsabweichungen möglich

Abbildung 7.4 zeigt dieselben Untersuchungen für das BEV-Basisfahrzeug. Das Ausgangsgewicht des BEV liegt bei 1.025 kg. Im Vergleich zu den ICEV ist das Gewicht des Antriebsstrangs deutlich kleiner, das Gewicht des Energiespeichers dafür größer.

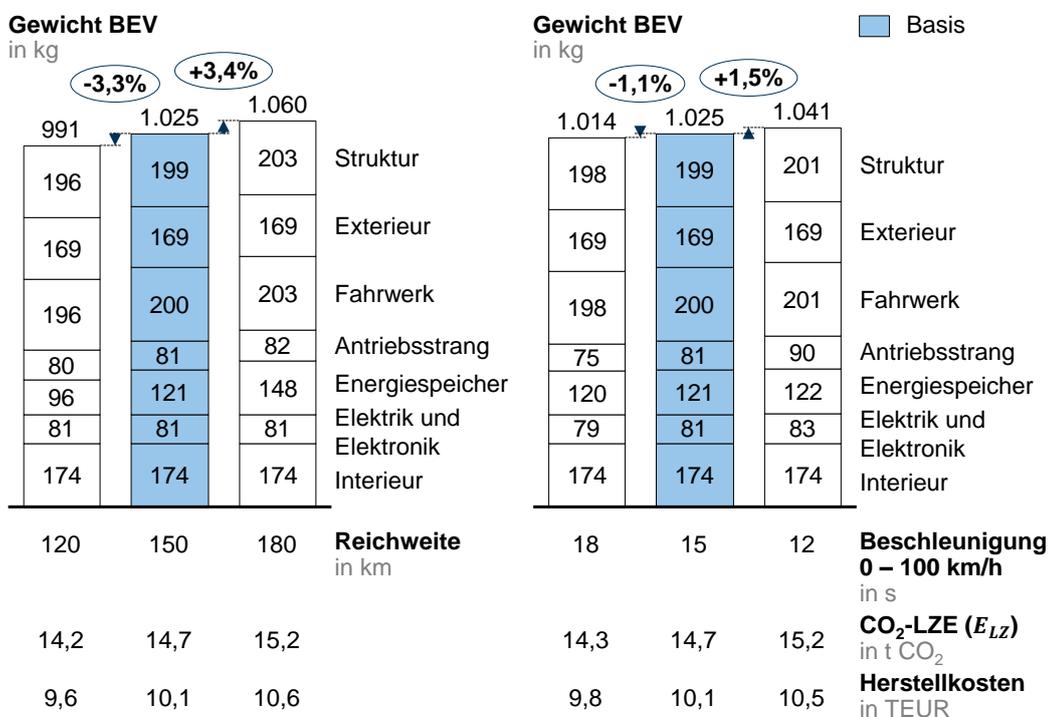


Abbildung 7.4: Gewicht von BEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben  
Gesamtgewicht und prozentuale Abweichung entsprechen dem genauen Simulationsergebnis; darstellungsbedingt sind Rundungsabweichungen möglich

Verglichen mit den ICEV-Versionen des Basisfahrzeugs reagiert das BEV auf eine Änderung der Reichweite um 20 Prozent deutlich empfindlicher, und zwar mit 3,4 bzw. -3,3 Prozent. Dies liegt vor allem an der geringeren Energiedichte der Batterie gegenüber konventionellen Kraftstoffsystemen. Die Gewichtsveränderung bei einer Änderung der Beschleunigungsvorgabe fällt beim BEV geringer aus, weil das Leistungsgewicht des Elektromotors höher ist als das eines Verbrennungsmotors. Abbildung 7.4 gibt auch die ermittelten CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und die Herstellkosten für das BEV-Basisfahrzeug und die Varianten an. Trotz gleicher Lebenszyklus-Fahrleistung der Fahrzeuge steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der Auslegungsreichweite und der Beschleunigung an.

Das mit dem Gewichtsmodell ermittelte Gewicht hängt ebenfalls von dem für die Auslegung genutzten Fahrzyklus ab, Abbildung 7.5.

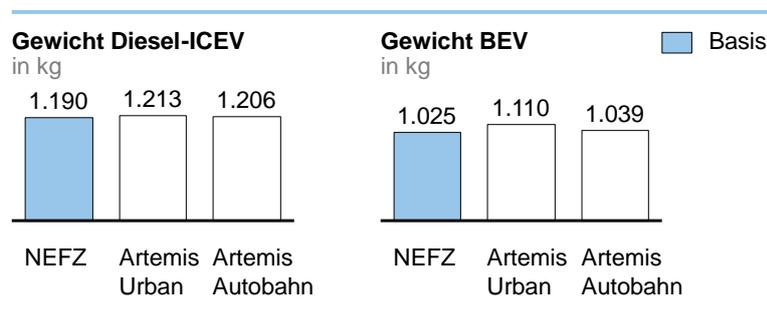


Abbildung 7.5: Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit des Fahrzyklus für die Auslegung

Anhand des Gewichtsmodells lassen sich eine Reihe weiterer Parametervariationen durchführen. Einige Beispiele zeigt Abbildung 7.6:

- Bei einer Veränderung der Grundabmessungen des Fahrzeugs wirkt sich ein kürzerer Radstand (bei gleichem Überhang vorne und hinten) am stärksten auf das Fahrzeuggewicht aus. Die Fahrzeughöhe hat die größten Auswirkungen auf den Verbrauch (über die Stirnfläche und die Luftwiderstandskraft). Bei den Produktionskosten ist ebenfalls der Radstand der am stärksten beeinflussende Parameter.
- Zurückliegende Veröffentlichungen gehen von deutlich höheren spezifischen Batteriekosten aus, beispielsweise [Eck10a; Hen12]. Für Batteriekosten von 550 EUR/kWh und eine niedrigere Energiedichte der Batterie von 100 Wh/kg beeinflusst bei BEV die Fahrzeughöhe am stärksten die Produktionskosten (4 Prozent Verringerung bei um 10 Prozent reduzierter Höhe, nicht dargestellt); dies liegt an den hohen Batteriekosten und am Zusammenhang zwischen Fahrverbrauch und Batteriekapazität.
- Wird in der Entwicklung für das untersuchte Fahrzeugkonzept eine Verkürzung des Radstands gegenüber einer prozentual gleichen Verringerung der Fahrzeughöhe in Erwägung gezogen, können folgende Schlüsse gezogen werden:
  - Stehen die Lebenszyklusemissionen im Vordergrund, sollte die niedrigere Fahrzeughöhe vorgezogen werden, weil diese aufgrund des geringeren Verbrauchs zu besseren CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen führt.
  - Sollen hingegen die Produktionskosten optimiert werden, ist eine Verkürzung des Radstands zu bevorzugen; nur bei BEV mit hohen spezifi-

schon Batteriekosten und einer niedrigen Energiedichte führt eine geringere Fahrzeughöhe zugleich auch zu niedrigeren Produktionskosten.

- Eine Verringerung von Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwert wirkt sich bei ICEV und bei BEV nur vergleichsweise gering auf das Fahrzeuggewicht und bei ICEV auch auf die Produktionskosten aus (Mehraufwendungen durch Maßnahmen zur Senkung der Beiwerte und durch Forschungs- und Entwicklungskosten werden hierbei nicht berücksichtigt). Die Auswirkungen auf Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen sind beim Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwert höher.
- Ein Hinterradantrieb führt gegenüber einem Vorderradantrieb zu einem Mehrgewicht von 4,8 Prozent bei Diesel- und 4,3 Prozent bei Otto-ICEV. Die ungefähre Höhe dieser Werte konnte im persönlichen Gespräch mit [Bac13] plausibilisiert werden. Die Produktionskosten steigen bei Umstellung auf einen Hinterradantrieb ebenso an wie die Lebenszyklusemissionen. Ein Fahrzeug mit Hinterradantrieb weist rund 4 Prozent höhere CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen auf als ein Fahrzeug mit Vorderradantrieb.

	Parameter	Basisfahrzeug	Veränderung	Auswirkung in Prozent			
				Gewicht	Verbrauch	CO <sub>2</sub> -LZE	Kosten Produktion
<b>Diesel-ICEV</b>	Radstand	2.550 mm	-10 Prozent	-5,6	-3,2	-3,6	-3,9
	Breite	1.700 mm	-10 Prozent	-4,4	-2,8	-3,0	-3,2
	Höhe	1.460 mm	-10 Prozent	-3,8	-4,5	-4,2	-3,0
	$c_W \cdot A$	0,625 m <sup>2</sup>	-10 Prozent	-0,2	-2,2	-1,7	-0,2
	$c_{RR}$	12,0 kg/t	-10 Prozent	-0,2	-2,3	-1,7	-0,2
	$m_L$	1.116 kg	- 3 Proz. primär	-4,7	-3,0	-2,7	-2,0
	Antriebs-Topol.	VA-Antrieb	HA-Antrieb	4,8	3,2	3,7	5,7
<b>Otto-ICEV</b>	Radstand	2.550 mm	-10 Prozent	-5,8	-3,9	-4,1	-4,0
	Breite	1.700 mm	-10 Prozent	-4,5	-3,4	-3,5	-3,2
	Höhe	1.460 mm	-10 Prozent	-3,9	-5,2	-4,7	-3,0
	$c_W \cdot A$	0,625 m <sup>2</sup>	-10 Prozent	-0,2	-2,4	-1,9	-0,2
	$c_{RR}$	12,0 kg/t	-10 Prozent	-0,2	-2,3	-1,8	-0,2
	$m_L$	1.190 kg	- 3 Proz. primär	-4,6	-3,4	-3,0	-1,8
	Antriebs-Topol.	VA-Antrieb	HA-Antrieb	4,3	3,4	3,6	5,0
<b>BEV</b>	Radstand	2.550 mm	-10 Prozent	-5,9	-2,3	-3,3	-3,8
	Breite	1.700 mm	-10 Prozent	-4,5	-2,2	-2,7	-3,1
	Höhe	1.460 mm	-10 Prozent	-3,9	-4,3	-3,9	-3,3
	$c_W \cdot A$	0,531 m <sup>2</sup>	-10 Prozent	-0,4	-2,6	-1,8	-0,6
	$c_{RR}$	8,5 kg/t	-10 Prozent	-0,4	-2,4	-1,6	-0,6
	$m_L$	1.021 kg	- 3 Proz. primär	-4,3	-2,1	-1,8	-1,2
	Energiedichte	156 kWh/kg	+20 Prozent	-2,7	-1,3	-2,8	-0,8

Abbildung 7.6: Auswirkung einer Änderung einzelner Parameter auf Gewicht, Verbrauch, CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und Kosten

Aus den Angaben in Abbildung 7.6 lassen sich auch Werte für die tolerierbaren Mehrkosten im Fall von Leichtbaumaßnahmen ableiten. Eine primäre Gewichtsveränderung von -3 Prozent führt bei ICEV unter Berücksichtigung von sekundären Gewichtseffekten zu 2 Prozent (Diesel) bzw. 1,8 Prozent (Otto) geringeren Produktionskosten. Bei Annahme von 12.000 EUR Produktionskosten für ein Diesel-ICEV und 11.000 EUR für ein Otto-ICEV belaufen sich die entsprechenden tolerierbaren Mehrkosten auf rund 6,60 EUR/kg für das Diesel- und rund 6 EUR/kg für das Otto-ICEV.

Mit demselben Vorgehen lassen sich auch die tolerierbaren Mehrkosten bei Leichtbaumaßnahmen für BEV ermitteln. Für 10.000 EUR Produktionskosten auf Basis des zugrunde gelegten Szenarios ergeben sich tolerierbare Mehrkosten von rund 4 EUR/kg. Bei höheren Batteriekosten von 550 EUR/kWh, einer spezifischen Energiedichte von 100 Wh/kg und höheren Komponentenkosten ergeben sich aus dem Modell Produktionskosten von rund 25.000 EUR. Die tolerierbaren Mehrkosten liegen dann bei rund 17 EUR/kg.

Die ermittelten tolerierbaren Mehrkosten für ICEV und für BEV mit hohen Kostenfaktoren liegen über den in Abschnitt 2.5 angegebenen Werten aus der Literatur. Für BEV beziehen sich die Werte aus [Eck10b] allerdings nur auf die Batteriesystemkosten und sind damit nicht direkt vergleichbar, weil das Kostenmodell zusätzlich auch sekundäre Gewichtseffekte und die Kosten für den Antriebsstrang und das restliche Fahrzeug berücksichtigt. Die Annahmen und Gültigkeitsbereiche der Literaturwerte sind nicht bekannt, insbesondere die Berücksichtigung sekundärer Gewichtseffekte. Die hier ermittelten Werte gelten unter der Voraussetzung einer Gewichtsreduktion zu Beginn des Entwicklungsprozesses, wenn sekundäre Gewichtseffekte vollumfänglich genutzt werden können.

Weitere Effekte werden in Veröffentlichungen, die dieser Arbeit vorausgegangen sind, dargestellt, beispielsweise der Zusammenhang zwischen optimalem Windschutzscheibenwinkel, Energieverbrauch für die Klimatisierung, Sonneneinstrahlung und Fahrzyklus [Fuc13a]. Auf diese Untersuchungen wird hier daher nicht näher eingegangen.

## 7.2 Verhältnis des sekundären zum primären Gewichtseffekt

In der Vergangenheit wurde das VSPG entweder anhand eines konkreten Referenzfahrzeugs oder über allgemeine empirische Untersuchungen ermittelt, wie bereits erläutert. Anhand der nachfolgenden Abbildungen werden weitergehende Erkenntnisse zum VSPG dargestellt.

Für die Bestimmung des VSPG eines Referenzfahrzeugs sind zwei Simulationen mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmo*del

- In der ersten Simulation wird die Fahrzeugleermasse  $m_L$  für einen entsprechenden Parametersatz bestimmt.
- Für die zweite Simulation wird eine primäre Gewichtsveränderung  $m_p$  berücksichtigt. Die Gewichtsveränderung fließt äquivalent zu einem zusätzlichen Bauteil in die Berechnung der Fahrzeugmasse  $m_{L,n}$  aus Formel (4.1) ein. Alle Parameter der ersten Simulation werden unverändert übernommen. Mit der zweiten Simulation wird so die veränderte Fahrzeugleermasse  $m_{L,ver}$  bestimmt, die die primäre Gewichtsveränderung und die Sekundäreffekte dieser Gewichtsveränderung beinhaltet.

Das VSPG kann mathematisch als Verhältnis aus sekundärer Gewichtsveränderung  $m_s$  und primärer Gewichtsveränderung  $m_p$  ausgedrückt werden, Formel (7.1). Die sekundäre Gewichtsveränderung ergibt sich aus der Differenz von veränderter Fahrzeugleermasse, Fahrzeugleermasse und primärer Gewichtsveränderung. Um einen genauen Wert für das VSPG zu erhalten, muss das Toleranzband  $\delta$  aus Formel (4.1) entsprechend klein gewählt werden.

$$VSPG = \left| \frac{m_s}{m_p} \right| = \left| \frac{m_{L,ver} - m_L - m_p}{m_p} \right| \quad (7.1)$$

Abbildung 7.7 zeigt die Abhängigkeit des VSPG von der Reichweite und der Beschleunigungsvorgabe für Otto- und für Diesel-ICEV. Das VSPG steigt mit zunehmender Auslegungsreichweite und abnehmender Beschleunigungszeit an. Das Verhalten des Otto- und Diesel-ICEV ist ähnlich; die Werte des Diesel-ICEV sind etwas höher als die des Otto-ICEV.

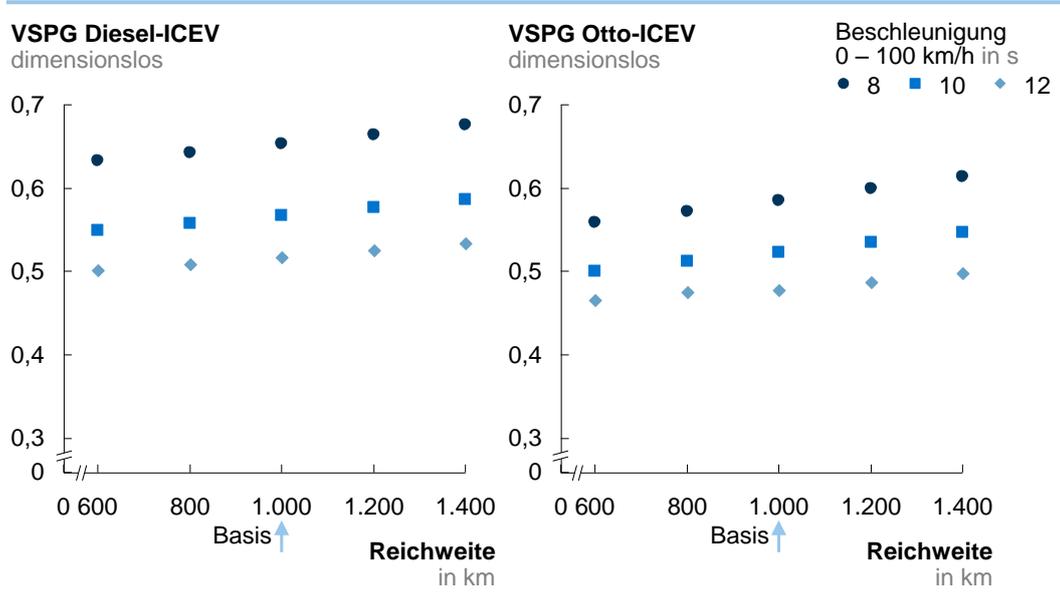


Abbildung 7.7: VSPG für ICEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben

Bei dem BEV-Basisfahrzeug zeigt sich eine etwas stärkere Abhängigkeit des VSPG von der Auslegungsreichweite als bei ICEV, Abbildung 7.8. Mit abnehmender Beschleunigungsvorgabe nimmt das VSPG ebenfalls, wie bei ICEV, tendenziell ab; dieser Effekt ist jedoch nicht so stark ausgeprägt und nicht bei allen Auslegungsreichweiten gegeben. Wie bereits in [Fuc13a] gezeigt, hängt das VSPG ebenfalls von der Energiedichte der Batterie ab; mit zunehmender Energiedichte nimmt das VSPG ab.

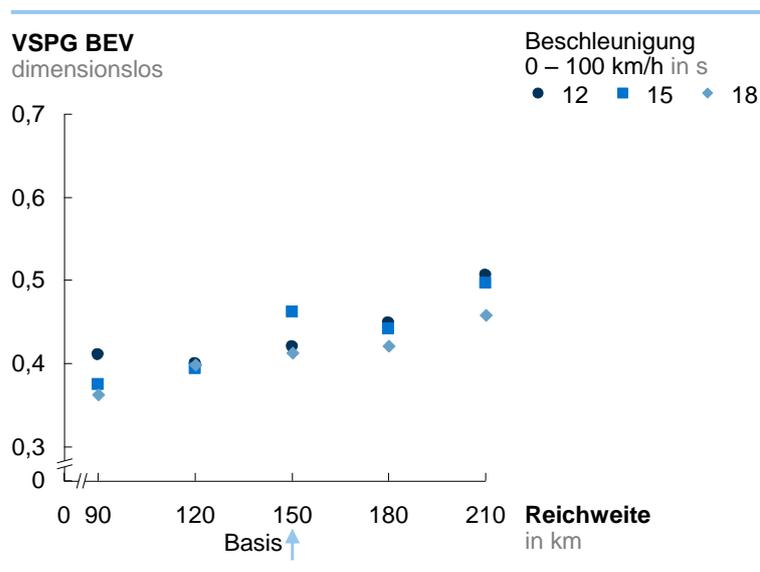


Abbildung 7.8: VSPG für BEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben

Der nicht-monotone Anstieg und die Schwankungen der VSPG-Werte für BEV in Abbildung 7.8 und auch 7.9 liegen an der Art der Modellierung von BEV im *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell*:

- Für den Elektromotor ist ein vollständiges Motorkennfeld in hoher Auflösung im Modell hinterlegt, das zur Erfüllung der Beschleunigungsanforderung skaliert wird. Zwischen den Stützstellen des Kennfelds wird interpoliert.
- Bei einer Parametervariation werden, abhängig von den Parameterwerten des Fahrzeugs und den im Laufe der Simulation berechneten fahrzeugspezifischen Kenngrößen, bei der Verbrauchsberechnung im Fahrzyklus für verschiedene Parameterwerte unterschiedliche Motorbetriebspunkte mit unterschiedlichen Wirkungsgraden angefahren. Hieraus können sich, verstärkt durch die Interpolation zwischen den Stützstellen, kleine Verbrauchsschwankungen und als Resultat kleine Schwankungen beim Fahrzeuggewicht ergeben, die nur indirekt aus der Veränderung eines Parameterwerts stammen.
- Dieser Effekt tritt auch bei der Simulation der reduzierten Fahrzeugleermasse  $m_{L,ver}$  aus Formel (7.1) auf. Bei der Berechnung des VSPG kann sich der Schwankungseffekt verstärken, weil die Fahrzeugleermasse von der reduzierten Fahrzeugleermasse subtrahiert wird. Fällt der eine Gewichtswert, lokal betrachtet, besonders günstig und der andere besonders ungünstig aus, führt dies beim VSPG zu einer höheren Auswirkung als bei dem simulierten Fahrzeuggewicht.

Das VSPG hängt nur geringfügig von den Abmessungen eines Fahrzeugs ab, Abbildung 7.9. Die Fahrzeugbreite hat den größten Einfluss, weil Bauteile im Fahrwerk von der Fahrzeugbreite und dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs gleichzeitig abhängen. Eine Variation der Fahrzeugbreite um +/-20 Prozent ist bei einem klassischen Sitzkonzept bereits eine sehr starke Veränderung; das VSPG ändert sich dennoch nur geringfügig.

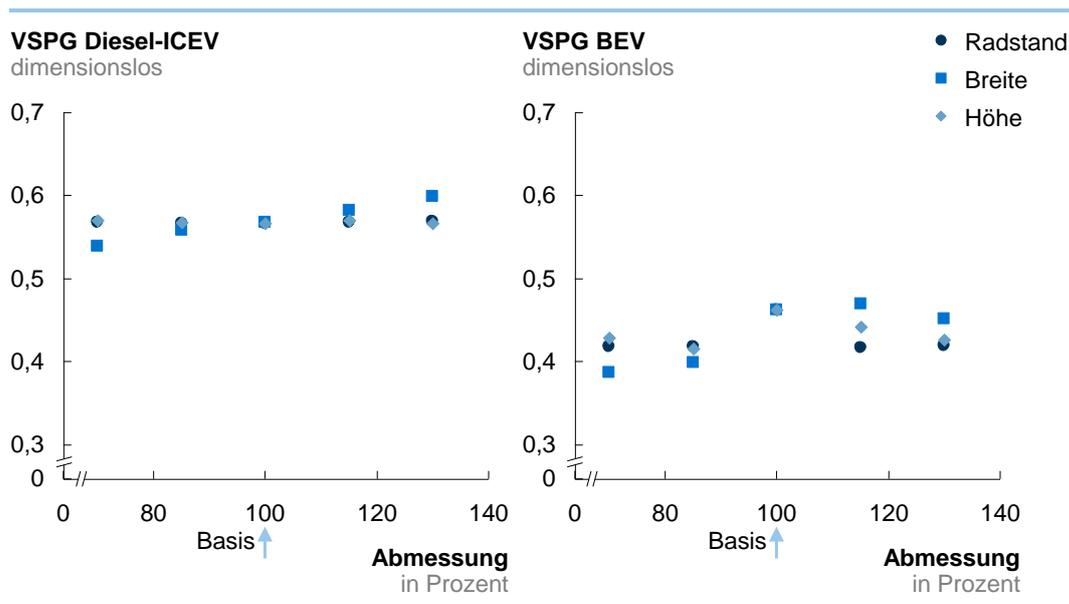


Abbildung 7.9: VSPG für ICEV und BEV bei einer Veränderung von Radstand, Breite und Höhe

Als Fazit lässt sich zusammenfassen: Mit den hier angenommenen Fahrzeugparametern liegt das VSPG der ICEV ungefähr zwischen 0,50 und 0,68 für einen Diesel- und zwischen 0,47 und 0,61 für einen Ottomotor; der Durchschnitt der simulierten Werte liegt bei 0,58 und 0,53. Für das BEV wird ein VSPG im Bereich von 0,36 bis 0,50 ermittelt; der Durchschnitt liegt bei 0,43. Das VSPG steigt jeweils mit der Auslegungsreichweite und dem Beschleunigungsvermögen an. Das VSPG hängt nur geringfügig von den Abmessungen ab. Bei BEV nimmt das VSPG mit zunehmender Energiedichte der Batterie ab.

### 7.3 Variation des Strukturmaterials: Stahl, Aluminium oder CFK

Eine der grundlegenden Entscheidungen für die Fahrzeugentwicklung ist die Wahl des Materials für die Fahrzeugstruktur. Für ICEV wird heute fast ausschließlich Stahl verwendet, vorwiegend aus Kostengründen. Wie bereits erläutert, kommen für die Fahrzeugstruktur zunehmend teurere Leichtbaumaterialien als selektive Ergänzung in Frage. Bisher werden nur wenige Fahrzeuge mit einer Aluminiumstruktur oder einer CFK-Struktur gebaut. Bei Elektrofahrzeugen mit hohen Energiespeicherkosten lohnt sich der Einsatz von Leichtbaumaterialien eher. So sind, wie schon erwähnt, beim BMW i3 große Teile der Struktur aus CFK gebaut, die Struktur des Mitsubishi i-MiEV ist aus Aluminium gefertigt. Dies zeigt auch die Abschätzung der tolerierbaren Leichtbau-Mehrkosten aus Abschnitt 7.1, sofern zurückliegende Batteriekosten und Energiedichten zugrunde gelegt werden. Für die Kostenfaktoren des hier verwendeten Szenarios für BEV liegen die tolerierbaren Mehrkosten für Leichtbau unter denen von ICEV.

Abbildung 7.10 vergleicht das Diesel-ICEV und das BEV für jeweils eine Fahrzeugstruktur aus Stahl, Aluminium und CFK. Die prozentuale Gewichtseinsparung durch eine Materialumstellung der Struktur fällt bei beiden Antriebsarten ungefähr gleich groß aus.

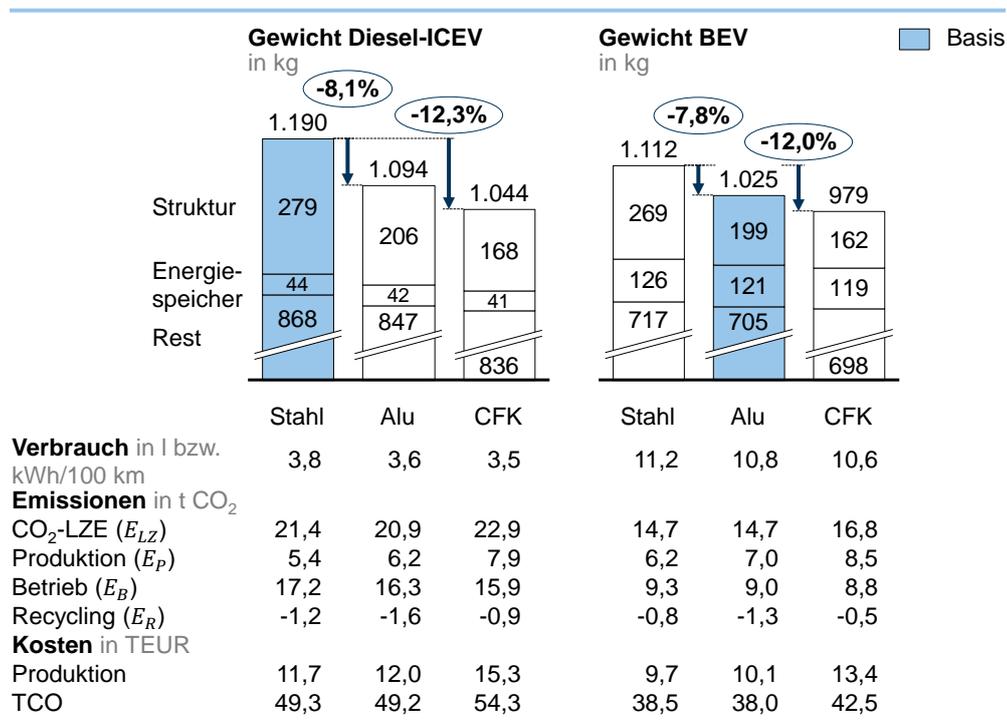


Abbildung 7.10: Vergleich von Stahl, Aluminium und CFK als Strukturmaterial für ICEV und BEV

Gesamtgewicht und prozentuale Abweichung entsprechen dem genauen Simulationsergebnis; darstellungsbedingt sind Rundungsabweichungen möglich

Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen die Produktionsemissionen bei einer Umstellung auf Aluminium an; eine CFK-Struktur verursacht nochmals mehr Emissionen. Über den Lebenszyklus mit 150.000 km Fahrleistung haben das Aluminium- und das Stahl-BEV insgesamt die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen; bei den ICEV-Varianten ist dies das Fahrzeug mit einer Aluminiumstruktur. Der Einsatz von Aluminium setzt ein vollständiges Recycling des Fahrzeugs voraus. Andernfalls stellt das BEV mit Stahlkarosserie die Variante mit den geringsten Emissionen insgesamt dar; innerhalb der ICEV ist es dann das Fahrzeug mit Stahlkarosserie.

Bei den Kosten hat das BEV in Stahlbauweise die geringsten Produktionskosten und liegt bei den TCO nur minimal höher als die Aluminiumbauweise. Die ICEV-Varianten sind teurer; hier ist ein Fahrzeug mit Stahlstruktur ebenfalls in der Produktion günstiger und bei den TCO teurer als ein Fahrzeug mit Aluminiumstruktur.

Abbildung 7.11 vergleicht die kilometerbezogenen CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und Kosten der drei BEV-Fahrzeugvarianten und des Diesel-ICEV-Basisfahrzeugs. Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt der Break-even des Stahl- und des Aluminium-BEV bei rund 130 Tkm; der Break-even zwischen dem Aluminium- und dem CFK-BEV liegt deutlich jenseits von 200.000 km und wird bei einem Einsatz als Privatfahrzeug vermutlich nicht erreicht. Bei den kilometerbezogenen TCO sind das Aluminium- und das Stahl-BEV fast deckungsgleich; das CFK-BEV weist höhere kilometerbezogene TCO auf; noch teurer ist das Diesel-ICEV.

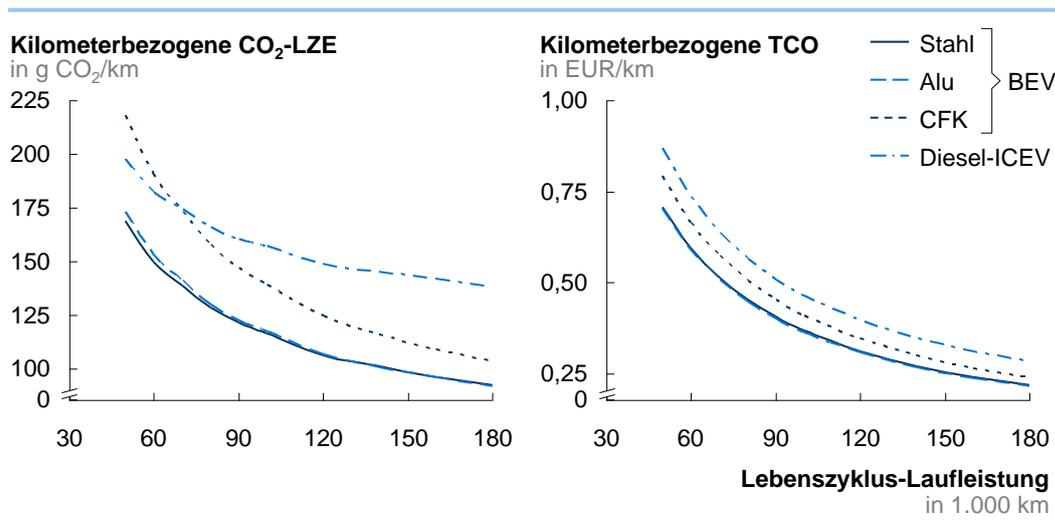


Abbildung 7.11: Kilometerbezogene CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und TCO in Abhängigkeit der Lebenszyklus-Laufleistung für BEV

## 7.4 Variation des Antriebskonzepts: BEV oder ICEV

Anhand der Simulationen des vorherigen Abschnitts lassen sich auch unterschiedliche Antriebsarten untersuchen. Ein Vergleich der Kennzahlen aus Abbildung 7.10 zeigt, dass die Produktionsemissionen beim BEV höher ausfallen als beim Diesel-ICEV; die Betriebsemissionen nach einer Lebenszyklus-Laufleistung von 150.000 km und bei konventionellem Strom sind bei dem BEV dafür niedriger. Für beide Antriebsarten ist, unter Berücksichtigung von Recycling, Aluminium das Strukturmaterial mit den niedrigsten CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen. Wird das Recycling nicht mit berücksichtigt (Worst-Case-

Szenario, siehe Absatz 6.2.3), weist Stahl in beiden Fällen einen niedrigeren Wert für die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen auf. Im Vergleich dazu hat CFK sowohl bei dem BEV als auch bei dem ICEV deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen.

Der Break-even der Emissionen des Diesel-ICEV in Stahlbauweise mit dem Aluminium-BEV liegt bei ungefähr 30 Tkm. Für eine eingehendere, detaillierte Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für unterschiedliche Antriebsarten, Produktionsprozesse und Energiequellen in Abhängigkeit der Lebenszyklus-Laufleistung wird auf die Ergebnisse in [Fuc14a] verwiesen.

Die Produktionskosten sind bei allen BEV-Varianten höher als die Produktionskosten der entsprechenden ICEV, berechnet auf Basis der Kostenfaktoren des mittelfristigen Szenarios. Die Betriebskosten der BEV-Varianten liegen unter denen der ICEV; dies zeigt sich deutlich bei den TCO. Hier sind alle BEV-Konzepte günstiger als das Diesel-ICEV mit Aluminiumstruktur, das innerhalb der ICEV die niedrigsten TCO aufweist. Das Aluminium-BEV ist insgesamt die Konzeptvariante mit den niedrigsten TCO.

## **7.5 Variation des Passagierkonzepts: Zwei- oder Fünfsitzer**

Die meisten der heute verkauften Fahrzeuge haben vier oder mehr Sitzplätze. Eine Untersuchung des Mobilitätsverhaltens in Deutschland [Bun10, S. 13] zeigt, dass im Durchschnitt über alle Fahrten 1,5 Sitzplätze belegt sind; bei allen in der Studie angegebenen Wegzwecken ist die durchschnittliche Belegung kleiner als 2 Sitzplätze. Mit einem zweisitzigen Fahrzeug ließe sich also ein Großteil aller Fahrten abdecken.

Abbildung 7.12 vergleicht das Basisfahrzeug mit jeweils einem Zweisitzerkonzept, dessen Abmessungen denen des Fahrzeugs Mute entsprechen. In beiden Fällen ist das simulierte kleinere Fahrzeug rund 25 Prozent leichter als das Basisfahrzeug.

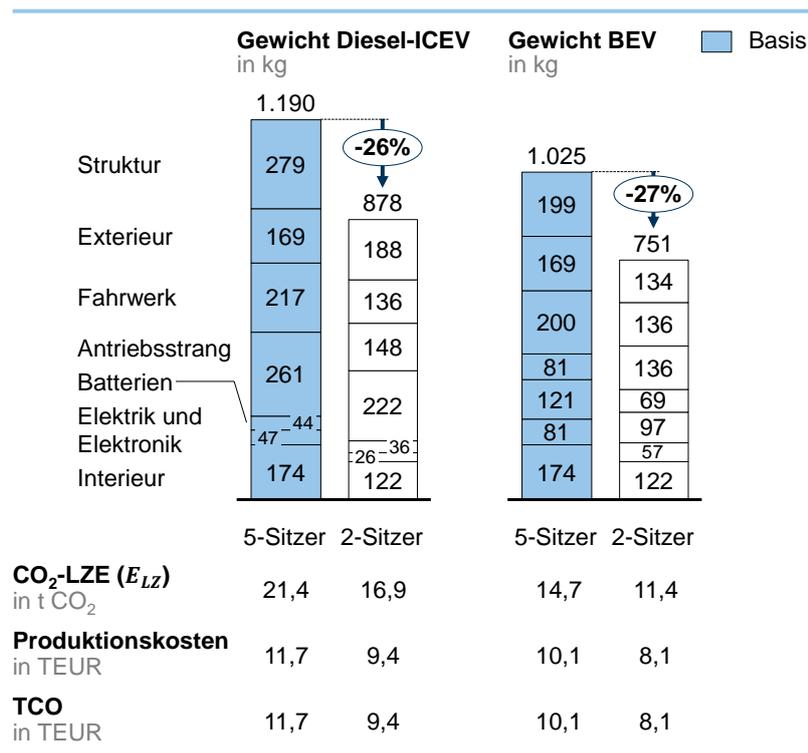


Abbildung 7.12: Vergleich von 5-Sitzer vs. 2-Sitzer ICEV und BEV

Gesamtgewicht und prozentuale Abweichung entsprechen dem genauen Simulationsergebnis; darstellungsbedingt sind Rundungsabweichungen möglich

Aus dem leichteren Gewicht resultieren auch niedrigere Produktionskosten und CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen. Das Zweisitzer-ICEV verursacht über das gesamte Fahrzeugleben 4,5 t weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als das ICEV-Basisfahrzeug. Bei dem BEV sind es 3,3 t weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen. Trotz der reduzierten Größe führt das kleine ICEV zu 2,2 t mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als das BEV-Basisfahrzeug. Unabhängig von der Antriebsart wirkt sich die Fahrzeuggröße entscheidend auf die Lebenszyklusemissionen aus.

Bei den Produktionskosten auf Basis des mittelfristigen Kostenszenarios ist das Zweisitzer-ICEV etwas günstiger als das BEV-Basisfahrzeug. Der Kostenvorteil wird schnell aufgebraucht, weil die TCO des Zweisitzer-ICEV deutlich höher ausfallen als die des BEV-Basisfahrzeugs.

## 8 Diskussion

Die berechneten Fahrzeugmassen des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* weichen in den meisten Beispielen zur Plausibilisierung aus Kapitel 5 nur im einstelligen Prozentbereich von den seitens der Automobilhersteller angegebenen Fahrzeugmassen realer Fahrzeuge ab. Die Funktionsweise des vorgeschlagenen Verfahrens zur Massebestimmung und die Umsetzung im *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* wurden anhand einer Vielzahl von Fallbeispielen abgesichert. Das Vorgehen liefert plausible Ergebnisse und erlaubt im Vergleich zu anderen Ansätzen zur Masseschätzung eine deutlich feinere Abbildung von Fahrzeugen und detailliertere Untersuchung allgemeiner Konzeptvariationen mit hoher Aussagekraft.

Dennoch, bei dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* handelt es sich innerhalb der modellierten Effekte und der getroffenen Annahmen nur um eine Annäherung an die Realität. Auch ein außergewöhnliches Design, Innovationen oder besondere technische Lösungen lassen sich mit dem Gewichtsmodell nicht beschreiben.

Das Gewicht beeinflusst, wie gezeigt wurde, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten. Auch hier lassen sich mit den vorliegenden Modellerweiterungen Konzeptuntersuchungen durchführen. Neue Materialien und Prozesse können jedoch ebenfalls nur unzureichend mit einer allgemeinen Beschreibung erfasst werden.

Auf einzelne Besonderheiten der Methoden und Modelle hinsichtlich Fehler und Einschränkungen wurde bereits in den vorausgegangenen Kapiteln an den relevanten Stellen eingegangen. Nachfolgend werden verschiedene Aspekte in einem breiter gesteckten Rahmen nochmals aufgegriffen.

### 8.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Die Anwendbarkeit der empirischen Gewichtsmodellierung auf Fragestellungen im Automobilbau wurde in zurückliegenden Arbeiten bereits gezeigt [FAT11; Mal07; Alo12] (siehe auch Kapitel 2). Dies gilt ebenso für physikalische Berechnungsverfahren und eine Modellierung einzelner Komponenten und Komponentengruppen anhand ihrer spezifischen Auslegungsparameter.

Der Neuheitswert dieser Dissertation besteht in der vollparametrischen Gewichtsmodellierung von Fahrzeugen. Der in Kapitel 3 beschriebene Lösungsansatz gilt allgemein für Fahrzeuge; die Umsetzung als *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* beinhaltet allerdings einige Einschränkungen:

- Als Datengrundlage für die meisten Komponentengruppen-Gewichtsmodelle werden die in Abbildung 4.3 gezeigten Benchmarkfahrzeuge verwendet; die Modelle gelten entsprechend nur für den jeweiligen Werte- und Eigenschaftsbereich der Benchmarkdaten aus 2002 bis 2012.
- Für die Realisierung des methodischen Ansatzes werden die Modellparameter als unabhängig angenommen. In der Realität ist dies bei einer Vielzahl von Parametern für die meisten heutigen Fahrzeuge nicht der Fall, beispielsweise:
  - Aus ästhetischen Gründen folgen Fahrzeuge bestimmten Breiten-zu-Höhen-Verhältnissen.

- Bauteile wie Reifen und Felgen werden in Relation zu den Gesamtfahrzeugabmessungen und dem -design dimensioniert und nicht immer auf die besten technischen Eigenschaften und einen optimalen Verbrauch abgestimmt.
- Der Komfortfaktor des Interieurs hängt mit der Fahrzeugklasse zusammen, die wiederum mit der Fahrzeuglänge einhergeht.
- Eine empirische Modellierung anhand von einzelnen Komponentengruppen birgt das Risiko, dass Scheineffekte beschrieben oder technisch nicht realisierbare Lösungen erzeugt werden. Dem kann nur mit der Nutzung von Ingenieurwissen bei der Modellierung und durch Plausibilitätsprüfungen, wie auch in dieser Arbeit erfolgt, entgegengewirkt werden. Insbesondere bei einem relativ kleinen Datenumfang ist dies für die Modellierung unerlässlich.

Die gezeigte Methodik lässt sich mit entsprechenden Benchmarkdaten und Komponentenmodellen auch auf weitere Aufbauformen, Antriebsstrangtopologien und Fahrzeugkonzepte übertragen. Bei einer entsprechenden Modellierung der Komponenten können ebenfalls Hybridfahrzeuge abgebildet werden. Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Fahrzeugen mit anderen Anforderungen, beispielsweise den Fahrzeugeinsatz in anderen Märkten und geländegängige Fahrzeuge.

Die Annahme der Unabhängigkeit der Modellparameter stellt für die Simulation gängiger Fahrzeugkonzepte und -proportionen nur ein geringes Fehlerrisiko dar, weil hierfür ähnliche Annahmen getroffen und hinterlegt werden. Das Risiko eines Fehlers in der Gewichtsberechnung bei ungewöhnlichen Parameterkombinationen oder einer Extrapolation des Wertebereichs, beispielsweise bei Konzeptoptimierern, ist dagegen, wie bei anderen Modellen auch, höher. Die Aussagekraft des vorgestellten Modells kann für diese Fälle nicht anhand realer Fahrzeugkonzepte überprüft werden, weil solche Fahrzeugkonzepte in der Realität nicht fertig ausgelegt verfügbar sind.

Die Gewichtsprädiktion erfolgt mit dem vorgestellten Verfahren immer mittels Daten aus der Vergangenheit. Die berücksichtigten Benchmarkfahrzeuge für diese Arbeit sind bis zu zwölf Jahre alt. Der Entwicklungsstart dieser Fahrzeuge liegt bei gängigen Entwicklungszeiten in der Automobilindustrie teilweise also bis zu 17 Jahre zurück. Zwischenzeitliche Veränderungen durch gestiegene Anforderungen und natürlich durch technische Weiterentwicklungen können auf unterschiedliche Arten berücksichtigt werden:

- Durch Korrekturfaktoren, wie dem Leichtbaufaktor für den vermehrten Einsatz von Leichtbaumaterialien, wird graduellen Veränderungen bei einzelnen Komponenten Rechnung getragen.
- Neue Komponenten lassen sich durch eine physikalische Modellierung abbilden und in das Modell integrieren.
- Die allgemeine technische Weiterentwicklung über Zeit lässt sich ebenfalls über Korrekturfaktoren berücksichtigen. Üblicherweise ist eine jährliche Verbrauchsverbesserung von einem Prozent technisch realisierbar; mit jeder neuen Modellgeneration, ungefähr alle acht Jahre, ist eine funktionsbereinigte Gewichtsreduktion von fünf Prozent erzielbar [Lie14].

## 8.2 Ergebnisse des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells

Mit der Umsetzung des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* im Programm Matlab lassen sich Fahrzeugkonzepte innerhalb weniger Sekunden Rechenzeit simulieren und verglei-

chen (Laufzeit stark abhängig von Fahrzeugkonzept und Simulationseinstellungen, bei Abbruchkriterium  $\delta = 0,01 \text{ kg}$  meistens  $< 2$  Sekunden für BEV und  $< 0,5$  Sekunden für ICEV auf Intel Core i5-M520 mit 2,4 GHz). Nachfolgend wird auf mögliche Fehlerquellen und mit Ungenauigkeiten behaftete Modellbereiche eingegangen.

### 8.2.1 Gewichte der Fahrzeugkomponenten

Die weitgehend linearen Regressionsfunktionen für die Komponentengewichtsmodelle erlauben eine schnelle und nachvollziehbare Berechnung des Gesamtfahrzeuggewichts. Durch die Aufteilung des Gewichts in Komponentengruppen lässt sich die Zusammensetzung des Gesamtfahrzeuggewichts zurückverfolgen. Einzelne Gewichte können gezielt verändert werden, um bekannte Gewichte zu berücksichtigen oder Sekundäreffekte einer primären Gewichtsveränderung zu untersuchen. Die Betrachtung der Fehlerkette in Abbildung 5.3 zeigt, dass sich Fehler in einzelnen Teilmodellen auf das Gesamtfahrzeuggewicht bezogen ausgleichen.

Bei einigen empirisch modellierten Komponentengruppen ergeben sich auf Basis der Benchmarkdaten kleine Korrelationskoeffizienten. Diese sind teilweise bedingt durch eine geringe Anzahl zur Verfügung stehender Datenpunkte mit nahe beieinanderliegenden Werten für die erklärenden Variablen. Durch einen Abgleich der Modellabhängigkeiten und -trends mit Literaturangaben und der Erfahrung von Entwicklern wird die grundsätzliche Modellaussage abgesichert.

Zusätzliche Funktionen der Benchmarkfahrzeuge aus [A2M12], beispielsweise Standheizung, besondere Sitzfunktionen, Schiebedach, Kartenfächer, Haltenetze etc., können aus Gründen der Komplexität oder Verfügbarkeit von ausreichend Datenpunkten nicht alle einzeln berücksichtigt werden. Besondere konstruktive Lösungen zur Realisierung eines außergewöhnlichen Designs oder einer technischen Funktion werden nicht in die Datengrundlage für die empirische Modellbildung aufgenommen. Mit dem beschriebenen Verfahren zur Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodellierung können solche Lösungen methodisch nicht berücksichtigt werden.

Die Qualität der Daten aus [A2M12] kann aufgrund der jahrelangen Erfahrung und der Zusammenarbeit des Anbieters A2Mac1 mit vielen Automobilherstellern als hoch eingestuft werden. Bei der Analyse wurden dennoch einige Unstimmigkeiten festgestellt, und bei der Teilezuordnung zu Komponentengruppen mussten deshalb teilweise Annahmen getroffen werden:

- Fehlende Teile in den Stücklisten: Die Stücklisten von A2Mac1 sind vereinzelt fehlerhaft, die Summe der Einzelmassen entspricht nicht der tatsächlichen Gesamtmasse des Fahrzeugs; beispielsweise fehlt beim Volkswagen Polo die hintere Achse.
- Falsche Teilezuordnung: Obwohl A2Mac1 [A2M08] angibt, bei der Zerlegung und Zuordnung der Teile einem festen Schema zu folgen, sind Bauteile teilweise unterschiedlichen Kategorien zugeordnet und können für die Modellierung nur eingeschränkt unterschieden werden. Dies ist beispielsweise bei den Veloursteppichen der Fall, die je nach Fahrzeug als Bestandteil des Interieurs oder der Dämmmaterialien ausgewiesen werden.
- Zuordnung von Teilen: Für die Modellbildung stellte A2Mac1 Stücklisten zur Verfügung [A2M12], die für eine Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodellierung ausreichend sind. Anhand des Stücklistenamens und der Beschreibung können manche Bauteile nicht eindeutig für weitergehende Untersuchun-

gen identifiziert werden; hierfür sind zusätzliche Informationen der A2Mac1-Datenbank oder die tatsächlichen Bauteile erforderlich.

Die Erstellung der Komponentenmodelle erfolgt mit dem Ziel, eine Aussage für das Gesamtfahrzeug zu ermöglichen. Für eine detaillierte Untersuchung und Bewertung einzelner Komponenten sind deutlich genauere Modelle erforderlich, die zusätzlich weitere Parameter umfassen können. Dies ist ausschließlich anhand der Stücklisten nicht möglich.

Aufgrund besonderer Entwicklungsanstrengungen oder Ausrichtung von Komponenten können in den Teilmodellen erhebliche Abweichungen auftreten. Durch die Vielzahl von Teilmodellen hat ein Fehler in einem der Teilmodelle nur eine kleine Auswirkung auf den prozentualen Fehler des Gesamtergebnisses. Eine gleichzeitige, sehr extreme Gewichts-optimierung aller Komponenten eines Fahrzeugs ist unter realistischen Bedingungen alleine schon aus wirtschaftlichen Gründen unwahrscheinlich; in diesem Fall würde das Gewichtsmodell auch für das Gesamtfahrzeug keine plausiblen Ergebnisse liefern.

### 8.2.2 Längsdynamiksimulation

Durch die Längsdynamiksimulation wird die Gewichtsspirale in der Gewichtsabschätzung berücksichtigt. Wie bereits erwähnt, stehen Fahrzyklen immer wieder in der Kritik, das reale Fahrgeschehen nicht richtig abzubilden. Fahrzeughersteller nützen zusätzlich die erlaubten Toleranzen zum Erreichen möglichst niedriger Verbrauchswerte aus. Trotzdem stellen Verbrauchszyklen eine einheitliche Basis für den Vergleich von Fahrzeugen dar und werden daher auch in dem beschriebenen Verfahren eingesetzt.

Ähnlich sieht es auch bei der Angabe der Beschleunigungszeit aus; die vom Hersteller angegebenen Werte unterscheiden sich teilweise von neutral und unter realistischen Bedingungen durchgeführten Fahrversuchen um bis zu 30 Prozent [Aut11b]. Die Beschleunigungszeit wirkt sich auf das erforderliche Motormoment und insbesondere bei ICEV auf das Fahrzeuggewicht aus. Für die Modellplausibilisierung anhand realer Fahrzeuge werden die Herstellerangaben für die Beschleunigungszeit verwendet und als valide angenommen.

Bei sehr starkem Beschleunigungsvermögen bzw. geringen Beschleunigungszeiten treten weitere physikalische Effekte auf, die im Modell derzeit nicht berücksichtigt sind. Dazu zählen insbesondere Reifenschlupf und dynamische Schwerpunktveränderung.

Zur Berücksichtigung des Einflusses des Fahrzeugkonzepts auf die fahrzeugspezifischen Kenngrößen der Längsdynamiksimulation sind diese Kenngrößen ebenfalls mit parametrischen Modellen hinterlegt. Somit können Fahrzeugkonzepte beispielsweise ohne die Angabe eines konkreten Luftwiderstandsbeiwerts simuliert werden. Auch hier weisen die Modelle teilweise niedrige Regressionskoeffizienten auf und werden anhand bekannter Trends kritisch überprüft und abgesichert.

Insbesondere der Luftwiderstandsbeiwert hängt bei konkreten Fahrzeugen ganz entscheidend von dem Entwicklungsaufwand ab. Bereits kleine und unscheinbare Aerodynamik-Maßnahmen in Form von Staulippen oder definierten Abrisskanten können die Aerodynamik erheblich beeinflussen. Know-How und Exzellenz der Entwicklung werden in dem Modell nicht berücksichtigt.

Ähnliches gilt für den Reifen, dessen Eigenschaften und insbesondere Rollwiderstand ganz entscheidend vom Entwicklungsaufwand abhängen. Der Rollwiderstandsbeiwert hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die sich auch untereinander beeinflussen. Die Vereinfachungen für das Reifenmodell wurden bewusst getroffen, einerseits zur Vermeidung

derung einer übermäßigen Detaillierung in einem einzelnen Modell in Relation zu den anderen Teilmodellen, andererseits aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und der teilweise widersprüchlichen Literaturangaben. Die fehlende Zugänglichkeit zu verlässlichen Daten und konkreten Zahlenwerten spielt bei der Modellbildung, wie auch bei anderen Teilmodellen, ebenfalls eine einschränkende Rolle.

### 8.2.3 Konvergenz und Grenzen des Verfahrens

Die betrachteten Benchmarkfahrzeuge umfassen konventionelle Fahrzeugaufbauformen aus dem Bereich Kleinwagen bis obere Mittelklasse/Oberklasse. Entsprechend kann mit dem Modell nur für diese Fahrzeuge eine Aussage getroffen werden. Eine Extrapolation ist möglich: Eine testweise simulierte Mercedes S-Klasse aus 2012 trifft das vom Hersteller angegebene Gewicht innerhalb eines Toleranzbandes von 10 Prozent. Durch eine Erweiterung des Modells um entsprechende Datenpunkte kann die Aussagekraft auch für andere Fahrzeuge erhöht oder eine Simulation überhaupt erst möglich gemacht werden.

Entscheidend für die Konvergenz des Gesamtmodells ist eine Konvergenz innerhalb der Teilmodelle. Diese ist gegeben, wenn das Verhältnis aus relativem Gewichtsanstieg der Teilkomponente zu relativem Anstieg des Gesamtfahrzeug-Gewichts kleiner eins ist. Durch die Modellierung der gewichtsabhängigen Bauteile mit linearen Regressionsfunktionen und eine entsprechende Parameterwahl ist dies bei der derzeitigen Modellierung immer der Fall.

Im Zusammenwirken mit der Längsdynamik können sich divergierende Iterationsschleifen ergeben, wenn von einer Iterationsschleife zur nächsten das Verhältnis aus relativer Gewichtssteigerung der Komponenten zu relativer Verbrauchssteigerung größer eins ist. Dies tritt innerhalb realistischer Wertebereiche nur bei BEV auf, und zwar bei sehr geringen Energiedichten (die zusätzliche Batteriekapazität, das daraus resultierende Mehrgewicht, der höhere Verbrauch und die wiederum zusätzliche Batteriekapazität schwingen sich auf) oder sehr großen Reichweiten. In diesen Fällen lässt sich ein Fahrzeugkonzept nicht berechnen; dieses ist mit den gegebenen Technologien dann vermutlich physikalisch ebenfalls nicht darstellbar.

### 8.2.4 Vergleich der Ergebnisse mit einem bestehenden Schätzverfahren

Abbildung 8.1 vergleicht die Herstellerangabe für das Gewicht von Fahrzeugen mit den simulierten Gewichten des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* und einer jeweiligen Gewichtsrechnung mit dem Verfahren nach [Yan10] und Formel (2.6):

- Für konventionelle Fahrzeuge besteht kein signifikanter Unterschied zwischen dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* und dem Verfahren nach [Yan10]. Die Abweichung gegenüber der Herstellerangabe und die Streuung der Simulationsergebnisse des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* ist geringfügig besser im Vergleich zu [Yan10]. Der geringe Umfang der Stichprobe lässt keine weiterführenden, umfassend bewertenden Aussagen zu.
- Bei neuen Technologien für konventionelle ICEV-Konzepte, hier gezeigt am Beispiel des Audi A2 3L mit einer Aluminiumstruktur, und bei BEV weist [Yan10] eine erhebliche Abweichung gegenüber den tatsächlichen Werten auf; das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* zeigt nur eine geringe Abweichung gegenüber den Herstellerangaben.

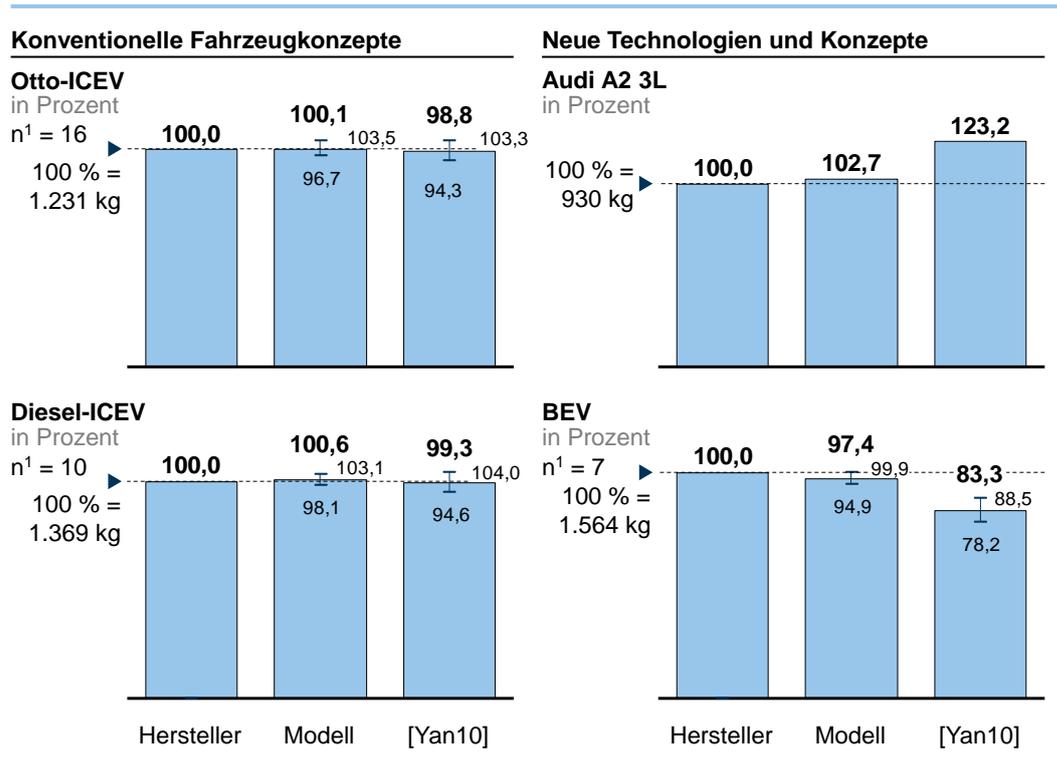


Abbildung 8.1: Vergleich der Modellergebnisse für ICEV, BEV und neuartige Technologien mit Herstellerangaben und der Berechnung über ein Schätzverfahren

<sup>1</sup> Jeweils nur ein Fahrzeug je Modellreihe eines Herstellers berücksichtigt  
 Ergebnisse in Vorgriff auf [Fuc14c]

Das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* bietet aufgrund des Aufbaus über Komponenten-  
 gruppen und insbesondere über die variable Berücksichtigung von neuen Technologien  
 einen deutlich größeren Funktionsumfang als das Verfahren nach [Yan10]. Wie von  
 [Kuc12], [Wie13] und [Fuc14d] gezeigt, kann [Yan10] beispielsweise um Leichtbaufakto-  
 ren erweitert werden. Dies muss jedoch immer individuell erfolgen. Zwei weitere Vorteile  
 des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* gegenüber [Yan10] bestehen darin, dass mit einer  
 Fahrzeugsimulation zugleich auch die Komponentengewichte und der Energieverbrauch  
 ermittelt werden.

### 8.3 Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Emissions- und der Kostenberechnung

Die Modelle zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und der TCO ergänzen  
 das in Kapitel 4 beschriebene *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* und erlauben zusätzliche  
 Analysen und Auswertungen. Die Ergebnisse des CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusmodells stimmen  
 relativ gut mit den tatsächlichen Werten der Beispielfahrzeuge überein; bei den TCO, ins-  
 besondere dem Fahrzeuglistenpreis, bestehen teilweise erhebliche Abweichungen.

An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass das CO<sub>2</sub>-Emissionsmodell und  
 das Kostenmodell mit den derzeitigen Modelldaten nicht gedacht sind, um für konkrete  
 Fahrzeuge eines Herstellers eine genaue Aussage zu treffen. Vielmehr ist es das Ziel, die  
 prinzipielle Anwendbarkeit der Schätzmethode über das Fahrzeuggewicht und das *Ge-  
 samtfahrzeug-Gewichtsmodell* zu zeigen. Für eine genaue Aussage sind die getroffenen  
 Annahmen und berücksichtigten Informationen mit deutlich zu vielen Unsicherheiten ver-  
 bunden, wie zuvor an mehreren Stellen aufgezeigt. Die entsprechenden Werte für eine

Modellbedatung, insbesondere des Kostenmodells, sind in den Häusern der Automobilhersteller verfügbar; die Werte sind jedoch nicht öffentlich zugänglich.

### 8.3.1 CO<sub>2</sub>-Emissionsmodell

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion lassen sich anhand des Gewichts gut abschätzen. Die Emissionen hängen allerdings sehr stark von den eingesetzten Materialien und einzelnen Details des Produktionsprozesses ab. Eine geringe Menge eines Gases mit einem hohen Treibhauspotenzial kann sich bereits deutlich auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen (genau: CO<sub>2e</sub>-Emissionen) der Produktion auswirken, was im Modell derzeit nicht berücksichtigt wird.

Ebenso hängen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Produktion sehr stark von den tatsächlichen Gegebenheiten ab. Anstrengungen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, beispielsweise durch die Verwendung von Strom aus regenerativen Energiequellen, lassen sich anhand der öffentlich zur Verfügung stehenden Daten derzeit nicht untersuchen. Neue Prozesse und abweichende Energiequellen erfordern eine Anpassung und Aktualisierung der Datengrundlage seitens der Anbieter.

Das CO<sub>2</sub>-Emissionsmodell verwendet für den Fahrzeugbetrieb entsprechend dem Vorgehen der Automobilhersteller den mit einem Fahrzyklus, üblicherweise der NEFZ, ermittelten Verbrauch als Grundlage für die Berechnung der Betriebsemissionen. Liegt der tatsächliche Verbrauch höher, wirkt sich dies unmittelbar auf die Lebenszyklusemissionen aus. Dies ist auch der Fall, wenn das Gewichtsmodell einen abweichenden Fahrverbrauch gegenüber der Herstellerangabe ermittelt.

### 8.3.2 Gesamtkostenmodell

Der Schwerpunkt des Kostenmodells liegt darauf, eine Aussage in Bezug auf einen Vergleich von Fahrzeugkonzepten zu treffen. Über das Gewichtsmodell können die Herstellkosten abgeschätzt werden, indem das Gewicht als spezifischer Funktionswert genutzt wird. Die prinzipielle Verwendung des Gewichts als Schätzfaktor wurde in vorausgegangenen Arbeiten gezeigt.

Die Gestaltung des Fahrzeuglistenpreises hängt jedoch, wie bereits in Absatz 6.3.1 eingehend erläutert, von einer Vielzahl nicht-technischer Faktoren ab, deren Modellierung nicht Ziel dieser Arbeit ist und außerhalb eines Automobilherstellerunternehmens auch nicht durchgeführt werden kann. Anhand der zur Verfügung stehenden Kostendaten ist die Modellbedatung, wie erwähnt, mit großen Unsicherheiten behaftet, was sich auch im Vergleich der simulierten Beispielfahrzeuge mit Referenzfahrzeugen zeigt.

Dennoch, für einen Vergleich von Fahrzeugkonzepten geht das Kostenmodell von einem ähnlichen Qualitätsanspruch und gleichen Rohmaterialkosten, Margen und Zuschlägen, unabhängig ob BEV oder ICEV, aus, so dass ein relativer Vergleich von Fahrzeugkonzeptvarianten mit dem Kostenmodell auch jetzt schon möglich ist.

## 8.4 Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens

Die Beispiele in Kapitel 7 verdeutlichen Anwendung und erzielbare Ergebnisse des in dieser Dissertation vorgestellten Verfahrens und seiner Umsetzung im *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* anhand konkreter Fragestellungen in der Fahrzeugentwicklung. Die untersuchten Aspekte sind an mehreren Stellen der Fahrzeugentwicklung relevant. Für die

vorgestellte Methode und das Software-Werkzeug ergibt sich eine Vielzahl möglicher Einsatzbereiche.

Die Methode kann zur Unterstützung bei der Konzeptauslegung und der Projektdefinition eines konkreten Fahrzeugs verwendet werden, wie dies die Abschnitte 7.3 bis 7.5 verdeutlichen. Das *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* erlaubt eine schnelle und einfache Abschätzung von Fahrzeuggewicht, Verbrauch, Emissionen und Kosten, und ermöglicht einen Vergleich von unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten hinsichtlich dieser Eigenschaften. Insbesondere bei Kompromissentscheidungen, wie in Abschnitt 7.1 gezeigt, lassen sich für ein spezifisches Fahrzeugkonzept konkrete Zahlenwerte errechnen, die den Entscheidungsprozess faktenbasiert unterstützen.

Leichtbaumaßnahmen können mit der Methode ebenso berücksichtigt werden wie verschiedene Aufbau- und Ausstattungsvarianten. Mit der gewählten softwaretechnischen Umsetzung lassen sich einzelne Komponenten austauschen oder diesen feste Gewichtswerte zuweisen; so kann die Auswirkung von neuen Technologien oder besonderem Entwicklungsaufwand untersucht werden. Die Methode kann ebenso auch als Werkzeug zur Massebestimmung in Konzeptoptimierern eingesetzt werden.

Die Auslegung von Fahrzeugkomponenten richtet sich bei vielen Bauteilen nach den größten im Betrieb vorkommenden Lasten und Kräften. Diese treten meist bei den Fahrzeugen mit der leistungsstärksten Motorisierungsvariante auf, die allerdings häufig nur in geringer Stückzahl verkauft werden. Alleine schon die Option dieser Motorisierungsvariante führt bei allen Fahrzeugen mit einer niedrigeren Motorleistung zu überdimensionierten Bauteilen und einem unnötigen Mehrgewicht, resultierend in Mehremissionen und Mehrkosten. Mit Hilfe des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* lässt sich dieses Mehrgewicht quantifizieren.

Zwei besondere Kennwerte werden für einfache Abschätzungen und schnelle Entscheidungen im automobilen Entwicklungsprozess häufig verwendet:

- Verhältnis des sekundären zum primären Gewichtseffekt (VSPG)
- Tolerierbare Mehrkosten pro eingespartes Gewicht.

Oftmals werden für diese Kennwerte allgemeine Erfahrungswerte genutzt. Abschnitt 7.2 zeigt mit den Untersuchungen zum VSPG, dass solche Kennwerte entscheidend vom Fahrzeugkonzept abhängen. Ebenso beeinflusst der Fortschritt der Entwicklung maßgeblich die Realisierbarkeit von Sekundäreffekten, wie Abbildung 2.5 verdeutlicht. Anhand der vorgestellten Methode und des *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells* lassen sich die genannten Kennwerte für ein konkretes Fahrzeugkonzept und für einen bestimmten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess erheblich genauer ermitteln und entsprechend einsetzen.

Mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* lässt sich auch ein Wert für die tolerierbaren Mehrkosten pro eingespartes Gramm CO<sub>2</sub>/km ermitteln. Vor dem Hintergrund einer Begrenzung der Flottenemissionen für Automobilhersteller und Strafzahlungen bei Nichteinhaltung der Emissionsgrenzen gewinnt diese Kenngröße zunehmend an Bedeutung.

Die heutige Gesetzgebung berücksichtigt nur die Fahrzeugemissionen im Betrieb. Für eine ganzheitliche Betrachtung sollten jedoch auch die Emissionen aus Produktion und Recycling berücksichtigt werden. Sollte dies zu einem späteren Zeitpunkt in die Gesetzgebung mit aufgenommen werden, können mit dem vorgestellten Ansatz auch tolerierbare Mehremissionen in der Produktion gegenüber einer Emissionseinsparung im Fahrzeugbetrieb unter Berücksichtigung sekundärer Gewichtseffekte abgeschätzt und Kompromissentscheidungen unterstützt werden.

## 9 Ausblick

Das vorausgegangene Kapitel beschreibt bereits Ansatzpunkte für eine Erweiterung und Verbesserung der modelltechnischen Umsetzung im Hinblick auf die betrachteten Fahrzeuge und Ausstattungsvarianten. Insbesondere sind dies:

- ICEV: Durch eine Erweiterung der Datenbasis und Erstellung jeweiliger Teilkomponentenmodelle lassen sich weitere Aufbauformen, Antriebsstrangtopologien und Ausstattungsvarianten berücksichtigen, beispielsweise SUV, Cabrios und Vans.
- BEV: Mit zunehmender Anzahl an BEV auf dem Markt können die physikalisch modellierten Bestandteile aktualisiert oder, bei entsprechend verfügbarer Anzahl von Fahrzeugen, durch empirische Modelle ersetzt werden.
- Hybridfahrzeuge, alternative Antriebe: Durch den Aufbau entsprechender Teilkomponentenmodelle und die Anpassung der modelltechnischen Umsetzung können auch diese Fahrzeugtypen berücksichtigt und mit ICEV und BEV verglichen werden.

Die derzeitige modelltechnische Umsetzung basiert auf einem festgelegten Umfang von Referenzfahrzeugen. Fahrzeughersteller nutzen bei Benchmarkuntersuchungen meist vergleichbare Fahrzeuge von Wettbewerbern als Referenz zu ihren eigenen Fahrzeugen oder interessieren sich speziell für Fahrzeuge, die in bestimmten Kriterien besonders gute Eigenschaften aufweisen. Eine Erweiterung des Modells mit einer Auswahlmöglichkeit für die zu berücksichtigenden Fahrzeuge ließe sich mit einer größeren Basis an Benchmarkdaten leicht umsetzen:

- Die funktionelle Zuweisung sämtlicher Einzelteile der Stücklisten der Benchmarkfahrzeuge in diesem Modell zu Komponentengruppen erfordert einen hohen zeitlichen Aufwand. Dieser fällt jedoch nur einmal an.
- Sind die Gewichte der Komponentengruppen und die beschreibenden Parameter bekannt, lassen sich die empirischen Regressionsfunktionen für veränderte Beobachtungswerte sehr schnell und automatisiert neu erstellen. Hier zeigt sich einer der Vorteile der linearen Modellierung.
- Die Bereitstellung einer Auswahlmöglichkeit ist im Rahmen der beschriebenen Methode ebenfalls machbar und erfordert lediglich programmier-technische Kenntnisse.

Die Rechengeschwindigkeit des Modells liegt auf herkömmlichen Computern aktuell im Bereich von wenigen Sekunden. Für den Einsatz in Konzeptoptimierern ist dies nach wie vor relativ lang. Durch Vereinfachungen, eine Parameterreduktion und Abstraktion kann die Rechenzeit nochmals deutlich verkürzt werden. Hierfür bietet sich das Verfahren der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) an. Der Aufbau eines solchen Regressionsmodells wird zum Anfertigungszeitpunkt dieser Arbeit bereits untersucht [Fuc14c, Wer14]. Im Vorgriff auf die Ergebnisse zeigt Abbildung 9.1 für ein BEV und ein Diesel-ICEV mit angetriebener VA, jeweils Steilheck-Bauform, eine Gewichtung der Modellparameter nach ihrem Einfluss auf das simulierte Gewicht (links) und die Zielfunktion zur Berechnung des Fahrzeuggewichts auf Basis von Länge, Breite, Höhe, Leichtbaufaktor, Energiedichte (nur BEV), Reichweite und Beschleunigungsvermögen (rechts).

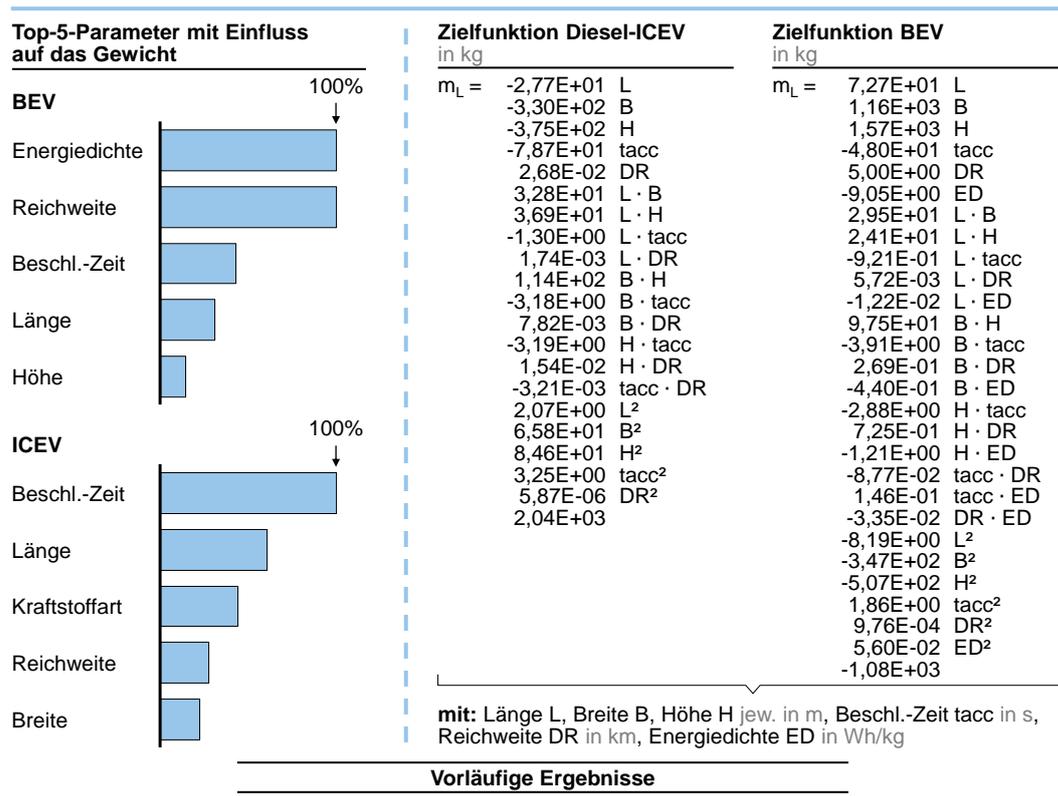


Abbildung 9.1: Aufbau eines Regressionsmodells auf Basis der Fahrzeugaußenabmessungen, Beschleunigungszeit, Reichweite und Energiedichte (vorläufige Ergebnisse)

Vorläufige Ergebnisse in Vorgriff auf [Fuc14c, Wer14]; Annahmen: Karosserieform Steilheck, Struktur Stahl (ICEV) bzw. Aluminium (BEV), Exterieurteile in Stahl, angetriebene VA (ICEV)

Im Bereich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Kosten lassen sich Verbesserungen der Ergebnisse durch eine bessere Datengrundlage und eine detaillierte Modellierung der Prozessschritte erreichen. Ein Fortschritt ist hier ohne die Unterstützung eines Automobilherstellers und den Zugang zu dessen konkreten Daten nicht möglich.

Letztendlich ist das vorgestellte Verfahren zur Massebestimmung nicht nur auf Fahrzeuge anwendbar. Bei sehr vielen Produkten finden sich zwei Kernaspekte, die auch Kraftfahrzeuge charakterisieren:

- Das Gewicht hängt von der Leistungsfähigkeit einer Komponente ab.
- Der Energieverbrauch hängt vom Gewicht einer oder mehrerer Komponenten oder des Produkts insgesamt ab.

Naheliegende Produkte sind Mobilitäts- und Transportmittel, die einen von der Umwelt losgelösten Energiespeicher haben, also Lastkraftwagen, Flugzeuge, Schiffe und dieselbetriebene Züge. Doch auch bei Produkten ohne einen unabhängigen, mobilen Energiespeicher, beispielsweise bei Zügen, die über eine Oberleitung mit Strom versorgt werden, lässt sich der Effekt einer Gewichtsspirale beobachten, wenngleich dieser deutlich schwächer ausgeprägt ist als bei Transportmitteln mit eigenem Energiespeicher.

## 10 Zusammenfassung

Im heutigen Prozess der Fahrzeugentwicklung werden die Gesamtfahrzeug- und Komponentenmassen neuer Fahrzeuge häufig auf Basis von Vorgänger- und Referenzfahrzeugen abgeschätzt. Bei größeren technischen Veränderungen, vollständig neuen Fahrzeugkonzepten oder neuen Technologien liefert diese Vorgehensweise keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Für die Masse- und Verbrauchsabschätzung von Fahrzeugen wird in der vorliegenden Arbeit ein neues Verfahren vorgeschlagen. Dabei wird ein Fahrzeug in Komponentengruppen unterteilt und die Masse jeder Komponentengruppe in Abhängigkeit ihrer massebestimmenden Parameter unabhängig beschrieben. Die Gesamtfahrzeugmasse ergibt sich aus der Summe der Massen der Komponentengruppen. Der Effekt der Gewichtsspirale und der sekundären Gewichtseffekte in der Fahrzeugauslegung wird über die längsdynamischen Fahrzeugeigenschaften und eine iterative Ausführung der Berechnungssystematik berücksichtigt.

Die Umsetzung des Verfahrens in einem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* wird detailliert beschrieben. Mit diesem Verfahren können die Masse von Fahrzeugen und Fahrzeugkonzepten sowie die Auswirkungen einer Veränderung von Masse und Abmessungen einzelner Bauteile und auch des gesamten Fahrzeugs schnell und einfach ermittelt werden. Das Modell berücksichtigt sowohl verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge (ICEV) als auch batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV).

Für die Modellierung werden zuerst die massebestimmenden relevanten Parameter identifiziert und durch fahrzeugübergreifende Parameter angenähert. Letztgenannte sind zum Beispiel Fahrzeugabmessungen, Anzahl der Sitzplätze, Beschleunigung und Reichweite, Antriebstechnologie und eingesetzte Materialien.

Auf Basis dieser Parameter werden die Massemodelle der Komponentengruppen anhand von physikalischen und empirischen Modellen aufgebaut. Eine Längsdynamiksimulation überprüft die zuvor festgelegten Anforderungen Beschleunigung und Reichweite. Sofern erforderlich, werden Motorleistung und Energiespeicherkapazität zur Erfüllung der Anforderungen angepasst. Um den Einfluss der Fahrzeugparameter auf die Längsdynamikeigenschaften berücksichtigen zu können, sind für die entsprechenden Kenngrößen wie Luftwiderstands- und Rollwiderstandsbeiwert sowie Massenträgheitsmoment des Antriebsstrangs ebenfalls parametrische Modelle hinterlegt.

Mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* werden die Massen der Komponentengruppen, aus denen sich die Gesamtfahrzeugmasse zusammensetzt, und zusätzliche Fahrzeugkenngrößen berechnet. Auf Basis dieser Ergebnisse können nun weitere Simulationen und Untersuchungen durchgeführt und Kenngrößen ermittelt werden, beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen und die Fahrzeuggesamtkosten; entsprechende Modelle werden ebenfalls beschrieben. Insbesondere das Kostenmodell hängt sehr stark von den Kostenfaktoren der Produktion ab, die außerhalb eines Automobilherstellers praktisch nicht verfügbar sind. Der Schwerpunkt bei diesen ergänzenden Modellen liegt daher auf der Beschreibung der Methodik.

Anhand von Simulationen von Beispielfahrzeugen der unteren Mittelklasse mit dem *Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell* und den weiteren Modellen werden grundlegende Zusammenhänge untersucht. Die wichtigsten Erkenntnisse für die Referenzfahrzeuge Diesel- und Otto-ICEV mit Stahlstruktur und BEV mit Aluminiumstruktur sind:

- Eine Reichweitenänderung von +/-20 Prozent führt bei den ICEV nur zu einer geringen Veränderung der Fahrzeugmasse von +/-1 Prozent. Eine Änderung der Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h wirkt sich stärker auf die Masse aus; bei einer Erhöhung um 20 Prozent ändert sich die Fahrzeugmasse um -3 Prozent, bei einer Verringerung um 20 Prozent um +4 Prozent für Otto- und +5 Prozent für Diesel-ICEV.
- Bei dem BEV sind die Auswirkungen dieser Effekte umgekehrt, die Reichweite beeinflusst die Masse stärker als die Beschleunigungszeit. Eine Änderung der Reichweite um +/-20 Prozent wirkt sich mit +/-3 Prozent auf die Masse aus; eine Änderung der Beschleunigungszeit um +/-20 Prozent führt zu einer um 1 Prozent niedrigeren bzw. 2 Prozent höheren Masse.
- Das durchschnittliche Verhältnis aus sekundärem zu primärem Gewichtseffekt (VSPG) des Diesel-ICEV liegt ungefähr bei 0,58 und das des Otto-ICEV bei ungefähr 0,53. Mit abnehmender Beschleunigungszeit erhöht sich das VSPG, ebenso mit zunehmender Reichweite; der Einfluss der Beschleunigungszeit ist höher als der der Reichweite.
- Das BEV weist mit ungefähr 0,43 ein geringeres VSPG auf als die ICEV. Die Tendenz des VSPG bei einer Veränderung von Beschleunigung und Reichweite ist dieselbe wie bei den ICEV; der Einfluss der Reichweite ist allerdings höher als der der Beschleunigungszeit.
- Die tolerierbaren Leichtbaukosten liegen für das Otto-ICEV bei etwa 6 EUR/kg und für das Diesel-ICEV bei etwa 6,60 EUR/kg eingesparter Masse. Die tolerierbaren Leichtbaukosten des BEV betragen etwa 4 EUR/kg eingesparter Masse bei Batteriekosten von 100 EUR/kWh und einer Energiedichte von 156 Wh/kg; für höhere Antriebsstrang- und Energiespeicherkosten und niedrigere Energiedichten steigen die tolerierbaren Leichtbaukosten signifikant an, bei 550 EUR/kWh Batteriekosten und einer Energiedichte von 100 Wh/kg liegen die tolerierbaren Mehrkosten bei rund 17 EUR/kg. Die genannten Werte gelten für eine volle Berücksichtigung der sekundären Gewichtseffekte.
- Das BEV führt zu geringeren CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen als das Diesel-ICEV, wenngleich die Emissionen der Produktion beim BEV höher sind. Die Mehremissionen für Aluminium gegenüber Stahl als Strukturmaterial werden beim BEV und beim Diesel-ICEV über die Lebensdauer durch niedrigere Betriebsemissionen kompensiert, sofern die Fahrzeuge recycelt werden.
- Die Produktionskosten des BEV liegen sowohl mit Stahl- als auch Aluminiumstruktur unter denen des entsprechenden Diesel-ICEV. Eine CFK-Struktur schneidet im jeweiligen Vergleich zu Aluminium oder Stahl bei Emissionen und Kosten schlechter ab. Das BEV in Aluminium weist von den untersuchten Fahrzeugkonzepten die niedrigsten Lebenszykluskosten auf.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Masseschätzung ermöglicht eine deutlich detailliertere Abbildung von Fahrzeugen und Untersuchung von Gewichtsaspekten in der Fahrzeugauslegung als die bestehenden, einfacheren Schätzverfahren. Im Gegensatz zur relativ genauen Masseberechnung mittels aufwändigen Computer-Aided-Engineering-Werkzeugen lassen sich anhand der gezeigten Methode Fahrzeugmasse, weitere Fahrzeugeigenschaften und zusätzliche Kenngrößen schnell und mit wenigen Parametern ermitteln und für ergänzende Untersuchungen verwenden.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Fahrzeugmasse des Volkswagen Polo, Golf und Passat verschiedener Baureihen.....	1
Abbildung 1.2:	Fahrwiderstandsarbeit des Audi 80 und des Audi A4 aus 1978, 1994 und 2007.....	2
Abbildung 1.3:	Übersicht über die Struktur dieser Arbeit .....	5
Abbildung 2.1:	Zusammensetzung des Gesamtfahrwiderstands .....	8
Abbildung 2.2:	Gewichtsspirale – Kompensation der Gewichtssteigerung über eine Leistungssteigerung .....	9
Abbildung 2.3:	Sekundäre Gewichtsreduktion eines Volkswagen Golf V und eines Opel Corsa C ohne iterative Ausführung der Berechnung .....	10
Abbildung 2.4:	Sekundäre Gewichtsreduktion für einen Volkswagen Golf V und einen Opel Corsa C bei drei Iterationen der Berechnung.....	11
Abbildung 2.5:	Abnehmende Realisierbarkeit sekundärer Gewichtseffekte mit Fortschreiten der Fahrzeugentwicklung .....	13
Abbildung 2.6:	CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen von ICEV und zeitliche Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Betriebsemissionen.....	15
Abbildung 2.7:	Treibhausgasemissionen eines „mittleren PKW“ nach Fahrleistung.....	16
Abbildung 2.8:	VSPG-Werte aus der Literatur .....	18
Abbildung 3.1:	Gegenseitige Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht, Längsdynamik und fahrzeugspezifischen Kenngrößen.....	23
Abbildung 3.2:	Ansatz zur Berücksichtigung der Gewichtsspirale ausgehend von einem Referenzfahrzeug .....	25
Abbildung 3.3:	Ansatz zur Berücksichtigung der Gewichtsspirale ausgehend von einem neuen Fahrzeugkonzept ohne ein bekanntes Referenzfahrzeug .....	26
Abbildung 4.1:	Übersicht über das Gewichtsmodell.....	30
Abbildung 4.2:	Möglichkeiten zur Modellierung von Komponenten, Beispiel Antriebswellen .....	32
Abbildung 4.3:	Übersicht über die 24 Benchmarkfahrzeuge von A2Mac1 .....	34
Abbildung 4.4:	Ableiten der modellrelevanten Kernparameter .....	35
Abbildung 4.5:	Eingangsparameter für das Fahrzeuggewichtsmodell.....	36
Abbildung 4.6:	Gliederung des Untermodells Gewichtsrechner in Baugruppen .....	37
Abbildung 4.7:	Gliederung der Baugruppe Struktur in Komponentengruppen.....	38
Abbildung 4.8:	Fahrzeubereiche für das BIW-Modell (Limousine) .....	39
Abbildung 4.9:	Modell für die BIW-Masse in Abhängigkeit des berechneten Ersatzvolumens .....	40

Abbildung 4.10:	Korrektur des berechneten BIW-Gewichts in Abhängigkeit der zulässigen Gesamtfahrzeugmasse.....	41
Abbildung 4.11:	Leichtbaufaktoren für von Stahl abweichende BIW-Materialien .....	41
Abbildung 4.12:	Gliederung der Baugruppe Fahrwerk in Komponentengruppen .....	42
Abbildung 4.13:	Modell für die Masse der Komponentengruppe Räder.....	42
Abbildung 4.14:	Gliederung der Baugruppe Antriebsstrang in Komponentengruppen für BEV.....	43
Abbildung 4.15:	Physikalische Modellierung des Elektromotors.....	44
Abbildung 4.16:	Modell für die Masse der ASM und PSM in Abhängigkeit von Leistung und Drehmoment .....	44
Abbildung 4.17:	Gliederung der Baugruppe Antriebsstrang in Komponentengruppen für ICEV .....	45
Abbildung 4.18:	Modell für die Masse des Verbrennungsmotors.....	46
Abbildung 4.19:	Energiedichte von Batteriesystemen bei BEV .....	47
Abbildung 4.20:	Technische Daten von Batteriezellen .....	47
Abbildung 4.21:	Masse des Batteriesystems in Abhängigkeit von der Kapazität bei BEV.....	48
Abbildung 4.22:	Gliederung der Baugruppe Energiespeicher in Komponentengruppen für ICEV .....	48
Abbildung 4.23:	Beeinflussung des Fahrzeugexterieurs durch das Design .....	49
Abbildung 4.24:	Gliederung der Baugruppe Exterieur in Komponentengruppen .....	49
Abbildung 4.25:	Modell für die Masse der Türen.....	50
Abbildung 4.26:	Gliederung der Baugruppe Interieur in Komponentengruppen.....	51
Abbildung 4.27:	Modell für die Masse der Mittelkonsole .....	52
Abbildung 4.28:	Gliederung der Baugruppe Elektrik und Elektronik in Komponentengruppen.....	53
Abbildung 4.29:	Modell für die Masse der Niedervoltverkabelung.....	53
Abbildung 4.30:	Gliederung der Baugruppe Sonstiges in Komponentengruppen.....	54
Abbildung 4.31:	Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ausgewählter Fahrzyklen.....	54
Abbildung 4.32:	Ablauf der Längsdynamiksimulation .....	56
Abbildung 4.33:	Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge für verschiedene Aufbauformen.....	58
Abbildung 4.34:	Rollwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der Reifenbreite für unterschiedliche Reifendimensionen .....	59
Abbildung 4.35:	Reduziertes Massenträgheitsmoment des BEV- und des Diesel-ICEV-Antriebsstrangs.....	60
Abbildung 4.36:	Klimamodell des Mute .....	62
Abbildung 4.37:	Leistungsbedarf für die Klimatisierung.....	62

---

Abbildung 4.38:	Wirkungsgradkennfeld des Mute-Elektromotors.....	63
Abbildung 4.39:	Überlastfaktor der PSM von BEV.....	64
Abbildung 4.40:	Referenzmotoren für die Bestimmung des maximalen Drehmoments.....	65
Abbildung 4.41:	Systematik der Verbrauchsbestimmung anhand des Willans-Verfahrens.....	65
Abbildung 4.42:	Koeffizienten zur Bestimmung von $V_{null}$ und $V_{eff}$ .....	66
Abbildung 4.43:	Auswahl der Package-relevanten Komponenten.....	68
Abbildung 4.44:	Batteriebauraum im Unterboden, unter und hinter der Sitzbank der zweiten Sitzreihe.....	68
Abbildung 5.1:	Vergleich Benchmark und Simulation des Mitsubishi i-MiEV.....	69
Abbildung 5.2:	Vergleich Benchmark und Simulation des Volkswagen Polo V.....	71
Abbildung 5.3:	Fehlerkette der von den Abmessungen in Längsrichtung abhängigen Exterieurbauteile der Fahrzeugseitenansicht.....	72
Abbildung 5.4:	VSPG des Volkswagen Golf V, Vergleich Studie mit Simulationsergebnis.....	73
Abbildung 5.5:	Abweichung zwischen Gewicht Herstellerangabe und Benchmark-Leergewicht.....	74
Abbildung 5.6:	Simulationsergebnis Mini E.....	75
Abbildung 5.7:	Simulationsergebnis BMW i3.....	76
Abbildung 5.8:	Simulationsergebnisse weiterer BEV.....	76
Abbildung 5.9:	Simulationsergebnisse Audi A4 Limousine mit Dieselmotor.....	77
Abbildung 5.10:	Simulationsergebnisse Audi A4 Limousine mit Ottomotor.....	78
Abbildung 5.11:	Simulationsergebnisse Mini One.....	79
Abbildung 5.12:	Simulationsergebnisse Mini One D.....	79
Abbildung 5.13:	Simulationsergebnisse weiterer ICEV Fahrzeuge.....	80
Abbildung 6.1:	Emissionsfaktoren für verschiedene Energiequellen.....	81
Abbildung 6.2:	Untergliederung der CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen in Lebenslaufphasen.....	82
Abbildung 6.3:	Detailbetrachtung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in der Produktion.....	84
Abbildung 6.4:	Durchschnittliche Materialzusammensetzung der Komponentengruppen des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells.....	85
Abbildung 6.5:	Ermittlung der CO <sub>2</sub> -Produktionsemissionen für die vorderen Türen aus Stahl.....	87
Abbildung 6.6:	Abschätzung des Brutto-Listenpreises und der Herstellkosten eines Fahrzeugs.....	90
Abbildung 6.7:	Auswahl an Kostenfaktoren für die Produktion von Fahrzeugen.....	92
Abbildung 6.8:	Simulationsergebnisse CO <sub>2</sub> -Emissionen für ICEV.....	94

Abbildung 6.9:	Simulationsergebnisse CO <sub>2</sub> -Emissionen für BEV .....	95
Abbildung 6.10:	Simulationsergebnisse Kosten für ICEV .....	96
Abbildung 6.11:	Kilometerbezogene Lebenszykluskosten für den Volkswagen Golf VII 1.6 TDI .....	97
Abbildung 7.1:	Basisfahrzeug für die Anwendungsbeispiele .....	99
Abbildung 7.2:	Gewicht von ICEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten .....	100
Abbildung 7.3:	Gewicht von ICEV für unterschiedliche Beschleunigungsvorgaben ...	101
Abbildung 7.4:	Gewicht von BEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben .....	101
Abbildung 7.5:	Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit des Fahrzyklus für die Auslegung .....	102
Abbildung 7.6:	Auswirkung einer Änderung einzelner Parameter auf Gewicht, Verbrauch, CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen und Kosten .....	103
Abbildung 7.7:	VSPG für ICEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben .....	105
Abbildung 7.8:	VSPG für BEV für unterschiedliche Auslegungsreichweiten und Beschleunigungsvorgaben .....	105
Abbildung 7.9:	VSPG für ICEV und BEV bei einer Veränderung von Radstand, Breite und Höhe .....	106
Abbildung 7.10:	Vergleich von Stahl, Aluminium und CFK als Strukturmaterial für ICEV und BEV .....	107
Abbildung 7.11:	Kilometerbezogene CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen und TCO in Abhängigkeit der Lebenszyklus-Laufleistung für BEV .....	108
Abbildung 7.12:	Vergleich von 5-Sitzer vs. 2-Sitzer ICEV und BEV .....	110
Abbildung 8.1:	Vergleich der Modellergebnisse für ICEV, BEV und neuartige Technologien mit Herstellerangaben und der Berechnung über ein Schätzverfahren .....	116
Abbildung 9.1:	Aufbau eines Regressionsmodells auf Basis der Fahrzeugaußenabmessungen, Beschleunigungszeit, Reichweite und Energiedichte (vorläufige Ergebnisse) .....	120

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol (Kunststofftyp)
ABS	Antiblockiersystem
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
Al	Aluminium (chemische Abkürzung)
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester (Kunststofftyp)
ASM	Asynchronmotor
BEV	Battery Electric Vehicle (dt.: batteriebetriebenes Fahrzeug)
BIW	Body in White (dt.: Rohkarosserie, Rohstruktur)
CAD	Computer Aided Design (dt.: computergestützte 3D-Konstruktion)
CAE	Computer Aided Engineering (dt.: computergestützte Entwicklung oder Entwicklungswerkzeuge)
CFD	Computational Fluid Dynamics (dt.: numerische Strömungssimulation)
CFK	Carbon-faserverstärkter Kunststoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid (chemische Abkürzung)
DoE	Design of Experiments (dt.: statistische Versuchsplanung)
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm
Fe	Eisen (chemische Abkürzung)
FTP75	Federal Test Procedure 75 (US-Fahrzyklus)
GF	Glasfaser (gibt Glasfaser-Füllanteil bei Kunststoffen an)
GHG	Greenhouse Gas (dt.: Treibhausgas)
GWP	Global Warming Potential (dt.: Treibhauspotenzial)
HA	Hintere Achse
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (dt.: Heizung, Lüftung und Klimaanlage)
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (dt.: verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug)
LCA	Life Cycle Analysis (dt.: Ökobilanz; allgemein auch Lebenszyklusanalyse)
Li	Lithium (chemische Abkürzung)
Li-Io	Lithium-Ionen(-Akkumulator) (Batterietyp)
LZE	Lebenszyklusemissionen
MAG	Metallaktivgas(-schweißen) (Schweißverfahren)
MIG	Metallinertgas(-schweißen) (Schweißverfahren)
Mn	Mangan (chemische Abkürzung)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NPV	Net Present Value (dt.: Kapitalwert)
O	Sauerstoff (chemische Abkürzung)
P	Phosphor (chemische Abkürzung)
PA	Polyamid (Kunststofftyp)
PC	Polycarbonat (Kunststofftyp)
PE	Polyethylen (Kunststofftyp)
PES	Polyethersulfon (Kunststofftyp)
PET	Polyethylenterephthalat (Kunststofftyp)
PMMA	Polymethylmethacrylat (Kunststofftyp)
PP	Polypropylen (Kunststofftyp)
PSM	Permanenterregter Synchronmotor
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststofftyp)
RTM	Resin Transfer Moulding (Verarbeitungsverfahren für CFK)
SMC	Sheet Moulding Compound (Verarbeitungsverfahren für CFK)
TCO	Total Cost of Ownership (dt.: Lebenszykluskosten)
TV	Torque Vectoring (dt.: stufenlose Antriebsmomentverteilung zwischen den Rädern)
VA	Vordere Achse
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VSPG	Verhältnis aus sekundärem zu primärem Gewichtseffekt, dimensionslos
xEV	x Electric Vehicles (allgemein elektrifizierte Fahrzeuge, das „x“ steht als Platzhalter)

## Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$a$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
$a_{Fzg}$	m/s <sup>2</sup>	Fahrzeugbeschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung
$A$	m <sup>2</sup>	Stirnfläche
$A_R$	m <sup>2</sup>	Radaufstandsfläche
$B$	m	Fahrzeugbreite
$B_{Rad}$	m	Reifenbreite
$\bar{c}_{ET}$	kg CO <sub>2</sub> /J	Mittlere spezifische Emissionen
$c_{RR}$	kg/t	Rollwiderstandsbeiwert
$c_{RR,ref}$	kg/t	Rollwiderstandsbeiwert des Referenzreifens
$c_T$	Nm/°	Torsionssteifigkeit
$c_W$	-	Luftwiderstandsbeiwert
$\delta$	kg	Toleranzband für Abbruchkriterium der Iteration im Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell
$D_{Rad}$	m	Reifendurchmesser
$e_i$	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
$\eta_M$	-	Motorwirkungsgrad
$\eta_{LE}$	-	Leistungselektronikwirkungsgrad
$E_B$	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Emissionen des Betriebs
$E_{Log}$	kg CO <sub>2</sub>	Logistikemissionen
$E_{LZ}$	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Lebenszyklusemissionen
$E_{Mont}$	kg CO <sub>2</sub>	Füge- und Montageemissionen
$E_P$	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Produktion
$E_R$	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Emissionen des Recycling
$E_W$	kg CO <sub>2</sub>	Emissionen für Fahrzeugwartung
$F_B$	N	Trägheitskraft, Beschleunigungswiderstandskraft
$F_I$	N	Innere Reibungskraft, Antriebswiderstandskraft
$F_L$	N	Luftwiderstandskraft
$F_R$	N	Rollwiderstandskraft
$F_W$	N	Fahrwiderstandskraft
$F_Z$	N	Zugkraftbedarf
$F_{ah}$	-	Index für Baugruppe Fahrwerk

## Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$H$	m	Fahrzeughöhe
$i$	-	Gangstufe $i$ , ggf. als Index; Übersetzungsverhältnis
$i_{ges}$	-	Gesamtübersetzung vom Motor bis zum Rad
$k_{eff}$	-	Proportionalitätskonstante
$L$	m	Fahrzeuglänge
$LBG$	kg°/(m <sup>2</sup> Nm)	Leichtbaugüte
$Lim$	-	Index für Karosserieform „Limousine“
$m$	kg	Masse, allgemein
$m_{Ant,ASM}$	kg	Masse der Asynchronmaschine
$m_{Ant,Mot}$	kg	Masse des Antriebsmotors
$m_{Ant,PSM}$	kg	Masse der permanenterregten Synchronmaschine
$m_{BIW}$	kg	Masse des BIW
$m_{EE,Inv}$	kg	Masse des Inverters
$m_{EE,NV}$	kg	Masse des Niedervoltbordnetzes
$m_{Ext,Tuer}$	kg	Masse der Türen
$m_{Fah,Raeder}$	kg	Masse von vier Rädern (Reifen und Felge)
$m_{Fzg}$	kg	Fahrzeugmasse
$m_{Int,MK}$	kg	Masse der Mittelkonsole
$m_L$	kg	Fahrzeugleermasse
$m_{L,ver}$	kg	Veränderte Fahrzeugleermasse, die gegenüber der Fahrzeugleermasse eine primäre und eine sekundäre Gewichtsveränderung beinhaltet
$m_P$	kg	Masse der primären Gewichtsveränderung, positiver oder negativer Wert möglich
$m_S$	kg	Masse der sekundären Gewichtsveränderung, positiver oder negativer Wert möglich
$m_{Str,BIW}$	kg	Masse des BIW
$m_Z$	kg	Masse der Zuladung
$m_{Z,max}$	kg	Masse der maximalen Zuladung
$m_{zGg}$	kg	Zulässige Fahrzeuggesamtmasse
$\bar{M}$	kg CO <sub>2</sub> /kg	Mittlere spezifische Emissionen
$n$	-	Index für Anzahl durchlaufene Iterationsschleifen des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$n_M$	1/min	Motordrehzahl
$P_{eff}$	W	Effektive Leistung
$P_{M,el}$	W	Elektrische Leistung am Motor
$P_{M,mech}$	W	Mechanische Leistung am Motor
$P_{max}$	W	Maximale Leistung
$P_{Motor}$	kW	Motorleistung, allgemein
$P_{Nenn}$	kW	Nennleistung
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Luft
$\rho_{Ersatz}$	kg/m <sup>3</sup>	Ersatzdichte für Masseberechnung nach [Yan10]
$r$	m	Radius
$r_{Rad}$	m	Reifenradius
$R$	m	Radstand
$R^2$	-	Korrelationskoeffizient
$s_{LZ}$	km	Gesamtfahrleistung
$Sch$	-	Index für Karosserieform „Schrägheck“
$Ste$	-	Index für Karosserieform „Steilheck“
$t$	s	Zeit
$T$	Nm	Antriebsdrehmoment
$T_{erf}$	Nm	Erforderliches Drehmoment zum Folgen einer Geschwindigkeitsvorgabe
$T_{max}$	Nm	Maximales Antriebsdrehmoment
$T_{Nenn}$	Nm	Nenndrehmoment
$\Theta$	kg m <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment
$\Theta_{red}$	kg m <sup>2</sup>	Reduziertes Massenträgheitsmoment
$U_h$	m	Überhang hinten
$U_v$	m	Überhang vorne
$v_{1000}$	m/s	Translatorische Fahrzeuggeschwindigkeit bei 1.000 Umdrehungen pro Minute des Motors
$v_{Fzg}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
$V$	l/h	Kraftstoffverbrauch
$\bar{V}$	J/km	Mittlerer Streckenenergieverbrauch
$V_{eff}$	l/h	Verbrauch durch effektive Leistung
$V_{Ersatz}$	m <sup>3</sup>	Ersatzvolumen

## Verwendete Formelzeichen

---

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$V_F$	m <sup>3</sup>	Frontbereich des BIW-Modells
$V_H$	m <sup>3</sup>	Heckbereich des BIW-Modells
$V_{Hub}$	l	Hubvolumen des Motors
$V_M$	m <sup>3</sup>	Mittelbereich des BIW-Modells
$V_{null}$	l/h	Nulllastverbrauch

## Zugrunde liegende Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, in denen Teilaspekte der Arbeit vorgestellt wurden. Die bereits erschienenen Veröffentlichungen in chronologischer Reihenfolge sind:

- Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus; Matz, Stephan.; Wehrle, Erich: Mute – ein effizientes und marktfähiges Elektrofahrzeug durch intelligenten Leichtbau. In: 5. Symposium Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte, Wolfsburg, 13. - 14.03.2012.
- Baier, Horst; Drechsler, Klaus; Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus; Lohr, Korbinian; Reinhart, Gunther; Volk, Wolfram; Zäh, Michael: Innovative Lösungsansätze bei der Produktion von Elektrofahrzeugen. In: Conference on Future Automotive Technology, Garching, 26. - 27.03.2012.
- Fuchs, Stephan; Lohr, Korbinian; Lienkamp, Markus: Bedeutung der Produktion für die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen von Elektrofahrzeugen. ATZ Produktion, 5. Jahrgang, S. 184 - 188, 2012.
- Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Modellierung des Gewichtseinflusses von Parametervariationen bei Elektrofahrzeugkonzepten. In: 6. Landshuter Leichtbau-Colloquium, Landshut, 27. - 28.02.2013.
- Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Parametrische Gewichts- und Effizienzmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 115. Jahrgang, Nr. 03, S. 232 - 239, 2013.
- Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Parametrische Gewichts- und Emissionsmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: 6. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 14. - 15.05.2013.
- Matz, Stephan; Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung mit Hilfe eines vollparametrischen Gewichtsmodells. In: Wissenschaftssymposium Automobiltechnik, Aachen, 12. - 13.06.2013.
- Kochhan, Robert; Fuchs, Stephan; Reuter, Benjamin; Burda, Peter; Matz, Stephan; Lienkamp, Markus: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. In: Research Gate, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), 27.02.2014.
- Fuchs, Stephan; Laubmann, Jonas; Lienkamp, Markus: Parametrische Kostenmodellierung für die Produktion, den Betrieb und das Recycling von Fahrzeugen. In: Conference on Future Automotive Technology, Garching, 17. - 18.03.2014.

Zum Zeitpunkt der Einreichung sind folgende Veröffentlichungen in Vorbereitung:

- Fuchs, Stephan; Schaffer, Matthias; Lienkamp, Markus: Parametrische CO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 116. Jahrgang, Nr. 05, 2014. Status: Angenommen.
- Fuchs, Stephan; Werner, Dominick; Lienkamp, Markus: Parametrische Modellierung von Gewicht, Kosten und CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen in frühen Phasen der Entwicklung. In: Symposium Faszination Leichtbau 2014, Wolfsburg, 19.05. - 20.05.2014. Status: Kurzfassung angenommen; Konferenzbeitrag in Vorbereitung.

Das Promotionsthema oder Teilaspekte daraus wurden vom Autor zusätzlich in Vorträgen ohne den offiziellen Charakter einer Veröffentlichung vorgestellt:

- Das Elektrofahrzeug Mute der TUM und Kernaspekte zugehöriger Life-Cycle-Analysen. In: Seminar Hochleistungsstrukturen im Leichtbau, Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München, 28. November 2012.
- Parametermodelle zur Massenabschätzung von PKW-Konzepten – Korrelationen mit Realisierungen. In: Seminar Hochleistungsstrukturen im Leichtbau, Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München, 27. November 2013.
- Fünf nicht-öffentliche Vorträge zum Forschungsstand der Promotion auf den halbjährlich stattfindenden Doktorandenkolloquien des Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik in den Jahren 2011 bis 2013.

Im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik war der Autor an folgenden Veröffentlichungen und Vorträgen beteiligt (Auswahl):

- Fuchs, Stephan; Rauchbart, Simon, Stenner, Patrick: Projekt Mute. In: Auto Motor und Sport Kongress 2012, Stuttgart, 2012.
- Fuchs, Stephan: Energiewende und Elektromobilität aus Sicht der Forschung. In: Tagung „Zukunftspfade – wie wollen wir künftig leben?“, Akademie für Politische Bildung Tutzing, 31.07.2012.

## Betreute studentische Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten entstanden unter der inhaltlichen, fachlichen und wissenschaftlichen Betreuung des Autors und sind für diese Dissertation relevant (Teil A) oder stehen in Bezug dazu (Teil B). Die Arbeiten wurden unter maßgeblicher Anleitung des Autors durchgeführt. Studentische Arbeiten, die nicht vom Autor betreut wurden und auf deren Ergebnisse zurückgegriffen wird, sind im Literaturverzeichnis enthalten.

### Teil A – Unmittelbar relevant für diese Dissertation

[Ant13] Antesner, Christoph: Entwicklung eines Verfahrens und Programmmoduls zur Package-Validierung für ein Fahrzeuggewichtsmodell. Semesterarbeit, 2013

- Programmierung eines Teilmodells zur Package-Validierung des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells und Umsetzung einer Überprüfung der Eingabewerte in Bezug auf die Modellgrenzen (Abschnitt 4.8)

[Ert12] Ertl, Florian: Analyse und Quantifizierung von gewichtsbestimmenden Kenngrößen für Fahrzeugkomponenten. Semesterarbeit, 2012

- Validierung der vom Autor erarbeiteten Liste für die Eingangsparameter des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells, ggf. Ergänzung (Abschnitt 4.3)
- Umsetzung des Teilmodells für die Struktur in erster Version (Absatz 4.4.1); Testweise Modellierung des Strukturgewichts über die Leichtbaugüte
- Umsetzung eines Teilmodells für Sitze (Absatz 4.4.6)

[Gar12] Gardijan, Petar: Aufbau eines Gewichtsmodells für einen elektrischen Antriebsstrang leichter Elektrofahrzeuge. Masterarbeit, 2012

- Aufbau eines physikalischen Modells für die Antriebsstrangkomponenten und die Batterie eines leichten Elektrofahrzeugs (Punkt 4.4.3.1 und 4.4.4.1)
- Softwareseitige Erweiterung und Programmierung der Modellstruktur des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells in Matlab

[Jak13] Jakob, Christian: Analyse der Gesamtfahrzeugeigenschaften in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts. Diplomarbeit, 2013

- Optimierung der Rechenzeit des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells mit diversen Maßnahmen, vor allem durch die Umsetzung einer optimierten Längsdynamiksimulation (Abschnitt 4.5)
- Aktualisierung des Gewichtsmodells für die Struktur anhand zusätzlicher Benchmarkdaten (Absatz 4.4.1)
- Umsetzung eines Modells für den Drehmassenzuschlagsfaktor (Absatz 4.6.3)
- Hinterlegung des Wertebereichs der Benchmarkdaten in der Eingabemaske (Absatz 4.8.1)
- Umsetzung eines empirischen Gewichtsmodells für Elektromotoren (Punkt 4.4.3.1)

[Kau13] Kaufmann, Felix: Gewichtsmodellierung von Fahrwerks- und Exterieurbauteilen. Bachelorarbeit, 2013

- Bedatung der Gewichts-Teilmodelle für Fahrwerk- (Absatz 4.4.2) und Exterieurbauteile (Absatz 4.4.5)
- Recherche von Bauteilinformationen, Bestimmung von Bauteilabmessungen anhand von Abbildungen (spätere Verwendung für Modellaufbau, Teil des Absatzes 4.4.5)

[Kon13] Konopka, Piotr: Gewichtsmodellierung des Antriebsstrangs für ein Verbrennerfahrzeug und Implementierung in einem Gewichtsmodell für Elektrofahrzeuge. Studienarbeit/Final Year Project University of Bath, 2013

- Bedatung der Gewichts-Teilmodelle für die Antriebsstrangkomponenten für ICEV (Punkt 4.4.3.2)
- Aufbau eines skalierbaren Motorkennfelds für ICEV (für diese Dissertation nicht verwendet)

[Lau13] Laubmann, Jonas: Parametrische Kostenmodellierung für die Produktion, den Betrieb und das Recycling von Fahrzeugen. Bachelorarbeit, 2013

- Aufbau und Bedatung des parametrischen Kostenmodells (Abschnitt 6.3)
- Gemeinsame Veröffentlichung des Modells und der Ergebnisse in [Fuc14b]

[Loh12] Lohr, Korbinian: Lifecycle-Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Elektrofahrzeugs Mute. Semesterarbeit, 2012

- Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen des Mute (Ergebnis für dieses eine Fahrzeug); Berechnungsstruktur und aus Datenbanken recherchierte CO<sub>2</sub>-Kennwerte dienten später als Grundlage für den Aufbau des parametrischen CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionsmodells mit Unterstützung von [Scha13] (Abschnitt 6.2)
- Gemeinsame Veröffentlichung der Ergebnisse in [Fuc12a]

[Mau11] Mauler, Stefan: Auswirkung der Raddimensionierung auf die Fahrwerksauslegung, Gewicht und Verbrauch. Semesterarbeit, 2011

- Recherche Reifendaten, Grundlage für späteres Teilgewichtsmodell für die Räder und Reifen (Teil von Absatz 4.4.2)
- Durchführung einer Untersuchung zur Verbrauchsbeeinflussung durch unterschiedliche Reifendimensionen

[Scha13] Schaffer, Matthias: Parametrische CO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung für die Produktion und das Recycling von Elektrofahrzeugen. Bachelorarbeit, 2013

- Aufbau und Bedatung des parametrischen CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusmodells (Abschnitt 6.2)
- Gemeinsame Veröffentlichung des Modells und der Ergebnisse in [Fuc14a]

[Scho13] Scholz, Markus: Parametrische Gewichtsmodellierung von Interieur- und Elektrik-/Elektronikbauteilen. Semesterarbeit, 2013

- Bedatung der Gewichts-Teilmodelle für Interieur- (Absatz 4.4.6) und Elektrik- und Elektronik-Bauteile (Absatz 4.4.7)

[Sta13] Stadler, Christoph: Einsatz von Modellen zur Gewichtsprädiktion und zur Bestimmung sekundärer Gewichtseffekte im Automobilbau. Forschungspraktikum, 2013

- Literaturrecherche zu bestehenden Möglichkeiten zur Gewichtsprädiktion und Untersuchung von Gewichtseffekten im Automobilbau

[Wer13] Werner, Dominick: Aufbau einer auf Excel basierenden, vereinfachten Variante eines bestehenden Fahrzeuggewichtsmodells. Bachelorarbeit, 2013

- Programmierung einer vereinfachten, auf Microsoft Excel basierenden Variante des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells; Ausgangspunkt ist das bestehende Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell in Matlab

## **Teil B – Arbeiten mit Bezug zu dieser Dissertation**

[Brz13] Brzemek, Denis: Anpassung eines bestehenden Fahrzeuggewichtsmodells an die Simulationsumgebung Dyna4. Bachelorarbeit, 2013

- Überprüfung des Einsatzes von Dyna4 für die Längsdynamiksimulation
- Umbau des bestehenden Gewichtsmodells für eine lehrstuhlweite Nutzbarkeit mit Matlab

[Gru13] Gruschka, Philipp: Gewichtsanalyse von Elektrofahrzeugen. Forschungspraktikum, 2013

- Recherche der Abmessungen von Fahrzeugkomponenten anhand technischer Zeichnungen und Abbildungen, Korrelation mit Fahrzeugabmessungen (angestrebt für Modellbildung der Fensterflächen, später jedoch anderweitig recherchierte Daten von [Kau13] verwendet)

[Mai13] Maier, Philipp: Analyse und Optimierung des Modellfehlers für ein Fahrzeuggewichtsmodell. Semesterarbeit, 2013

- Überprüfung des Modellfehlers des Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodells; die Arbeit bestätigt weitgehend die bei den Komponentenmodellen ermittelte Genauigkeit

[Tho11] Thomas, Cody: Identification and Evaluation of Opportunities for Mass Reduction in a Lightweight Electric Car. Masterarbeit, 2011

- Umsetzung einer Masseabschätzung der Struktur des Mute über das Fahrzeugvolumen; später weiterentwickelt in [Ert12]
- Aufbau und Pflege der Stückliste des Mute; Erarbeitung von Maßnahmen zur Gewichtssenkung



## Literaturverzeichnis

- [A2M08] A2Mac1 Automotive Benchmarking: AutoReverse Teardown Process. Unternehmensbroschüre, A2Mac1 Automotive Benchmarking, 25, Chaussée de Hary, 02140 Hary, Frankreich; 2008.
- [A2M12] A2Mac1 Automotive Benchmarking: Fahrzeugbenchmark-Datenbank. A2Mac1 Automotive Benchmarking, 25, Chaussée de Hary, 02140 Hary, Frankreich; 2012.
- [All13a] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.: ADAC Autokosten 2013. Kostenübersicht für über 1.800 aktuelle Neuwagen-Modelle. [http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/autokostenuebersicht\\_s-v\\_47089.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/autokostenuebersicht_s-v_47089.pdf), aufgerufen am 06.11.2013, Stand 04-2013, ADAC, München, 2013.
- [All13b] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.: ADAC Autokosten-Rechner. <http://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/default.aspx>, aufgerufen am 06.11.2013, ADAC, München, 2013.
- [Alo12] Alonso, Elisa; Lee, Theresa M.; Bjelkengren, Catarina; Roth, Richard; Kirchain, Randolph E.: Evaluating the Potential for Secondary Mass Savings in Vehicle Lightweighting. Environmental Science and Technology, Volume 46, Issue 5, S. 2893 - 2901, 2012.
- [And04a] André, Michel: Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), Report INRETS-LTE 0411, 2004.
- [And04b] André, Michel: Zusammenstellung von Fahrzyklen, Microsoft Excel Datei (All\_Cycles\_in\_Artemis\_BD\_092006.xls). Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), 2004.
- [Ant13] Antesner, Christoph: Entwicklung eines Verfahrens und Programmmoduls zur Package-Validierung für ein Fahrzeuggewichtsmodell. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Aud13] Audi AG: Audi A4 Limousine, A4 Avant, A4 allroad quattro, S4 Limousine, S4 Avant. Produktkatalog. Audi AG, Ingolstadt, 2013.
- [Aut11a] Auto, Motor und Sport: Bis zu 47 Prozent geringere Reichweite. Elektroauto-Reichweite im Winter. Heft 1/2011, 2011.
- [Aut11b] Auto, Motor und Sport: Sprint-Schummeler. Werksangabe vs. Messwert. Auto, Motor und Sport, <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/sprint-schummeler-werksangabe-vs-messwert-1921038.html>, aufgerufen am 05.01.2014, Beitrag aus 2011.
- [Aut12] Auto, Motor und Sport: Wankel Mutig. Bericht Eco Drive, Audi A1 e-tron. Heft 15/2012, 2012.
- [Aut13a] Auto, Motor und Sport: Watt kann er? Test VW e-up!. Heft 24/2013, 2013.

- [Aut13b] Auto Zeitung: Leise Revolution. <http://www.autozeitung.de/auto-news/bmw-i3-2013-carbon-karosserie-fertigung-cfk-karbon-technik-elektro-gn-401371>, aufgerufen am 23.10.2013.
- [Aut14] Autotest: Fahrzeugabbildungen. <http://www.autotest.de/tests/Opel/Corsa/C/bilder/opel-corsa-c> und <http://www.autotest.de/tests/VW/Golf/V/golf-1.4-tsi>, aufgerufen am 28.03.2014.
- [Bac13] Bachmann, Thomas: Persönliches Gespräch im Rahmen der Vorstellung und Diskussion des parametrischen Gewichtsmodells; weitere Anwesende: Lienkamp, Markus; Klein, Markus; Fuchs, Stephan. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 10.12.2013.
- [Bai12] Baier, Horst; Drechsler, Klaus; Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus; Lohr, Korbinian; Reinhart, Gunther; Volk, Wolfram; Zäh, Michael: Innovative Lösungsansätze bei der Produktion von Elektrofahrzeugen. In: Conference on Future Automotive Technology, Garching, 26. - 27.03.2012.
- [Bar11] Bardehle, Horst: Trends and Changes in frame and body construction demonstrated by a Mbtech vehicle concept. In: FutureCarBody 2011, 22. - 23. November 2011, Automotive Circle International, Bad Nauheim, 2011.
- [Bay13a] Bayerische Motoren Werke AG: Homepage. <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/1er/3-tuerer/2012/technische-daten.html>, aufgerufen am 01.10.2013.
- [Bay13b] Bayerische Motoren Werke AG: Homepage. <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/3er/touring/2012/bilder-videos.html#>, aufgerufen am 01.10.2013.
- [Bay13c] Bayerische Motoren Werke AG: Der BMW i3. Pressemappe, Juli 2013.
- [Bay13d] Bayerische Motoren Werke AG: Technische Daten. Der BMW i3 und der BMW i3 (mit Range Extender) im Vergleich. <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2013/techdata.html>, aufgerufen am 23.10.2013.
- [Bay14] Bayerische Motoren Werke AG: Die BMW 3er Limousine. Produktkatalog. BMW AG, München, 2014.
- [Ben13] Bender, Sebastian: Skype-Interview durch den Autor vom 14.08.2013 zu „Einsparung Materialsubstitution Stahl durch Alu oder CFK; Erfahrungswerte aus der Industrie.“ Garching Hochbrück, 2013.
- [Ber13] Bernhard, Wolfgang; Schlick, Thomas; Olschewski, Ingo; Thoennes, Markus; Garrelfs, Jens: Index Elektromobilität Q1/2013. Roland Berger Strategy Consultants, Automotive Competence Center & Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, April 2013.
- [Bir07] Birkhofer, Herbert; Kloberdanz, Hermann: Produktentwicklung II. Skript zur gleichnamigen Vorlesung des Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [Bos02] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Bosch Krafftahrtechnisches Taschenbuch. 24. Auflage, ISBN 3528138769, Vieweg Verlag, 2002.
- [Bos10] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Bosch Krafftahrtechnisches Taschenbuch. 27. Auflage, ISBN 3834814407, Vieweg und Teubner Verlag, 2010.

- [Bra05] Braß, Egbert: Konstruieren mit Catia V5. Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenmodellierung. 3., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hanser: München, 2005.
- [Bra07] Braess, Hans-Hermann (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-8348-0222-4, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [Bra13] Braess, Hans-Hermann (Hrsg.); Seiffert, Ulrich (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7. aktualisierte Auflage, ISBN 978-3-658-01690-6, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [Bra99] Braess, Hans-Hermann: Negative Gewichtsspirale. Erster Ansatz einer quantitativen Erfassung. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 101. Jahrgang, Nr 1, 1999.
- [Brz13] Brzemek, Denis: Anpassung eines bestehenden Fahrzeuggewichtsmodells an die Simulationsumgebung Dyna4. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Bun09] Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Die Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, August 2009.
- [Bun10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BmVBS): Mobilität in Deutschland 2008. Kurzbericht. Beauftragt vom BmVBS (FE-Nr. 70.801/2006), durchgeführt von infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn und Berlin, Februar 2010.
- [Bun12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. 1. Auflage, Stand Juli 2013.
- [Bur14] Burda, Peter: Entwicklung und Auslegung von Energiespeichersystemen für Elektrofahrzeuge. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Einreichung und Veröffentlichung voraussichtlich 2014.
- [Car13] CAR-Center Automotive Research: Was die Autobauer pro Fahrzeug verdienen. In: Absatzwirtschaft.de, <http://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2013/Absatzwirtschaft-21%2011%202013.pdf>, aufgerufen am 29.11.2013, Beitrag vom 19.11.2013.
- [Che10] Cheah, Lynette W.: Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S.. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, September 2010.
- [Chr00] Christlein, J.; Schüler, L.: Audi Space Frame 2. Generation: Realisierung eines zukunftsweisenden Leichtbau-Karosseriekonzepts mit Hilfe der Simulation. In: VDI-Berichte 1543, Tagung Entwicklungen im Karosseriebau, 11. - 12. Mai 2000, S. 137 - 153, VDI-Verlag: Düsseldorf, ISBN 3-18-091543-9, 2000.
- [Dur08] Durst, Georg: Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau. Dissertation, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 2008.

- [EAA07] European Aluminium Association (EAA): Aluminium in Cars. European Aluminium Association, Brüssel, Belgien, 2007.
- [Eck10a] Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 112. Jahrgang, Nr. 11, S. 788 - 795, 2010.
- [Eck10b] Eckstein, Lutz; Hartmann, Bastian; Schmitt, Fabian: Kosteneinsparpotenzial durch Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: Lightweight Design, Ausgabe 05/2010, S. 36 - 38 und 40 - 43, 2010.
- [Eck11a] Eckstein, L.; Göbbels, R.; Goede, M.; et al.: Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 113. Jahrgang, Nr. 01, S. 68 - 76, 2011.
- [Eck11b] Eckstein, L.; Göbbels, R.; Wohlecker, R.: Benchmarking des Elektrofahrzeugs Mitsubishi i-MiEV. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 113. Jahrgang, Nr. 12, S. 964 - 970, 2011.
- [Eco13a] Ecoinvent: Homepage. [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org), aufgerufen am 10.11.2013, Swiss Center for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Schweiz, 2013.
- [Eco13b] Ecoinvent: Ecoinvent data v2.2. Swiss Center for Life Cycle Inventories, St. Gallen/Dübendorf, Schweiz, 2013.
- [ELC13] European reference Life Cycle Database (ELCD): Homepage. <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>, aufgerufen am 10.11.2013, Institute for Environment and Sustainability (IES), Ispra, Italien, Europäische Kommission, 2013.
- [Ele12] Elend, Lutz-Eike: Audi „ultra“ – die neue Dimension des Leichtbaus. In: 5. Symposium Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte, 13.03.2012 - 14.03.2012, Wolfsburg, 2012.
- [Eng00] Engelhart, D.: Der A2 – eine neue Modellreihe von Audi. In: Sonderausgabe von ATZ und MTZ: Audi A2, 2000.
- [Ert12] Ertl, Florian: Analyse und Quantifizierung von gewichtsbestimmenden Kenngrößen für Fahrzeugkomponenten. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2012.
- [Eur07] Rat der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 70/220/EWG des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. Geänderte Fassung vom 01.01.2007.
- [Eur09] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 05.06.2009.
- [Eur11] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. Konsolidierte Fassung mit Änderungen und Berichtigungen vom 20.04.2011.

- [Eur12] Europäische Kommission: Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern bezüglich ihrer Massen und Abmessungen und zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 21.12.2012.
- [Fah09] Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan: Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Auflage, Springer: Heidelberg, 2009.
- [FAT11] Forschungsvereinigung Automobiltechnik (Hrsg.); Göbbels, René; Biermann, Jan-Welm; Urban, Peter: Analyse der sekundären Gewichtseinsparung. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) Schriftenreihe 230, 2011.
- [Fia09] Fiat Group Automobiles Germany AG: Alfa Romeo 159 und Alfa Romeo 159 Sportwagon Lineaccessori. Unternehmensbroschüre, Fiat Group Automobiles Germany AG, Direktion Teile & Service, Frankfurt am Main, 2009.
- [Fid10] Fidorra, Andreas; Risch, Hendrik; Ries, Thorsten: Audi Space Frame. Die Karosserie des neuen Audi A8. In: Lightweight Design, Ausgabe 03, 2010.
- [Fra12] Fraunhofer IAO: Fuhrparkanalyse und Flottenversuch am Regierungspräsidium Stuttgart. Präsentation der Ergebnisse vom 21. November 2012, Stuttgart, 2012.
- [Fri09] Fritsche, Uwe; Rausch, Lothar: Life Cycle Analysis of GHG and Air Pollutant Emissions from Renewable and Conventional Electricity, Heating, and Transport Fuel Options in the EU until 2030. European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC), Technical Paper 2009/18, June 2009.
- [FTM11] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik: Projektdokumentation des Elektrofahrzeugs Mute. Interne Datenbank, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2011.
- [Fuc12a] Fuchs, Stephan; Lohr, Korbinian; Lienkamp, Markus: Bedeutung der Produktion für die CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen von Elektrofahrzeugen. ATZ Produktion, 5. Jahrgang, S. 184 - 188, 2012.
- [Fuc12b] Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus; Matz, Stephan.; Wehrle, Erich: Mute – ein effizientes und marktfähiges Elektrofahrzeug durch intelligenten Leichtbau. In: 5. Symposium Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte, Wolfsburg, 13. - 14.03.2012.
- [Fuc13a] Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Parametrische Gewichts- und Effizienzmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 115. Jahrgang, Nr. 03, S. 232 - 239, 2013.
- [Fuc13b] Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Modellierung des Gewichtseinflusses von Parametervariationen bei Elektrofahrzeugkonzepten. In: 6. Landshuter Leichtbau-Colloquium, Landshut, 27. - 28.02.2013.
- [Fuc13c] Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Parametrische Gewichts- und Emissionsmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: 6. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 14. - 15.05.2013.

- [Fuc14a] Fuchs, Stephan; Schaffer, Matthias; Lienkamp, Markus: Parametrische CO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 116. Jahrgang, Nr. 05, 2014. Status: Angenommen.
- [Fuc14b] Fuchs, Stephan; Laubmann, Jonas; Lienkamp, Markus: Parametrische Kostenmodellierung für die Produktion, den Betrieb und das Recycling von Fahrzeugen. In: Conference on Future Automotive Technology, Garching, 17. - 18.03.2014.
- [Fuc14c] Fuchs, Stephan; Werner, Dominick; Lienkamp, Markus: Parametrische Modellierung von Gewicht, Kosten und CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusemissionen in frühen Phasen der Entwicklung. In: Symposium Faszination Leichtbau 2014, Wolfsburg, 19.05. - 20.05.2014. Status: Kurzfassung angenommen; Konferenzbeitrag in Vorbereitung.
- [Fuc14d] Fuchs, Johannes: Analyse der Wechselbeziehungen und Entwicklungspotenziale in der Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Einreichung und Veröffentlichung voraussichtlich 2014.
- [Gab13a] GaBi: Homepage. [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com), aufgerufen am 10.11.2013, PE International AG, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland, 2013.
- [Gab13b] GaBi: GaBi 5 Software Database. Datenbank mit Datensätzen. PE International AG, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland, 2013.
- [Gab13c] Springer Gabler Verlag (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Total Cost of Ownership. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/16735/total-cost-of-ownership-v6.html>, aufgerufen am 10.11.2013. Springer Gabler Verlag, 2013.
- [Gar12] Gardijan, Petar: Aufbau eines Gewichtsmodells für einen elektrischen Antriebsstrang leichter Elektrofahrzeuge. Unveröffentlichte Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2012.
- [Geb00] Gebhard, Peter; Wilk, Torsten; Kroll, Siegfried: Gesamtfahrzeugparameter und die Auswirkungen auf Fahrleistung und Verbrauch. In: Sonderausgabe der Automobiltechnische Zeitschrift und der Motortechnische Zeitschrift, S. 56 - 58, 60 - 62, 2000.
- [Goe05] Goede, Martin; Ferkel, Hans; Stieg, Jürgen; et. al.: Mischbauweisen Karosseriekonzepte – Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2005.
- [Gru13] Gruschka, Philipp: Gewichtsanalyse von Elektrofahrzeugen. Unveröffentlichtes Forschungspraktikum, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Had12] Hadler, Jens; Neußer, Heinz-Jakob; Jelden, Hanno; Lück, Peter; Tausen, Jonas: Golf Blue-e-Motion. Der elektrische Volkswagen. In: 33. Internationales Wiener Motoren-Symposium 26. - 27. April, Wien, 2012.
- [Hak11] Haken, Karl-Ludwig: Grundlagen Kraftfahrzeugtechnik. 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-446-42604-7, München: Carl Hanser Verlag, 2011.

- [Ham13] Hammer, Martin: Schriftverkehr mit dem Autor zu technischen Daten und Potenzial von Conchifera-Batterien sowie zum Entladefaktor von Batteriezellen (Nominal-Kapazität). Garching bei München, 19., 22., 24. und 25.11.2013.
- [Has09] Hastie, Trevor; Tishirani; Friedman, Jerome: The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction. 2. Ausgabe, ISBN 978-0-387-84857-0, New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- [Hei11] Heißing, Bernd; Ersoy, Metin; Gies, Stefan (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Hei13] Heißing, Bernd: Schriftverkehr mit dem Autor zu Gewicht von Achsbauteilen und der Auswirkung eines Fahrschemels oder Hilfsrahmens auf das Achsgewicht. Garching bei München, 23.12.2013.
- [Hen12] Hensley, Russell; Newman, John; Rogers, Matt: Battery technology charges ahead. In: McKinsey Quarterly, July 2012, McKinsey & Company, Inc., 2012.
- [Her12] Herrmann, Paul; Fuchs, Stephan: Expertengespräch zu Scheiben bei Kraftfahrzeugen. Produktionsprozess, Scheibendicke, eingesetzte Materialien und Scheibengewicht. Telefonisches Gespräch vom 27.07.2012 mit Paul Herrmann, Product Manager bei Glas Trösch AG Automobile, Trimbach, Schweiz. Garching/Trimbach, 2012.
- [Höh09] Höhn, Bernd-Robert; Wirth, Christian; Kurth, Franz: Aktives Differential mit Torque-Vectoring-Funktion. In: Automobiltechnisches Kolloquium 2009, Technische Universität München, 2009.
- [Hof10] Hofmann, M.; Eckhardt, B.; März, M.; Frey, L.: Effizienzoptimierung integrierter elektrischer Antriebssysteme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. In: EMA 2010 Elektromobilausstellung, Fachtagung – Wettbewerbe, Aschaffenburg, 08. - 09.10.2010.
- [IAI07] International Aluminium Institute (IAI): Improving Sustainability in the Transport Sector Through Weight Reduction and the Application of Aluminium. Full Report, World Aluminium, International Aluminium Institute, London, 2007.
- [IFE11] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IfEU): Umweltbilanzen Elektromobilität (UMBRéLA). Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Heidelberg, 2011.
- [IFE13] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IfEU): Homepage. [www.ifeu.de](http://www.ifeu.de), aufgerufen am 10.11.2013.
- [IFU13] Institut für Umweltinformatik Hamburg: Homepage. [www.ifu.com/de](http://www.ifu.com/de), aufgerufen am 10.11.2013.
- [IIN13] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien (IINAS): Ausgewählte Ergebnisdaten aus GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme), Version 4.81, Februar 2013. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien, Darmstadt, 2013.

- [IKA12] Institut für Kraftfahrzeuge (ika): CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020. Abschlussbericht 113510, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen. Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bonn. Dezember 2012.
- [IPC07] IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Genua, Schweiz, 2007.
- [Jak13] Jakob, Christian: Analyse der Gesamtfahrzeugeigenschaften in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Kai10] Kaindl, Sebastian: Untersuchung der Klimatisierungsfunktionen für E-Fahrzeuge. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2010.
- [Kau13] Kaufmann, Felix: Gewichtsmodellierung von Fahrwerks- und Exterieurbauteilen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Kle12] Kleimann, Markus; Schorn, Tomas: Konsequenter Leichtbau. In: ATZ Extra „Der neue Golf“, Automobiltechnische Zeitschrift, November 2012, Seite 38 - 48, 2012.
- [Koc14] Kochhan, Robert; Fuchs, Stephan; Reuter, Benjamin; Burda, Peter; Matz, Stephan; Lienkamp, Markus: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. In: Research Gate, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), 27.02.2014.
- [Kog12] Koglin, Klaus: Karosseriearchitekturen der AUDI AG. Vortrag im Rahmen der Vorlesung „Ausgewählte Kapitel der Fahrzeugentwicklung“, Technische Universität München, 23.04.2012.
- [Koh07] Kohoutek, Peter; Dietz, Jürgen; Burggraf, Barbara: Entwicklungsziele und Konzeptauslegung des neuen Audi A4. In: Automobiltechnische Zeitschrift, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, September 2007, S. 20 - 27, 2007.
- [Kon13] Konopka, Piotr: Gewichtsmodellierung des Antriebsstrangs für ein Verbrennerfahrzeug und Implementierung in einem Gewichtsmodell für Elektrofahrzeuge. Unveröffentlichte Studienarbeit/Final Year Project, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München bzw. Mechanical Engineering Department, University of Bath, 2013.
- [Kuc12] Kuchenbuch, Kai: Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge. Dissertation, TU Braunschweig, 2012.
- [Lan12] Lang, Rüdiger: Telefonisches Interview durch den Autor mit dem Thema „Gewicht von Airbags – Einflussgrößen auf das Gewicht von Front-, Seiten-, Curtain- und weiteren Airbags; Einflussgrößen auf das Gewicht der Airbag-Steuergeräte und Sensoren“. Garching bei München am 12.12.2012, 9.50 - 10.00 Uhr, 2012.
- [Läs12] Lässig, Ralph; Eisenhut, Martin; Mathias, Arne; et. al.: Series production of high-strength composites. Perspectives for the German engineering industry. Studie von Roland Berger Strategy Consultants, September 2012.

- [Lau13] Laubmann, Jonas: Parametrische Kostenmodellierung für die Produktion, den Betrieb und das Recycling von Fahrzeugen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Lie12] Lienkamp, Markus: Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus. Kapitel 6 – Reifen. Vorlesung des Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2012.
- [Lie13] Lienkamp, Markus: 100 Tipps den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zu schlagen. In: Research Gate, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), aufgerufen am 15.01.2014, veröffentlicht am 10.12.2013.
- [Lie14] Lienkamp, Markus: Persönliches Gespräch mit dem Autor zu zukünftigen Trends und Entwicklungen von Kraftfahrzeugen und jährlichen Verbesserungsraten. Garching, 29.01.2014.
- [Lin12] Lingenhöl, Simon: TCO-Betrachtung Elektromobilität. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2012.
- [Loh12] Lohr, Korbinian: Lifecycle-Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Elektrofahrzeugs Mute. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2012.
- [LVK11] Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, TU München: Unterlagen zum Praktikum „Schnellaufende Verbrennungsmotoren“. Unveröffentlicht. Technische Universität München, 2011.
- [Mai13] Maier, Philipp: Analyse und Optimierung des Modellfehlers für ein Fahrzeuggewichtsmodell. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Mal07] Malen, Donald E.; Reddy, Kundan: Preliminary Vehicle Mass Estimation Using Empirical Subsystem Influence Coefficients. University of Michigan, Ann Arbor, 2007.
- [Mat11] Matz, Stephan: Mute – an efficient, safe and economical electric vehicle through smart lightweight construction. In: FutureCarBody 2011, Bad Nauheim, 2011.
- [Mat13a] Matz, Stephan: Optimisation of vehicle concepts in a multimodal environment with regard to user benefit. In: Conference on Future Automotive Technology 2013, Focus Electromobility, March 18 - 19, Garching, 2013.
- [Mat13b] Matz, Stephan; Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus: Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung mit Hilfe eines vollparametrischen Gewichtsmodells. In: Wissenschaftssymposium Automobiltechnik, Aachen, 12. - 13.06.2013.
- [Mat14] Matz, Stephan; Fuchs, Johannes; Burda, Peter; Horlbeck, Lorenz; Eckl, Richard; Lienkamp, Markus: Beschreibung der Modellierungsart sowie der Modellierungsparameter von Elektrofahrzeugen in der Konzeptphase. Noch unveröffentlichte Ergebnisse, 2014.
- [Mau11] Mauler, Stefan: Auswirkung der Raddimensionierung auf die Fahrwerksauslegung, Gewicht und Verbrauch. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2011.
- [McK12] McKinsey & Company: Advanced Marketing and Sales for Advanced Industries. McKinsey & Company, Inc., 2012.

- [McK13] McKinsey & Company: Cleansheet Solution. Produktinformation, [http://www.cleansheetsolution.mckinsey.com/download/Cleansheet\\_Solution\\_TM\\_May\\_2013.pdf](http://www.cleansheetsolution.mckinsey.com/download/Cleansheet_Solution_TM_May_2013.pdf), aufgerufen am 06.11.2013, McKinsey & Company, Inc., 2013.
- [Mic05] Michelin Reifenwerke KGaA (Hrsg.): Der Reifen. Rollwiderstand und Kraftstoffersparnis. Société de Technologie Michelin, Clermont-Ferrand, Karlsruhe, 2005.
- [Min13a] Mini (BMW Group): Vorläufige Technische Daten Mini E. [http://www.minispace.com/de\\_de/projects/electric-mini-e/pdf/mini-e-de\\_de.pdf](http://www.minispace.com/de_de/projects/electric-mini-e/pdf/mini-e-de_de.pdf), aufgerufen am 23.10.2013.
- [Min13b] Mini (BMW Group): Homepage. [www.mini.de](http://www.mini.de), aufgerufen am 23.10.2013.
- [Min13c] Mini (BMW Group): Mini. Mini Cabrio. Mini Clubman. Produktkatalog, März 2013; München, BMW AG, 2013.
- [Mit12a] Mitsubishi Motors Deutschland GmbH: Mitsubishi i-MiEV, Produktbroschüre (Stand 04/2012) und Preisliste (Stand 05/2012) für das Modelljahr 2013, bestellt im November 2013, Rüsselsheim, 2012.
- [Mit12b] Mitsubishi Motors Deutschland GmbH: Homepage. <http://www.mitsubishi.de>, aufgerufen am 11.05.2012.
- [Mot10] Motor-Talk GmbH, Benutzer "Superdino": Getriebeübersetzung 1,2 TDI vs. 1,6 TDI. <http://www.motor-talk.de/forum/getriebeuebersetzung-1-2-tdi-vs-1-6-tdi-t2716756.html>, Eintrag vom 16.05.2010, aufgerufen am 08.10.2013.
- [Nam05] Nam, Edward K.; Giannelli, Robert: Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE). Draft. Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [Nau11] Naunheimer, Harald; Bertsche, Bernd; Ryborz, Joachim; Novak, Wolfgang: Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application. ISBN 9783642162138, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag, 2011.
- [Nis13] Nissan Center Europe GmbH: Homepage. <http://www.nissan.de/DE/de/vehicle/city-cars/new-note/gallery/photos.html>, aufgerufen am 01.10.2013.
- [Ove04] Overhoff, D.: Grundlagen Reifentechnik. Kapitel 3 – Anforderungen der Fahrzeughersteller an Reifen. Vorlesung des Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2004.
- [Par11] Parametric Technology Corporation (PTC): Windchill Cost. Datenblatt, [http://www.ptc.com/WCMS/files/125262/en/6276\\_Windchill\\_Cost\\_DS.pdf](http://www.ptc.com/WCMS/files/125262/en/6276_Windchill_Cost_DS.pdf), aufgerufen am 06.11.2013, Stand 2011.
- [Pes13] Pesce, Thomas: Ein Werkzeug zur Spezifikation von effizienten Antriebstopologien für Elektrofahrzeuge. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Veröffentlichung voraussichtlich 2014, eingereicht 2013.
- [Por98] Porsche Engineering Services: Ultra Light Steel Auto Body. Phase 2 Findings. Porsche Engineering Services, Ultra Light Steel Auto Body Consortium, 1998.

- [Rei02] Reithmaier, Walter; Salzinger, Thomas: Ermittlung des aktuellen Stands der Technik im Hinblick auf Abrollgeräusch, Rollwiderstand sowie Sicherheitseigenschaften moderner Pkw-Reifen. Forschungsbericht 201 54 112. TÜV Automotive GmbH, 2002.
- [Rei88] Reimpell, Jörn; Sponagel, Peter: Reifen und Räder. 2. Auflage, Würzburg: Vogel, 1988.
- [Rei93] Reichert, Konrad; Neubauer, Raimund E.; Reiche, Hans; Berg, Fritz W.: Elektrische Antriebe energie-optimal auslegen und betreiben. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, Schweiz, 1993.
- [Roh12] Rohde-Brandenburger, Klaus: Die Gewichtsspirale ist durchbrochen. Interview. In: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, S. 378 - 380, 114. Jahrgang, Ausgabe 05, 2012.
- [Roh13] Rohde-Brandenburger, Klaus: Was bringen 100 kg Gewichtsreduzierung im Verbrauch? Eine physikalische Berechnung. In: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 115. Jahrgang, Ausgabe 07-08, 2013.
- [Roh96] Rohde-Brandenburger, Klaus: Einfluss von Gesamtfahrzeug-Parametern auf Fahrverhalten/Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch. Haus der Technik, Essen, November 1996. (Quelle nicht zugänglich; daher Nutzung der Sekundärquellen [FAT11, S. 100 ff.] und [Roh13].)
- [Ren13] Renault Deutschland AG: Homepage. <http://www.renault.de>, aufgerufen am 01.10.2013.
- [Sai13] Saint Gobain: Glazing Manual. [http://www.sekurit.com/GE/downloads/glazing\\_manual.pdf](http://www.sekurit.com/GE/downloads/glazing_manual.pdf). Aufgerufen am 27.09.2013. Ohne Jahresangabe.
- [Scha13] Schaffer, Matthias: Parametrische CO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung für die Produktion und das Recycling von Elektrofahrzeugen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Schi13] Schickram, Stephan; Till, Zhi; Lienkamp, Markus: Auslegung von elektrischen Fahrzeugkonzepten für Megacities in Asien. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 115. Jahrgang, Ausgabe 2, S. 126 - 130, 2013.
- [Schi14] Schickram, Stephan: Schriftverkehr mit dem Autor zu Grundumsatz bei Elektrofahrzeugen. Garching, 08.01.2014.
- [Schl04] Schlößer, Friedhelm: Kostenanalyse als Methodik zur Optimierung von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004.
- [Scho13] Scholz, Markus: Parametrische Gewichtsmodellierung von Interieur- und Elektrik-/Elektronikbauteilen. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Schü13] Schütz, Thomas (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. 6. Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-8348-1919-2, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [Schw04] Schweimer, Georg; Levin, Marcel: Sachbilanz des Golf A4. Forschung Umwelt und Verkehr, Volkswagen AG, Wolfsburg und Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Gesamthochschule Kassel, 2004.

- [Sei13] Seiwert, Martin; Rother, Franz: Premium-Masche – Wie BMW und Co. Milliarden scheffeln. In: WirtschaftsWoche Online, <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/teure-sonderausstattungen-premium-masche-wie-bmw-und-co-milliarden-scheffeln/7587120.html>, aufgerufen am 28.11.2013, Artikel vom 07.01.2013. Zusätzlich in: Zeit Online, <http://www.zeit.de/auto/2013-01/premium-autohersteller>, aufgerufen am 28.11.2013, Artikel vom 09.01.2013.
- [SFE13] SFE Concept: Powerful Tools for Fast Parametric Design. Produktbroschüre, SFE GmbH, Berlin, 2013.
- [SGL12] SGL Carbon: SGL Group at a Glance. Unternehmenspräsentation, 2013.
- [Sta13] Stadler, Christoph: Einsatz von Modellen zur Gewichtsprädiktion und zur Bestimmung sekundärer Gewichtseffekte im Automobilbau. Unveröffentlichtes Forschungspraktikum, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Tes12] Tesla Motors: Homepage. <http://www.teslamotors.com>, aufgerufen am 11.05.2012.
- [Tho11] Thomas, Cody: Identification and Evaluation of Opportunities for Mass Reduction in a Lightweight Electric Car. Unveröffentlichte Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2011.
- [Tra11] Trautwein, Tobias; Henn, Stefan; Rother, Klemens: Gewichtsspirale. Stellhebel in der Fahrzeugauslegung. Automobiltechnische Zeitschrift, 113. Jahrgang, Nr. 5, S. 390 - 394, 2011.
- [Tra13] Transport and Environment (Hrsg.): Mind the Gap. Why official car fuel economy figures don't match up to reality. Transport and Environment, März 2013, Brüssel, Belgien, 2013.
- [Umb13] Umberto, ifu Hamburg GmbH: Homepage. [www.umberto.de](http://www.umberto.de), aufgerufen am 10.11.2013.
- [Umw13] Umweltbundesamt (Hrsg.): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012. ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, 2013.
- [Vat13] Vattenfall Europe Sales GmbH: Mini E Berlin powered by Vattenfall. [www.corporate.vattenfall.dedemini-e-berlin.htm](http://www.corporate.vattenfall.dedemini-e-berlin.htm), aufgerufen am 23.10.2013.
- [VDM13] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA): Kennzahlenkompass. Ausgabe 2013. Bestell-Nr.: vf 44013, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt, 2013.
- [VDI98] Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsmethodik. Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Tabellenwerk. VDI-Norm 2225, Blatt 2, Juli 1998.
- [Ven13] Vennebörger, Martin; Strübel, Christian; Wies, Burkhard; et al: Leichtlaufreifen für PKW mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 07-08/2013, 115. Jahrgang, 2013.
- [Vol03a] Volkswagen AG, Service Training: The 2.0 ltr. TDI engine. Design and function. Self-study programme 316. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2003.

- [Vol03b] Volkswagen AG, Service Training: The 2.0l FSI engine with 4-valve technology. Design and function. Self-study programme 322. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2003
- [Vol04] Volkswagen AG, Service Training: The 2.0l FSI engine with turbocharger. Design and function. Self-study programme 337. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2004.
- [Vol12a] Volkswagen AG: Der Golf. Das Auto. Workshop. Presse-Information, Volkswagen Produktkommunikation, Wolfsburg, 2012.
- [Vol12b] Volkswagen AG: Der Golf. Technik und Preise. Gültig für das Modelljahr 2013. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2012.
- [Vol12c] Volkswagen AG: Der Golf. Umweltprädikat – Hintergrundbericht. Volkswagen AG, Wolfsburg, November 2012.
- [Vol13a] Volkswagen AG: Der Golf Plus. Technik und Preise. Gültig für das Modelljahr 2014. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2013.
- [Vol13b] Volkswagen AG: Der Polo. Technik und Preise. Gültig für das Modelljahr 2014. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2013.
- [Vol13c] Volkswagen AG: Der Golf. Technik und Preise. Gültig für das Modelljahr 2014. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2013.
- [Vol13d] Volkswagen AG: Der Passat und Passat Variant. Technik und Preise. Gültig für das Modelljahr 2014. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2013.
- [Vol13e] Volkswagen AG: Der e-up! Umweltprädikat – Hintergrundbericht. Volkswagen AG, Wolfsburg, September 2013.
- [War12] Warsen, Jens; Krinke, Stephan: Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen. In: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, Ausgabe Juli/August 2012, 114. Jahrgang, S. 560 - 565, 2012.
- [War13] Warburton, Max; Quettawala, Abbas Ali; Zhu, Robin; Wen, Bo: Euro Autos: The 10 Most Loss Making Cars of Modern Times (Or What Happens When It All Goes Wrong). BernsteinResearch, 2013.
- [Wer13] Werner, Dominick: Aufbau einer auf Excel basierenden, vereinfachten Variante eines bestehenden Fahrzeuggewichtsmodells. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2013.
- [Wer14] Werner, Dominick: Anwendung von statistischer Versuchsplanung und multivariaten Regressionsmodellen zur Verkürzung von Rechenzeiten in der Fahrzeugkonzeptoptimierung (tbc). Unveröffentlichte Semesterarbeit, in Bearbeitung, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2014.
- [Wie09] Wiedemann, Jochen: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: ATZ 111 (2009), Nr. 6, S. 462 - 463.
- [Wie13] Wiedemann, Elias: Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen. Dissertation in Vorbereitung, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Veröffentlichung voraussichtlich 2014, eingereicht 2013.

- [Wik13] Wikipedia: Audi 80/A4. [http://de.wikipedia.org/wiki/Audi\\_A4](http://de.wikipedia.org/wiki/Audi_A4), aufgerufen am 07.11.2013.
- [Win06] Winner, Hermann: Kraftfahrzeugtechnik 1, Triebstrang. Vorlesungsunterlagen, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [Win99] Winterkorn, Martin; Bohne, Peter: Das Drei-Liter-Auto von Volkswagen – der Lupo 3L TDI. Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 101. Jahrgang, Ausgabe 06/1999, S. 390 - 401, 1999.
- [Woh09] Wohnig, Walter: Blechverarbeitung im Automobilbau. Vorlesung, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München, 2009.
- [Woo12] Woodall, Bernie; Lienert, Paul; Klayman, Ben: Insight: GM's Volt: The ugly math of low sales, high cost. Thomson Reuters, 10. September 2012.
- [Wor11] World Auto Steel: Future Steel Vehicle. Overview Report. World Auto Steel, 2011.
- [Wor12] World Auto Steel: Design Advisor – Press Release. November 2012, World Auto Steel, Brüssel, 2012.
- [Wor13] World Auto Steel: Ultralight Steel Auto Body (ULSAB). Cost Models in Microsoft Excel. Ohne Angabe von Versionsnummer oder -datum, <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/>, aufgerufen am 06.11.2013, World Auto Steel, 2013.
- [Yan10] Yanni, Tamer; Venhovens, Paul J. Th.: Impact and Sensitivity of Vehicle Design Parameters on Fuel Economy Estimates. SAE Paper 2010-01-0734, SAE International, 2010.

# Anhang

Anhang A: Abschätzung der Verbrauchsanteile im NEFZ .....	xxxii
Anhang B: Berücksichtigte Elektromotoren .....	xxxiii
Anhang C: Simulationsergebnisse Mitsubishi i-MiEV und Volkswagen Polo .....	xxxiv
Anhang D: Wertebereich für die Eingangsparameter .....	xxxvi
Anhang E: Berücksichtigte Materialien, Verarbeitungs- und Fügeverfahren sowie Parameter des CO <sub>2</sub> -Emissionsmodells .....	xxxvii
Anhang F: Berücksichtigte Materialien, Verarbeitungs- und Fügeverfahren sowie Parameter des TCO-Modells .....	xxxviii
Anhang G: Parameter des Basisfahrzeugs .....	xxxix
Anhang H: Berechnung der Komponentengruppen.....	xli

## Anhang A: Abschätzung der Verbrauchsanteile im NEFZ

[Roh13] stellt ein Verfahren zur physikalischen Berechnung des Energiebedarfs im NEFZ vor. Anhand der angegebenen Zusammenhänge und Formeln kann der Energiebedarf auf Basis der grundlegenden Fahrzeugparameter leicht ermittelt werden. Die Formeln gelten für ICEV.

Die Beschleunigungswiderstandsarbeit  $W_A$  wird aus der Fahrzeugmasse  $m$ , dem Drehmassenzuschlagsfaktor  $e_i$  und einer Konstanten für die Beschleunigungsarbeit im NEFZ berechnet, Formel (A.1).

$$W_A = 1.227 \frac{m^2}{s^2} m e_i \quad (\text{A.1})$$

Die effektive Rollwiderstandsarbeit  $W_{R,eff}$  berechnet sich aus der Rollwiderstandsarbeit  $W_R$  über den Faktor 0,85, weil in den Ausrollphasen des NEFZ keine Arbeit durch den Antriebsmotor verrichtet werden muss, Formel (A.2).  $g$  ist die Erdbeschleunigung,  $c_{RR}$  der Rollwiderstandsbeiwert, und der konstante Faktor 11.013 m entspricht der Länge des Zyklus.

$$W_{R,eff} = 0,85 \cdot 11.013 \frac{m}{1.000} g c_{RR} \quad (\text{A.2})$$

Die zur Überwindung des Luftwiderstands erforderliche Arbeit zeigt Formel (A.3). Die effektive Luftwiderstandsarbeit  $W_{L,eff}$  berechnet sich aus der Luftwiderstandsarbeit  $W_L$  über den Faktor 0,87;  $\rho$  ist die Dichte der Luft,  $c_W$  der Luftwiderstandsbeiwert und  $A$  die Stirnfläche des Fahrzeugs. Der konstante Faktor 3.989.639 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup> entspricht wiederum der Konstanten für die Luftwiderstandsarbeit im NEFZ.

$$W_{L,eff} = \frac{1}{2} \cdot 0,87 \cdot 3.989.639 \frac{m^3}{s^2} \rho c_W A \quad (\text{A.3})$$

Für die Abschätzung in Abbildung 1.2 werden zudem folgende Annahmen getroffen:

- Der Rollwiderstandsbeiwert  $c_{RR}$  hat sich historisch um ein Prozent pro Jahr verbessert. Dies entspricht ungefähr den abgelesenen Werten aus [Mic05, S. 14]. Für 2007 wird ein Wert von 0,0100 entsprechend dem Wert von [Roh13] angenommen. Daraus errechnet sich ein Rollwiderstandsbeiwert von 0,0134 für das Jahr 1978 und von 0,0114 für das Jahr 1994.
- Die Masse des Antriebsstrangs ist trotz gestiegener Fahrzeugmasse über die Jahre hinweg durch Leichtbaumaßnahmen und bessere Materialausnutzung konstant geblieben. Für 2007 wird ein Wert von 1,03 entsprechend dem Wert von [Roh13] angenommen. Ausgehend von diesem Wert wird der Drehmassenzuschlagsfaktor für die anderen Fahrzeuge entsprechend [Win06, S. 151] berechnet. Für das Jahr 1978 ergibt sich ein Drehmassenzuschlagsfaktor von 1,048 und für 1994 von 1,038. Der Wert des Massenzuschlagsfaktors wirkt sich nur geringfügig auf das Ergebnis der Analyse aus.

## Anhang B: Berücksichtigte Elektromotoren

Abbildung 4.16 umfasst folgende Elektromotoren aus [Jak13, S. xxiv]:

- ASM
  - Brusa ASM1-6.17.12
  - Brusa ASM1-8.24.10
  - Brusa ASM6.17.12
  - Brusa ASM8.24.10
  - Raser Technologies 100 kW
  - Vectopower VP-AC-170-250-4-18000
  - Vectopower VP-AC-240-127-8-12000
  - Vectopower VP-AC-240-260-8-6000
- PSM
  - Brusa HSM1-6.17.12-E01 64 kW
  - Brusa HSM1-10.18.13 81 kW
  - Brusa HSM1-10.18.13-Co1 84 kW
  - Brusa HSM1-10.18.13-Co-A01 81 kW
  - Evo Electric AFM-140
  - Evo Electric AFM-240
  - Mute-Motor
  - Remy HVH250-090-SOC3 Standard Winding
  - Remy HVH250-090-SOM
  - Remy HVH410-075-POC6
  - TM4 MO120
  - TM4 HSM120
  - UQM SPM195-114-3
  - UQM SPM218-143-3
  - UQM SR218N
  - Vectopower VP-FS-215-160-8-12000
  - Vectopower VP-FS-240-127-8-12000.

## Anhang C: Simulationsergebnisse Mitsubishi i-MiEV und Volkswagen Polo

Mitsubishi i-MiEV aus [Eck11b]				Mitsubishi i-MiEV simuliert mit Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell			
Baugruppe	Gewicht in kg	Komponentengruppe	Gewicht in kg	Baugruppe	Gewicht in kg	Komponentengruppe	Gewicht in kg
Karosserie	383			Struktur	343	Karosserie gesamt	
		Rohkarosserie	214,5	Struktur		Rahmen	154,8
		Türen / Klappen	61,3	Exterieur		Kotflügel	4,5
				Exterieur		Türen vorne	36,8
		Exterieur	23,0	Exterieur		Türen hinten	36,8
				Exterieur		Motorhaube	8,9
		Verglasung	30,6	Exterieur		Heckklappe	11,9
				Exterieur		Scheibenwischer	4,9
		Fahrzeugakustik	3,8	Exterieur		Stoßstange	7,9
		Strukturanteile	34,5	Exterieur		Spiegel	2,5
		Halbleche	15,3	Exterieur		Unterbodenverkleidung	0,0
				Exterieur		Windschutzscheibe	17,6
				Exterieur		Seitenscheiben vorne	6,4
				Exterieur		Seitenscheiben hinten	4,8
				Exterieur		Heckscheibe	4,4
				Struktur		Dämmung	0,0
				Interieur		Dämmung	7,4
				Struktur		Crashsystem	27,5
				Struktur		Sonstiges	5,5
Antrieb	322			Antrieb	342	Antriebsstrang gesamt	
		Antriebsenergiewandler	48,3	Antriebsstrang		Motor mit Gehäuse	32,8
		Kraftübertragung	35,4	Antriebsstrang		Getriebe ohne Öl	14,9
				Antriebsstrang		Ölhaushalt	0,5
		Energiespeicher	231,8	Antriebsstrang		Differenzial	8,8
		Kühlsystem	6,4	Antriebsstrang		Seitenwellen	18,8
				Antriebsstrang		Batterie	259,6
				Antriebsstrang		Kühlsystem	7,0
Fahrwerk	165			Fahrwerk	183	Fahrwerk gesamt	
		Vorderachse	41,3	Fahrwerk		Vorderachse	35,0
		Hinterachse	28,1	Fahrwerk		Stoßdämpfer	8,8
		Räder / Reifen	49,5	Fahrwerk		Hinterachse	22,1
		Bremssystem	34,7	Fahrwerk		Stoßdämpfer	8,8
		Lenksystem	11,6	Fahrwerk		Räder / Reifen	49,6
				Fahrwerk		Bremssystem	40,2
				Fahrwerk		Lenksystem	15,9
				Fahrwerk		ESP	2,4
Interieur	119			Interieur	125	Interieur gesamt	
		Sitze	58,3	Interieur		Sitze vorne	37,6
		Verkleidungen	29,8	Interieur		Sitze hinten	20,5
				Interieur		Innenverkleidung	17,1
		Package Türen / Klappen	17,9	Interieur		Teppich	0,0
		Bedienelemente	8,3	Interieur		MQT	7,0
		Sonstiges	4,8	Interieur		Armaturenbrett	3,7
				Interieur		Mittelkonsole	3,1
				Interieur		Klappen / Fächer	6,0
				Interieur		Infotainment	4,3
				Interieur		Instrumentation	2,5
				Interieur		Airbags Fahrer/Beifahrer	3,8
				Interieur		Airbags erweitert	3,6
				Interieur		Rückhaltesysteme	8,4
				Interieur		Sonstige Sicherheitssysteme	1,0
				Fahrwerk		Pedalerie	2,5
				Interieur		Sonstiges	0,7
				Sonstiges		Sonstiges	3,6
Elektronik	110			Elektronik	96	EE gesamt	
		HV	52,8	EE		HV	40,7
		NV	57,2	EE		NV - Pufferbatterie	12,1
				EE		NV - Verkabelung	13,5
				EE		Außenbeleuchtung	7,4
				EE		Innenbeleuchtung	0,4
				EE		NV - Sonstiges	3,0
				Interieur		Heizung	9,7
				Interieur		Klima	8,8
<b>Leergewicht</b>	<b>1099</b>			<b>Leergewicht</b>	<b>1089</b>		

Abbildung A.1: Simulationsergebnisse des Mitsubishi i-MiEV im Vergleich mit [Eck11b]

Polo V aus [Eck11b]				Polo V simuliert mit Gesamtfahrzeug-Gewichtmodell			
Baugruppe	Gewicht in kg	Komponentengruppe	Gewicht in kg	Baugruppe	Gewicht in kg	Komponentengruppe	Gewicht in kg
Karosserie	417			Karosserie	448		
		Rohkarosserie	246,0	Struktur		Rahmen	257,0
		Türen / Klappen	66,7	Exterieur		Kotflügel	10,1
				Exterieur		Türen vorne	50,6
				Exterieur		Türen hinten	0,0
		Exterieur	20,9	Exterieur		Motorhaube	13,2
				Exterieur		Heckklappe	14,4
				Exterieur		Scheibenwischer	4,9
				Exterieur		Stoßstange	14,7
				Exterieur		Spiegel	2,5
		Verglasung	29,2	Exterieur		Unterbodenverkleidung	0,0
				Exterieur		Windschutzscheibe	14,5
				Exterieur		Seitenscheiben vorne	5,9
				Exterieur		Seitenscheiben hinten	4,4
		Fahrzeugakustik	16,7	Exterieur		Heckscheibe	6,1
				Struktur		Dämmung	0,0
				Interieur		Dämmung	12,7
		Strukturbauteile	29,2	Struktur		Crashsystem	31,9
		Haltebleche	8,3	Struktur		Sonstiges	5,5
Antrieb	321			Antrieb	279		
		Antriebsenergiewandler	138,03	Antriebsstrang		Antriebsstrang gesamt (Verbrenner)	
				Antriebsstrang		Motor	114,3
				Antriebsstrang		Motoröl	3,9
		Kraftübertragung	67,4	Antriebsstrang		Kupplung	17,4
				Antriebsstrang		Getriebe ohne Öl	41,7
				Antriebsstrang		Getriebeöl	1,7
				Antriebsstrang		Achsgetriebe/Wellen	12,5
		Energiespeicher	70,6	Antriebsstrang		Kraftstofftank	7,2
				Antriebsstrang		Kraftstoffanlage	4,4
				Antriebsstrang		Kraftstoff	32,3
		Abgassysteme	19,3	Antriebsstrang		Abgassystem	22,5
		Kühlsystem	19,3	Antriebsstrang		Kühlsystem	8,8
				Antriebsstrang		Kühlflüssigkeit	5,9
		Luftansaugsystem	6,4	Antriebsstrang		Belüftung	6,5
				Antriebsstrang		Elektrik (in EE enthalten)	0,0
Fahrwerk	218			Fahrwerk	205		
		Vorderachse	45,8	Fahrwerk		Fahrwerk gesamt	
				Fahrwerk		Vorderachse	36,5
		Hinterachse	28,3	Fahrwerk		Stoßdämpfer	9,7
				Fahrwerk		Hinterachse	27,3
		Räder / Reifen	85,0	Fahrwerk		Stoßdämpfer	9,7
		Bremssystem	39,24	Fahrwerk		Räder / Reifen	60,7
		Lenksystem	19,6	Fahrwerk		Bremssystem	41,3
				Fahrwerk		Lenksystem	17,5
				Fahrwerk		ESP	2,5
Interieur	132			Interieur	133		
		Sitze	67,3	Interieur		Interieur gesamt	
				Interieur		Sitze vorne	38,1
		Verkleidungen	31,7	Interieur		Sitze hinten	22,6
				Interieur		Innenverkleidung	22,7
				Interieur		Teppich	0,0
				Interieur		MQT	7,0
				Interieur		Armaturenbrett	6,8
		Package Türen / Klappen	19,8	Interieur		Mittelkonsole	2,7
		Bedienelemente	6,6	Interieur		Klappen / Fächer	4,4
				Interieur		Infotainment	3,6
				Interieur		Instrumentation	2,5
		Sonstiges	6,6	Interieur		Airbags Fahrer/Beifahrer	3,8
				Interieur		Airbags erweitert	3,6
				Interieur		Rückhaltesysteme	7,2
				Interieur		Sonstige Sicherheitssysteme	1,0
				Fahrwerk		Pedalerie	2,5
				Interieur		Sonstiges	0,7
				Sonstiges		Sonstiges	3,6
Elektronik	56			Elektronik	52		
		NV	56	EE		Elektrik gesamt	
				EE		NV - Pufferbatterie	16,2
				EE		NV - Verkabelung	13,7
				EE		Außenbeleuchtung	8,7
				EE		Innenbeleuchtung	0,4
				EE		NV - Sonstiges	2,9
				Interieur		Heizung	9,7
<b>Leergewicht</b>	<b>1144</b>			<b>Leergewicht</b>	<b>1117</b>		

Abbildung A.2: Simulationsergebnisse des Volkswagen Polo V im Vergleich mit [Eck11b]

## Anhang D: Wertebereich für die Eingangsparameter

Eingangsparameter	Einheit	Werte	
		Kleinste	Größte
Radstand	in mm	2.100	2.968
Überhang vorne	in mm	585	974
Überhang hinten	in mm	460	1.153
Höhe	in mm	1.310	1.640
Breite	in mm	1.550	1.874
Spur	in mm	1.385	1.627
Anzahl Türen	-	2	4
Windschutzscheibenwinkel	in Grad	25	42
Heckscheibenwinkel	in Grad	13	64
Seitenscheibenwinkel	in Grad	15	29
Felgendurchmesser	in Zoll	14	18
Reifenbreite	in mm	115	240
Querschnittsverhältnis	-	40	70
Sitzreihen	-	1	2

Abbildung A.3: Wertebereich der Eingangsparameter für das Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell auf Basis der beschreibenden Variablen der Benchmarkwerte

## Anhang E: Berücksichtigte Materialien, Verarbeitungs- und Fügeverfahren sowie Parameter des CO<sub>2</sub>-Emissionsmodells

Die nachfolgende Abbildung zeigt die wesentlichen zugrunde gelegten Parameter und berücksichtigten Emissionsfaktoren des CO<sub>2</sub>-Emissionsmodells.

Typ	Parameter	Beschreibung	Typ	Parameter	Beschreibung
Material	Stahl	Stahlcoil	Verarbeitung	Stahl	Stanzen Stahlcoil
Material	Stahl	Stahl niedriglegiert	Verarbeitung	Stahl	Tiefziehen Stahlcoil
Material	Stahl	Grauguss	Verarbeitung	Stahl	Erwärmen Stahl
Material	Stahl	Chromstahl	Verarbeitung	Stahl	Warmfließpressen Stahl
Material	Aluminium	Primäraluminium (100%)	Verarbeitung	Stahl	Kaltfließpressen Stahl
Material	Aluminium	Sekundäraluminium (100%)	Verarbeitung	Stahl	Spanende Verarbeitung Stahl
Material	Aluminium	70% Primär-/ 30% Sekundäraluminium	Verarbeitung	Stahl	Fließpressen
Material	Aluminium	20% Primär-/ 80% Sekundäraluminium	Verarbeitung	Stahl	Stanzen (gesamt)
Material	CFK	CFK-SMC	Verarbeitung	Stahl	Tiefziehen (Prozess)
Material	CFK	CFK-RTM	Verarbeitung	Aluminium	Tiefziehen Aluminium (50/50)
Material	CFK	GFK-SMC	Verarbeitung	Aluminium	Tiefziehen Aluminium (20/80)
Material	Kunststoffe	PC	Verarbeitung	Aluminium	Tiefziehen Aluminium (Primär)
Material	Kunststoffe	PC-GF20	Verarbeitung	Aluminium	Tiefziehen Aluminium (Sekundär)
Material	Kunststoffe	PU	Verarbeitung	Aluminium	Tiefziehen (nur Prozess)
Material	Kunststoffe	PA	Verarbeitung	Aluminium	Druckguss Aluminium
Material	Kunststoffe	ABS	Verarbeitung	Aluminium	Strangpressen Aluminium
Material	Kunststoffe	ABS-PC	Verarbeitung	Aluminium	Kaltfließpressen Aluminium
Material	Kunststoffe	PMMA	Verarbeitung	Aluminium	Spanende Verarbeitung Aluminium
Material	Kunststoffe	PVC	Verarbeitung	Kunststoffe	Spritzguss
Material	Kunststoffe	PET	Fügen	Stahl	Punktschweißen Stahl
Material	Kunststoffe	PET-GF30	Fügen	Stahl	MAG Stahl
Material	Kunststoffe	PET-GF20	Fügen	Stahl	MIG Stahl
Material	Kunststoffe	PE	Fügen	Aluminium	MIG Aluminium
Material	Kunststoffe	PP	Fügen	Allgemein	Kleben
Material	Kunststoffe	PP-TD10	Fügen	Allgemein	Schrauben
Material	Kunststoffe	PP-TD20	Verwertung	Stahl	Recycling Stahl
Material	Kunststoffe	PP-GF20	Verwertung	Stahl	Recycling Schrauben
Material	Kunststoffe	PP-GF30	Verwertung	Aluminium	Recycling Primäraluminium neu
Material	Kunststoffe	PP-GF50	Verwertung	Aluminium	Recycling Sekundäraluminium neu
Material	Kunststoffe	POM	Verwertung	Aluminium	Recycling Aluminium (50/50) neu
Material	Kunststoffe	ASA; SMA	Verwertung	Aluminium	Recycling Aluminium (20/80) neu
Material	Kunststoffe	PES	Verwertung	Aluminium	Recycling Aluminium (50/50) alt
Material	Kunststoffe	Elastomer	Verwertung	Aluminium	Recycling Aluminium (20/80) alt
Material	Kunststoffe	Glasfaser	Verwertung	Aluminium	Recycling Primäraluminium alt
Material	Kunststoffe	Talkum	Verwertung	Aluminium	Recycling Sekundäraluminium alt
Material	Batterien/Akkus	Li-Io-Akku (Li-Mn)	Verwertung	CFK	Recycling Pyrolyse CFK-SMC
Material	Batterien/Akkus	Li-Io-Akku (Li-FP)	Verwertung	CFK	Recycling Pyrolyse CFK-RTM
Material	Batterien/Akkus	Li-Io-Akku (Li-MO)	Verwertung	CFK	Deponie CFK
Material	Batterien/Akkus	Li-Io-Akku (Durchschnitt)	Verwertung	CFK	Verbrennung CFK-SMC
Material	Batterien/Akkus	Li-Io-Akku (Ifeu)	Verwertung	CFK	Verbrennung CFK-RTM
Material	Batterien/Akkus	Zink	Verwertung	CFK	Recycling GFK-SMC
Material	Batterien/Akkus	Zink-Luft-Batterie	Verwertung	Kunststoffe	Recycling Kunststoffe
Material	Elektrik und Elektronik	E-Motor	Verwertung	Batterien/Akkus	Entsorgung Lithium-Ionen-Akku
Material	Elektrik und Elektronik	Spannungswandler	Verwertung	Elektrik und Elektronik	Recycling Elektronik
Material	Elektrik und Elektronik	Elektronikgeräte	Verwertung	Elektrik und Elektronik	Recycling Kabel
Material	Elektrik und Elektronik	Kleine Elektronikgeräte	Verwertung	Elektrik und Elektronik	Recycling Kupfer
Material	Elektrik und Elektronik	Lüfter	Verwertung	Sonstige	Recycling Glas
Material	Elektrik und Elektronik	Kabel	Betrieb	Energiebereitstellung	Prognostizierter Strom (separates Modell)
Material	Elektrik und Elektronik	Netzwerkkabel	Betrieb	Energiebereitstellung	Ökostrom
Material	Elektrik und Elektronik	1kV- Stromkabel	Betrieb	Betriebsstoffe	Heizung Strom
Material	Sonstige	Glas	Betrieb	Betriebsstoffe	Heizung Ethanol
Material	Sonstige	Leder	Betrieb	Ersatzteile	Li-Io-Akku (Ifeu)
Material	Sonstige	Stoff	Betrieb	Ersatzteile	Ersatzreifen
Material	Sonstige	Teppich	Betrieb	Kraftstoffe	Benzin (5 vol.% Ethanol)
Material	Sonstige	Dämmung	Betrieb	Kraftstoffe	Diesel
Material	Sonstige	Lack			
Material	Sonstige	Schmieröl			
Material	Sonstige	Kühlwasser			
Material	Sonstige	Kältemittel R134a			
Material	Sonstige	Verzinkung			

Abbildung A.4: Wesentliche Parameter des CO<sub>2</sub>-Emissionsmodells

## Anhang F: Berücksichtigte Materialien, Verarbeitungs- und Fügeverfahren sowie Parameter des TCO-Modells

Die nachfolgende Abbildung zeigt die wesentlichen zugrunde gelegten Parameter und berücksichtigten Kostenfaktoren des Kostenmodells.

Typ	Parameter	Beschreibung
Materialkosten	Stahl	Komplexphasenstahl insb. für Crashstruktur
Materialkosten	Stahl	Diverse Dualphasenstähle
Materialkosten	Stahl	High Formability Stahl
Materialkosten	Stahl	Martensitphasenstahl
Materialkosten	Stahl	Bake-Hardening
Materialkosten	Stahl	Höherfeste Streck-Ziehstähle
Materialkosten	Stahl	Höherfeste IF-Stähle
Materialkosten	Stahl	Rundstahl
Materialkosten	Stahl	Gussstahl
Materialkosten	Stahl	Schmiedestahl
Materialkosten	Aluminium	Aluminium allgemein
Materialkosten	Aluminium	Schmiedealuminium
Materialkosten	Aluminium	Druckgussaluminium
Materialkosten	Kunststoff	ABS
Materialkosten	Kunststoff	ASA/SMA
Materialkosten	Kunststoff	Elastomere
Materialkosten	Kunststoff	PA
Materialkosten	Kunststoff	PBT/PET
Materialkosten	Kunststoff	PC
Materialkosten	Kunststoff	PE
Materialkosten	Kunststoff	PMMA
Materialkosten	Kunststoff	POM
Materialkosten	Kunststoff	PP
Materialkosten	Kunststoff	PU
Materialkosten	Kunststoff	PVC
Materialkosten	Kunststoff	Sonstige
Materialkosten	Glas	Glas
Scraperstattung	Rückerstattung	Diverse Materialien
Komponentenkosten	Motor	Elektromotor
Komponentenkosten	Motor	Verbrennungsmotor
Komponentenkosten	Leistungselektronik	Leistungselektronik
Komponentenkosten	Batterie	Batterie
Komponentenkosten	Pufferbatterie	Pufferbatterie
Komponentenkosten	Ladegerät	Ladegerät
Komponentenkosten	Verkabelung	Verkabelung
Komponentenkosten	Infotainment/Instrumentation	Infotainment/Instrumentation
Komponentenkosten	Sonstige	Sonstige
Komponentenkosten	Lenksystem	Lenksystem
Komponentenkosten	ESP	ESP
Komponentenkosten	Airbag	Standard
Komponentenkosten	Airbag	Erweitert
Komponentenkosten	Gurtsystem	vorne
Komponentenkosten	Gurtsystem	hinten
Komponentenkosten	Sitze	Front mech.
Komponentenkosten	Sitze	Front elektr.
Komponentenkosten	Sitze	Fond
Komponentenkosten	Sitze	Sitzheizung
Komponentenkosten	Spiegel	Spiegel
Komponentenkosten	Scheibenwischer	Scheibenwischer
Komponentenkosten	Pedalerie	Pedalerie
Komponentenkosten	Stoßdämpfer	Stoßdämpfer
Komponentenkosten	Bremssystem	Bremssystem
Komponentenkosten	Beleuchtung	vorne
Komponentenkosten	Beleuchtung	hinten
Komponentenkosten	Abgassystem	Katalysator
Komponentenkosten	Abgassystem	DPF
Komponentenkosten	Komponenten	Diverse weitere Komponenten- und Materialkosten aus [Koc14]

Abbildung A.5: Wesentliche Parameter des Kostenmodells

## Anhang G: Parameter des Basisfahrzeugs

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die wesentlichen Parameter des Basisfahrzeugs für die Simulationen in Kapitel 7 sowie die Simulationseinstellungen der Längsdynamiksimulation.

Grundparameter	in	Werte		
		BEV und ICEV	Nur BEV	Nur ICEV
Karosserieform		Steilheck		
Radstand	mm	2550		
Breite	mm	1700		
Höhe	mm	1460		
Überhang vorne	mm	850		
Überhang hinten	mm	630		
Spurweite vorne	mm	1520		
Spurweite hinten	mm	1520		
Anzahl der Türen		4		
max. Zuladung	kg	500		
Windschutzscheibenwinkel	°	30		
Seitenscheibenwinkel	°	22		
Heckscheibenwinkel	°	60		
Art der Hinterachse		Verbundlenker		
Art der Vorderachse		McPherson		
Fahrschemel Vorderachse		Nein		
Felgendurchmesser vorne	Zoll	15		
Reifenbreite vorne	mm	175		
Reifenhöhe / Breite vorne	%	70		
Felgendurchmesser hinten	Zoll	15		
Reifenbreite hinten	mm	175		
Reifenhöhe / Breite hinten	%	70		
Reifentyp			Widerstandsopt.	Standard

BEV-Antriebsstrang	in	Werte		
		BEV und ICEV	Nur BEV	Nur ICEV
Übersetzung			9,4	
Wirkungsgrad rot. Teile und Getriebe	%		95	
Motortyp			PSM	
maximale Drehzahl	1/min		12000	
maximale Reкуп-Verzögerung	m/s <sup>2</sup>		2	
Batterieberechnung über			Systemenergiesied.	
Energiedichte System	Wh/kg		156	

ICEV-Antriebsstrang Diesel (Otto)	in	Werte		
		BEV und ICEV	Nur BEV	Nur ICEV
Kraftstoffart				Diesel (Otto)
Zylinderanzahl				4 in Reihe
Antriebsart				FWD
Getriebeart				Handschalter
Turbolader				ja
Wirkungsgrad rot. Teile und Getriebe	[%]			93
Start-Stopp-Automatik				ja
Übersetzung 1. Gang				3,78 (3,77)
Übersetzung 2. Gang				2,12 (1,96)
Übersetzung 3. Gang				1,27 (1,281)
Übersetzung 4. Gang				0,86 (0,89)
Übersetzung 5. Gang				0,66 (0,67)
Übersetzung 6. Gang				im Zyklus n. verw.
Übersetzung Differenzial				3,16 (4,06)

Abbildung A.6: Parameter des Basisfahrzeugs (Teil 1/2)

<b>Materialien</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
Karosserie: Stahl-Anteil	%			100
→ davon hochfester Stahl	%			50
Karosserie: Alu-Anteil	%		100	
Karosserie: CFK-Anteil	%	0		
Türen		Stahl		
Motorhaube		Stahl		
Heckklappe		Stahl		
Kotflügel		Stahl		
MQT		Stahl		
Felge		Stahl		
Crashsystem		Stahl		
Fenster		Glas		

<b>Interieur-Ausstattung</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
LCD Screen		nein		
Klimaanlage		ja (ausgeschaltet)		
Mobilitäts-Kit		Pannenset		
Scheinwerferreinigungsanlage		nein		
Nebelscheinwerfer		nein		
Türfächer (Anzahl)		2		
Kofferraumfach		nein		
Mittelablage		nein		
Subwoofer		nein		
Seitenairbag		ja		
Kopfairbag		ja		
aktive Motorhaube		nein		
Gurtstraffer		ja		
Komfortfaktor		3		
Wertigkeitsfaktor		3		

<b>Anforderungen</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
Reichweite	km		150	1000
Beschleunigungspotenzial	s		15	10
Fahrzyklus		NEFZ		

<b>Einstellungen Emissionen</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
Laufleistung	km	150.000		
Haltezeit	Jahre	12		
Verhältnis Primär- zu Sekundäraluminium	-	70/30		
Recycling CFK	-	Verbrennung		

<b>Einstellungen Kosten</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
Laufleistung	km	150.000		
Haltezeit	Jahre	12		
Entwicklungskosten	MEUR	500		
Montagezeit	h		25	40
Kostenszenario (Abbildung 6.7)	-	mittelfristig		

<b>Simulationseinstellungen</b>	in	<b>Werte</b>		
		<b>BEV und ICEV</b>	<b>Nur BEV</b>	<b>Nur ICEV</b>
Nutzbare Batteriekapazität	%		85	
Wirkungsgrad Leistungselektronik	%		89	
Wirkungsgrad Rekuperation	%		60	
Überlast-Faktor Elektromotor			2	
Einsatz Start-Stopp ab	s			8
Tankfüllung für Beschleunigungsrechnung	%			10

Abbildung A.7: Parameter des Basisfahrzeugs (Teil 2/2)

## **Anhang H: Berechnung der Komponentengruppen**

Dieser Anhang kann am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik eingesehen werden.

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15  
85748 Garching

Kontakt zum Sekretariat:  
+49 89 289 15345  
[ftm@ftm.mw.tum.de](mailto:ftm@ftm.mw.tum.de)