

# **Lösungsraumanalyse für Plug-In-Hybridfahrzeuge hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

**Michael Ried**

aus

Schongau

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm  
Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Dudenhöffer

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Februar 2014



---

## Kurzzusammenfassung

---

Ein verändertes Umfeld für individuelle Mobilität lässt neben Elektrofahrzeugen auch Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEVs) in den Fokus der Öffentlichkeit rücken. Für die Entwicklung solcher Fahrzeugkonzepte existiert ein technischer Lösungsraum, der sich in Maßkonzept, Topologie, Komponententyp und -auslegung gliedert. In einem strukturierten Vorgehen wird der große technische Lösungsraum mit geeigneten Prämissen eingegrenzt. Der Lösungsraum aus Energieinhalt des elektrochemischen Hochvolt-Speichers (HV-Speicher) und Leistung der elektrischen Maschine wird hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept analysiert.

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse von PHEVs aus Käufersicht werden die Mehrkosten in der Anschaffung den reduzierten Verbrauchskosten bei der Nutzung eines PHEVs im Vergleich zu einem rein verbrennungsmotorischen Fahrzeug gegenübergestellt. Die Reduzierung der Verbrauchskosten resultiert aus der Kraftstoffverbrauchseinsparung eines PHEVs, ermittelt mit dem neuen europäischen Fahrzyklus und mit monatelang aufgezeichneten Realfahrten verschiedener Fahrer. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass ein PHEV für Käufer ein attraktives Angebot darstellt, vor allem zukünftig sowie abhängig vom Fahr- und Nutzungsprofil. Außerdem wird der optimale Auslegungsbereich des elektrischen Systems eines PHEVs identifiziert. Für das Optimum darf der Energieinhalt des HV-Speichers nicht zu klein gewählt werden aufgrund eines hohen Grundbetrags an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, der im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben wird. HV-Speicher mit eher höherem Energieinhalt sind auch außerhalb des Optimums wegen der stärker steigenden Mehrkosten im Vergleich zum geringer zunehmenden Verbrauchsvorteil.

Der Schwerpunkt der Bauraumkonzeptanalysen liegt auf der geometrischen Integration des HV-Speichers in das Gesamtfahrzeug. Dies stellt eine große Herausforderung dar aufgrund der geringen Energiedichte des HV-Speichers im Vergleich zu Benzin. Die Bauraumanalyse identifiziert bevorzugte Integrationsmöglichkeiten bei PHEVs im Tunnel- und Tankbereich sowie deren Kombination. Der in diesen Bauräumen mögliche Energieinhalt wird durch die HV-Speicheranalyse festgelegt. Der ermittelte optimale Auslegungsbereich im Lösungsraum des elektrischen Systems hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht wird unter geometrischen Randbedingungen aus der Bauraumkonzeptanalyse weiter eingegrenzt.

Der Kern des ganzheitlichen Ansatzes sind entwickelte parametrische Modelle für die Anwendung in der frühen Entwicklungsphase auf Komponenten- und Gesamtfahrzeugebene in MATLAB, MS Excel und CATIA V5. Neben den Ergebnissen für das Jahr 2011/12 zeigen Prognosen die Entwicklungen bis in die Jahre 2020 und 2025. Sensitivitätsanalysen zeigen die Auswirkungen von Variation der Parameter und Prämissen. Der interdisziplinäre Ansatz mit der erstmaligen Kombination von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept eines PHEVs zur optimalen Auslegung des elektrischen Systems stellt den wissenschaftlichen Beitrag dar.



---

## Abstract

---

Plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) are shifted into the focus of the general public alongside battery electric vehicles because of the changing environment for individual mobility. There is a wide technical solution scope for the vehicle concept characteristics that consists of main vehicle dimensions, drive train and energy storage architectures, component technology as well as dimensioning. In a systematic design approach, the technical solution scope for PHEVs is defined based on suitable assumptions and is then analysed for the energy capacity in the high-voltage accumulator (HV-accumulator) and the peak power output of the electrical motor.

The analysis of the economic efficiency of PHEVs for customers contrasts the additional acquisition costs with the reduced costs for consumption of a PHEV in relation to a comparable internal combustion engine vehicle. The savings of the costs for consumption results from reduced fuel consumption. The basis of the analysis is the New European Driving Cycle and real-life driving profiles, measured over several months. The analysis of the economic efficiency shows that a PHEV is an attractive offer for customers, dependent on the driving and usage behaviour. Furthermore, an optimal dimensioning of the electrical system is identified for the HV-accumulator. A too small HV-accumulator is not beneficial due to a high basic amount of additional manufacturing costs for the car manufacturer, which is passed as additional acquisition costs to the customer. The same holds true for a HV-accumulator that is too large due to the relatively slow rise in benefits of fuel consumption compared with the increase in acquisition costs.

In the geometrical analysis the installation of the HV-accumulator in the total vehicle is the major challenge because of the small energy density compared to fuel. The analysis of the constructed spaces in a vehicle identifies PHEVs preferred installation spaces for the HV-accumulator in the tunnel and tank area as well as the combination of both. The following analysis of the HV-accumulator estimates the possible energy content in the specific installation space. The identified optimal configuration range of the electrical system regarding economic efficiency of PHEVs for customers is additionally limited due to geometrical boundary conditions as a result of the geometrical analysis.

The basis of the holistic approach are developed parametric models for the analysis in the early stage of vehicle development on component and total vehicle level in MATLAB, MS Excel and CATIA V5. Additionally to the results for 2011/12, forecasts for 2020 and 2025 are presented. Effects of varying assumptions and the characteristics of the electrical system are investigated via sensitivity analysis. The interdisciplinary approach combining costs, consumption and geometrical design for the first time and therefore determining an optimal dimensioning of the electrical system in PHEVs represents the scientific contribution.



---

## Danksagung

---

Auf meinem Weg während der Promotion in Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen und der BMW AG wurde ich von einer Vielzahl von Menschen begleitet und unterstützt. Jeder Einzelne hat einen großen Anteil am Erfolg dieser Arbeit. Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um mich an dieser Stelle sehr herzlich zu bedanken.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Prof. Dieter Schramm für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung und für das Vertrauen sowie die Freiheit bei der Ausgestaltung der Forschungsschwerpunkte. Er fand stets Zeit für Gespräche mit wertvollen Anregungen für meine Arbeit. Neben dem fachlichen schätzte ich den privaten Austausch sehr. Außerdem danke ich meinem Zweitgutachter Prof. Ferdinand Dudenhöffer, der mir durch seine Sicht auf die Dinge, vor allem bei betriebswirtschaftlichen Themen, wertvolle Tipps geben konnte.

Mein Dank gilt seitens der BMW AG dem Projekt „Gesamtfahrzeugentwicklung alternativer Antriebe“ für die Möglichkeit meine eigene Forschungsidee als Doktorand dort umzusetzen. Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Dr. Helmut Berger und Dr. Merten Jung für das Vertrauen und ihre Unterstützung in fachlichen und persönlichen Fragestellungen. Außerdem danke ich allen Kollegen aus dem Team für die gemeinsamen Diskussionen und das freundschaftliche Verhältnis, das wesentlich zu einem guten und produktiven Arbeitsklima beitrug, allen voran Sönke Richter, Erwin Weigl, Andreas Rucker, Andreas Egger, Philipp Wilde, Dirk Weiler, Markus Lehmann und Werner Foag. Des Weiteren danke ich den Kollegen aus anderen Bereichen für die gute Zusammenarbeit, allen voran Dr. Tobias Karspeck, Philipp Reupold und Stephan Seisenberger. Außerdem danke ich dem Doktorandenkreis der BMW AG für die fachlichen und privaten Veranstaltungen sowie den daraus entstandenen Freundschaften. Die Doktorandenzeit behalte ich in bester Erinnerung.

Zusätzlich bedanke ich mich bei allen Studenten, die im Rahmen von Praktika und Abschlussarbeiten zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen haben: Tobias Buxhoidt, Niko Fontein, Thomas Scott Bryant, Albert Kelnberger und Lukas Wittchen.

Ich danke auch den Kollegen vom Lehrstuhl für Mechatronik für die Zusammenarbeit und die vielen Gespräche mit Anregungen für meine Arbeit, beispielsweise beim Doktorandenseminar bis tief in die Nacht, allen voran Dr. Benjamin Hesse und Martin Koppers.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich nachwievor großartig unterstützt und mir stets einen sicheren Halt gibt. Besonders großen Anteil an meinem Werdegang und am Erfolg der Arbeit haben meinen Eltern Angelika und Xaver Ried, meine Großeltern, meine Brüder Thomas und Matthias sowie meine Freundin Nicole. Euch widme ich meine Arbeit!

Fuchstal-Asch, im Februar 2014

Michael Ried





Meiner Familie gewidmet



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Motivation und Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Randbedingungen	1
1.2	Ziele der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Entwicklung und des Lösungsraums von PHEVs</b>	<b>5</b>
2.1	Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge	5
2.1.1	Definition von elektrifizierten Fahrzeugen	5
2.1.2	Conversion und Purpose Design	7
2.1.3	Entwicklungsphasen	8
2.2	Definition des Lösungsraums	9
2.3	Maßkonzept – Hauptabmessungen im Fahrzeug	10
2.4	Topologie – Komponentenanzordnung im Fahrzeug	12
2.5	Komponenten – Typen und Auslegung	15
2.5.1	Grundlagen des verbrennungsmotorischen und elektrischen Systems	15
2.5.2	Elektrochemischer Hochvolt-Speicher	17
2.5.3	Elektrische Maschine	23
2.5.4	Leistungselektronik	25
2.5.5	Weitere Komponenten des Elektrifizierungsumfangs	27
2.6	Methodik der Lösungsraumanalyse	29
2.7	PHEV-Konfiguration als Prämisse für die Analysen	29
<b>3</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsanalysen von PHEVs aus Käufersicht</b>	<b>33</b>
3.1	Stand der Forschung	34
3.2	Kostenmodell und -analyse	35
3.2.1	Definition und Charakterisierung der Kosten	36
3.2.2	Methoden zur Kalkulation der Herstellkosten	37

3.2.3	Kostenmodell des HV-Speichers	40
3.2.4	Kostenmodell der E-Maschine	43
3.2.5	Kostenmodell der Leistungselektronik	47
3.2.6	Kostenmodell der weiteren Komponenten	48
3.2.7	Mehrkosten eines PHEVs aus Käufersicht	51
3.3	Verbrauchsmodell und -analyse	56
3.3.1	Definition und Charakterisierung des Verbrauchs	56
3.3.2	Modell zur Verbrauchsbestimmung	59
3.3.3	Mehrstufige Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfs	61
3.3.4	Modellierung der Betriebsstrategie	69
3.3.5	Verbrauch im Fahrzyklus	70
3.3.6	Sensitivitätsanalysen durch Parametervariation im Fahrzyklus	74
3.3.7	Auswahl der Fahr- und Nutzungsprofile im Realbetrieb	76
3.3.8	Verbrauch und Verbrauchskosten im Realbetrieb	78
3.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse hinsichtlich Kosten und Verbrauch von PHEVs	89
3.4.1	Definition des wirtschaftlich optimalen Auslegungsbereichs	89
3.4.2	Lösungsraumanalyse hinsichtlich des Quotienten aus Kosten und Verbrauch	90
3.4.3	Lösungsraumanalyse hinsichtlich der Amortisationsdauer	95
3.5	Zusammenfassung und Fazit der Wirtschaftlichkeitsanalyse	101
<b>4</b>	<b>Bauraumkonzeptanalysen für HV-Speicher in PHEVs</b>	<b>103</b>
4.1	Stand der Forschung	104
4.2	HV-Speichertopologien	104
4.3	Bauraumanalyse mittels Maßketten	106
4.3.1	Grundlagen parametrischer Geometriemodelle	106
4.3.2	Funktionsweise des Bauraummodells	106
4.3.3	Parameter des Bauraummodells	109
4.3.4	Maßketten im Bauraummodell	112
4.3.5	Validierung des Bauraummodells	116
4.4	HV-Speicheranalyse mittels Kennzahlen	117
4.4.1	Funktionsweise des HV-Speichermodells	117
4.4.2	Validierung des HV-Speichermodells	118

4.5	Kombination der Wirtschaftlichkeits- und Bauraumkonzeptanalysen	120
4.5.1	Definition des geometrisch möglichen Auslegungsbereichs	120
4.5.2	Lösungsraumanalyse hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept	122
4.6	Zusammenfassung der Bauraumkonzeptanalysen	126
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
5.1	Zusammenfassung und Fazit	129
5.2	Wissenschaftlicher Beitrag	132
5.3	Ausblick	133



---

## Abkürzungsverzeichnis

---

AC	=	Alternating Current (Wechselstrom)
ASM	=	Asynchronmaschine
BEV	=	Battery Electric Vehicle
BMS	=	Batteriemanagementsystem
BMW	=	Bayerische Motoren Werke
CAD	=	Computer Aided Design
CD	=	Charge-Depleting
CO <sub>2</sub>	=	Kohlenstoffdioxid
CS	=	Charge-Sustaining
CSC	=	Cell-Supervision-Circuits
CVT	=	Continuously variable transmission
DC	=	Direct Current (Gleichstrom)
DKG	=	Doppelkupplungsgetriebe
DoD	=	Depth of discharge
ECE	=	Economic Commission for Europe
EM	=	Elektrische Maschine (E-Maschine)
EuroFOT	=	European Field Operational Test
FCEV	=	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
HEV	=	Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug)
HK	=	Herstellkosten
HSM	=	Hybrid-erregte Synchronmaschine
HV	=	Hochvolt
HVS	=	Hochvolt-Speicher (HV-Speicher)
ICEV	=	Internal Combustion Engine Vehicle (Verbrennerfahrzeug)
IGBT	=	Insulated Gate Bipolar Transistors
LE	=	Leistungselektronik

## Abkürzungsverzeichnis

---

NEFZ	=	Neuer europäischer Fahrzyklus
PHEV	=	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (Plug-In-Hybridfahrzeug)
PSM	=	Permanent-erregte Synchronmaschine
SoC	=	State of Charge
SOP	=	Start of Production
SSM	=	Stromerregte Synchronmaschine
TCO	=	Total Cost of Ownership



---

# 1 Motivation und Einleitung

---

Ein verändertes Umfeld für individuelle Mobilität lässt neben Elektrofahrzeugen auch Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEVs) in den Fokus der Öffentlichkeit rücken. Aufgrund des großen technischen Lösungsraums ist die Entwicklung einer Vielzahl von Fahrzeugkonzepten mit spezifischen Vor- und Nachteilen möglich. Daraus lassen sich die Fragestellung und die Ziele der hier präsentierten Arbeit ableiten. Der interdisziplinäre Ansatz mit der erstmaligen Kombination von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept eines PHEVs zur optimalen Auslegung des elektrischen Systems stellt den wissenschaftlichen Beitrag dar.

## 1.1 Motivation und Randbedingungen

In den letzten Jahren ist das Interesse an nachhaltiger Mobilität deutlich gestiegen. Die Debatte über den Klimawandel, der zunehmende Erfolg alternativer Antriebe und volatile Kraftstoffpreise sind Gründe dafür. Zusätzlich verstärken ein neues Verantwortungsbewusstsein gegenüber der Umwelt und der Gesellschaft als Teil des modernen Lebensstils sowie die fortschreitende Urbanisierung den Trend in Richtung nachhaltiger Mobilität. Weitere Argumente für dieses veränderte Mobilitätsbewusstsein sind Einfahrtsbeschränkungen in Städten, Flottenregulierungen und CO<sub>2</sub>-Steuern. Darüber hinaus sind für Automobilhersteller ein möglicher Wertewandel der Kunden sowie marktspezifische Anforderungen an die Fahrzeuge zusätzliche Treiber. Die veränderten Randbedingungen für individuelle Mobilität mit dem Fokus auf Nachhaltigkeit steigern das Interesse an Fahrzeugen mit optimierten Verbrennungsmotoren sowie an elektrifizierten Fahrzeugen. (Ried, et al., 2013a)

Neben reinen Elektrofahrzeugen zählen dazu PHEVs, bei denen ein verbrennungsmotorisches und elektrisches Antriebs- und Speichersystem kombiniert wird. Es können damit größere Strecken als mit Hybridfahrzeugen rein elektrisch zurückgelegt werden, da die Möglichkeit existiert die Batterie extern über das Stromnetz aufzuladen. Für die Entwicklung solcher Fahrzeuge existiert ein großer technischer Lösungsraum, der eine Vielzahl elektrifizierter Fahrzeugkonzepte mit verschiedenen Ausprägungen geometrischer und funktionaler Eigenschaften ermöglicht. (Ried, et al., 2013b) Die Motivation und der Hauptvorteil elektrifizierter Fahrzeuge sind die Kraftstoffverbrauchsreduzierung und die damit einhergehende Abwendung von fossilen Energieträgern. Demgegenüber stehen die wesentlichen Nachteile von elektrifizierten Fahrzeugen im Vergleich zu rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen, die sich hauptsächlich auf die erforderliche Batterie beziehen: erhebliche Kosten, großer Bauraumbedarf und hohes Gewicht. Zusätzlich wird die Reichweite von Elektrofahrzeugen häufig als Problem genannt.

Dies trifft jedoch nicht auf PHEVs zu, da dort bei leerer Batterie mit dem verbrennungsmotorischen System weiter gefahren werden kann. Aus dieser Problembeschreibung lässt sich folgende Fragestellung ableiten: Welche Dimensionierung des elektrischen Systems eines PHEVs ist aus Käufersicht optimal, unter Berücksichtigung der damit einhergehenden Nachteile? Das Beispiel des HV-Speichers zeigt, dass mit zunehmender Dimensionierung trotz Mehrgewicht der Kraftstoffverbrauch deutlich sinkt, jedoch die Kosten steigen und trotz des erhöhten Bauraumbedarfs muss eine Integration ins Fahrzeug möglich sein. (Matsumoto, et al., 2012) (Ried, et al., 2013a) (Tschöke, 2012)

### 1.2 Ziele der Arbeit

Die Strukturierung und Beschreibung des technischen Lösungsraums für PHEVs ist das erste Ziel der vorliegenden Arbeit. Die folgenden Ziele beschäftigen sich mit der Analyse des Lösungsraums in der frühen Phase der Entwicklung, welcher durch geeignete Prämissen eingegrenzt wird. Das zweite Ziel ist die Kostenanalyse eines PHEVs aus Käufersicht. Dazu sind Modelle zu entwickeln, die die aktuellen Mehrkosten beim Kauf eines PHEVs gegenüber einem rein verbrennungsmotorischen Fahrzeug ermitteln, sowie Prognosen der zukünftigen Kostenentwicklung enthalten. Die Verbrauchsanalyse eines PHEVs aus Käufersicht ist das dritte Ziel. Auch hier ist eine Modellbildung erforderlich für die Analyse basierend auf gesetzlichen Fahryklen und Realfahrten, um Kraftstoff- und Stromverbrauch sowie aktuelle und prognostizierte Verbrauchskosten zu ermitteln. Das vierte Ziel ist die Verrechnung der Ergebnisse in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse von PHEVs aus Käufersicht, um die optimale Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs zu identifizieren. Der hinsichtlich Wirtschaftlichkeit analysierte Lösungsraum eines PHEVs wird anschließend unter geometrischen Randbedingungen untersucht und eingegrenzt, was das fünfte und letzte Ziel der hier vorliegenden Arbeit darstellt. Der Fokus hierbei liegt auf der Integration des HV-Speichers in ein Fahrzeug nach dem sogenannten Conversion Design. Dazu sind parametrische Geometriemodelle zu entwickeln. Neben den aktuellen Ergebnissen sind Prognosen unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts darzustellen. Der Anspruch an alle Modelle ist die Eignung für die frühe Phase der Entwicklung und die Möglichkeit von Sensitivitätsanalysen durch Variation der Parameter.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die fünf Hauptkapitel, wie in Abbildung 1.1 dargestellt. In Kapitel 1 wird die Motivation beschrieben und die daraus resultierenden Fragestellungen und Ziele der Forschungsarbeit abgeleitet. Kapitel 2 dient zur Erläuterung der Grundlagen bezüglich der Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge und des Lösungsraums von PHEVs. Es werden mögliche elektrifizierte Fahrzeuge beschrieben und der Fokus auf PHEVs festgelegt. Die Beschreibung des Lösungsraums erfolgt über Maßkonzept, Topologie, Komponententypen und -auslegung. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Wirtschaftlichkeitsanalyse eines PHEVs aus Käufersicht im gesetzlichen Fahrzyklus und im Realbetrieb, einem der beiden Schwerpunkte der hier präsentierten Arbeit. Die Wirtschaftlichkeit wird über Kosten und Verbrauch eines PHEVs aus Käufersicht definiert und es werden Modelle vorgestellt, um beides zu ermitteln. Anschließend wird der

Lösungsraum dahingehend analysiert. Den zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit stellt die Bauraumkonzeptanalyse in Kapitel 4 dar, aufgeteilt in eine Bauraum- und HV-Speicheranalyse. Der Fokus liegt auf der geometrischen Integration des HV-Speichers in das Fahrzeug, da dieser für die geometrische Konzeptgestaltung eine große Herausforderung darstellt. Durch die Ergebnisse der Analyse des Bauraums und des HV-Speichers wird der technische Lösungsraum für PHEVs eingegrenzt. Jedes der beiden Hauptkapitel schließt am Ende mit einem Fazit und einer Zusammenfassung. Das Ende der Arbeit in Kapitel 5 bilden eine gesamthafte Zusammenfassung, ein Fazit und ein Ausblick.

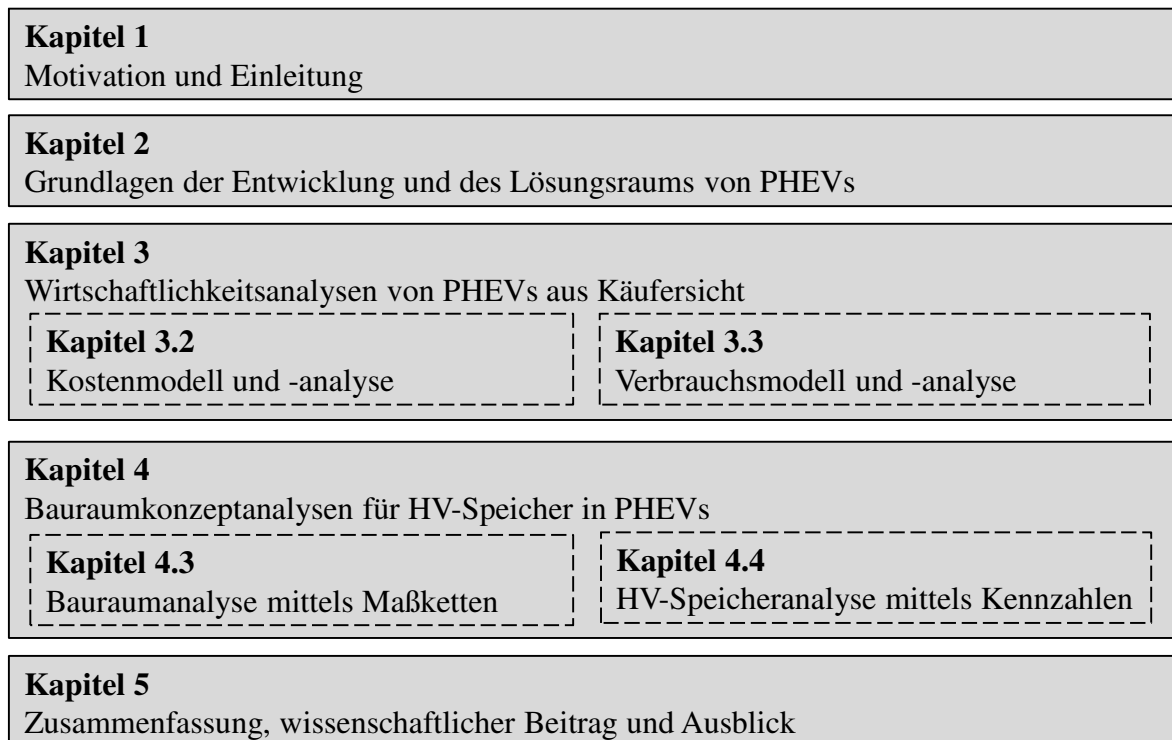


Abbildung 1.1: Aufbau der vorliegenden Arbeit mit den fünf Hauptkapiteln und Details zu den beiden Schwerpunkten in Kapitel 3 und 4



---

## **2 Grundlagen der Entwicklung und des Lösungsraums von PHEVs**

---

PHEVs gehören zu den elektrifizierten Fahrzeugen. Für deren Entwicklung sind verschiedene Ansätze möglich. Generell wird in der frühen Phase der Entwicklung vom Groben ins Detail fortschreitend gearbeitet. Für die Entwicklung von PHEVs existiert ein großer technischer Lösungsraum, der zuerst aufgespannt und anschließend eingegrenzt wird. Dieser gliedert sich in vier Cluster: Maßkonzept und Topologie auf Gesamtfahrzeugebene, sowie Komponententyp und -auslegung auf Komponentenebene. Innerhalb dieser Cluster werden die Ausprägungen wesentlicher Parameter in der frühen Phase der Entwicklung definiert. Das Ziel der Konzeptgestaltung ist die Entwicklung stimmiger Gesamtfahrzeugkonzepte, die die Anforderungen bestmöglich erfüllen. Um dieses Ziel zu erreichen wird der Lösungsraum systematisch analysiert und eingegrenzt.

### **2.1 Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge**

Im letzten Jahrhundert und auch nach wie vor ist ein Großteil der Fahrzeuge mit einem verbrennungsmotorischen Antrieb ausgestattet. Es werden jedoch vermehrt Fahrzeuge mit hybridisierten und rein elektrischen Antriebssträngen angeboten. In Deutschland haben im Jahr 2010 nur knapp 1 % der Fahrzeuge die Möglichkeit rein elektrisch zu fahren (Diez & Kohler, 2010). Das verbrennungsmotorische ist im Gegensatz zum elektrischen Antriebs- und Speichersystem im Automobilbau sehr gut bekannt und die Hersteller können bei der Optimierung auf jahrzehntelange Erfahrung zurückgreifen. Bei der Weiterentwicklung von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist meist der Nachfolger eine Ableitung des Vorgängers. Im Gegensatz dazu existieren für die Entwicklung von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben Ansätze von Conversion bis Purpose Design, mit teilweise komplett neuen Konstruktionen und Designs.

#### **2.1.1 Definition von elektrifizierten Fahrzeugen**

Es existierten Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts verschiedene Antriebskonzepte. Dazu zählten hauptsächlich Konzepte mit Dampf, Strom und Kraftstoff, wobei sich Benzin und Diesel als Energieträger durchsetzte. Verschiedene Hersteller entwickelten im Laufe des Jahrhunderts immer wieder elektrifizierte Fahrzeuge und versuchten diese erfolgreich am Markt zu platzieren, jedoch größtenteils ohne Erfolg. Erst Ende des 20. Jahrhunderts gelang Toyota mit dem Prius die Einführung eines Hybridfahrzeugs in Großserie. Seit dieser Zeit sind verstärkt Entwicklungstendenzen in

Richtung elektrifizierter Antriebsstränge erkennbar, wobei der verbrennungsmotorische Antrieb nach wie vor dominiert. (Gorbea Diaz, 2011) Laut den Prognosen des CAR-Center Automotive Research der Universität Duisburg-Essen sind bis zum Jahr 2025 weltweit 65 % aller verkauften Neufahrzeuge mit einem elektrifizierten Antrieb ausgestattet, darunter verschiedene Varianten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen (Dudenhöffer, 2010).

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEVs) werden intensiv weiterentwickelt, vor allem im Bereich der Emissionierung und Effizienzsteigerung. Daneben existieren unterschiedliche elektrifizierte Fahrzeuge: Hybridfahrzeuge (HEVs) sind gekennzeichnet durch jeweils mindestens zwei verschiedene Energiewandler und -speicher in einem Fahrzeug. Klassischerweise ist dies die Kombination aus einer elektrischen Maschine mit elektrochemischem Energiespeicher (Batterie) und einem Verbrennungsmotor mit Tank. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen (PHEVs) existiert die Möglichkeit die Batterie über ein externes Stromnetz, bevorzugt mit regenerativen Energiequellen, aufzuladen. Innerhalb der elektrischen Reichweite kann der Fahrer ohne Verbrauch von Kraftstoff und somit lokal ohne Emissionen fahren. Neben dem geringen Kraftstoffverbrauch ist die verbesserte Fahrleistung ein weiterer Vorteil von PHEVs, dank der Dynamik des elektrischen Systems. Darüber hinaus zählen zu den elektrifizierten Fahrzeugen auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEVs) und Elektrofahrzeuge (BEVs), die ausschließlich mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet sind. (Wallentowitz, et al., 2010)

Die Antriebskonzepte in Tabelle 2.1 sind nach steigendem Elektrifizierungsgrad dargestellt, vom ICEV bis zum BEV. Ab einem Full-Hybrid-Fahrzeug ist elektrisches und somit lokal emissionsfreies Fahren möglich. Der CO<sub>2</sub>-Vorteil wird gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug mit Verbrennungsmotor im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ausgewiesen. Mit der heute verfügbaren Speichertechnologie in BEVs sind lediglich begrenzte Reichweiten zu erzielen. In Fahrzeugen mit einem sogenannten „Range Extender“ ist eine größere Reichweite möglich, da ein Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie integriert ist (Tschöke, 2012). In der hier vorgestellten Arbeit liegt der Fokus auf PHEVs, da diese eine hohe Einsparung des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen und gleichzeitig wenig Einschränkungen im Alltagsbetrieb mit sich bringen, etwa hinsichtlich der Gesamtreichweite.

Tabelle 2.1: Antriebskonzepte nach steigendem Elektrifizierungsgrad vom ICEV bis zum BEV sowie beispielhafte Funktionen und Eigenschaften

	ICEV		HEV		PHEV	REX	BEV
	konv. Fahrzeug	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Plug-In-Hybrid	Range Extender	Elektrofahrzeug
<b>E-Maschinen-Leistung</b>	-	< 5 kW	< 20 kW	< 50 kW	< 100 kW	>100 kW	> 100 kW
<b>Emissions-freies-Fahren</b>	-	-	-	< 5km	< 50km	> 50km	> 100km
<b>CO<sub>2</sub>-Vorteil (NEFZ)</b>	Referenz	2 %	4 %	5 – 15 %	40 – 80 %	80-100 %	100 %
<b>Nutzung Netzstrom</b>	-	-	-	-	ja	ja	ja
<b>Gesamtreichweite &gt; 600km</b>	ja	ja	ja	ja	ja	konzept-abhängig	-

### 2.1.2 Conversion und Purpose Design

Für die Konzeptgestaltung elektrifizierter Fahrzeuge existieren zwei verschiedene Entwicklungsansätze. Im Conversion Design wird ein ursprünglich mit verbrennungsmotorischem Antrieb entwickeltes Fahrzeug in eines mit elektrifiziertem Antrieb umgebaut. Für Automobilhersteller ist diese Umwandlung eines bestehenden Fahrzeugs eine vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit eine Variante mit elektrifiziertem Antriebsstrang zu erproben und anzubieten. Es bestehen Synergien bei Entwicklung, Absicherung und Fertigung. Die Karosseriestruktur und die wesentlichen Abmessungen des Fahrzeugs bleiben erhalten, obwohl das Fahrzeug ursprünglich für einen anderen Antriebsstrang konzipiert wurde. Bei der Integration zusätzlicher Komponenten werden Bauräume teilweise nur mit einem begrenzten Nutzungsgrad belegt, da das Bauraumkonzept nicht optimal dafür ausgelegt wurde. Nichtsdestotrotz ist eine Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge nach dem Conversion Design bei Automobilherstellern weit verbreitet. Aufgrund der genannten Skalen- und Synergieeffekten ist dies für Automobilhersteller ein lukrativer Entwicklungsansatz und steht im Fokus der hier präsentierten Arbeit. (Wallentowitz, et al., 2010)

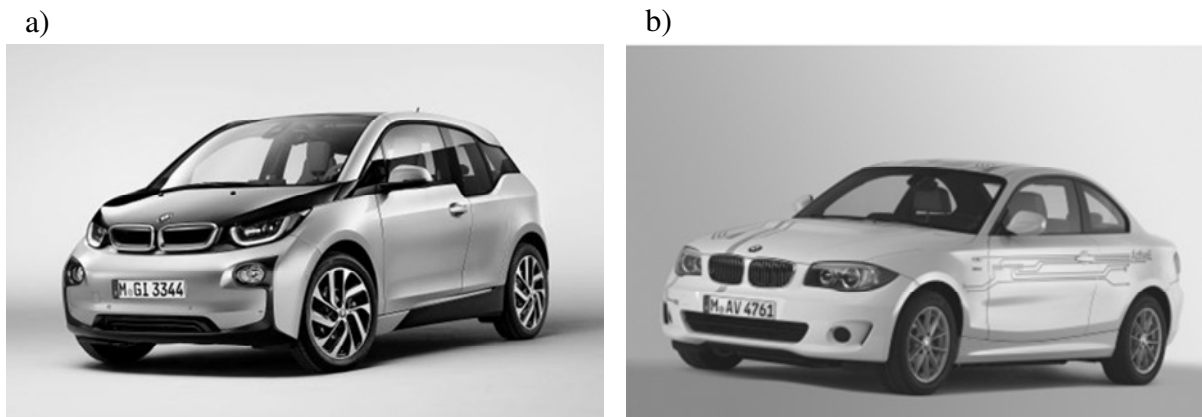


Abbildung 2.1: Beispiele für zwei unterschiedliche Entwicklungsansätze eines Elektrofahrzeugs: a) Purpose Design beim BMW i3, b) Conversion Design beim BMW ActiveE; Bildquellen: (www.press.bmwgroup.com, 2013b) (Jung & Hofer, 2011)

In einer Entwicklung nach dem Purpose Design ist es die Absicht ein Fahrzeug von Grund auf mit einem elektrifizierten Antrieb zu bauen. Die Entwicklung eines solchen Fahrzeugs erfordert hohen Aufwand und das finanzielle Risiko bei nicht optimaler Platzierung am Markt ist erheblich. Da der elektrifizierte Antrieb von vornherein gesetzt ist, zeichnen sich diese Fahrzeugkonzepte durch eine sehr gute Integration der Elektrifizierungskomponenten aus. Speziell der für die Batterie vorgesehene Bauraum in einem Fahrzeugkonzept wird optimal auf Speicherzellen und deren -module abgestimmt, woraus sich ein hoher Nutzungsgrad der Bauräume ergibt. (Wallentowitz, et al., 2010)

### 2.1.3 Entwicklungsphasen

Der Produktentstehungsprozess in der Fahrzeugentwicklung lässt sich in mehrere aufeinander folgende Phasen einteilen. Am Anfang befindet sich die Definitionsphase in der strategische Entscheidungen getroffen und Ziele festgelegt werden. Es wird das Fahrzeug in den Märkten und im Produktportfolio des Herstellers positioniert. In der darauf folgenden Konzeptphase werden die Ziele weiterentwickelt und konkrete Anforderungen an das Fahrzeug sowie dessen Systeme und Komponenten abgeleitet. Außerdem werden Lösungen für Fahrzeugkonzepte entwickelt, die den Anforderungen bestmöglich entsprechen. Darauf folgt die Entwicklungsphase, in der eines der Fahrzeugkonzepte aus der Konzeptphase konkretisiert und für die Serienproduktion entwickelt wird. Das Ziel ist ein marktfähiges Produkt zu entwickeln, welches am Ende dieser Phase mit dem Start of Production (SOP) an die Produktionsphase übergeben wird. (Gusig, 2010)



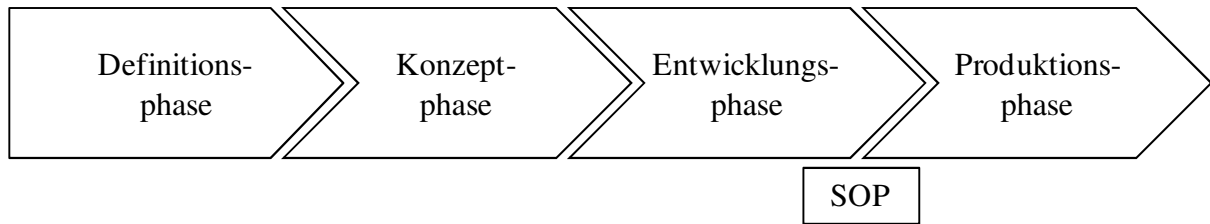


Abbildung 2.2: Aufeinander folgende Phasen des Produktentstehungsprozesses, in Anlehnung an: (Gusig, 2010)

In den aufeinanderfolgenden Phasen steigt der Konkretisierungs- und Detaillierungsgrad analog dem Vorgehensprinzip im Systems Engineering „vom Groben ins Detail“. Zuerst werden generelle Ziele für das Gesamtsystem definiert und der Lösungsraum aufgespannt. Anschließend folgt ein schrittweises Einengen des Betrachtungsfeldes. (Daenzer, 1989) Nach dem gleichen Prinzip richtet sich die vorliegende Arbeit. Der Fokus liegt auf der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses, im Bereich der Definitions- und Konzeptphase. Vorausgesetzt wird die strategische Entscheidung eines Automobilherstellers einen PHEV zu entwickeln. Darüber hinaus ist eine erfolgreiche Platzierung am Markt mit maximalem Nutzen für den Kunden bzw. Käufer gefordert. Das Ziel dieser Phase ist ein Fahrzeugkonzept aus dem Lösungsraum zu gestalten, welches hinsichtlich funktionaler, geometrischer und betriebswirtschaftlicher Kriterien am besten den Anforderungen entspricht. Dieses Fahrzeugkonzept wird in den darauf folgenden Phasen des Produktentstehungsprozesses detailliert.

## 2.2 Definition des Lösungsraums

Die zwei unterschiedlichen Antriebs- und Speichersysteme in einem PHEV führen in der Fahrzeugentwicklung zu einem großen technischen Lösungsraum. Es sind neue Lösungen auf Gesamtfahrzeugebene erforderlich, um die zusätzlichen Komponenten miteinander zu kombinieren und ins Fahrzeug zu integrieren. Außerdem existieren auf Komponentenebene neue Herausforderungen, um das verbrennungsmotorische und elektrische System aufeinander abzustimmen.

Abbildung 2.3 zeigt vier Cluster in die sich der technische Lösungsraum gliedert. Darin enthalten sind wesentliche Parameter, deren Ausprägungen in der frühen Phase der Konzeptentwicklung festgelegt werden. Durch die Vorgabe von Baukästen und Architekturen werden einige Parameter fixiert. Die Topologie beschreibt die Position der wesentlichen Antriebs- und Speicherkomponenten im Fahrzeug. Das Maßkonzept beinhaltet die Hauptabmessungen des Interieurs und Exterieurs. Auf Komponentenebene wird der Komponententyp gewählt, wie beispielsweise Synchron- oder Asynchronmaschine und die Komponente grob ausgelegt, wie z. B. die Leistung der E-Maschine.

Der große technische Lösungsraum ermöglicht die Gestaltung einer Vielzahl von PHEVs im Spannungsfeld zwischen verschiedenen Fahrzeugeigenschaften. Ausgehend von Zielen und Anforderungen werden die gewünschten Eigenschaften untereinander gewichtet, um so die

Bandbreite möglicher Fahrzeugkonzepte zielgerichtet einzugrenzen. Ziel der Konzeptgestaltung ist es, stimmige Gesamtfahrzeugkonzepte aus dem technischen Lösungsraum zu entwickeln, welche die jeweiligen Anforderungen an die Fahrzeugeigenschaften bestmöglich erfüllen. Beispielsweise stellt die Dimensionierung des HV-Speichers eine große Herausforderung dar: Ein großer HV-Speicher wirkt sich positiv auf die elektrische Reichweite aus, jedoch verschlechtert das hohe Gewicht die Dynamik und der große Bauraumbedarf hat Konsequenzen für die ergonomische Raumökonomie. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Cluster exakt definiert und die enthaltenen Gestaltungsparameter für die frühe Entwicklungsphase vorgestellt.

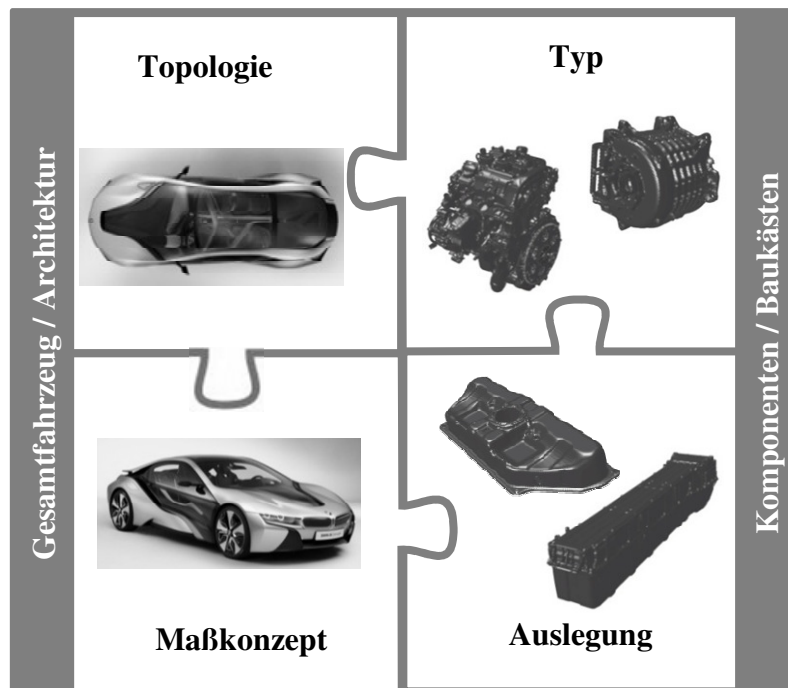


Abbildung 2.3: Strukturierung des technischen Lösungsraums für PHEVs in die vier Cluster Topologie, Maßkonzept, Komponententyp und –auslegung (Ried, et al., 2012a)

### 2.3 Maßkonzept – Hauptabmessungen im Fahrzeug

Der Begriff „Maßkonzept“ definiert wesentliche Ausprägungen eines Fahrzeugs (Roschinski, et al., 2008). Die Parameter des Maßkonzepts beschreiben ein Fahrzeug mit genormten Längen (L), Breiten (W), Höhen (H) und Winkel (A) basierend auf (DIN 70020-1, 1993), (SAE J1100, 2009) und (Astier, 2011). Das Maßkonzept bildet die Grundlage für das parametrische Geometriemodell zur Analyse des HV-Speicherbauraums in Abschnitt 4.3. Abbildung 2.4 zeigt die Hauptabmessungen eines Fahrzeugs des Exterieurs und Interieurs nach (Braess & Seiffert, 2011) und (Grabner & Nothaft, 2006).

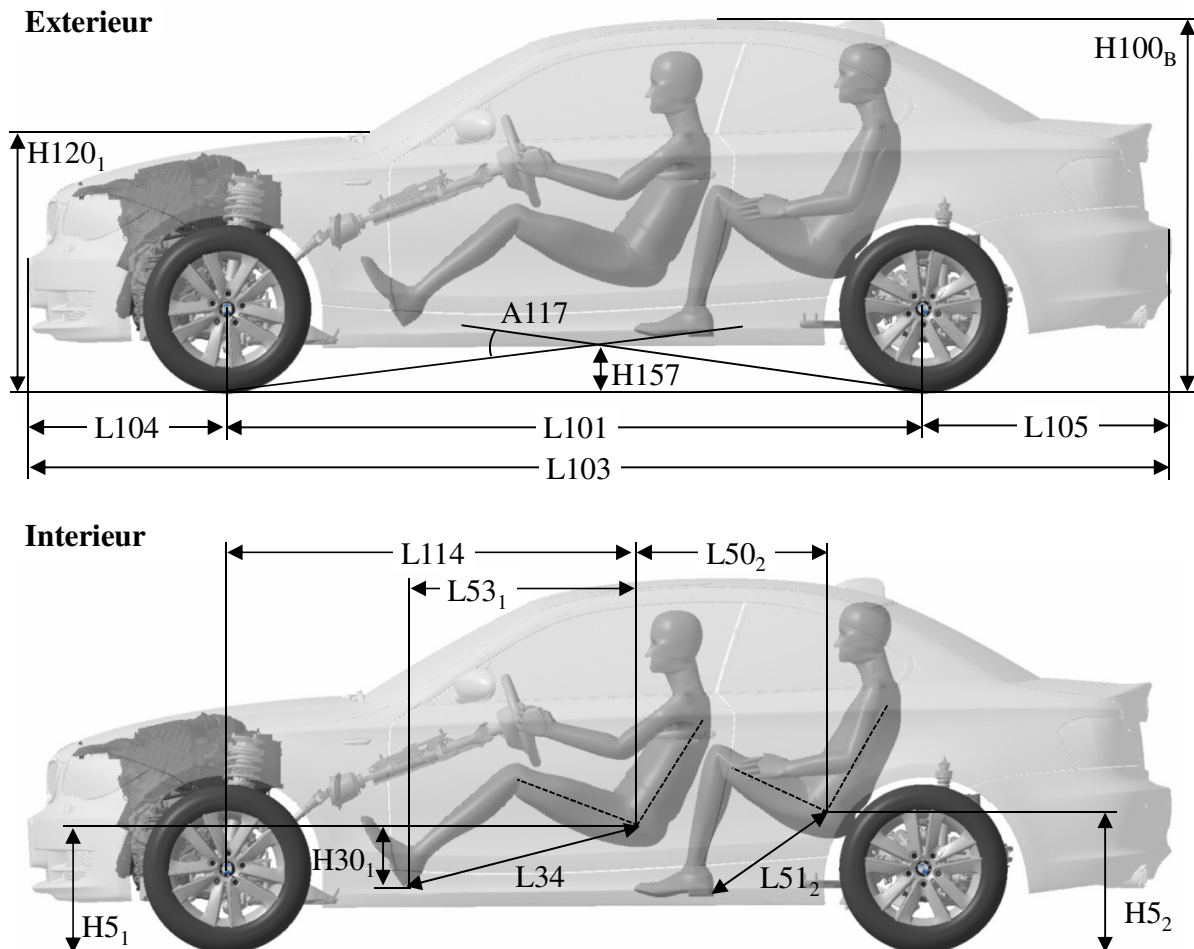


Abbildung 2.4: Hauptabmessungen des Exterieurs und Interieurs aus dem Maßkonzept

Ausgehend von den wesentlichen Abmessungen des Exterieurs erfolgt in der Automobilindustrie eine Einteilung in Fahrzeugklassen. Neue Fahrzeugkonzepte in identifizierten Nischen und die Modellvielfalt der Hersteller erschweren eine exakte Einteilung. Tabelle 2.2 zeigt eine mögliche Einteilung nach Fahrzeugklassen mit Beispielfahrzeugen. Die angegebenen Mittelwerte wesentlicher Abmessungen des Exterieurs und Interieurs sind mögliche Ausprägung der Parameter des Maßkonzepts. Eine häufig verwendete Bezugsgröße ist der Sitzreferenzpunkt des Manikins, der mit SRP abgekürzt wird. (Braess & Seiffert, 2011) (Grabner & Nothaft, 2006)

Tabelle 2.2: Fahrzeugklasseneinteilung mit Beispielfahrzeugen und Mittelwerte der Hauptabmessungen des Exterieurs und Interieurs nach (Braess & Seiffert, 2011)

	<b>Minicar</b>	<b>Compact</b>	<b>Untere Mittel-klasse</b>	<b>Mittel-klasse</b>	<b>Obere Mittel-klasse</b>	<b>Luxus-klasse</b>	<b>Vans</b>	<b>SUV</b>
<b>Beispiel</b>	Fiat 500	Opel Corsa	VW Golf	BMW 3er	Audi A6	MB S-Klasse	VW Sharan	BMW X5
<b>Länge L103 / mm</b>	3527	3970	4199	4580	4916	5137	4854	4846
<b>Breite W103 / mm</b>	1639	1682	1786	1782	1855	1949	1904	1939
<b>Höhe H100-B / mm</b>	1460	1453	1480	1395	1459	1460	1720	1705
<b>Radstand L101 / mm</b>	2323	2470	2578	2760	2843	2992	2919	2895
<b>SRP bis Standebene vorn H5-1 / mm</b>	515	543	537	475	521	523	687	741
<b>SRP bis Fersenebene vorn H30-1 / mm</b>	303	269	279	238	257	257	365	298

## 2.4 Topologie – Komponentenanzordnung im Fahrzeug

Die Topologie beschreibt die Anordnung der wesentlichen Komponenten im Fahrzeug. Dazu zählt bei PHEVs neben dem verbrennungsmotorischen auch das elektrische Antriebs- und Speichersystem. Die beiden Systeme in einem Fahrzeug führen zu einer Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. (Kasper & Schünemann, 2012)

In den letzten Jahrzehnten stand der Verbrennungsmotor als Antrieb im Fokus. Es haben sich verschiedene Antriebstopologien mit dem Verbrennungsmotor im Vorderwagen etabliert, wie in Abbildung 2.5 dargestellt. Bei 75 % der Fahrzeuge wird der Verbrennungsmotor front-quer eingebaut und die Vorderachse angetrieben. Diese Topologie zeigt Vorteile bei der Integration, da der Motor genau auf der Achse positioniert ist, die auch angetrieben wird und somit keine zusätzliche Gelenkwelle erforderlich ist. Die zweithäufigste Antriebstopologie ist mit 16 % der Standardantrieb, bei welchem der Verbrennungsmotor front-längs eingebaut wird und die Hinterachse antreibt. Diese Variante ermöglicht den Einbau von größeren

Motoren und hat Vorteile bei der Fahrdynamik aufgrund des Antriebs an der Hinterachse. Mit 3 bzw. 4 % Marktanteil folgen die Allradvarianten der beiden vorgestellten Antriebstopologien. Für Fahrzeuge mit dem Verbrennungsmotor im Heck bleibt ein geringer Marktanteil. (Grote & Feldhusen, 2012)

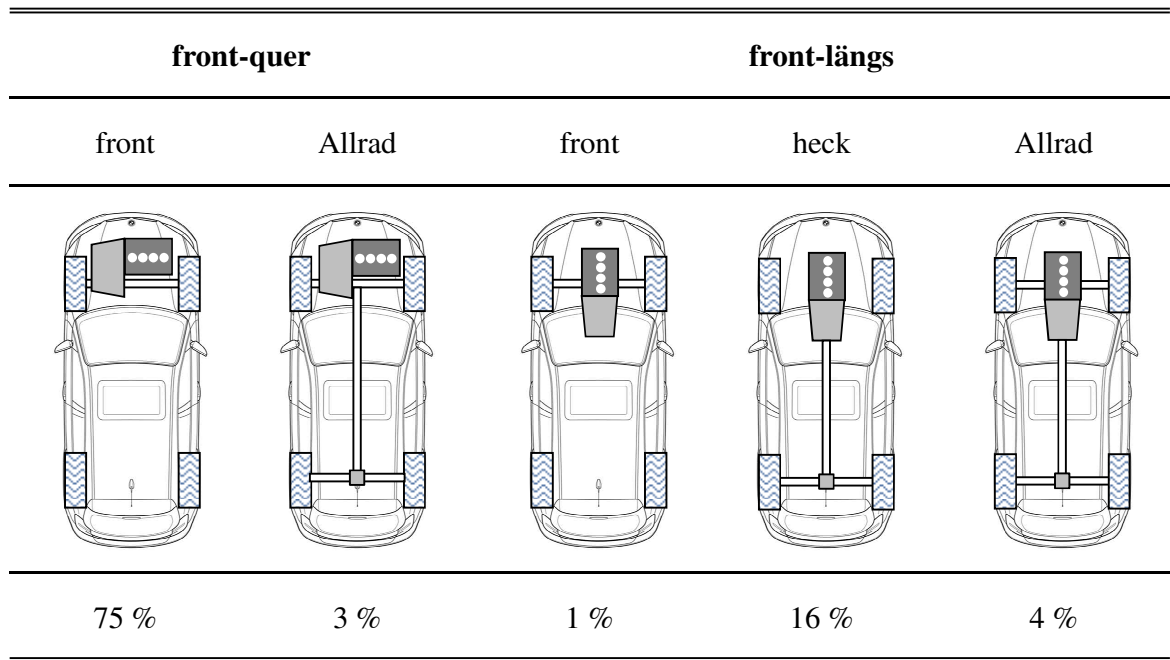


Abbildung 2.5: Wesentliche Antriebstopologien mit Verbrennungsmotor in einem ICEV, inklusive der Marktanteile (Grote & Feldhusen, 2012)

Durch die Integration der E-Maschine in den Antriebsstrang ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Antriebstopologien für einen PHEV, wovon die gängigen in Abbildung 2.6 am Beispiel der front-quer Anordnung des Verbrennungsmotors dargestellt sind. Bei den parallelen Anordnungen ist rein elektrisches und rein verbrennungsmotorisches Fahren möglich. Wohingegen bei einer leistungsverzweigten Variante beim verbrennungsmotorischen Fahren auch das elektrische System erforderlich ist. Bei einer seriellen Antriebstopologie wird ausschließlich rein elektrisch gefahren und die kombinierte Anordnung ermöglicht den seriellen und parallelen Betrieb.

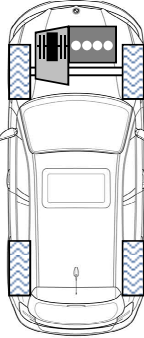
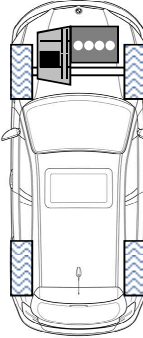
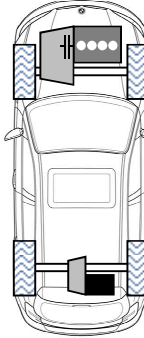
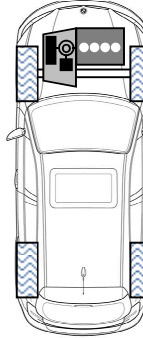
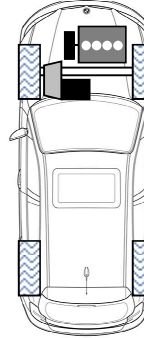
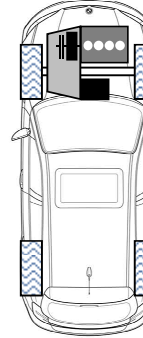
	parallel			leistungs- verzweigt	seriell	kombiniert
	P-2	P-DKG	P-AxleSplit			
						
Integration der EM zwischen VM und Getriebe mit zwei Kupplungen	Anbindung der EM an einem Teilgetriebe des DKGs	Abtrieb des VMs und der EM auf unterschiedlichen Achsen	Hybrid-getriebe mit zwei EMs und Planetensatz, Übersetzung variabel (eCVT)	EM1 (Motor) mit Achse verbunden; VM und EM2 (Generator) ohne mech. Durchtrieb	Kombination aus serieller und paralleler Topologie	

Abbildung 2.6: Wesentliche Antriebstopologien für die Kombination von Verbrennungsmotor und E-Maschine (schwarzes Rechteck) in einem PHEV, am Beispiel der front-quer Anordnung des Verbrennungsmotors; in Anlehnung an: (Duesmann, et al., 2011)

Eine weit verbreitete Variante ist die parallele Antriebstopologie, in welcher die E-Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe integriert wird. Mit Hilfe einer Kupplung ist rein verbrennungsmotorisches oder rein elektrisches Fahren möglich. Diese Antriebstopologie wird generell als P-2 bezeichnet und in Kombination mit Doppelkupplungsgetriebe als P-DKG. Ein straßengekoppelter Hybrid, P-AxleSplit genannt, ist charakterisiert durch unterschiedliche Antriebsachsen von Verbrennungsmotor und E-Maschine. Das Hybridgetriebe mit Planetensatz bei einer leistungsverzweigten Antriebstopologie kombiniert den Verbrennungsmotor mit zwei E-Maschinen, wobei eine als Motor und eine als Generator eingesetzt wird. Eine variable Übersetzung ist möglich und wird als „electronic continuously variable transmission“ (eCVT) bezeichnet. Bei der seriellen Antriebstopologie dient der Verbrennungsmotor mit Generator als „Range Extender“ und erhöht durch das Laden des HV-Speichers die elektrische Reichweite. Das Fahren ist ausschließlich über das elektrische System möglich, da der Verbrennungsmotor über keinen mechanischen Durchtrieb verfügt. Eine Kombination aus serieller und paralleler Anordnung wird als kombinierte Antriebstopologie bezeichnet. (Duesmann, et al., 2011) (Reif, 2010) (Tschöke, 2012)

Für die Integration des HV-Speichers in das Fahrzeug existieren verschiedene Speichertopologien, die in Abschnitt 4.2 detailliert beschrieben und analysiert werden.

### **2.5 Komponenten – Typen und Auslegung**

Der technische Lösungsraum wird auf Komponentenebene über Komponententypen und deren Auslegung beschrieben. Bei PHEVs zählen dazu die wesentlichen Antriebs- und Speicherkomponenten des elektrischen und verbrennungsmotorischen Systems. Der Fokus liegt auf dem elektrischen System, da das verbrennungsmotorische System aus konventionellen Fahrzeugen bekannt ist.

#### **2.5.1 Grundlagen des verbrennungsmotorischen und elektrischen Systems**

Antriebs- und Speichersysteme können in Fahrzeugen in ihrer Funktion in Energiebereitstellung, -dosierung, und -wandlung unterteilt werden, wie in Abbildung 2.7 dargestellt. Im verbrennungsmotorischen System wird der Kraftstoff aus dem Tank mit Hilfe einer Dosierungseinrichtung dem Verbrennungsmotor zugeführt. Die Energieumwandlung in Form der Verbrennung erzeugt ein Drehmoment an der Kurbelwelle. Dieses wird in Verbindung mit einer entsprechenden Drehzahl über ein typischerweise mehrstufiges Getriebe an die Räder übertragen. Ein großer Vorteil von verbrennungsmotorischen Systemen liegt in der kompakten Energiespeicherung von Benzin oder Diesel, aufgrund der hohen spezifischen Energiedichte. Ein Nachteil im Vergleich zum elektrischen System ist der begrenzte Wirkungsgrad. Verbrennungsmotorische Systeme sind aus konventionellen Fahrzeugen bekannt. Es besteht die Möglichkeit diese mit geringen Anpassungen für PHEVs zu übernehmen. Aus diesem Grund liegt der Fokus der folgenden Betrachtungen auf dem elektrischen System, mit dessen Auslegung sich Kapitel 3 und 4 beschäftigen.





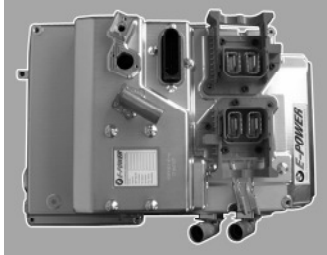

	Energie- bereitstellung	Energie- dosierung	Energie- wandlung
<b>ICE- System</b>			
	Kraftstofftank	Einspritzung / Steuergerät	Verbrennungsmotor
<b>E- System</b>			
	HV-Speicher	Leistungselektronik	E-Maschine

Abbildung 2.7: Wesentliche Komponenten des verbrennungsmotorischen und elektrischen Antriebs- und Speichersystems; Bildquellen: (Jung & Hofer, 2011), (www.press.bmwgroup.com, 2013a) und (Braess & Seiffert, 2011)

Die Leistung des elektrischen Systems wird aus einem HV-Speicher durch eine Leistungselektronik bereitgestellt. In einer E-Maschine wird die elektrische Leistung in Drehmoment und Drehzahl gewandelt. Die Kraftübertragung auf die Räder erfolgt typischerweise in einem ein- bis zweistufigen Getriebe. Bei E-Maschinen steht bereits aus dem Stillstand das volle Drehmoment zur Verfügung. Darüber hinaus ist ein generatorischer Betrieb mit E-Maschinen möglich. Mit der anfallenden Energie aus Brems- und Schubphasen kann der HV-Speicher geladen werden. Das elektrische System ist besonders für häufige Anfahr- und Verzögerungsvorgänge geeignet, wie sie z.B. im Stadtverkehr auftreten. Der gesamte Elektrifizierungsumfang eines PHEVs wird in den folgenden Abschnitten genauer erläutert. Dieser umfasst neben den drei vorgestellten Hauptkomponenten des E-Systems weitere Komponenten:

- HV-Speicher,
- E-Maschine,
- Leistungselektronik,



- Ladegerät,
- E-Getriebe,
- HV-Kabel (inklusive Ladekabel),
- modifiziertes Bremskonzept,
- modifiziertes Zustartsystem,
- modifiziertes Klima-, Heiz- und Kühlkonzept,
- modifizierter Tank.

### 2.5.2 Elektrochemischer Hochvolt-Speicher

In einem PHEV ist der elektrochemische Hochvolt-Speicher (HV-Speicher) die größte, schwerste und teuerste Komponente des Elektrifizierungsumfangs. Dieser speichert Energie und stellt Leistung für elektrische Funktionen, vor allem für das rein elektrische Fahren, zur Verfügung. In PHEVs existiert die Möglichkeit den HV-Speicher, neben der Energierückspeisung durch Rekuperation, über eine Ladedose direkt am Stromnetz zu laden. Der HV-Speicher besteht aus mechanischen und elektrischen Bauteilen sowie chemischen Substanzen in den Speicherzellen. Den Hauptbestandteil bilden Lithium-Ionen-Zellen mit unterschiedlichen Bauformen und Materialkombinationen.




#### Aufbau und Funktionsweise der Speicherzellen

Die Speicherzelle ist wiederaufladbar und speichert elektrische Energie auf elektrochemischer Basis (Akkumulator). Die Eigenschaften hängen sehr stark von den verwendeten Materialien ab. Bleibatterien und Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) sind beispielsweise kostengünstig, verfügen aber über eine vergleichsweise geringe Energiedichte, was den Einsatz als Traktionsbatterie in PHEVs erschwert. Aktuell setzen nahezu alle Hersteller auf eine Speicherlösung mit Lithium-Ionen-Technologie (Vezzini, 2009). Bei Lithium-Ionen-Zellen existieren verschiedene Bauformen und Materialkombinationen, die alle auf dem gleichen Funktionsprinzip beruhen. Die Zelle besteht aus zwei Elektroden, einem Separator und einem Elektrolyten. Beim Laden und Entladen werden die Lithium-Ionen an der einen Elektrode ausgelagert, wandern durch den Elektrolyten und werden im Kristallgitter der anderen Elektrode eingelagert. Die Bezeichnung der positiven und negativen Elektrode erfolgt analog dem Entladevorgang als Kathode und Anode. Die Kathode besteht meist aus einem Metalloxid und die Anode aus einer Kohlenstoffmodifikation, wie beispielsweise Graphit. Die hochporösen Elektrodenmaterialien werden mit Hilfe von Binde- und Leitmaterialien auf dünne Metallfolien aufgetragen, die auch als Stromableiter dienen. Für die Kathode wird Aluminium verwendet und für die Anode Kupfer. Jeweils zwei beschichtete Elektroden bilden zusammen mit einem Separator Stapel, die mehrlagig zu einer Zelle zusammengefasst werden. Die Auslegung der Lithium-Ionen-Zellen reicht von hohen Energiedichten mit moderater Stromstärke, bis kleineren Energiedichten mit hoher Stromstärke und somit hoher Leistungsdichte. Variiert wird dabei die Beschichtungsdicke. Je dünner die Beschichtung, desto höher die Leistungsdichte, bei abnehmender Energiedichte. (Sauer & Ecker, 2013)

### Bauformen der Speicherzellen

Es existieren drei verschiedene geometrische Bauformen für Lithium-Ionen-Zellen: prismatisch, Pouch und zylindrisch. Prismatische und zylindrische Zellen besitzen eine feste Hülle im Gegensatz zu einer Pouchzelle, die auch Folienzelle oder „Coffee bag“ genannt wird (Zschech, 2010). In Pouch-Zellen werden die Lagen aus Elektroden und Separatoren übereinander geschichtet, in zylindrischen Zellen gewickelt und bei prismatischen Zellen sind beide Verfahren möglich. Die Abmessungen der prismatischen und der Pouch-Zellen sind über (DIN SPEC 91252, 2011) genormt. Die Maße der zylindrischen Zellen entsprechen einer Norm des American National Standards Institutes, abgekürzt mit ANSI, wie in (www.varta-microbattery.com, 2013). Tabelle 2.3 enthält die Bezeichnungen und Abmessungen der genormten Zellen. Darüber hinaus existiert die Möglichkeit, Zellen mit abweichenden Abmessungen zu gestalten, um diese individuell an die Bauräume in den Fahrzeugen der Hersteller anzupassen. Dafür ist die Wirtschaftlichkeit zu prüfen, da damit meist nicht die Stückzahlen wie mit genormten Bauteilen erreicht werden und die Fertigungsanlagen anzupassen sind.

Tabelle 2.3: Bauformen der Speicherzellen und die genormten Abmessungen; Bildquelle: (Sauer & Ecker, 2013)

DIN:		PHEV1	PHEV2	BEV1	BEV2
<b>Prismatisch</b> Länge x Breite x Dicke / mm		85 x 173 x 21	91 x 148 x 26,5	115 x 173 x 32	115 x 173 x 45
DIN:		PHEV		BEV	
<b>Pouch</b> Länge x Breite / mm		165 x 227		162 x 330	
ANSI:		<b>18650</b>			
<b>Zylindrisch</b> Durchmesser x Höhe / mm		18 x 65			

Aufgrund dem langjährigen Einsatz in der Unterhaltungs- und Haushaltelektronik, wie beispielsweise bei Sony seit den 1990er Jahren, existiert viel Erfahrung für den Betrieb und die Produktion von zylindrischen Zellen (Sauer & Ecker, 2013). Nachteile solcher Zellen sind die aufwendige Kühlung und die geringere Bauraumnutzung bei der Stapelung runder Zellen in einem HV-Speicher. Die prismatische Zelle ist sehr stabil und geschützt vor mechanischer Beschädigung durch das feste Gehäuse. Dies sorgt jedoch für ein Mehrgewicht und somit eine

geringere gravimetrische Energiedichte auf Zellebene. Für die Pouch-Zelle hingegen ist die Bewertung der Vor- und Nachteile umgekehrt zu einer prismatischen Zelle aufgrund des fehlenden festen Gehäuses. (Zschech, 2010)

### Kathodenmaterialien der Speicherzellen

Der wesentliche Unterschied zwischen den verschiedenen Lithium-Ionen-Zellen ist das Aktivmaterial an der Kathode, welches jeweils zu spezifischen Vor- und Nachteilen der Zelle führt. Die unterschiedlichen Materialkombinationen werden in (The Boston Consulting Group, 2010) für verschiedene Disziplinen verglichen: Energiedichte, Leistungsdichte, Sicherheit, Stabilität, Lebensdauer und Kosten. Keine Materialkombination dominiert alle Eigenschaften. Deshalb ist es entscheidend die Kombination auszuwählen, die optimal zu den gestellten Anforderungen passt. In Tabelle 2.4 sind Eigenschaften wesentlicher Kathodenmaterialien dargestellt mit jeweils einem typischen Vor- und Nachteil. Diese werden durch das Mischungsverhältnis und der Zellbauform beeinflusst, weshalb beispielsweise bei der Energiedichte eine Bandbreite angegeben wird.

Tabelle 2.4: Eigenschaften wesentlicher Kathodenmaterialien von Lithium-Ionen-Zellen; in Anlehnung an: (Vezzini, 2009) und (Sauer & Ecker, 2013)

	<b>Lithium-Cobalt-Oxid</b>	<b>Lithium-Mangan-Oxid</b>	<b>Lithium-Nickel-Oxid</b>	<b>Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid</b>	<b>Lithium-Eisen-Phosphat</b>
<b>Abkürzung</b>	LCO	LMO	LNO	LNMC	LFP
<b>Chemische Bezeichnung</b>	LiCoO <sub>2</sub>	LiMnO <sub>2</sub>	LiNiO <sub>2</sub>	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
<b>Vorteil</b>	hohe Energiedichte	hohe thermische Stabilität	hohe Energiedichte	abhängig vom Mischungsverhältnis aus	hohe Sicherheit
<b>Nachteil</b>	hohe Kosten	teilweise Auflösung im Elektrolyt	geringe thermische Stabilität	LCO, LMO, LNO	geringe Energiedichte
<b>Nennspannung / V</b>	3,7	4,0	k.A.	3,7	3,3
<b>Energiedichte / Wh/kg</b>	110-190	110-120	k.A.	95-130	95-140

Lithium-Cobalt-Oxid (LCO) wird unter anderem in der Unterhaltungs- und Haushaltselektronik eingesetzt, wobei dort geringere Sicherheits- und Lebensdauieranforderungen im Vergleich zum Einsatz in einem Fahrzeug vorliegen. Diese Materialkombination ermöglicht eine hohe Energiedichte, ist aber aufgrund des hohen Kobaltanteils sehr teuer. Weitere Materialkombinationen an der Kathode sind Lithium-Nickel-Oxid (LNO) und Lithium-Mangan-Oxid (LMO) mit den jeweils in Tabelle 2.4

genannten Vor- und Nachteilen. In einer Zelle mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) werden die drei genannten Materialien gemischt mit dem Ziel, die jeweils positiven Eigenschaften zu kombinieren. Durch das Mischungsverhältnis wird die Zelle für den Anwendungsfall optimal ausgelegt. Abhängig von der Mixtur wird die Energiedichte von LCO, die Sicherheit von LMO und die Leistungsfähigkeit von LNO vereint. Ein weiteres Kathodenmaterial ist Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), welches zwar eine vergleichsweise geringe Energiedichte aufweist, dafür aber hohe Sicherheit verspricht. (Sauer & Ecker, 2013)

Im HV-Speicher des BMW ActiveE werden NMC-Zellen mit einer Energiedichte auf Zellebene von ca. 110 Wh/kg eingesetzt (Jung & Hofer, 2011). Die volumetrische Energiedichte liegt generell für diese Zellen zwischen 190 und 250 kWh/l (Howell, 2012). Aufgrund der genannten Eigenschaften werden NMC-Zellen aktuell sehr häufig eingesetzt (Zschech, 2010) und bilden auch die Basis für die Analysen in der vorliegenden Arbeit mit folgenden Werten und Prognosen aus (Howell, 2012):

- 2011/12: 110 Wh/kg, 220 Wh/l,
- 2020: 170 Wh/kg, 330 Wh/l (angenommene Steigerung um 50 %),
- 2025: 240 Wh/kg, 460 Wh/l (angenommene Steigerung gegenüber 2020 um 40 %).

Die Angaben für Leistungsdichten liegen zwischen 500 W/kg für Elektrofahrzeuge und 3.000 W/kg für Hybridfahrzeuge. PHEVs sind dazwischen einzuordnen. Dieser weite Bereich liegt zum Einen an der unterschiedlichen Auslegung der Zellen in Richtung Leistungs- oder Energiezelle und zum Anderen an der Abhängigkeit dieser Kenngröße von weiteren Betriebsbedingungen. Dazu zählt beispielsweise der Ladezustand, da ein voller HV-Speicher eine höhere Leistungsabgabe ermöglicht als ein leerer Speicher. Außerdem sinkt die mögliche Leistungsabgabe aufgrund der Alterung und dem Betrieb außerhalb des Temperaturbereichs von ca. 20 bis 40 °C. (Sauer & Ecker, 2013)

### **Aufbau des HV-Speichers**

Die Zellen werden parallel oder in Serie verschaltet und bilden zusammen mit den mechanischen und elektrischen Modulkomponenten, wie Zellkontaktierungssystem und Gehäuse, ein Modul. Die Module werden wiederum in Serie oder parallel zu einem Batteriepack verschaltet, wie in Abbildung 2.8 dargestellt. Durch die Verschaltung wird die Charakteristik, vor allem Strom und Spannung, des HV-Speichers definiert. Für Steuerung und Schutz des HV-Speichers und der Zellen sind weitere Komponenten erforderlich. Ein Zellüberwachungssystem, oft mit CSC (Cell-Supervision-Circuits) abgekürzt, überwacht Zellspannung und Temperatur der Zellen. Außerdem sorgt es für die Symmetrierung der Zellen auf einen gleichen Ladezustand. Das Zellüberwachungssystem ist über einen Bus mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) verbunden. Das BMS übernimmt Sicherheits- und Diagnosefunktionen und steuert den Ablauf im HV-Speicher, z.B. die Schaltung der Relais. Außerdem wird die Kühlung des HV-Speichers vom BMS geregelt und es sind Algorithmen zur Erkennung des aktuellen Zustands hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Ladezustand und Alterungsgrad integriert. Bei sicherheitsrelevanten Störungen, im Ruhezustand und beim Service wird über Sicherungen und Relais in einer Schaltbox (Auto-/Manual-Disconnect) der HV-Speicher vom Fahrzeugbordnetz getrennt. Für die Kühlung des HV-Speichers existieren

verschiedene Konzepte. Im BMW ActiveE ist ein Wasser-Glykol-Kühlsystem installiert, welches über einen Wärmetauscher mit dem Kühlkreislauf des Fahrzeugs verbunden ist. (Jung, et al., 2012)



Abbildung 2.8: Aufbau des HV-Speichers: a) Zelle, b) Modul, c) Pack bzw. HV-Speicher; Bildquelle: (www.press.bmwgroup.com, 2013a)

### **Eigenschaften und Kennzahlen des HV-Speichers**

Die Zellen bilden den größten Anteil am HV-Speicher hinsichtlich Gewicht und Volumen, neben den Komponenten für Steuerung und Schutz. Die empirische Analyse mit existierenden PHEVs liefert den Volumen- und Massenanteil der Speicherzellen am gesamten HV-Speicher in Abbildung 2.9. Der Massenanteil liegt um die 60 % und der Volumenanteil zwischen einer minimalen und maximalen Bauraumnutzung durch Speicherzellen von 30 und 40 %. Der ermittelte Massenanteil ist ähnlich zu Werten in (Vezzini, 2009). Die Basis der Analyse bilden Fahrzeuge nach dem Conversion Design mit einem flüssigkeitsgekühlten HV-Speicher, da diese in elektrifizierten Fahrzeugen weit verbreitet sind. HV-Speicherkonzepte mit Luftkühlung werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Für Analysen in der frühen Entwicklungsphase wird der Einfluss von unterschiedlichen Speichertopologien, Zellbauformen, Modulgrößen und möglichen Einbaulagen der Zellen, wie beispielsweise liegend oder stehend, ausgeblendet (Kuchenbuch, et al., 2011).

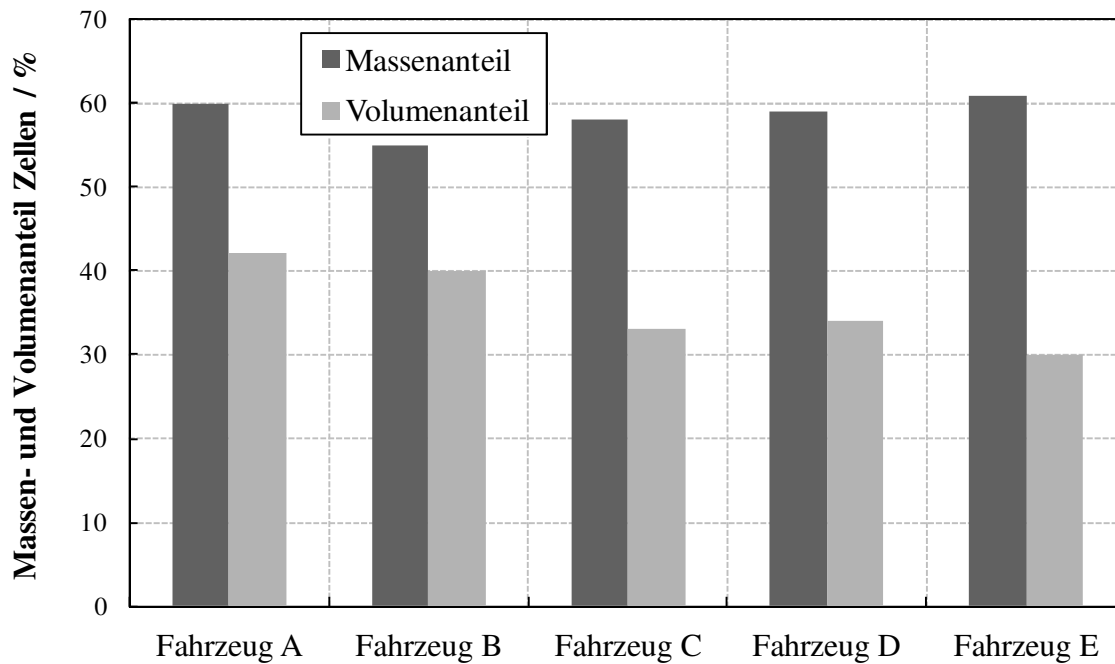


Abbildung 2.9: Massen- und Volumenanteil der Zellen am gesamten HV-Speicher von existierenden PHEVs nach dem Conversion Design mit flüssigkeitsgekühlten HV-Speichern

Die Analyse berücksichtigt die zusätzlichen Bestandteile eines HV-Speichers neben den Speicherzellen, wie Kühlung, Gehäuse und Elektronik. Die zusätzlichen Bestandteile haben tendenziell eine niedrigere Dichte als die kompakt gebauten Speicherzellen. Dies führt zu einem höheren Wert beim Massenanteil im Vergleich zum Volumenanteil der Zellen am gesamten HV-Speicher. Bei einem kompakten Bauraum im Fahrzeug, der optimal zur Zellgeometrie passt, ist der Volumenanteil der Bauraumnutzung (Füllfaktor) größer als bei einem sehr zerklüfteten Bauraum mit Abschrägungen.

### Ausblick

Neben der Lithium-Ionen-Technologie befinden sich Lithium-Luft- ( $\text{Li-O}_2$ ) und Lithium-Schwefel-Zellen ( $\text{Li-S}$ ) in der Forschung. Diese erreichen um den Faktor sieben bis neun höhere spezifische Energiedichten. Probleme existieren im Bereich der Sicherheit und Lebensdauer, da mit  $\text{Li-O}_2$ -Zellen aktuell maximal einige 100 Zyklen erreicht werden. Für Anodenmaterialien wird neben Graphit auch an Modifikationen mit Siliziumanteilen geforscht, die höhere Energiedichten ermöglichen. Mit Silizium sind theoretisch um bis zu Faktor elf höhere Energiedichten möglich. Die größte Herausforderung ist die Volumenänderung von bis zu 400% beim Laden und Entladen. Aktuell ist offen, ob eine der genannten Technologien die Automobilstandards erreichen werden. (Sauer & Ecker, 2013) Die Weiterentwicklung der bekannten Lithium-Ionen-Technologien ermöglichen laut (Howell, 2012) eine Steigerung der Energiedichte bis in das Jahr 2020 um ungefähr 50% und bis 2025 zusätzliche 40%.

Die vorgestellten gravimetrischen Kennzahlen des HV-Speichers ermöglichen in Abschnitt 3.3 die Berücksichtigung des Gewichtseinflusses bei der Lösungsraumanalyse und die volumetrischen Kennzahlen dienen als Basis für die geometrischen Analysen in Abschnitt 4.4.

### 2.5.3 Elektrische Maschine

Die elektrische Maschine (E-Maschine) ist eine weitere Komponente im Elektrifizierungsumfang eines PHEVs, um den elektrischen Antrieb zu ermöglichen. Für den Einsatz in PHEVs existieren verschiedene Typen, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Für die Anforderungen im Automobilbau stellt die Hybrid-Synchronmaschine eine attraktive Lösung dar.

#### Typ, Aufbau und Funktionsweise

Die E-Maschine übernimmt abhängig von der Energieflussrichtung die Funktion eines Motors sowie eines Generators und kann folglich das Fahrzeug beschleunigen und abbremsen. Bei einer Beschleunigung wandelt die E-Maschine als Motor elektrische in mechanische Energie und bei einer Verzögerung mechanische in elektrische Energie. (Leidhold, 2012)

E-Maschinen zeichnen sich dadurch aus, dass ein zeitlich begrenzter Betrieb mit Überlast möglich ist, beschränkt durch thermische Belastbarkeit und Kühlung. Diese Eigenschaft ist bei der Angabe der Leistung und bei der Auslegung der E-Maschine zu berücksichtigen, da die maximale Leistung nur zeitlich begrenzt zu Verfügung steht, im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren. Um einen längeren Überlastbereich zu ermöglichen, werden die meisten E-Maschinen in elektrifizierten Fahrzeugen mit Flüssigkeit gekühlt. (Wallentowitz, et al., 2010)

Im Bereich der Industrie existiert eine Vielzahl an E-Maschinen, die jedoch als Traktions-E-Maschine im Fahrzeug nicht geeignet sind. Im Automobilbau werden im Vergleich zur Industrie abweichende Anforderungen gestellt, wie beispielsweise für Abmessungen, Gewicht und Kühlung. Aus diesen Gründen werden für die Anforderungen spezielle E-Maschinen entwickelt. In elektrifizierten Fahrzeugen kommen nahezu ausschließlich Drehstrommaschinen zum Einsatz, da diese im Vergleich zu Gleichstrommaschinen Vorteile bei Wirkungsgraden und Leistungsfähigkeit aufweisen (Leidhold, 2012). Die Drehstrommaschinen lassen sich aufgrund des Aufbaus und der Erzeugung des Drehmoments in folgende Typen unterscheiden, deren Prinzip in Schnittbildern in Abbildung 2.10 dargestellt ist:

- permanent-erregte Synchronmaschine (PSM),
- hybrid-erregte Synchronmaschine (HSM),
- stromerregte Synchronmaschine (SSM),
- Asynchron- oder Induktionsmaschine (ASM).

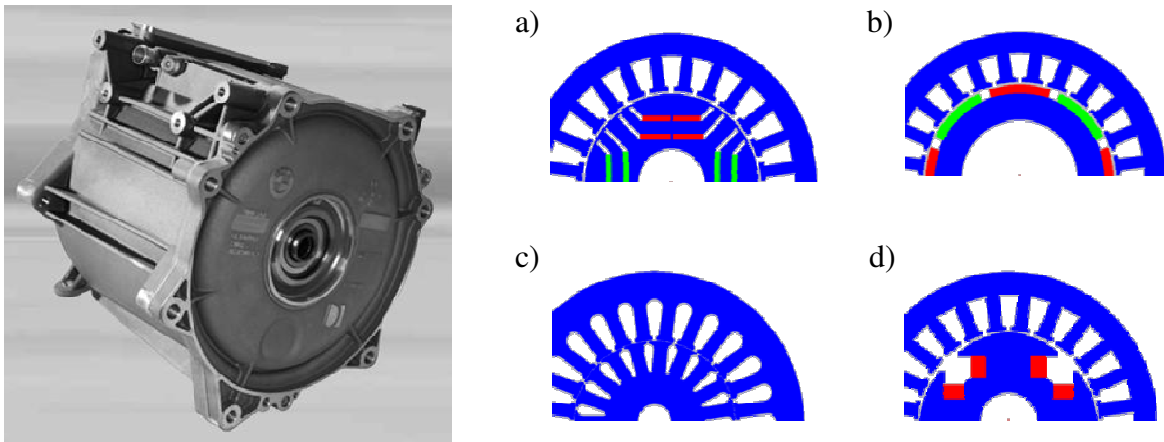


Abbildung 2.10: E-Maschine aus dem BMW ActiveE und Schnittbilder mit dem Prinzip wesentlicher E-Maschinentypen: a) HSM, b) PSM, c) ASM, d) SSM; Bildquelle: (Jung & Hofer, 2011)

In einer PSM wird das umlaufende Magnetfeld durch Wicklungen im Stator erzeugt. Auf der Oberfläche des Rotors befinden sich Permanentmagnete. Durch die Wechselwirkung der Magnetfelder dreht sich der Rotor synchron zu dem rotierenden Magnetfeld im Stator. Die Drehmomentbildung erfolgt über die Lorentzkraft. Im Generatorbetrieb wird durch die Rotation des Rotors ein Strom in den Spulen des Stators induziert.

Eine HSM nutzt neben dem gleichen Prinzip wie in einer PSM zusätzlich den Reluktanzeffekt, um ein Drehmoment zu erzeugen. Reluktanz beschreibt das Ausrichten eines magnetisierbaren Körpers innerhalb eines magnetischen Feldes. Dazu werden in dem Rotor einer HSM die Magnete „vergraben“ und befinden sich nicht wie bei einer PSM auf der Oberfläche.

In einer ASM wird durch das umlaufende Drehfeld in den Wicklungen des Stators ein Magnetfeld erzeugt. Der Rotor ist als Käfigläufer ausgeführt, dessen Elektroden über Kurzschlussringe zusammengefasst sind. Durch die unterschiedlichen Drehzahlen von Drehfeld und Rotor (Schlupfdrehzahl) wird eine Spannung im Rotor induziert. Auf die stromdurchflossenen Leiter im Rotor wirkt im Magnetfeld des Stators die Lorentzkraft, was zu einem Drehmoment führt.

Die Funktionsprinzipien einer SSM und einer permanentenerregten Synchronmaschinen sind sehr ähnlich, jedoch besitzt der Rotor anstelle von Permanentmagneten Wicklungen. Diese werden mit Strom gespeist, wodurch ein Magnetfeld aufgebaut wird. Durch die Wechselwirkung mit dem Magnetfeld der Wicklungen im Stator, erfolgt die Drehmomentbildung aufgrund der Lorentzkraft und des Reluktanzeffektes.

Die Vor- und Nachteile sind basierend auf (Reif, 2010), (Jung & Hofer, 2011), (Oswald, 2010) und (Wünsch, et al., 2010) zusammengestellt.



### **Eigenschaften**

Die PSM wird sehr häufig als Traktions-E-Maschine in elektrifizierten Fahrzeugen eingesetzt. Ein genereller Vorteil von Synchronmaschinen im Vergleich zu Asynchronmaschinen ist die hohe Leistungsdichte und die somit kompakte Bauweise. Bezogen auf das Dauermoment pro Rotorvolumen wird mit ca. 40-50 Nm/l bei Synchronmaschinen ein fast doppelt so hoher Wert erreicht. Ein wesentlicher Nachteil der E-Maschinen mit Permanentmagneten sind die hohen Kosten der Magnete. Bei einer HSM ist es möglich, die notwendige Magnetmasse bei gleicher Leistung deutlich zu reduzieren, wohingegen bei einer ASM und SSM komplett auf Magnete verzichtet wird. Hinsichtlich der Effizienz erreichen die HSM und SSM hohe Wirkungsgrade im Bereich von durchschnittlich knapp über 90 %. Demgegenüber erreicht eine PSM Werte um die 90 % und eine ASM prinzipbedingt nur knapp über 85 %. (Jung & Hofer, 2011) Der Fertigungsprozess von Synchronmaschinen ist im Vergleich zu einer ASM aufwendiger, da dort Magnete bzw. Wicklungen im Rotor installiert werden.

### **Ausblick**

Es wird an Transversalfluss-Maschinen geforscht, die eine hohe Momentendichte aufweisen und Wirkungsgrade über 95 % ermöglichen. Diese E-Maschinen verfügen im Gegensatz zu den vorgestellten E-Maschinen über Wicklungen auf dem Umfang des Rotors, die konzentrisch zur Welle angeordnet sind. Durch den entfallenden Wickelkopf wird eine Reduzierung des Gewichts und des Volumens angestrebt. Eine weitere Verbesserung der Eigenschaften ist in E-Maschinen mit supraleitenden Materialien zu erreichen, da hier nahezu keine Verluste auftreten. (Oswald, 2010)

## **2.5.4 Leistungselektronik**

Neben dem HV-Speicher und der E-Maschine ist die Leistungselektronik die dritte Hauptkomponente des E-Systems. Diese besteht aus einem Umrichter und einem DC/DC-Wandler. Für den Einsatz in PHEVs sind IGBTs als Halbleiterschaltungen weit verbreitet.

### **Typ, Aufbau und Funktionsweise**

Der Umrichter wird auch Inverter genannt und dient zur Steuerung des Energieflusses über Strom und Spannung variabler Amplitude und Frequenz zwischen HV-Speicher und E-Maschine (Cebulski, 2011). Im Motorbetrieb wird die Gleichspannung aus dem HV-Speicher in Wechselspannung für den Betrieb der E-Maschine umgewandelt. In diesem Fall wird der Umrichter auch als Wechselrichter bezeichnet. Im umgekehrten Fall, wenn Energie in den HV-Speicher zurückgespeist wird (Rekuperation), wandelt der Umrichter die Wechselspannung, die in der E-Maschine induziert wird, in Gleichspannung für den HV-Speicher um. Im Generatorbetrieb übernimmt der Umrichter die Funktion eines Gleichrichters. Der DC/DC-Wandler, auch Konverter genannt, ist ein Gleichspannungswandler und dient zur Versorgung des 12V/14V-Bordnetzes, woraus Verbraucher wie Beleuchtung und Unterhaltungselektronik gespeist werden. Die hohe Spannung aus dem HV-Speicher von bis zu 1.000 V in Hybridfahrzeugen, abhängig von der Verschaltung und Anzahl der Zellen, wird an die deutlich niedrigere Spannung von 12 bzw. 14 V angepasst. (Reif, 2010) (Lindemann, 2012)

Das zentrale Element des Umrichters sind gesteuerte Halbleiterschalter, die zu einem Leistungsmodul zusammengefasst sind. In heutigen Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird am häufigsten als Schaltertopologie eine B6-Brückenschaltung eingesetzt. Diese besteht aus sechs Leistungsschaltern, die in drei Brückenschaltungen angeordnet sind, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Aufgrund der Spannungsniveaus und Schaltfrequenzen sind IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) mit Silizium-Halbleiter in PHEVs typisch. In der Pulsweitenmodulation werden die Schalter so gesteuert, dass aus Gleichspannung eine dreiphasige Wechselspannung entsteht. Zur Glättung der Spannung wird ein Kondensator eingesetzt, der meist als Folienkondensator ausgeführt ist. Aufgrund der notwendigen Spannung und Kapazität bestimmt dieser zusammen mit den Halbleiterschaltern die wesentlichen Eigenschaften des gesamten Umrichters. Darüber hinaus ist eine geeignete Kühlung erforderlich, um die entstehenden Verluste beim Schalten und Stromführen in Form von Wärmeenergie abzuführen. Weitere Bauteile sind Steuerungselektronik, Gehäuse, Stecker, Sensoren und Kleinteile. (Cebulski, 2011)

Der DC/DC-Wandler verfügt über leistungselektronische Bauteile, die zu einer elektrischen Schaltung kombiniert sind. Für die exakte Auslegung der Schalter und deren Topologie sind vor allem der Betrag und die Güte der eingehenden bzw. ausgehenden Spannungen und Ströme entscheidend. (Cebulski, 2011) Die Integration des DC/DC-Wandlers erfolgt in einem separaten Gehäuse oder im Gehäuse der Leistungselektronik zusammen mit dem Umrichter. (Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011)

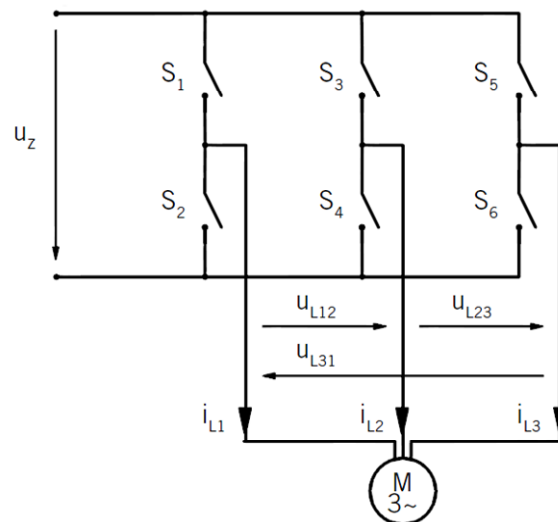
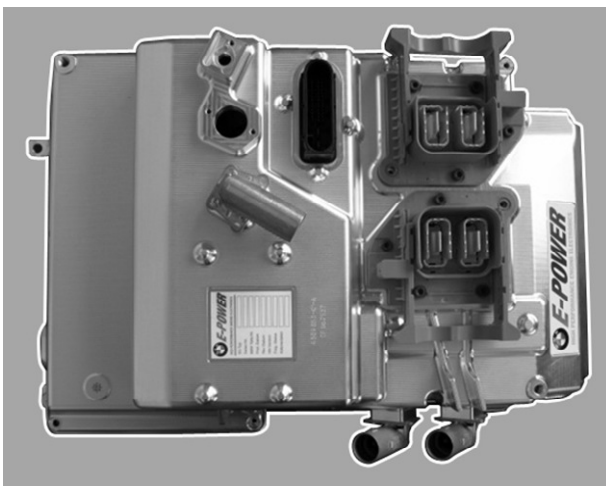


Abbildung 2.11: Leistungselektronik aus dem BMW ActiveE (Jung & Hofer, 2011) und das Schaltbild einer dreiphasigen Brückenschaltung mit sechs Halbleiterschaltern (Lindemann, 2012)

### Eigenschaften

In Hybrid- und Elektrofahrzeugen werden IGBTs mit Sperrspannungen von typischerweise 600 oder 1.200 V verwendet (Lindemann, 2012). Moderne Umrichter arbeiten hoch effizient

mit Wirkungsgraden in relativ großen Betriebsbereichen von über 95 %, wodurch eine optimale Ausnutzung der E-Maschine hinsichtlich Dynamik, Drehmoment und Drehzahlbereich möglich ist. Neben den Kosten sind wesentliche Eigenschaften der Leistungselektronik das erforderliche Bauraumvolumen und das Gewicht. Beide Eigenschaften werden vor allem durch den notwendigen Kühlaufwand beeinflusst. (März, 2010)

### **Ausblick**

Das Ziel der Forschung und Entwicklung ist eine kompaktere, leichtere und dabei kostengünstigere Bauweise der Leistungselektronik. Ein möglicher Ansatz ist die Integration des Umrichters an oder in die E-Maschine. Außerdem wird an der Haltbarkeit der Halbleiterschalter geforscht, da die hohen Temperaturen und Temperaturwechsel zu hohen Belastungen führen, was sich negativ auf die Lebensdauer auswirkt. Es werden neue Fertigungsmethoden und Materialien untersucht, wie beispielsweise Siliziumkarbid (SiC). Damit steigt die Leistungsdichte und Zuverlässigkeit, jedoch stehen diesen Vorteilen die hohen Kosten gegenüber. (Cebulski, 2011)

### **2.5.5 Weitere Komponenten des Elektrifizierungsumfangs**

Zu dem Elektrifizierungsumfang eines PHEVs gehören neben den drei Hauptkomponenten HV-Speicher, E-Maschine und Leistungselektronik weitere Komponenten. Dazu zählen auch modifizierte, konventionelle Komponenten, um die gewünschten Funktionen im elektrischen Fahrbetrieb sicherzustellen. Im Folgenden wird Typ und Funktion der weiteren Komponenten jeweils kurz beschrieben und falls erforderlich der jeweiligen Antriebstopologie zugeordnet.

#### **Ladegerät**

In einem PHEV wird unabhängig von der Antriebstopologie im Vergleich zu einem ICEV ein Ladegerät mit einer Ladedose installiert, um den HV-Speicher am Stromnetz zu laden. Es existieren verschiedene Varianten, wie AC- oder DC-Laden mit einem ein- oder drei-phasigen Anschluss. Am weitesten verbreitet ist ein-phasiges AC-Laden an der normalen Steckdose, was in Europa bei 230 V und 16 A zu einer Ladeleistung von ca. 3,5 kW führt. Aus Sicherheitsgründen ist eine galvanische Trennung erforderlich, die mit einem integrierten Transformator realisiert wird. Dieser arbeitet typischerweise mit Frequenzen bis zu einigen 10 kHz, um Gewicht und Volumen des Ladegeräts zu optimieren. Ergänzend zum konduktiven Laden befindet sich eine induktive Energieübertragung in der Entwicklung. Dabei wird eine Spulenanordnung verwendet, deren Primärspule im Fahrbahnboden integriert ist und die Sekundärspule im Fahrzeugunterboden. (Lindemann, 2012)

#### **E-Getriebe**

Abhängig von der Antriebstopologie in einem PHEV ist ein zusätzliches E-Getriebe oder ein modifiziertes Getriebe des Verbrennungsmotors erforderlich. Für die Umsetzung einer elektrischen Achse in einem straßengekoppelten oder einem seriellen PHEV ist ein sogenanntes E-Getriebe notwendig, um Drehzahl und -moment von E-Maschine und Räder anzupassen. Dieses Getriebe wird speziell für die E-Maschine und das elektrische Fahren konzipiert, da der Verbrennungsmotor kein Getriebe benötigt oder ein eigenes dafür

vorgesehen ist. Eine optionale Kupplung ermöglicht das Abkoppeln des E-Systems, beispielsweise bei höheren Geschwindigkeiten. Bei einer parallelen Anordnung (P-2 oder P-DKG) wird die E-Maschine in das Getriebe koaxial oder achsparallel integriert. Ein spezielles Hybridgetriebe mit Planetenradsatz ist für die leistungsverzweigte Variante erforderlich, um zwei E-Maschinen und den Verbrennungsmotor zu kombinieren. (Reif, 2010)

### **HV-Kabel**

Um die Komponenten des E-Systems miteinander zu verbinden und das Fahrzeug extern zu laden, sind in einem PHEV HV-Kabel erforderlich. Dieser Kabelbaum ist topologiespezifisch, da die Länge abhängig von der Integration der HV-Komponenten im Fahrzeug ist. Darüber hinaus wird ein Ladekabel benötigt, um die Ladedose des Fahrzeugs mit einer Steckdose zu verbinden und den HV-Speicher über das Stromnetz zu laden. (Reif, 2010)

### **Modifiziertes Bremssystem**

Ein rekuperationsfähiges Bremssystem und eine elektrische Unterdruckpumpe ersetzen die konventionellen Komponenten des Bremssystems, um die gewünschten Funktionen im elektrischen Fahrbetrieb sicherzustellen. Der notwendige Unterdruck für das konventionelle Bremssystem, der über den Verbrennungsmotor zu Verfügung gestellt wird, steht während des elektrischen Fahrbetriebs nicht zu Verfügung. (Reif, 2010)

### **HV-Starter-Generator**

Für das Laden des HV-Speichers im Stillstand und das Starten des Verbrennungsmotors ist in einem straßengekoppelten PHEV ein HV-Starter-Generator im Riemen des Verbrennungsmotors notwendig. Der konventionelle 12-V-Generator wird dadurch ersetzt. Gleiches gilt für den Ritzelstarter, sofern dieser nicht für den Kaltstart des Verbrennungsmotors erforderlich ist. Der HV-Starter-Generator besteht im Wesentlichen aus einer E-Maschine und einem Umrichter. (Le Dantec & Breuer, 2012)

### **Modifiziertes Klima- Heiz- und Kühlkonzept**

Ein modifiziertes Klima- und Heizkonzept für den Innenraum ist erforderlich, um diese Funktionen im elektrischen Fahrbetrieb zu realisieren. Ein elektrischer Kältemittelverdichter und Durchlauferhitzer sind möglich. Außerdem ist zusätzlich ein Kühlkonzept für E-Maschine, HV-Speicher und Leistungselektronik erforderlich und in den Kühlkreislauf des Fahrzeugs zu integrieren. (Wallentowitz, et al., 2010) (Reif, 2010)

### **Modifizierter Tank**

Der konventionelle Tank in einem elektrifizierten Fahrzeug wird durch einen Drucktank ersetzt. Dadurch ist gewährleistet, dass im elektrischen Fahrbetrieb kein Kraftstoffgeruch im Innenraum entsteht. (Gorbea Diaz, 2011)

### **Modifikationen an Karosserie und Fahrwerk**

Modifikationen an Karosserie und Fahrwerk sind erforderlich, um die zusätzlichen Komponenten im Fahrzeug zu integrieren. Dazu zählen beispielsweise Aufnahmen für Komponenten, Anpassungen aufgrund des höheren Fahrzeuggewichts oder Strukturelemente, um die hohen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. (Wallentowitz, et al., 2010) (Reif, 2010)

Das Ziel der Konzeptgestaltung ist ein stimmiges Antriebs- und Speichersystem zu gestalten, dessen Komponenten perfekt aufeinander abgestimmt sind (Hildinger, et al., 2010). Für die folgende Lösungsraumanalyse in der frühen Entwicklungsphase liegt der Fokus auf der Auslegung des HV-Speichers und der E-Maschine, im Verbund mit der Leistungselektronik.

### **2.6 Methodik der Lösungsraumanalyse**

Auf Basis geeigneter Prämissen wird der technische Lösungsraum für PHEVs eingegrenzt und anschließend analysiert. Das Maßkonzept eines existierenden verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs wird für die Analysen zugrunde gelegt, wie es bei einer Fahrzeugentwicklung nach dem Conversion Design typisch ist. Die Antriebstopologie für die zu untersuchende PHEV-Konfiguration wird festgelegt, um den Fokus der Analyse auf verschiedene HV-Speichertopologien zu legen. Bei der geometrischen Konzeptgestaltung von PHEVs stellt der HV-Speicher aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte im Vergleich zu Benzin oder Diesel die größte Herausforderung dar, siehe Kapitel 4. Es wird die Speicherintegration im Tunnel- und Tankbereich sowie deren Kombination untersucht. Außerdem werden die Komponententypen festgelegt, um einen weiteren Fokus der Analyse auf die Auslegung des elektrischen Antriebs- und Speichersystems zu legen, da diese entscheidenden Einfluss auf Kosten und Verbrauch eines PHEVs gegenüber einem ICEV hat. Es wird der Lösungsraum über dem Energieinhalt des HV-Speichers von 3 bis 30 kWh und die Spitzenleistung der E-Maschine von 30 bis 160 kW aufgespannt und analysiert.

In einem strukturierten Vorgehen wird der Lösungsraum hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit für Käufer eines PHEVs untersucht. Anschließend wird dieser unter geometrischen Randbedingungen bei verschiedenen HV-Speicherintegrationen weiter eingegrenzt. Es werden Analysen im gesetzlichen Fahrzyklus NEFZ nach der ECE-Norm dargestellt sowie im Realbetrieb anhand aufgezeichneter Fahr- und Nutzungsprofile unterschiedlicher Fahrer. In diesem ganzheitlichen Ansatz werden mit Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen von Parametervariationen analysiert, um beispielsweise unterschiedliche HV-Speicherbauräume, den technologischen Fortschritt und die preisliche Entwicklung bis 2020 und 2025 zu berücksichtigen. Ziel ist es, neben dem aktuellen Stand der Technik eine Prognose über zwei Fahrzeuggenerationen darzustellen, wenn von einer Modelllaufzeit von ungefähr sieben Jahren ausgegangen wird. Die entwickelten Modelle auf Komponentenebene in MATLAB und MS Excel bestimmen für die folgenden Analysen in Abhängigkeit der Auslegung Gewicht, Volumen und Kosten der Komponenten des Elektrifizierungsumfangs eines PHEVs. Darüber hinaus ermitteln Modelle auf Gesamtfahrzeugebene in MATLAB, MS Excel und CATIA V5 den Energiebedarf und die Mehrkosten eines PHEVs gegenüber einem ICEV sowie Bauräume für die HV-Speicherintegration. Mit Hilfe von parametrischen Modellen im Produktentstehungsprozess werden die Entwicklungszeit reduziert und Entwicklungskosten eingespart (Schramm, et al., 2010).

### **2.7 PHEV-Konfiguration als Prämisse für die Analysen**

Der technische Lösungsraum für PHEVs wird auf Basis geeigneter Prämissen vor den Analysen eingegrenzt: Für das Maßkonzept wird ein verbrennungsmotorisch angetriebenes

BMW 1er Coupé zugrunde gelegt, welches somit auch die Fahrwiderstände festlegt (sogenanntes Conversion Design). Die Antriebstopologie in dem zu untersuchenden Fahrzeug wird ähnlich zum vorgestellten BMW Active Tourer Concept gewählt (www.press.bmwgroup.com, 2012). Wie Abbildung 2.12 verdeutlicht, treibt bei dem straßengekoppelten PHEV die E-Maschine die Hinterachse an und der Verbrennungsmotor (Ottomotor) die Vorderachse. Für den HV-Speicher sind verschiedene Integrationen im Bereich des Tunnels und unter der zweiten Sitzreihe möglich, ähnlich dem BMW ActiveE (Jung & Hofer, 2011), die in Kapitel 4 genauer analysiert werden. (Ried, et al., 2013b)

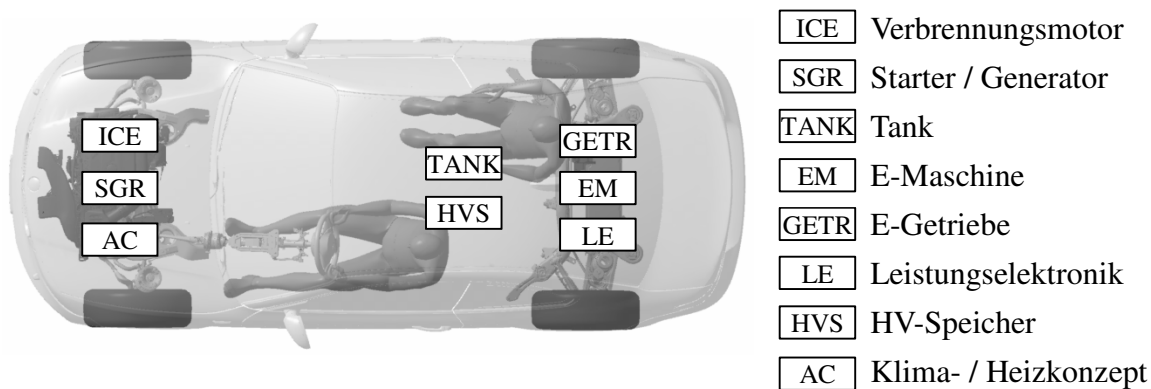


Abbildung 2.12: Topologie des konfigurierten PHEVs für die folgenden Analysen

Komponenten und Dimensionierung des verbrennungsmotorischen Systems werden für die folgenden Analysen vom Basisfahrzeug übernommen. Die Auslegung des elektrischen Antriebs- und Speichersystems wird im Lösungsraum anhand Energieinhalt und Leistung (P/E-Lösungsraum) untersucht (Ried, et al., 2013b). Folgende Prämissen gelten für das E-System: Für den HV-Speicher werden Zellen mit NMC als Kathodenmaterial angenommen, da diese Materialkombination für die Anforderungen im Automobilbau gut geeignet ist, wie in Abschnitt 2.5.2 dargestellt. Die Zellbauform wird für das Kostenmodell nicht eingegrenzt, da kein entscheidender Einfluss auf die Kosten existiert (Argonne National Laboratory, 2012). Eine konstante Anzahl von 16 Zellen in Serie pro Modul wird angenommen, um 60 V nicht zu überschreiten und somit besondere Umgangsvorschriften zu vermeiden, wie in (von Borck, et al., 2010) und (Justen, 2013) erläutert. Die Modulanzahl wird auf sechs festgelegt, wiederum in Serie verschaltet, was insgesamt zu 96 Zellen im HV-Speicher führt. Es wird dadurch der zulässige Betriebsspannungsbereich von E-Maschine, Leistungselektronik und weiteren Komponenten eingehalten (Hildinger, et al., 2010). Heizen des HV-Speichers ist nicht vorgesehen. Als E-Maschinen-Typ ist eine HSM gewählt mit einer maximalen Drehzahl von 12.000 Umdrehungen pro Minute. Eine solche E-Maschine ist typisch für elektrisch angetriebene Achsen mit einem ein-gängigen Getriebe und ist beispielsweise im BMW ActiveE installiert (Jung & Hofer, 2011). Die Leistungselektronik besteht aus einem DC/DC-Wandler mit Umrichter, für dessen Halbleiterschaltungen IGBTs bei der Spannungslage von PHEVs weit verbreitet sind und für das Kostenmodell zugrunde gelegt werden. Außerdem wird angenommen, dass die Leistungselektronik über ein eigenes Gehäuse verfügt und nicht in die E-Maschine halb- oder vollintegriert ist.

Die Prämissen für das verbrennungsmotorische und elektrische System sind in Tabelle 2.5 zusammengefasst. Unter diesen Prämissen wird der Lösungsraum für die folgenden Analysen über dem Energieinhalt des HV-Speichers ( $E_{HVS, \text{brutto}}$ ) von 3 bis 30 kWh und die Spitzenleistung der E-Maschine ( $P_{EM, \text{peak}}$ ) von 30 bis 160 kW aufgespannt und analysiert. Der Einfluss auf das Fahrzeuggewicht durch die Skalierung des E- Systems wird berücksichtigt.

Tabelle 2.5: Details des verbrennungsmotorischen und elektrischen Systems der für die Analysen zugrunde gelegten PHEV-Konfiguration

	<b>Komponente</b>	<b>Details</b>	<b>PHEV-Konfiguration</b>
<b>ICE-System</b>	Verbrennungsmotor	Typ / Einbau / Abtrieb	4 Zylinder Otto / front-quer / Vorderachse
	Getriebe	Typ	Automatik
	Tank, Abgasanlage	Position	abhängig vom HV-Speicher
<b>E-System</b>	HV-Speicher	Typ / Zellanzahl / Energie / Leistung / Position	NMC / 96 Zellen in 6 Modulen / 3 - 30 kWh / analog E-Maschine / Tunnel- und Tankbereich
	E- Maschine	Typ / Leistung / Einbau / Abtrieb	HSM / 30 - 160 kW / achsparallel im Hinterwagen / Hinterachse
	E- Getriebe	Typ	1-Gang mit Kupplung
	Leistungselektronik	Typ / Position	Umrichter (IGBT) inklusive DCDC-Wandler / Hinterwagen
	Ladegerät	Typ / Leistung / Position Ladedose	einphasig / 3,6 kW / Hinterwagen
	Zustartsystem	Typ	HV-Starter-Generator
	Bremssystem	Typ	rekuperierfähiges Bremssystem, elektrische Unterdruckpumpe
	Klima- und Heizkonzept	Typ	elektrischer Kältemittelverdichter und Durchlauferhitzer





---

### 3 Wirtschaftlichkeitsanalysen von PHEVs aus Käufersicht

---

Beim Kauf eines PHEVs entstehen für den Käufer Vor- und Nachteile im Vergleich zu dem Kauf eines ICEVs. Um die Wirtschaftlichkeit von PHEVs gegenüber einem ICEV aus Käufersicht zu bewerten und somit die Kaufentscheidung abzuwägen, werden die wesentlichsten Vor- und Nachteile monetär bewertet und miteinander verrechnet. In der vorliegenden Arbeit werden dazu in der Wirtschaftlichkeitsanalyse die Kosten eines PHEVs dem Verbrauch und den daraus resultierenden Verbrauchskosten im Vergleich zu einem ICEV gegenübergestellt. Das Ziel der Analyse ist es, den optimalen Auslegungsbereich für das elektrische System eines PHEVs hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht zu identifizieren. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse sind die Begriffe Kosten und Verbrauch folgendermaßen definiert:

- **Kosten:** Die Kosten werden als Anschaffungskosten für Käufer eines PHEVs definiert und entsprechen den Mehrkosten im Vergleich zu einem ICEV. Diese stellen einen wesentlichen Nachteil von PHEVs aus Käufersicht dar. In einem konzipierten Kostenmodell werden die Mehrkosten ermittelt.
- **Verbrauch:** Der Verbrauch wird als Energiebedarf bei der Nutzung eines PHEVs definiert und entspricht dem Kraftstoff- und Stromverbrauch im Vergleich zu einem ICEV. Der reduzierte Kraftstoffverbrauch führt trotz zusätzlichem Stromverbrauch eines PHEVs gegenüber einem ICEV zu einer gesamthaften Verbrauchskostenreduzierung. Diese stellt einen wesentlichen Vorteil von PHEVs aus Käufersicht dar. In einem konzipierten Verbrauchsmodell werden Kraftstoff- und Stromverbrauch sowie Verbrauchskosten ermittelt.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist mit diesen Definitionen eine monetäre Bewertung beider Größen möglich und erlaubt die Gegenüberstellung von Produkt- und Verbrauchskosten eines PHEVs aus Käufersicht. Dieses Vorgehen entspricht dem Grundprinzip einer Kosten-Nutzen-Analyse. Im Bereich der Wirtschaftswissenschaften ist diese Methode ein Instrumentarium zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit öffentlicher Projekte und Maßnahmen. Dabei werden grundsätzlich negative bzw. positive Auswirkungen von Projekten als Kosten bzw. Nutzen definiert und monetär bewertet. (Wirtz & Mühlenkamp, 2010) (Baum, et al., 2011)

In den folgenden Abschnitten ist anhand verschiedener Veröffentlichungen, die ähnliche Vorgehensweisen und Definitionen wählen, der Stand der Forschung dargestellt. Anschließend werden die konzipierten Modelle für die frühe Entwicklungsphase vorgestellt, um Kosten und Verbrauch zu ermitteln. In einem systematischen Vorgehen werden

notwendige Prämissen definiert und der resultierende Lösungsraum über Energieinhalt und Leistung für die Dimensionierung des elektrischen Systems eines PHEVs analysiert. Als Ergebnis wird ein optimaler Auslegungsbereich des E-Systems identifiziert und in Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen von Parametervariationen dargestellt. Das Ergebnis dieser Bedarfsanalyse wird in Kapitel 4 unter geometrischen Randbedingungen im Fahrzeug analysiert.

## 3.1 Stand der Forschung

Verschiedene Veröffentlichungen beschäftigen sich mit einzelnen Fragestellungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von PHEVs aus Käufersicht. Darüber hinaus wird generell Wirtschaftlichkeit, im Speziellen Kosten und Verbrauch, individuell definiert und mit unterschiedlichen Detaillierungstiefen analysiert. Im Folgenden werden zuerst existierende Kosten- und anschließend Verbrauchsanalysen vorgestellt sowie am Ende des Kapitels deren Kombination.

Es existieren in der Literatur verschiedene Kostenmodelle für Elektrifizierungskomponenten, die jedoch teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, wie in (Cheah & Heywood, 2010) am Beispiel des HV-Speichers verdeutlicht wird. In einigen Veröffentlichungen wird unterstellt, dass alle Komponenten des E-Systems von Automobilherstellern zugekauft werden, wie beispielsweise in (Gorbea Diaz, 2011). In solchen Betrachtungen werden Einkaufspreise für Automobilhersteller zugrunde gelegt, die deutlich von der Marktsituation abhängen. Im Vergleich dazu werden in der hier vorgestellten Arbeit Herstellkosten für Automobilhersteller ermittelt. Bei Veröffentlichungen ist außerdem der Zeithorizont der Kostenschätzung zu berücksichtigen, da zukünftig teilweise starke Kostenreduzierungen zu erwarten sind, wie beispielsweise bei den Batteriekosten um nahezu 50 % zwischen den Jahren 2011/12 und 2025 (Lang, et al., 2011). Generell gilt, je weiter die Prognosen in die Zukunft reichen, desto größer werden die Unsicherheiten die angenommenen zukünftigen Werte zu erreichen (Delorme, et al., 2009). Außerdem ist eine typspezifische Modellierung und Analyse zu bevorzugen, da verschiedene Komponententypen jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. Eine ASM ist beispielsweise günstiger als eine PSM und verursacht geringere Herstellkosten, hat aber unter anderem eine geringere Leistungsdichte und benötigt mehr Bauraum, wie in Abschnitt 2.5.3 erläutert. Darüber hinaus ist der Zeitpunkt der Studiererstellung entscheidend, da sich in den letzten Jahren im Bereich der Elektrifizierungskomponenten viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beobachten lassen, die betriebswirtschaftliche Annahmen beeinflussen. Kostenschätzungen für Elektrifizierungskomponenten sowie die Prognosen in die Zukunft sind aus aktuellen Studien, wie beispielsweise (National Research Council of the National Academics, 2011), besser geeignet als aus älteren Studien, wie z.B. (Cuenca, et al., 1999). Viele weitere Veröffentlichungen beinhalten Informationen zu den aktuellen und prognostizierten Herstellkosten des elektrischen Systems bzw. einzelner Komponenten daraus, die als Basis für das konzipierte Kostenmodell in der vorliegenden Arbeit dienen und in den folgenden Abschnitten zitiert werden.

Im Bereich der Verbrauchsanalysen eines PHEVs beschränken sich viele Veröffentlichungen auf konstante Verbräuche aus einem Fahrzyklus, wie beispielsweise in (Shiau, et al., 2010).

Dabei handelt es sich um eine theoretische Betrachtung, da die Verbrauchswerte aus einem Fahrzyklus für realitätsnahe Analysen mit PHEVs nicht ausreichen. Vielmehr sind aufgezeichnete Realfahrten erforderlich (Gonder, et al., 2007). In (Waldowski, et al., 2012) werden nutzerindividuelle Fahrzyklen generiert, jedoch ist für die Ermittlung der realen Kraftstoffeinsparung der Verlauf des Energiebedarfs im Realbetrieb zu analysieren. Das Ziel ist es, exakt zu ermitteln, wie lange der HV-Speicher genutzt werden kann, bis dieser komplett entladen ist. Die Annahme eines konstanten Energiebedarfs ist nicht zielführend, da dieser maßgeblich von dem Fahr- und Nutzungsprofil abhängt, was auch die Analysen in Abschnitt 3.3.8 zeigen. In der hier vorgestellten Arbeit werden reale Fahr- und Nutzungsprofile mit unterschiedlichen PHEV-Konfigurationen exakt simuliert und daraus der reale Leistungs- und Energieverlauf des jeweiligen Fahrprofils als Basis für die Analysen ermittelt.

Die vorgestellten separaten Kosten- und Verbrauchsanalysen werden nur teilweise in der Literatur kombiniert. (Lang, et al., 2011) zeigt beispielsweise ausschließlich die Kosten und (Gonder, et al., 2007) nur den Verbrauch von PHEVs. Die Kombination der Analysen wird in der Literatur oft als Kosten-Nutzen-Analyse bezeichnet, wobei Kosten und Nutzen nicht exakt dem ökonomischen Sinne entsprechen und individuell definiert sind: (Delorme, et al., 2009) zeigt Ergebnisse bis in das Jahr 2045 für eine große Bandbreite an Antriebskonzepten und unterstellt ein vereinfachtes Kostenmodell sowie Verbräuche aus Fahrzyklen. (Shiau, et al., 2010) berücksichtigt das Fahr- und Nutzungsverhalten indirekt über die mittlere Tagesfahrstrecke, was jedoch nur bedingt ein geeignetes Kriterium ist, wie die Analysen in der vorliegenden Arbeit zeigen. In (Karlsson, 2009) wird eine Analyse realer Fahrdaten durchgeführt. Als Basis für die Kosten-Nutzen-Analysen wurden die Fahrten von 20 schwedischen Familien über zwei Wochen aufgezeichnet, was einen sehr kurzen Zeitraum darstellt und noch keine ausreichend repräsentative Datenbasis bildet. In (Simpson, 2006) wird die mittlere Tagesstreckenverteilung der USA zugrunde gelegt. Die folgenden Analysen zeigen, dass durch eine Mittelwertbildung die großen Unterschiede zwischen einzelnen Fahrern, mit deren spezifischen Fahr- und Nutzungsprofilen, nicht mehr auflösbar sind. Die Kosten-Nutzen-Analyse in (Baum, et al., 2011) beschäftigt sich ausschließlich mit BEVs. In (Propfe, et al., 2012) ist ein einfaches Modell der Herstellkosten integriert und der Hauptfokus liegt auf einer Total-Cost-of-Ownership-Analyse.

Darüber hinaus liegt der Hauptfokus vieler Analysen auf der Abhängigkeit vom Energieinhalt, wie beispielsweise in (Baum, et al., 2011). In der vorliegenden Arbeit wird ergänzend zum Energieinhalt die Leistung betrachtet, da beide Größen bereits in der frühen Entwicklungsphase einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung der elektrischen Komponenten eines PHEVs haben.

## 3.2 Kostenmodell und -analyse

Die Kosten sind für die folgende Wirtschaftlichkeitsanalyse als Mehrkosten eines PHEVs aus Käufersicht gegenüber einem ICEV definiert. Diese resultieren aus dem Elektrifizierungsumfang in einem PHEV. Dazu zählen neben HV-Speicher, E-Maschine und Leistungselektronik auch weitere Komponenten und erforderliche Modifikationen im Fahrzeug. Im folgenden Abschnitt werden die konzipierten Kostenmodelle vorgestellt, mit

denen die Kosten des Elektrifizierungsumfangs im Jahr 2011/12 ermittelt werden. Auf Basis dessen werden unter Verwendung von Studien Prognosen für die Kostenentwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025 präsentiert.

#### **3.2.1 Definition und Charakterisierung der Kosten**

Im Rahmen der folgenden Wirtschaftlichkeitsanalyse von PHEVs werden die Kosten als Anschaffungskosten für Käufer eines PHEVs definiert und entsprechen den Mehrkosten im Vergleich zu einem ICEV. Durch die Elektrifizierungsumfänge entstehen zusätzliche Herstellkosten eines PHEVs im Vergleich zu einem ICEV für Automobilhersteller, die im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben werden. In der vorliegenden Arbeit werden die zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller ermittelt und den Mehrkosten für Käufer gleichgesetzt. (Nationale Plattform Elektromobilität, 2011)

Aufgrund der Elektrifizierung werden zusätzliche Komponenten in ein Fahrzeug integriert und einzelne konventionelle Komponenten modifiziert, um die gewünschten Funktionen auch im elektrischen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Die zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller werden einerseits mit Kostenmodellen ermittelt, die auf externen Studien basieren, wie beispielsweise für den HV-Speicher (Argonne National Laboratory, 2012), oder andererseits neu entwickelt wurden, wie bei dem Kostenmodell der E-Maschine (Seisenberger, et al., 2012). Für die wesentlichen Elektrifizierungsumfänge sind die Herstellkosten, abhängig von Energieinhalt und Leistung, in Kostenmodellen beschrieben. Einige Komponenten sind unabhängig davon und bilden einen fixen Grundbetrag an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller. (Ried, et al., 2013b) Es sind die Ergebnisse für das Jahr 2011/12 und Prognosen für 2020 und 2025 basierend auf Studien abgebildet. Herstellkosten sind generell von Stückzahlen abhängig, da sich mit großen Mengen kostenreduzierende Skaleneffekte erzielen lassen. Die folgenden Analysen gelten für eine Produktionsmenge von 100.000 Stück pro Jahr. Folgende Elektrifizierungsumfänge eines PHEVs sind für die genannten Komponententypen in Tabelle 2.5 im Kostenmodell abgebildet:

- HV-Speicher,
- E-Maschine,
- Leistungselektronik,
- Ladegerät,
- E-Getriebe,
- HV-Kabel,
- modifiziertes Bremskonzept,
- modifiziertes Zustartsystem,
- modifiziertes Klima-, Heiz- und Kühlkonzept,
- modifizierter Tank,

- Modifikationen an Karosserie und Fahrwerk.

Die Elektrifizierungsumfänge in einem Fahrzeug führen zu zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, die ausgehend von einem fixen Grundbetrag über Energieinhalt und Leistung ansteigen. Folgende Variablen werden für die Kostenanalysen aus Käufersicht definiert und deren prinzipieller Verlauf ist in Abbildung 3.1 dargestellt:

- $AK_{ICEV}$  = Anschaffungskosten für Käufer eines ICEVs in € (Basis = 100%),
- $MK (= \Delta HK)_{PHEV, \text{Jahr}}$  = Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV im jeweiligen Jahr in €, gleichgesetzt mit den zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller aufgrund der Elektrifizierungsumfänge (Annahme in Anlehnung an: (Nationale Plattform Elektromobilität, 2011)).

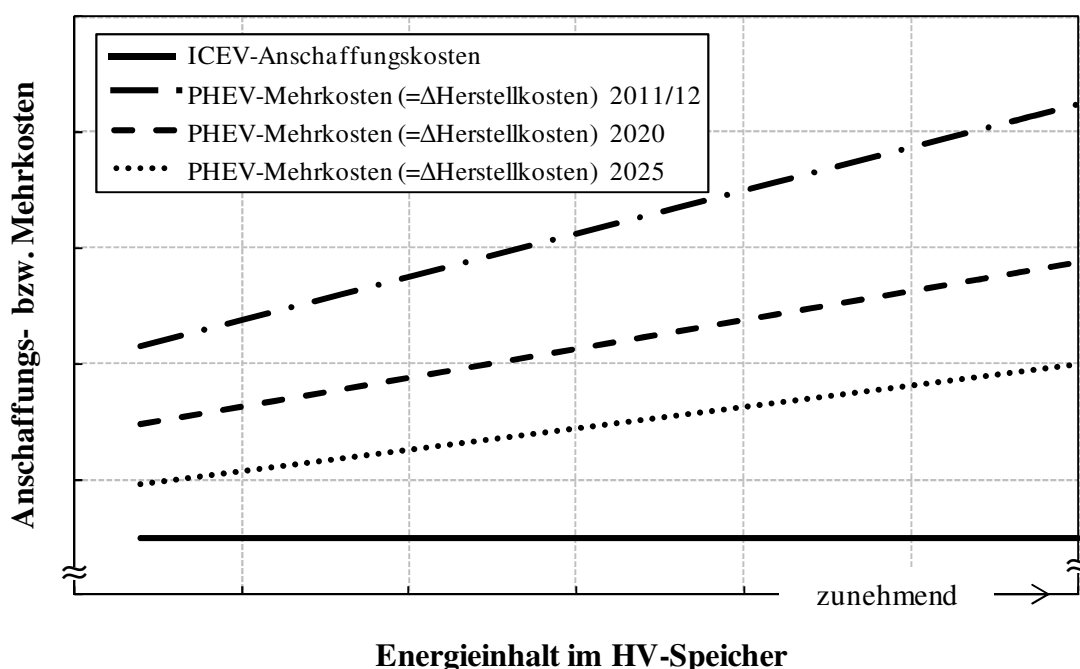


Abbildung 3.1: Darstellung des prinzipiellen Verlaufs der Mehrkosten eines PHEVs aus Käufersicht im Vergleich zu einem ICEV über dem Energieinhalt bei gegebener Leistung (Verlauf der Kurven in Anlehnung an die im folgenden Abschnitt vorgestellten Kostenmodelle)

### 3.2.2 Methoden zur Kalkulation der Herstellkosten

Unternehmen achten bereits in der frühen Phase der Entwicklung auf Kosten, um frühzeitig Möglichkeiten zur Senkung zu identifizieren. Es sind vor allem Kosten relevant, die direkt durch die Produkte eines Unternehmens verursacht werden. Die Herstellkosten eines Produkts können direkt dem Herstellungsprozess zugeordnet werden. Diese bestehen im Wesentlichen aus den Material- und Fertigungskosten. Zusammen mit den Entwicklungs- und

Konstruktionskosten sowie den Verwaltungs- und Vertriebskosten ergeben sich die Selbstkosten. Die Selbstkosten gehen als Anteil in den Verkaufspreis eines Produkts ein. Den Kern der kosteneffizienten Entwicklung von Produkten in der frühen Phase bildet die Analyse der Herstellkosten. (Ehrlenspiel, et al., 2005)

Die Material- und Fertigungskosten beinhalten analog Abbildung 3.2 jeweils Einzel- und Gemeinkosten. Materialeinzelkosten errechnen sich aus den verbrauchten Materialmengen. Diese Kosten sind dem späteren Produkt eindeutig zugeordnet, wie beispielsweise der Rohling der E-Maschinen-Welle. Außerdem zählen Norm- und Kaufteile sowie fremdgefertigte Teile dazu, weshalb unter anderem Fertigungskosten des Zulieferers enthalten sind. Materialgemeinkosten können dem Produkt nicht eindeutig zugeordnet werden, sondern entstehen beispielsweise durch Beschaffung, Prüfung und Lagerung des Materials. Die Fertigungseinzelkosten werden auch Fertigungslohnkosten genannt und errechnen sich aus der Stückzeit und dem Lohnkostensatz, wie beispielsweise bei der Montage der E-Maschine. Fertigungsgemeinkosten sind analog den Materialgemeinkosten einem einzelnen Produkt nicht eindeutig zuzuordnen und resultieren aus den Kosten für Maschinen, Hallen und Meister. (Ehrlenspiel, et al., 2005)

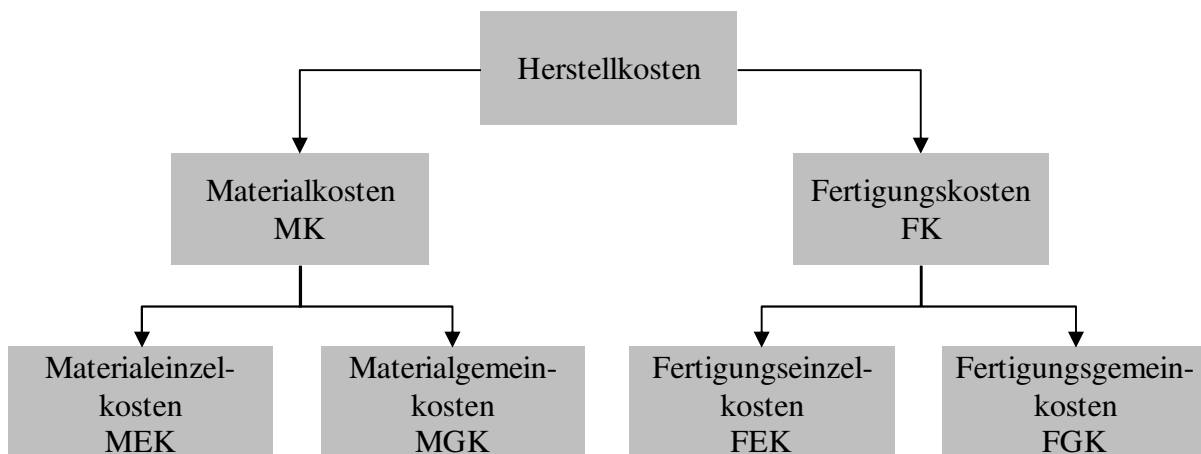


Abbildung 3.2: Aufteilung der Herstellkosten in Material- und Fertigungskosten, sowie Einzel- und Gemeinkosten; in Anlehnung an: (Ehrlenspiel, et al., 2005)

Es existieren verschiedene Methoden zur entwicklungsbegleitenden Kostenkalkulation. (Zirkler, 2010) beinhaltet eine disziplinübergreifende Zusammenstellung mit Kostenkalkulationsverfahren für mechatronische Produkte aus der Elektrotechnik, dem Maschinenbau und der Informationstechnik. Viele Methoden erfassen ausschließlich die einem Produkt direkt zuzuordnenden Einzelkosten. Die Gewichtsmethode beispielsweise prognostiziert die Herstellkosten mit einem konstanten Kostensatz abhängig vom Gewicht. Ein weiteres Beispiel ist die Kurzkalkulation mit einer Einflussgröße. Dabei wird eine einzige Größe, wie beispielsweise Leistungsbedarf oder Trocknungsfläche, für die Kostenermittlung eines Produkts herangezogen. Die Grundlage bilden in der Regel Regressionsanalysen auf Basis vorangegangener Entwicklungen. Neben den Verfahren zur Ermittlung der Einzelkosten, existieren Methoden für die zusätzliche Berücksichtigung der Gemeinkosten.

Ein weit verbreitetes Kalkulationsverfahren in der frühen Entwicklungsphase ist die Zuschlagskalkulation. Dabei bilden die Einzelkosten die Bezugsgrößen der Gemeinkostenverrechnung über Zuschlagssätze. Mit relativ geringem Aufwand ist es möglich, Herstellkosten von Produkten auf Basis von Einzel- und Gemeinkosten abzuschätzen. Ein weiteres Verfahren mit Berücksichtigung des Gemeinkostenanteils ist die Prozesskostenrechnung. Dabei wird beachtet, dass die Gemeinkosten nicht nur vom Materialwert und Fertigungslohn bestimmt werden, sondern auch von den notwendigen Prozessen. In der Prozesskostenrechnung ist eine verursachergerechte Aufteilung der Gemeinkosten möglich, im Vergleich zu der pauschalen Verrechnung in der Zuschlagskalkulation. (Ehrlenspiel, et al., 2005) (Zirkler, 2010)

In der vorliegenden Arbeit werden Kostenkalkulationsverfahren für die Ermittlung der Einzelkosten und die zusätzliche Berücksichtigung der Gemeinkosten ausgewählt. Für die Abschätzung der Einzelkosten wird die Kostenkalkulation mit einer Einflussgröße verwendet, da diese für Anwendungen in der frühen Entwicklungsphase weit verbreitet ist und zu akzeptablen Ergebnissen führt. Außerdem sind die wesentlichen Komponenten des Elektrifizierungsumfangs für diese Methode gut geeignet, da eine Beschreibung der Kosten über einzelne Größen möglich ist, wie die folgenden Analysen zeigen. Für die Berücksichtigung der Gemeinkosten wird in der vorliegenden Arbeit die Zuschlagskalkulation verwendet. Aufgrund des hohen Aufwandes und der Fokussierung auf die Gemeinkosten ist die Prozesskostenrechnung im Rahmen der frühen Phase der Entwicklung nur bedingt geeignet. (Zirkler, 2010)

In den Kostenmodellen der vorliegenden Arbeit werden die wesentlichen Komponenten des Elektrifizierungsumfangs eines PHEVs, für den in Abschnitt 2.7 festgelegten Komponententyp, durch folgende physikalische Größen in der frühen Entwicklungsphase ausreichend genau beschrieben (Ried, et al., 2013a):

- HV-Speicher: Energieinhalt und Spitzenleistung,
- E-Maschine: Spitzenleistung,
- Leistungselektronik: Spitzenleistung.

Die Einzelkosten der Bestandteile dieser Komponenten werden in einer ABC-Analyse hinsichtlich des Einflusses auf die Herstellkosten untersucht. Die identifizierten Bestandteile sind die Kostentreiber der Komponenten und stehen im Fokus der Kostenmodelle in der frühen Entwicklungsphase. (Seisenberger, et al., 2012) In den folgenden Abschnitten werden die Kostenmodelle vorgestellt. Diese sind in MS Excel erstellt und beinhalten programmierte Makros in Visual Basic. Für die Wirtschaftlichkeitsanalysen in Kapitel 3 werden die Ergebnisse in MATLAB ausgeleitet. Die Ergebnisse der Kostenmodelle sind Herstellkosten für Automobilhersteller im Jahr 2011/12 und auf Basis dessen ist eine Kostenentwicklung für die Jahre 2020 und 2025 prognostiziert.

### 3.2.3 Kostenmodell des HV-Speichers

Der HV-Speicher besteht aus vielen einzelnen Bauteilen und ist eine wesentliche Komponente des Elektrifizierungsumfangs eines PHEVs. Im folgenden Abschnitt wird die Abschätzung der Herstellkosten des HV-Speichers unter Verwendung von Studien und existierenden Kostenmodellen vorgestellt.

#### Prämissen und Methode des Kostenmodells des HV-Speichers

Für das Kostenmodell des HV-Speichers sind Teilumfänge der vom Argonne National Laboratory entwickelten Software „Battery Performance and Cost Model Version 2.1“ (BatPac) integriert. Eine ausführliche Dokumentation mit Hinweisen zum Download ist unter (Argonne National Laboratory, 2012) zu finden. Die Software basiert auf MS Excel und bildet die komplexen Zusammenhänge innerhalb eines HV-Speichers vereinfacht in Form von verschachtelten Gleichungen und iterativen Rechnungen ab. Mit den verwendeten Teilumfängen von „BatPac“ im Kostenmodell der vorliegenden Arbeit ist eine Abschätzung der Herstellkosten für Automobilhersteller für das Jahr 2020 möglich. Ausgehend davon werden mit den Annahmen aus (Wietschel & Roser, 2012) und (Roland Berger, 2011) die Herstellkosten für die Jahre 2011/12 und 2025 abgeleitet. Ausgehend von den Herstellkosten im Jahr 2011/12 wird bis in das Jahr 2020 eine Reduzierung um ca. 35 % prognostiziert und basierend darauf weitere 20 % bis in das Jahr 2025.

Der HV-Speicher besteht neben mechanischen und elektrischen Bauteilen auch aus chemischen Substanzen in den Speicherzellen. Einen wesentlichen Bestandteil des HV-Speichers bilden die Speicherzellen, wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert. Weitere Bauteile sind für Steuerung und Schutz des HV-Speichers und der Zellen erforderlich. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der wesentlichen Bestandteile des HV-Speichers und die zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell. Wie in Abschnitt 2.7 definiert, wird die Skalierung des HV-Speichers bei konstanter Zellanzahl über Energieinhalt und Leistung durch eine spezifische Auslegung der Zelle realisiert.



Tabelle 3.1: Wesentliche Bestandteile des HV-Speichers (Lithium-Ionen) mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell

		Typ / Material	Kostenfunktion
<b>Zelle</b>	Zelle	NMC	f (Leistung, Energieinhalt)
<b>Modul</b>	mech. Komponenten	Div.	f (Leistung, Energieinhalt)
	elektr. Komponenten	Div.	f (Leistung, Energieinhalt)
<b>Pack</b>	Modulverbinder	Div.	konstant
	HV-Stecker	Div.	konstant
	Batteriemanagementsystem	Div.	konstant
	Auto-/Manual-Disconnect	Div.	konstant
	Kühlung	Div.	konstant
	Gehäuse	Aluminium	f (Leistung, Energieinhalt)

Die Fertigungstiefe hinsichtlich des HV-Speichers ist bei Automobilherstellern unterschiedlich (bayme vbm, 2012). In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass die Speicherzellen von Automobilherstellern zugekauft werden. Im Vergleich zu „BatPac“ ist das Kostenmodell der vorliegenden Arbeit dahingehend modifiziert. Dazu sind Materialeinzel- und Materialgemeinkosten, sowie Fertigungseinzel- und Fertigungsgemeinkosten der Speicherzellen zu den Herstellkosten der Zellen zusammengefasst. Für die folgenden Analysen werden die Herstellkosten der Zellen dem Einkaufspreis für Automobilhersteller gleichgesetzt, in Anlehnung an Erkenntnisse aus (Roland Berger, 2012). Der Einkaufspreis der Zellen wird in den Materialeinzelkosten des HV-Speichers bei der Kostenrechnung von Automobilherstellern berücksichtigt, analog der vorgestellten Kalkulationsmethode in Abschnitt 3.2.2. Wie in Abschnitt 2.7 festgelegt, erfolgt die Auslegung der Zellen über Energieinhalt und Leistung, wodurch neben den Herstellkosten auch Gewicht und Abmessungen der Zellen beeinflusst werden. Darüber hinaus hat die Zellauslegung Auswirkungen auf die Materialeinzelkosten der Modulkomponenten, da diese mit größeren Abmessungen und höheren Strömen der Zellen variieren. Die Herstellkosten für Modulverbinder, HV-Stecker, BMS, Auto-/Manual-Disconnect und Kühlung werden als konstant angenommen. Die dargestellten Zusammenhänge und Annahmen stammen aus den verwendeten Teilumfängen von „BatPac“ (Argonne National Laboratory, 2012). Bei den Fertigungskosten des HV-Speichers für Automobilhersteller werden ausschließlich die Modul- und Packkomponenten berücksichtigt. Die Fertigungskosten der zugekauften Zellen

sind bereits im Einkaufspreis der Zellen für Automobilhersteller und somit in den Materialkosten der erstellten Kostenkalkulation integriert.

#### **Aktuelle Herstellkosten des HV-Speichers und eine prognostizierte Entwicklung**

Mit 10 kWh Energieinhalt im HV-Speicher und 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine, was ungefähr 100 kW Spitzenleistung des HV-Speichers erfordert, wird beispielhaft ein typischer PHEV konfiguriert. In Abbildung 3.3 ist deutlich zu erkennen, dass die Speicherzellen den größten Anteil an den Herstellkosten für Automobilhersteller einnehmen. Den nächstgrößeren, jedoch deutlich geringeren Kostenanteil, bilden die Modulkomponenten, was darauf zurückzuführen ist, dass sich die Kosten eines Moduls in einem HV-Speicher mit der Modulanzahl multiplizieren. Alle anderen Bauteile sind pro HV-Speicher einmal vorhanden. Bis in das Jahr 2020 ist, nach (Wietschel & Roser, 2012) und (Roland Berger, 2011), eine Kostenreduktion für HV-Speicher in PHEVs von ungefähr 35 % zu erwarten, was hauptsächlich aus einer deutlichen Senkung der Zellkosten resultiert. Für das Jahr 2025 wird nahezu eine Halbierung der Kosten im Jahr 2011/12 laut (Lang, et al., 2011) prognostiziert. Die Gründe für die erwartete Reduzierung sind die steigende Nachfrage, die zunehmende Erfahrung in der Produktion und der technologische Fortschritt.

Eine Abschätzung der Herstellkosten für den HV-Speicher mit dem Kennwert €/kWh ist bei PHEVs nicht geeignet, da die Herstellkosten zusätzlich deutlich von der Leistung abhängen. Eine charakteristische Größe von Zellen bzw. HV-Speichern ist das Verhältnis von Leistung zu Energieinhalt, welches als P/E-Verhältnis bezeichnet wird. Das typische P/E-Verhältnis von PHEVs liegt zwischen fünf und 15 (Lowe, et al., 2010). Der üblicherweise größere Anstieg des Energieinhalts im Vergleich zur Leistung bei BEVs gegenüber PHEVs führt bei BEVs zu einem geringeren P/E-Verhältnis. Deswegen ist eine Kostenschätzung des HV-Speichers in BEVs mittels des Kennwerts €/kWh möglich, wie beispielsweise in (The Boston Consulting Group, 2010).

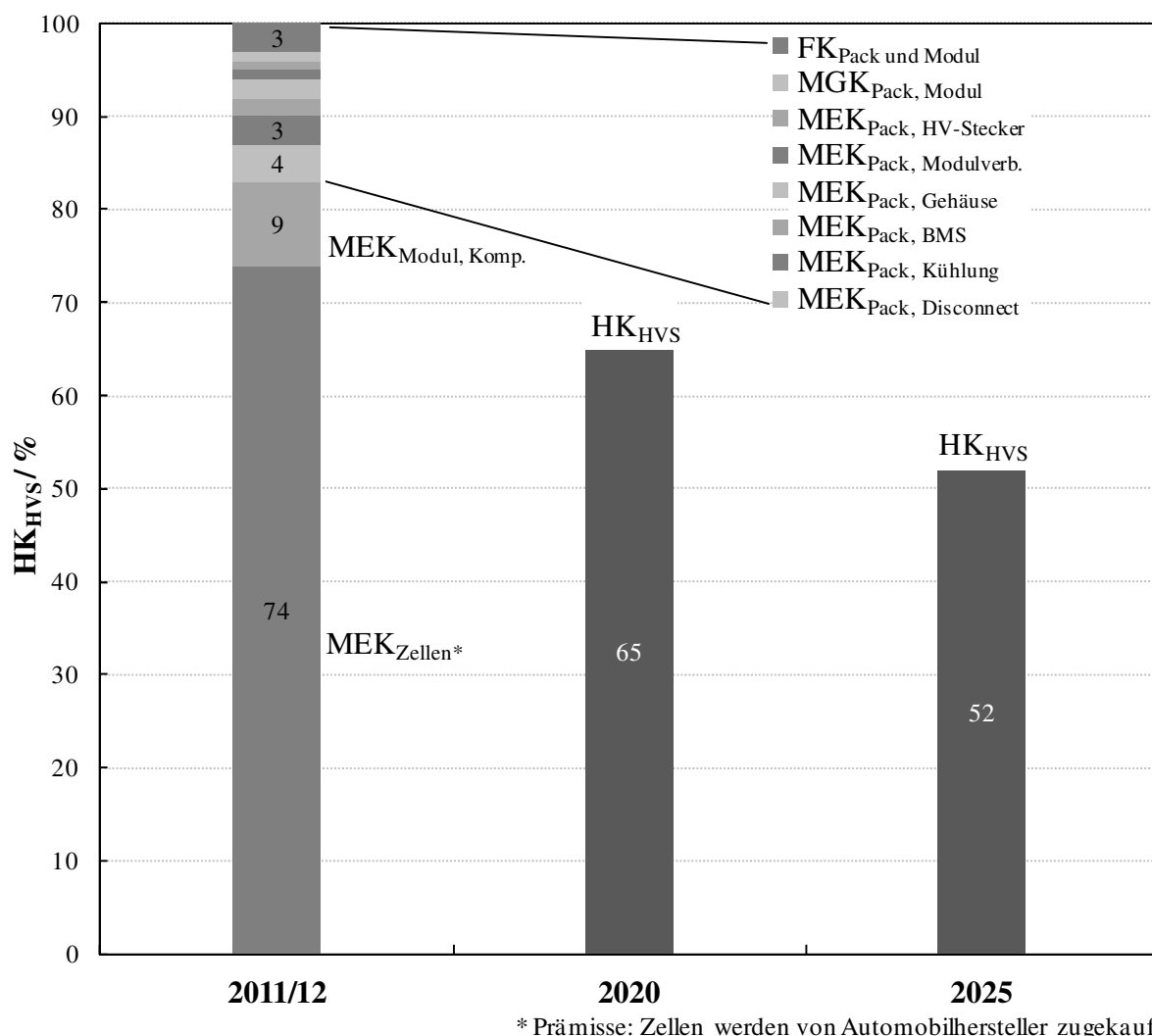


Abbildung 3.3: Aktuelle Aufteilung der Herstellkosten des HV-Speichers für Automobilhersteller im konfigurierten PHEV mit 10 kWh Energieinhalt und 100 kW Spitzenleistung, sowie eine prognostizierte Entwicklung der gesamten Herstellkosten bis in die Jahre 2020 und 2025, auf Basis von (Argonne National Laboratory, 2012), (Roland Berger, 2011), (Wietschel & Roser, 2012) und (Lang, et al., 2011)

#### 3.2.4 Kostenmodell der E-Maschine

Die E-Maschine ist eine weitere Komponente im Elektrifizierungsumfang eines PHEVs, um den elektrischen Antrieb zu ermöglichen. Über empirisch ermittelte Korrelationen zur Spitzenleistung als Auslegungsgröße werden die Materialgewichte der einzelnen Bauteile abgeleitet. Anschließend werden über Materialpreise die Materialkosten berechnet. Zusammen mit den Fertigungskosten ergeben sich die Herstellkosten für Automobilhersteller in Abhängigkeit der Spitzenleistung. Das Kostenmodell ist speziell für eine HSM konzipiert

und eignet sich für Kostenschätzungen in der frühen Entwicklungsphase. Dieser E-Maschinentyp ist im konfigurierten PHEV in der vorliegenden Arbeit in Abschnitt 2.7 definiert. Weitere Details des Kostenmodells sind in (Seisenberger, et al., 2012) beschrieben.

**Prämissen und Methode des Kostenmodells der E-Maschine**

Eine ABC-Analyse hinsichtlich der Wertigkeit der Bauteile identifiziert die Kostentreiber. Der Fokus des Kostenmodells für die frühe Entwicklungsphase liegt auf den Kostentreibern, die in Tabelle 3.2 mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell dargestellt sind.

Tabelle 3.2: Wesentliche Bauteile der E-Maschine (HSM) mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell

	<b>Typ / Material</b>	<b>Kostenfunktion</b>
Statorblech	Elektroblech	f (Leistung), Gewichtsanteil Aktivmasse
Statorwicklung	Kupfer	f (Leistung), Gewichtsanteil Aktivmasse
Rotorblech	Elektroblech	f (Leistung), Gewichtsanteil Aktivmasse
Magnete	NdFeB	f (Leistung), Gewichtsanteil Aktivmasse
Welle	Stahl	konstant
Gehäuse	Alu	f (Leistung)
Sonstiges (Resolver, Stecker, ...)	Div.	konstant

Die Skalierung der E-Maschine erfolgt über die Spitzenleistung (Shiau, et al., 2010), als charakteristische Auslegungsgröße, bei konstanter maximaler Drehzahl, wie in Abschnitt 2.7 definiert. Die Gewichte der wesentlichen Bauteile (Kostentreiber) der E-Maschine werden als Zwischenergebnis innerhalb des Kostenmodells über Korrelationen zur Spitzenleistung ermittelt, um anschließend auf die Materialeinzelkosten zu schließen. Der Zusammenhang von Spitzenleistung und Gewicht von Gehäuse und Aktivteilen wurde empirisch anhand von mehreren existierenden E-Maschinen eines vergleichbaren Typs ermittelt und mit physikalischen Zusammenhängen plausibilisiert. Die Gewichts zusammensetzung der einzelnen Bauteile der Aktivteile wird über typische, empirisch ermittelte Anteile aufgeteilt. (Seisenberger, et al., 2012)

In Abbildung 3.4 sind die Ergebnisse der empirischen Analyse dargestellt, die als Basis des Kostenmodells der E-Maschine dienen. Die Datenbasis der Regressionsanalysen ist mit sechs aktuell am Markt verfügbaren E-Maschinen gering und ist für zukünftige Analysen auszubauen, wie im Ausblick in Abschnitt 5.3 dargestellt. Für die vorliegende Arbeit ist die Datenbasis ausreichend, da die entwickelte Methodik im Vordergrund steht und diese beispielhaft angewendet wird.

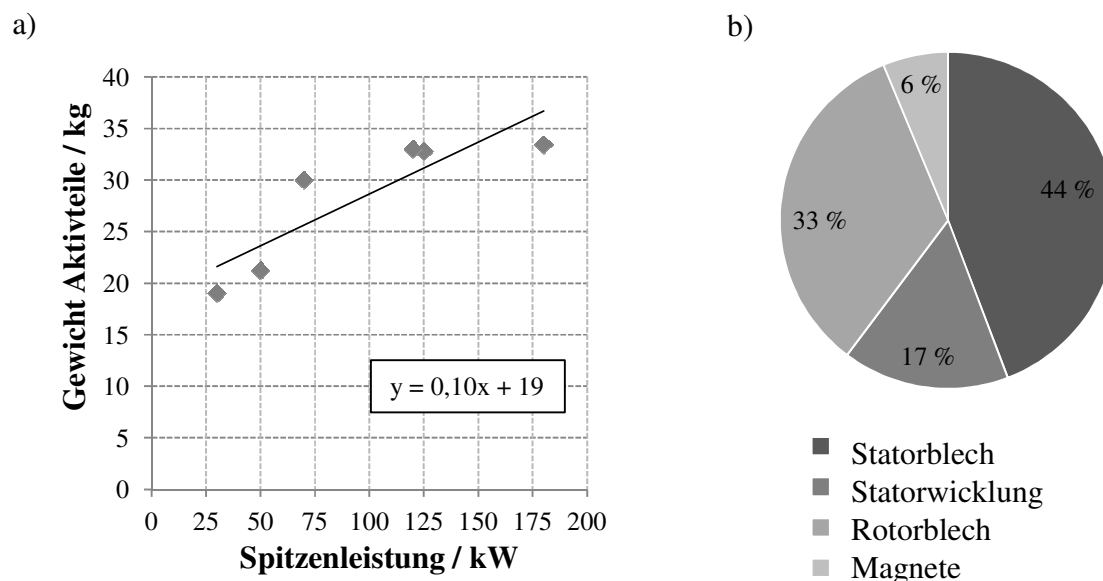


Abbildung 3.4: Ergebnisse der empirischen Analysen hinsichtlich des Aufbaus von existierenden E-Maschinen mit Permanentmagneten: a) Korrelation von Spitzenleistung und Gewicht der Aktivteile, b) Gewichts zusammensetzung der Aktivteile

Das Gewicht der Welle und sonstiger Bauteile sind in diesem Kostenmodell für die frühe Entwicklungsphase als konstant angenommen. Die Magnete werden von Automobilherstellern als Fertigteil zugekauft und können direkt verbaut werden. Das Elektroblech wird für Stator und Rotor zugeschnitten bzw. gestanzt. Das Ausgangsmaterial des Stators ist rechteckig und der innere Teil dient direkt als Ausgangsmaterial des Rotors. Für Stator, Rotor, Welle und Gehäuse werden entsprechende Verschnitte berücksichtigt, jedoch nicht für die Magnete und die Statorwicklung. (Reif, 2010) (Kampker, et al., 2012)

Eine Änderung der Materialmenge hat eine direkte Auswirkung auf die Materialeinzelkosten. Die Multiplikation des Gewichts der betrachteten Bauteile der E-Maschine mit den jeweiligen Materialpreisen ergibt die Materialeinzelkosten für Automobilhersteller. (Seisenberger, et al., 2012) Die Materialpreise im Kostenmodell wurden in Anlehnung an die veröffentlichten Rohstoffpreise der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe festgelegt (www.bgr.bund.de, 2013). Der Einkaufspreis für Magnete ist sehr volatil und stark von der Zusammensetzung sowie von den Eigenschaften abhängig (Zhang, et al., 2012). Im Kostenmodell ist ein Magnetpreis von 200 €/kg vorgegeben (Illiano, 2012). Die Material- und Einkaufspreise für Automobilhersteller bilden Eingangsgrößen des Kostenmodells und können angepasst werden. Die absoluten Fertigungskosten für eine permanent-erregte Synchronmaschine sind aus (Kampker, et al., 2012) entnommen und werden als konstant angenommen, innerhalb der Variationsgrenzen von 30 bis 160 kW Spitzenleistung.

**Aktuelle Herstellkosten der E-Maschine und eine prognostizierte Entwicklung**

Die Herstellkosten einer permanent-erregten Synchronmaschine für Automobilhersteller werden dominiert von den verbauten Magneten (Zhang, et al., 2012). Mit einem Anteil an den Herstellkosten von ungefähr 50 % verdeutlicht dies Abbildung 3.5 am Beispiel einer achsparallelen HSM für eine elektrische Antriebsachse in einem PHEV mit 90 kW Spitzenleistung. Die anderen Bauteile haben einen Kostenanteil um die 10 % oder darunter. Die Fertigungskosten bilden bei dieser PHEV Konfiguration einen Kostenanteil von 12 %. Laut (National Research Council of the National Academics, 2011) ist für das Jahr 2020 eine Kostenreduzierung von ungefähr 8 % zu erwarten und bis 2025 weitere 5 % bezogen auf die Herstellkosten im Jahr 2011/12.

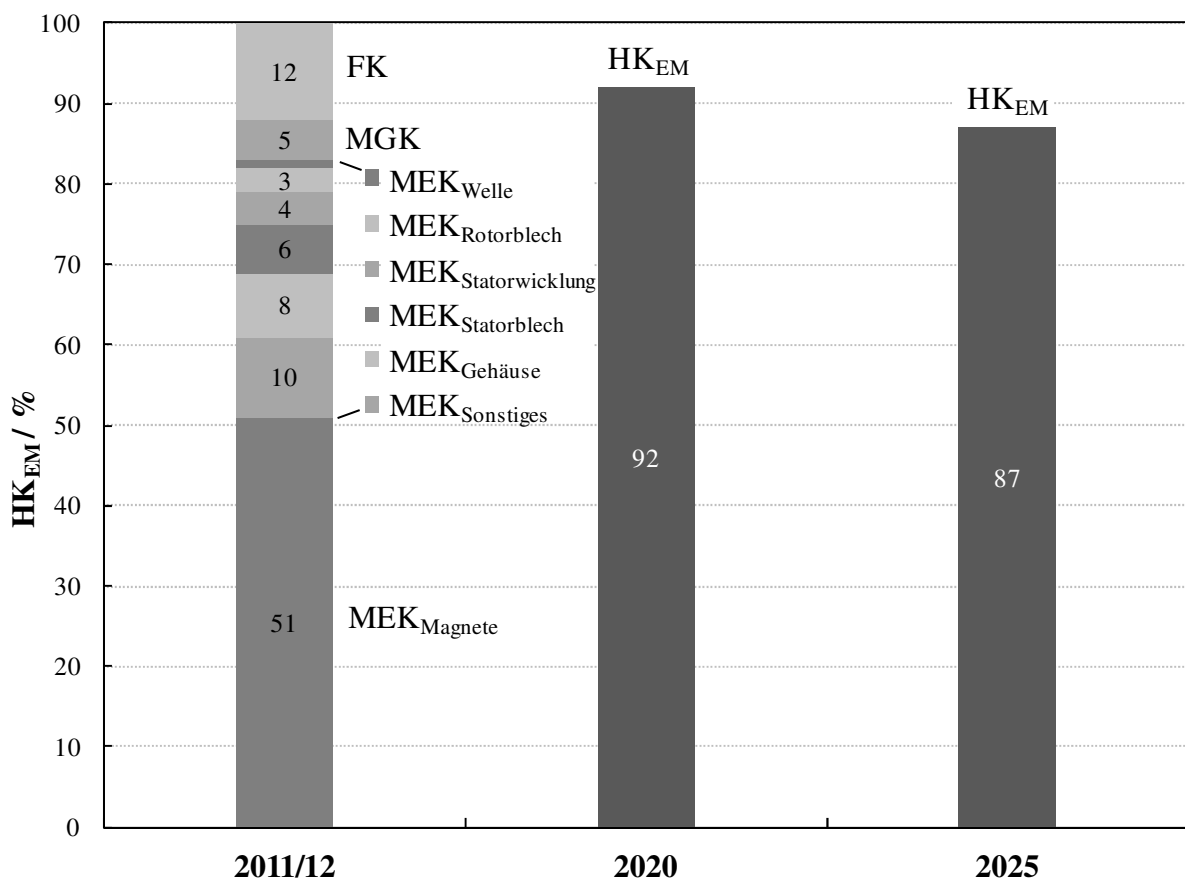


Abbildung 3.5: Aktuelle Aufteilung der Herstellkosten der E-Maschine für Automobilhersteller im konfigurierten PHEV mit 90 kW Spitzenleistung, sowie eine prognostizierte Entwicklung der gesamten Herstellkosten bis in die Jahre 2020 und 2025, auf Basis von (Kampker, et al., 2012), (Argonne National Laboratory, 2012), (Illiano, 2012) und (National Research Council of the National Academics, 2011)

### 3.2.5 Kostenmodell der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik besteht aus einem Umrichter und einem DC/DC-Wandler. Die Basis für die Werte des Kostenmodells bilden Erkenntnisse aus (Graham, 2001) und für die Prognosen in die Jahre 2020 und 2025 gilt (National Research Council of the National Academics, 2011).

#### Prämissen und Methode des Kostenmodells der Leistungselektronik

Der Aufbau des Umrichters und des DC/DC-Wandlers ist in Abschnitt 2.5.4 beschrieben. Die kostenintensivsten Bauteile sind das Leistungsmodul mit Hochleistungs-Halbleiterschaltungen und der Zwischenkreiskondensator im Umrichter (Cebulski, 2011). Während E-Maschinen und deren Bestandteile auf „ausgewogenen“ Märkten hinsichtlich Angebot und Nachfrage gehandelt werden, unterscheidet sich die Marktsituation für den Umrichter und dessen Bauteile, vor allem hinsichtlich der IGBTs. Aufgrund der geringen Nachfrage in den letzten Jahren sind nur wenige Hersteller in der Lage Bauteile des Umrichters nach den Anforderungen der Automobilindustrie zu produzieren. Die Preise für Automobilhersteller hierfür werden stark von dem geringen Angebot und der steigenden Nachfrage beeinflusst. (Seisenberger, et al., 2012) Ein weiterer Unterschied bei elektronischen Bauteilen sind die hohen Ausschusskosten, die neben den im Maschinenbau berücksichtigten Material- und Fertigungskosten einen wesentlichen Einfluss auf die Ermittlung der Herstellkosten in der frühen Entwicklungsphase haben (Zirkler, 2010). Für das Kostenmodell wird angenommen, dass die Leistungselektronik von Automobilherstellern zugekauft wird und die Basis der Kostenschätzung bilden die Erkenntnisse aus (Graham, 2001), in Abhängigkeit der Spitzenleistung. Die wesentlichen Bestandteile der Leistungselektronik mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell zeigt Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Wesentliche Bestandteile der Leistungselektronik mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell

	Typ / Material	Kostenfunktion
Umrichter	IGBT	f (Leistung)
DC/DC-Wandler	12/14 V ⇔ Hochvolt	f (Leistung)

#### Aktuelle Herstellkosten der Leistungselektronik und eine prognostizierte Entwicklung

Die Herstellkosten der Leistungselektronik für Automobilhersteller werden hauptsächlich durch den Umrichter bestimmt. Wie in Abbildung 3.6 dargestellt, resultieren ca. 86% der Herstellkosten aus dem Umrichter und die verbleibenden 14 % aus dem DC/DC-Wandler. Die Werte gelten für den konfigurierten PHEV mit 10 kWh Energieinhalt des HV-Speichers und 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine, was ungefähr 98 kW Spitzenleistung des Umrichters erfordert. Die ausgewiesenen Herstellkosten für den Umrichter schwanken in Studien sehr

stark, teilweise sogar um bis zu 200 % (Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011). In diesem Kostenmodell ist eine aus (National Research Council of the National Academics, 2011) zu erwartende Kostenreduzierung der Leistungselektronik für permanent-erregten Synchronmaschinen von über 20 % bis in das Jahr 2020 zugrunde gelegt. Laut (Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011) existieren Studien, die aufgrund einer möglichen Serienproduktion sogar von bis zu 70 % Reduzierung ausgehen.

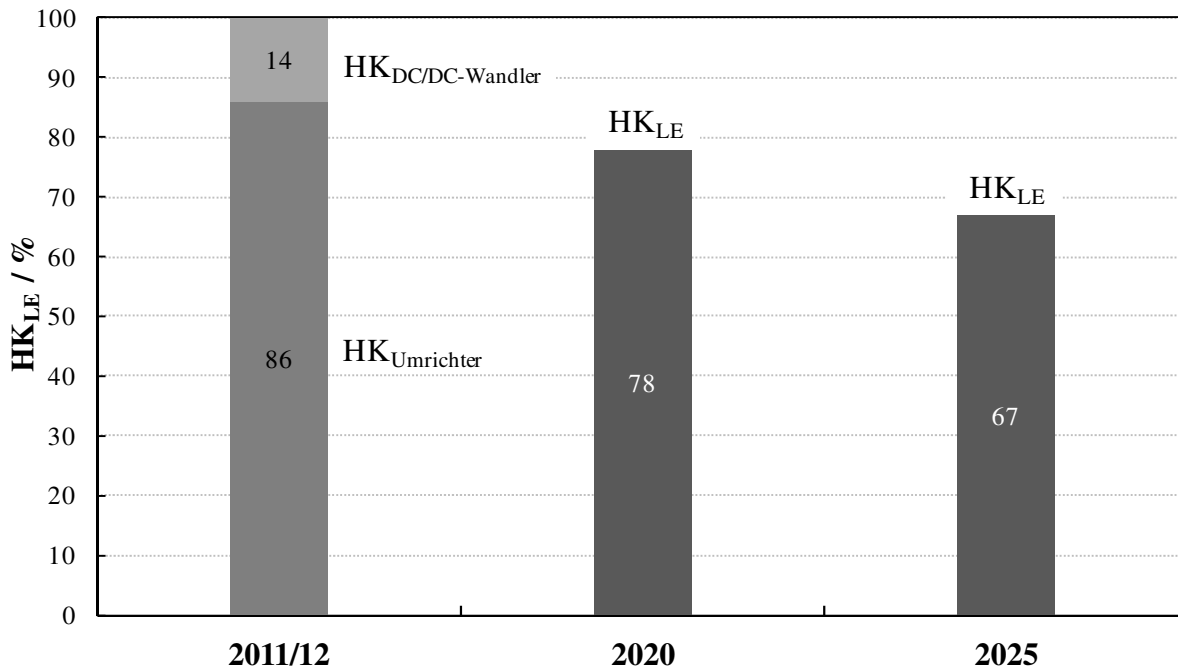


Abbildung 3.6: Aktuelle Aufteilung der Herstellkosten der Leistungselektronik für Automobilhersteller im konfigurierten PHEV mit 98 kW Spitzenleistung des Umrichters, sowie eine prognostizierte Entwicklung der gesamten Herstellkosten bis in die Jahre 2020 und 2025, auf Basis von (Graham, 2001) und (National Research Council of the National Academics, 2011)

#### 3.2.6 Kostenmodell der weiteren Komponenten

Neben HV-Speicher, E-Maschine und Leistungselektronik sind durch die Elektrifizierung in PHEVs weitere Komponenten erforderlich und konventionelle Komponenten werden modifiziert, wie in Tabelle 3.4 aufgelistet. Die angenommen Typen bzw. die Ausprägung der weiteren Komponenten des Elektrifizierungsumfangs sind in Abschnitt 2.7 für den konfigurierten, straßengekoppelten PHEV definiert. Im Folgenden werden die Herstellkosten für Automobilhersteller hergeleitet und mit Quellen belegt.



Tabelle 3.4: Weitere Komponenten in einem straßengekoppelten PHEV mit elektrischer Hinterachse mit den zugrunde gelegten Kostenfunktionen im Modell

	<b>Typ / Funktion</b>	<b>Kostenfunktion</b>
Ladegerät	ein-phasig	konstant
E-Getriebe	1-Gang	konstant
HV-Kabel	HV-Kabelbaum, Ladekabel	konstant
modifiziertes Bremsystem	rekuperierfähiges Bremsystem, elektrische Unterdruckpumpe	konstant
modifiziertes Zustartsystem	HV-Starter-Generator (E-Maschine, Umrichter)	konstant
modifiziertes Klima-, Heiz- und Kühlkonzept	Klimatisierung und Heizen Innenraum, Kühlung EM / LE	konstant
modifizierter Tank	Drucktank	konstant
Modifikationen Fahrwerk und Karosserie	Anpassungen	konstant

#### **Details und Methoden der Kostenmodelle der weiteren Komponenten**

In einem PHEV wird ein **Ladegerät** installiert, um den HV-Speicher am Stromnetz zu laden. Basis des Kostenmodells ist ein-phasiges AC-Laden. Laut (Graham, 2001) liegen die Herstellkosten für ein Ladegerät im Jahr 2011/12 bei ungefähr 300 €. Nach (National Research Council of the National Academics, 2011) ist für Steuerelektroniken in elektrifizierten Fahrzeugen in den nächsten acht Jahren eine Reduzierung von ca. 20 % zu erwarten und bis in das Jahr 2025 weitere 15 % bezogen auf die aktuellen Herstellkosten.

Für die Umsetzung einer elektrischen Hinterachse in einem straßengekoppelten PHEV ist ein **Getriebe** notwendig, welches laut der PHEV-Konfiguration in Abschnitt 2.7 einem einfachen Getriebe mit einem Gang entspricht. Die Herstellkosten für ein Getriebe in einem konfigurierten BEV Small in (Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011), was ähnlich zu der elektrischen Achse im konfigurierten PHEV ist, betragen etwa 140 €. Laut dieser Studie ist für das E-Getriebe zukünftig keine Reduzierung zu erwarten. Falls für einen PHEV eine Kupplung integriert wird, steigen die Herstellkosten.

Die Länge der **HV-Kabel** zur Verbindung der elektrischen Komponenten ist topologiespezifisch. In diesem Kostenmodell für die frühe Entwicklungsphase werden die

Herstellkosten jedoch als konstant angenommen und sind abgeleitet aus den HV-Kabeln eines HEVs für ca. 150 € (National Research Council of the National Academics, 2011). Zusätzlich wird ein Ladekabel mit ca. 120 € berücksichtigt (Graham, 2001). Durch die zusätzlichen Komponenten in einem PHEV gegenüber einem HEV, wie beispielsweise das Ladegerät, sind für HV-Kabel höhere Herstellkosten zu erwarten. Die Prognosen für die Jahre 2020 und 2025 sind aus (National Research Council of the National Academics, 2011) entnommen.

Für ein rekuperationsfähiges Bremssystem und eine elektrische Unterdruckpumpe resultieren zusätzliche Herstellkosten für das **Bremssystem** von ungefähr 190 € laut (National Research Council of the National Academics, 2011), mit einer prognostizierten Kostenreduzierung bis in das Jahr 2020 von 6%.

Der **HV-Starter-Generator** besteht im Wesentlichen aus einer E-Maschine und einem Umrichter. Mit dem vorgestellten Kostenmodell der beiden Komponenten ergeben sich Herstellkosten für Automobilhersteller bei einer Auslegung mit 10 kW Spitzenleistung von ungefähr 700 €. Nach Abzug der zu ersetzenden konventionellen Komponenten aus (National Research Council of the National Academics, 2011) resultieren zusätzliche Herstellkosten von ca. 630 €. Die Prognosen für die Jahre 2020 und 2025 sind analog der für Leistungselektronik und der E-Maschine.

Für ein **modifiziertes Klima- und Heizkonzept** im Fahrzeug und ein **Kühlkonzept** für E-Maschine und Leistungselektronik sind nach (National Research Council of the National Academics, 2011) und (Graham, 2001) ungefähr 320 € zu berücksichtigen. In den gleichen Quellen wird bis in das Jahr 2020 eine Reduzierung um 16 % und bis 2025 um weitere 8 % bezogen auf die aktuellen Herstellkosten angenommen. Die Kühlung des HV-Speichers ist in dessen Kostenmodell berücksichtigt.

Für einen Drucktank anstatt eines konventionellen **Tanks** sind in (Gorbea Diaz, 2011) ca. 170 € im moderaten Szenario für das Jahr 2015 vorgesehen, die in der vorliegenden Arbeit für 2011/12, 2020 und 2025 angenommen werden.

**Modifikationen an Karosserie und Fahrwerk** werden in (National Research Council of the National Academics, 2011) mit ungefähr 150 € zusätzlicher Herstellkosten für einen HEV kalkuliert. Bis in das Jahr 2020 ist eine Reduzierung von 16 %, sowie weitere 6 % bis 2025 bezogen auf die aktuellen Herstellkosten vorgesehen, was in das Kostenmodell implementiert wurde (National Research Council of the National Academics, 2011). Für einen PHEV könnten diese Modifikationen umfangreicher ausfallen, aufgrund der größeren und schwereren Komponenten.

#### **Aktuelle Herstellkosten der weiteren Komponenten und eine prognostizierte Entwicklung**

Die Kostenaufteilung der weiteren Komponenten ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Da die Herstellkosten dieser Komponenten unabhängig von Leistung und Energieinhalt modelliert sind, bilden diese einen fixen Grundbetrag an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller bei jeder PHEV-Konfiguration mit einer elektrischen Hinterachse als Antriebstopologie. Der HV-Starter-Generator bildet mit fast 30 % die größte Position, gefolgt von den Ausgaben für ein Ladegerät und einem modifizierten Klima- Heiz- und Kühlkonzept mit jeweils ungefähr 15 %. Nach den HV-Kabeln mit 12 % haben die anderen Komponenten

jeweils einen Anteil unter 10 %. Für das Jahr 2020 ist insgesamt eine Reduzierung der Herstellkosten für Automobilhersteller von ungefähr 12 % und für das Jahr 2025 zusätzliche 7 % der weiteren Komponenten des Elektrifizierungsumfangs eines PHEVs prognostiziert.

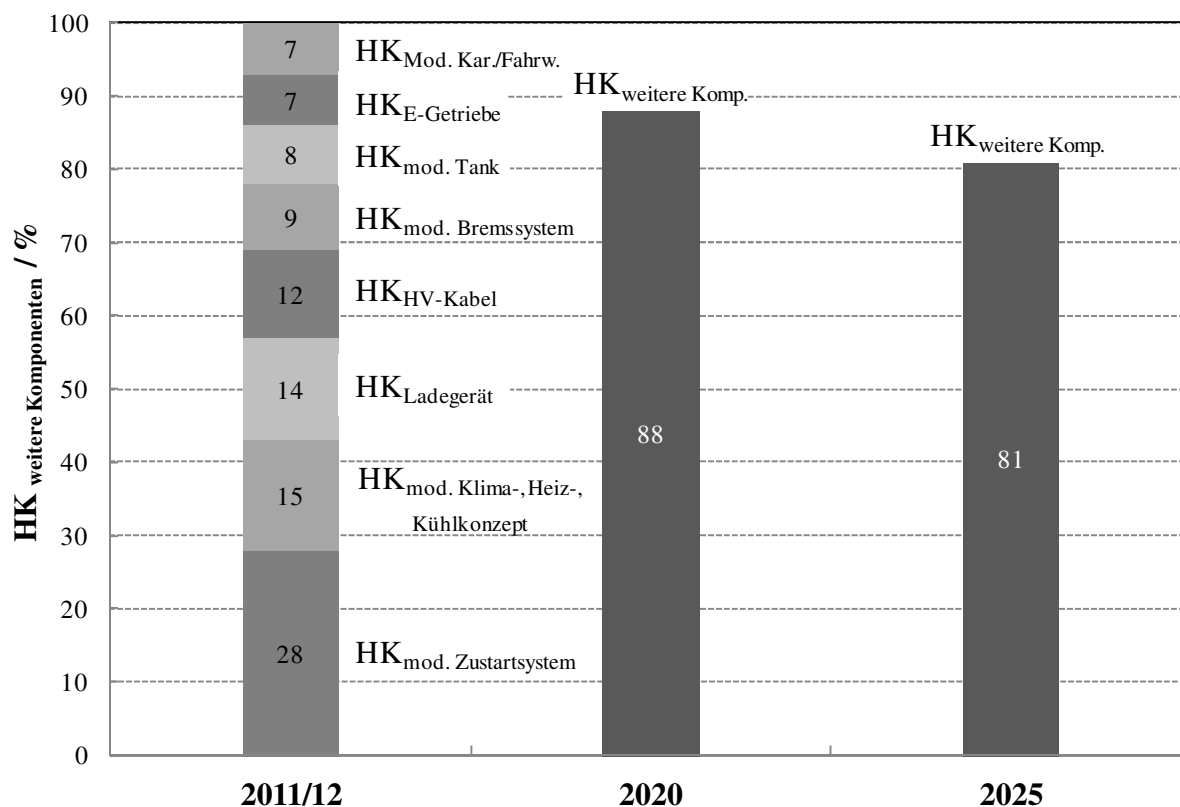


Abbildung 3.7: Aktuelle Aufteilung der Herstellkosten der weiteren Komponenten für Automobilhersteller im konfigurierten PHEV, sowie eine prognostizierte Entwicklung der gesamten Herstellkosten bis in die Jahre 2020 und 2025, auf Basis von (Graham, 2001), (National Research Council of the National Academics, 2011), (Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011) und (Gorbea Diaz, 2011)

#### 3.2.7 Mehrkosten eines PHEVs aus Käufersicht

Die Summe aus den Ergebnissen der Kostenmodelle ergeben die zusätzlichen Herstellkosten eines PHEVs gegenüber einem ICEV für Automobilhersteller. Diese werden im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben und in der vorliegenden Arbeit gleichgesetzt, wie in Abschnitt 3.2.1 definiert. In Abbildung 3.8 ist die Zusammensetzung der Mehrkosten für Käufer dargestellt, basierend auf dem Elektrifizierungsumfang eines straßengekoppelten PHEVs mit 10 kWh Energieinhalt im HV-Speicher und 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine. Der HV-Speicher bildet mit 60 % die dominierende Komponente. Leistungselektronik und E-Maschine sind mit jeweils 8 % Kostenanteil ungefähr gleich. Die weiteren Komponenten bilden mit 24 % einen relativ großen Anteil. Diese stellen einen fixen

Grundbetrag an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller unabhängig von Energieinhalt und Leistung dar. Unter Berücksichtigung der Prognosen für die einzelnen Elektrifizierungsumfänge in den jeweiligen Kostenmodellen wird für die gesamten Mehrkosten für Käufer eine Reduzierung bis in das Jahr 2020 um 27 % erwartet und bis in das Jahr 2025 um weitere 11 % bezogen auf die aktuellen Mehrkosten.

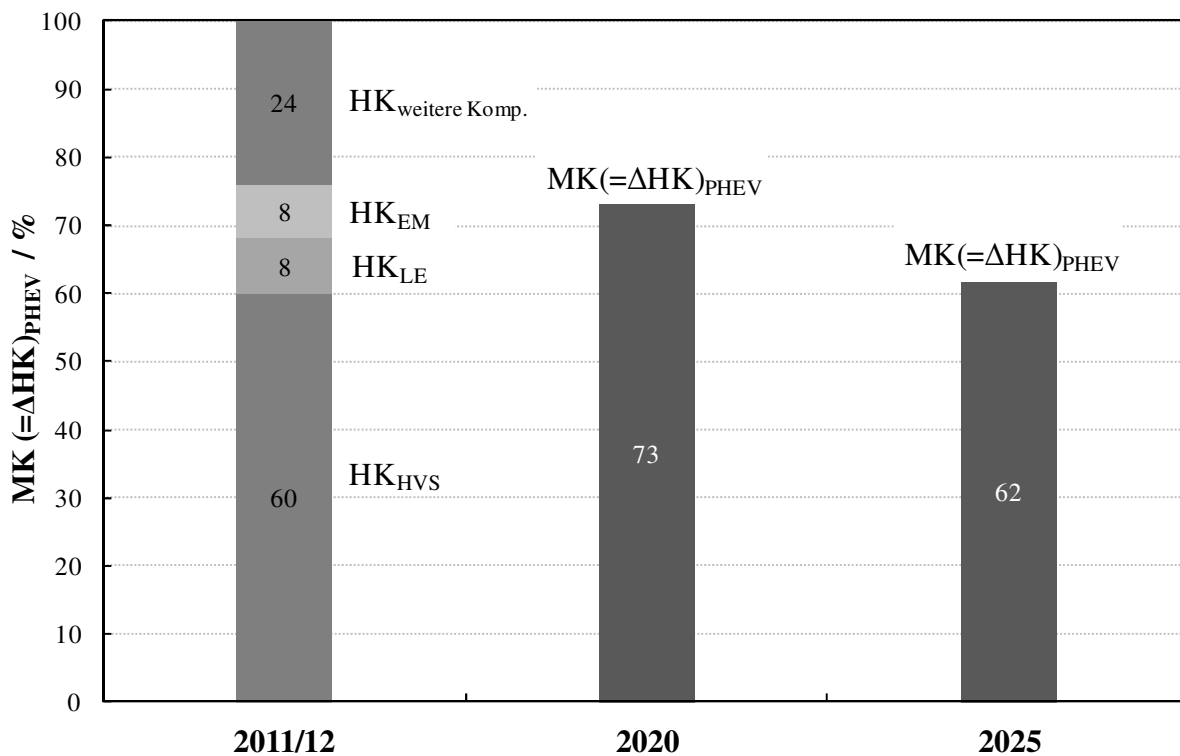


Abbildung 3.8: Aktuelle Zusammensetzung der Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV, sowie eine prognostizierte Entwicklung der gesamten Mehrkosten bis in die Jahre 2020 und 2025 (Werte aus den vorgestellten Kostenmodellen für den konfigurierten PHEV mit 10 kWh Energieinhalt im HV-Speicher und 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine)

Auf Basis der Kostenmodelle in MS Excel für jede Komponente des Elektrifizierungsumfanges werden für alle möglichen Kombinationen von Energieinhalt und Leistung im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs die jeweiligen Mehrkosten für Käufer ermittelt. Die resultierenden Kombinationen führen zu möglichen PHEV-Konzepten in diesem Lösungsraum mit Spitzenleistungen der E-Maschine von 30 bis 160 kW in 5 kW-Schritten und Energieinhalten des HV-Speichers von 3 bis 30 kWh in 1 kWh-Schritten. Zwischen den simulierten PHEV-Konzepten wird interpoliert.

In Abbildung 3.9 sind die Ergebnisse der vorgestellten Kostenmodelle für alle Elektrifizierungsumfänge im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs als Mehrkosten für Käufer gegenüber einem ICEV dargestellt. Die Ergebnisse liegen für das Jahr 2011/12 zwischen 6.000 und 14.000 €, abhängig vom installierten E-System. In der Fläche ist der fixe

Grundbetrag an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller zu erkennen und der Anstieg über Energieinhalt und Leistung. Das Verhältnis von Leistung zu Energieinhalt eines HV-Speichers (P/E-Verhältnis) ist bei PHEVs typischerweise kleiner als 15, weshalb andere Bereiche in den Abbildungen nicht dargestellt werden (Lowe, et al., 2010). Die Wirtschaftlichkeitsanalysen in der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die nicht dargestellten Bereiche für eine optimale Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs nicht relevant sind. (Ried, et al., 2013b)

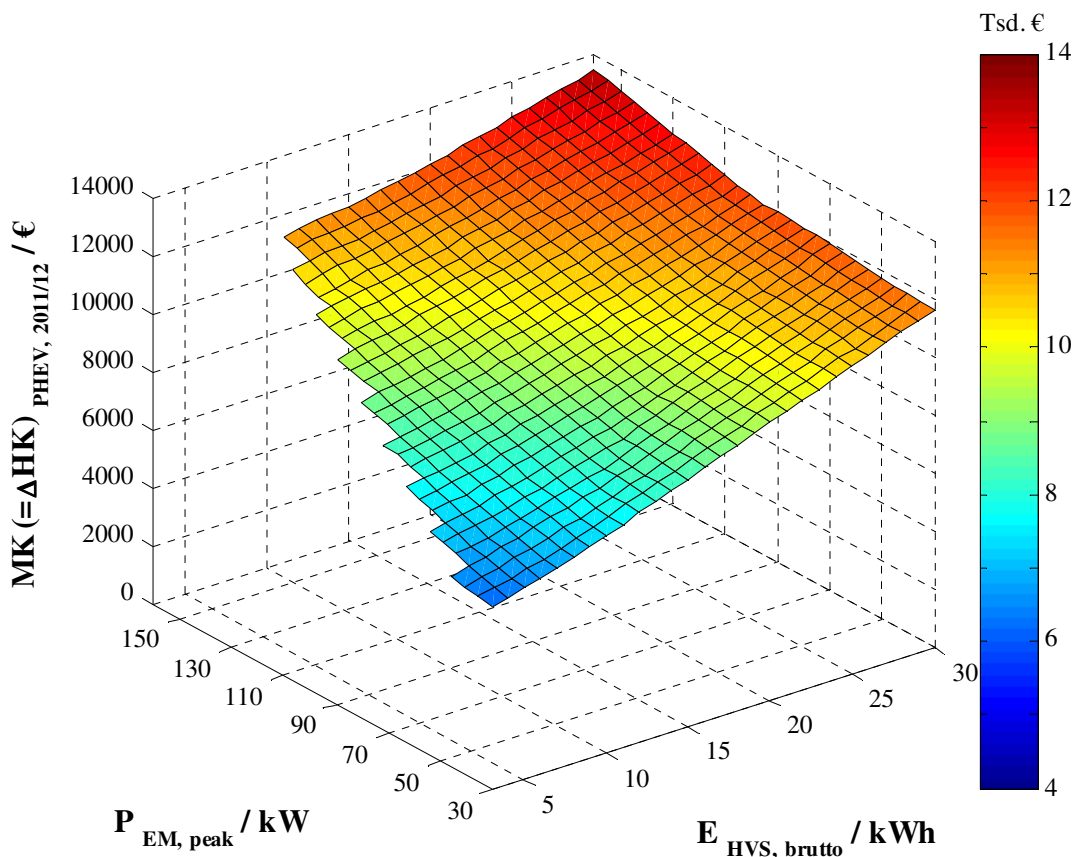


Abbildung 3.9: Darstellung der aktuellen Mehrkosten im Jahr 2011/12 für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV als Fläche im P/E-Lösungsraum (Werte aus den vorgestellten Kostenmodellen)

Die gleichen Ergebnisse, die in Abbildung 3.9 als Fläche dargestellt sind, werden in Abbildung 3.10 als Höhenlinien über Energieinhalt und Spitzenleistung abgebildet, bzw. als Schnitte bei definierten Spitzenleistungen über dem Energieinhalt. Im Vergleich zum Jahr 2011/12 wird für die Jahre 2020 und 2025 ein ähnlicher Verlauf der Mehrkosten prognostiziert, jedoch auf einem geringeren, absoluten Niveau. Es sinkt der fixe Grundbetrag und der Anstieg über Leistung und Energieinhalt verringert sich. Ein PHEV mit beispielsweise einem HV-Speicher von 10 kWh Energieinhalt und einer E-Maschine von 90 kW Spitzenleistung kostet für Käufer aktuell ungefähr 9.000 € mehr als ein ICEV. Bis in

das Jahr 2020 wird eine Reduzierung gemäß den vorgestellten Kostenmodellen um 26 % prognostiziert, was zu Mehrkosten für Käufer von ca. 6.500 € führt. Laut den zugrunde gelegten Prognosen in den entwickelten Kostenmodellen sinken die Mehrkosten für Käufer bis in das Jahr 2025 um weitere 12 % bezogen auf den aktuellen Wert. Daraus ergeben sich für den beispielhaft konfigurierten PHEV ungefähr 5.500 €.

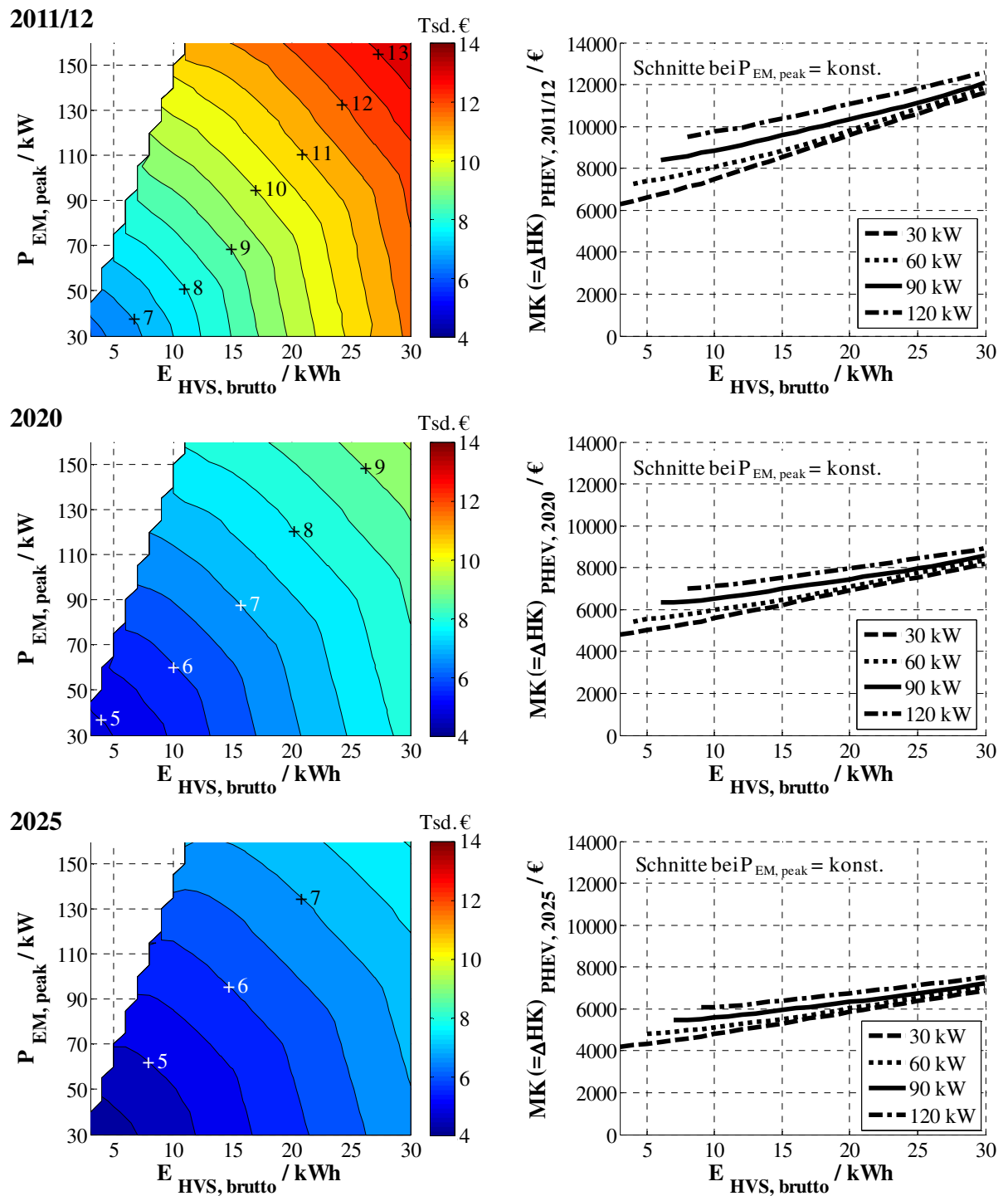


Abbildung 3.10: Darstellung der aktuellen Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV als Höhenlinien und Schnitte im P/E-Lösungsraum, sowie eine prognostizierte Entwicklung der Mehrkosten bis in die Jahre 2020 und 2025

Mit den vorgestellten Kostenmodellen werden in der frühen Entwicklungsphase die zusätzlichen Herstellkosten eines PHEVs gegenüber einem ICEV für Automobilhersteller

abgeschätzt, die im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben werden. Durch die modulare Gestaltung der Kostenmodelle ist es möglich, weitere Komponententypen zu integrieren. Eingangsgrößen der Modelle, wie beispielsweise Materialpreise, können angepasst und aktualisiert werden. Die Kostenanalysen sind Bestandteil der Wirtschaftlichkeitsanalysen von PHEVs aus Käufersicht und ermöglichen den Vergleich unterschiedlicher PHEV-Konfigurationen. Ein solcher relativer Vergleich ist mit derartigen Modellen mit wenigen Parametern das Ziel der frühen Entwicklungsphase. Für eine detailliertere, absolute Betrachtung eines einzelnen Konzepts im weiteren Verlauf der Entwicklung sind weitere Parameter und Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Beispiele dafür sind die Marktsituation und die Verhandlungsposition des Automobilherstellers, wobei diese nur schwer modelliert werden können.

### 3.3 Verbrauchsmodell und -analyse

Der Verbrauch wird als Energiebedarf bei der Nutzung eines PHEVs definiert und entspricht dem Kraftstoff- und Stromverbrauch im Vergleich zu einem ICEV. Der reduzierte Kraftstoffverbrauch führt trotz zusätzlichem Stromverbrauch eines PHEVs gegenüber einem ICEV zu einer gesamthaften Verbrauchskostenreduzierung. Diese stellt einen Vorteil von PHEVs aus Käufersicht dar. In den folgenden Abschnitten wird der Verbrauch exakt definiert und das Modell für die Ermittlung beschrieben. Anschließend werden im gesetzlichen Fahrzyklus und im Realbetrieb für verschiedene Fahrer der Verbrauch und die daraus resultierenden Verbrauchskosten im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs ermittelt.

#### 3.3.1 Definition und Charakterisierung des Verbrauchs

Der Vorteil für Käufer eines PHEVs ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs gegenüber ICEVs, aufgrund dessen sich auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Betriebs eines Fahrzeugs verringern. Abhängig von wirtschaftlichen und steuerlichen Randbedingungen geht die Einsparung des Kraftstoffverbrauchs einher mit einer Reduzierung der Verbrauchskosten für Käufer eines PHEVs. (Ried, et al., 2013b) Weitere Vorteile eines PHEVs, wie beispielsweise gesteigerte Fahrleistungen durch das dynamische, elektrische System, werden nicht betrachtet. Darüber hinaus werden die Einsparungen ausschließlich für den Fahrbetrieb definiert und beinhalten keine Well-To-Wheel-Betrachtungen mit Vorkette, Herstellung und Recycling, wie es beispielsweise in (Shiau, et al., 2009) und (Diez & Kohler, 2010) vorgenommen wird. Die Basis bilden der Neue Europäische Fahrzyklus, abgekürzt als NEFZ, nach der ECE-Norm (Amtsblatt der Europäischen Union, 2012) und aufgezeichnete Realfahrten aus dem euroFOT-Projekt ([www.eurofot-ip.eu](http://www.eurofot-ip.eu), 2012).

#### Verbrauch (Kraftstoff und Strom)

Für die Ermittlung des Verbrauchs eines PHEVs werden folgende Variablen definiert und anschließend genauer erläutert:

- $KV_{ICEV}$  = Kraftstoffverbrauch eines ICEVs in l/100km,
- $KV_{HEV}$  = Kraftstoffverbrauch eines HEVs in l/100km,



- $KV_{\text{PHEV}}$  = Kraftstoffverbrauch eines PHEVs in l/100km,
- $KV_{\text{PHEVh}}$  = Kraftstoffverbrauch eines PHEVs im hybriden Betriebsmodus in l/100km,
- $SV_{\text{PHEVe}} = SV_{\text{PHEV}}$  = Stromverbrauch eines PHEVs im elektrischen Betriebsmodus über die aufgezeichnete Strecke in Wh,
- $SG_{\text{PHEV}}$  = energetischer Substitutionsgrad aufgrund des elektrischen Betriebsmodus eines PHEVs in %.

Die Variablen für die verschiedenen Antriebskonzepte und Betriebsmodi gelten generell im Realbetrieb. In der Zyklusanalyse wird im Index der jeweilige Fahrzyklus ergänzt. Ein PHEV kann generell rein elektrisch oder in einem hybriden Betriebsmodus gefahren werden. Für die Betriebsmodi eines PHEVs gilt folgende Definition: Im elektrischen Fahrbetrieb wird kein Kraftstoff verbraucht, da der Verbrennungsmotor nicht in Betrieb ist. Im hybriden Fahrbetrieb wird der Energieinhalt im HV-Speicher über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten, woraus kein Stromverbrauch resultiert, ähnlich wie in einem HEV (Shiau, et al., 2009). Für die Analyse im gesetzlichen Fahrzyklus wird darüber hinaus zwischen Charge-Sustaining (CS) und Charge-Depleting (CD) unterschieden. Die Begriffe werden in Abschnitt 4.3.5 genau erläutert. Der energetische Substitutionsgrad beschreibt den Energieanteil der gesamten erforderlichen Energie, der in einem PHEV rein mit dem elektrischen System abgedeckt werden kann und somit dafür kein Kraftstoff notwendig ist. Diese Größe ist für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs eines PHEVs notwendig, um den elektrischen und hybriden Betriebsmodus zu berücksichtigen. (Ried, et al., 2013a)

In Abhängigkeit vom installierten Energieinhalt ist der prinzipielle Verlauf der relevanten Verbräuche in Abbildung 3.11 dargestellt. Für die rein elektrische Bewältigung der Fahraufgabe ist eine ausreichende Leistung als Prämisse vorausgesetzt. Der Kraftstoffverbrauch eines HEVs, typischerweise mit geringem Energieinhalt im HV-Speicher, liegt unter dem des ICEVs. HEV-Funktionen können dargestellt werden, wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert. Der Auslegungsbereich eines PHEVs beginnt typischerweise bei einem etwas höheren Energieinhalt im HV-Speicher. Das Fahrzeuggewicht nimmt aufgrund des größeren E-Systems mit zunehmendem Energieinhalt zu, weshalb der Stromverbrauch im elektrischen Betriebsmodus und der Kraftstoffverbrauch im hybriden Betriebsmodus eines PHEVs steigen. Der hybride Betriebsmodus eines PHEVs ist ähnlich zu dem Betriebsmodus eines HEVs, welcher ausschließlich in diesem Modus gefahren wird, da keine Möglichkeit existiert den Energiespeicher im HEV über eine Ladesteckdose zu laden (Shiau, et al., 2009). Bei einer unterstellten Nutzung mit regelmäßigem Laden des HV-Speichers steigt der Substitutionsgrad des PHEVs anfangs steil an, da bereits mit geringem Energieinhalt einige Fahrtanteile elektrisch gefahren werden und somit ein wesentlicher Anteil der Energie substituiert wird. Der Graph flacht bei höherem Energieinhalt ab (Sättigung), da oft schon wieder geladen wird, obwohl der HV-Speicher nicht komplett entladen wurde. Dazu passend resultiert der typische Verlauf des Kraftstoffverbrauchs eines PHEVs, unter Berücksichtigung des hybriden und elektrischen Betriebsmodus, in einer starken Reduzierung bei kleinen Energieinhalten und anschließender Sättigung. (Ried, et al., 2013b) (Ried, et al., 2013a) Für die Analyse im NEFZ wird statt dem Substitutionsgrad eine elektrische Reichweite ermittelt. Die Verrechnung in

einer definierten Formel nach der ECE-Norm führt zu einem ähnlichen Verlauf des Kraftstoffverbrauchs eines PHEVs über dem Energieinhalt. Details zu den Kurvenverläufen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

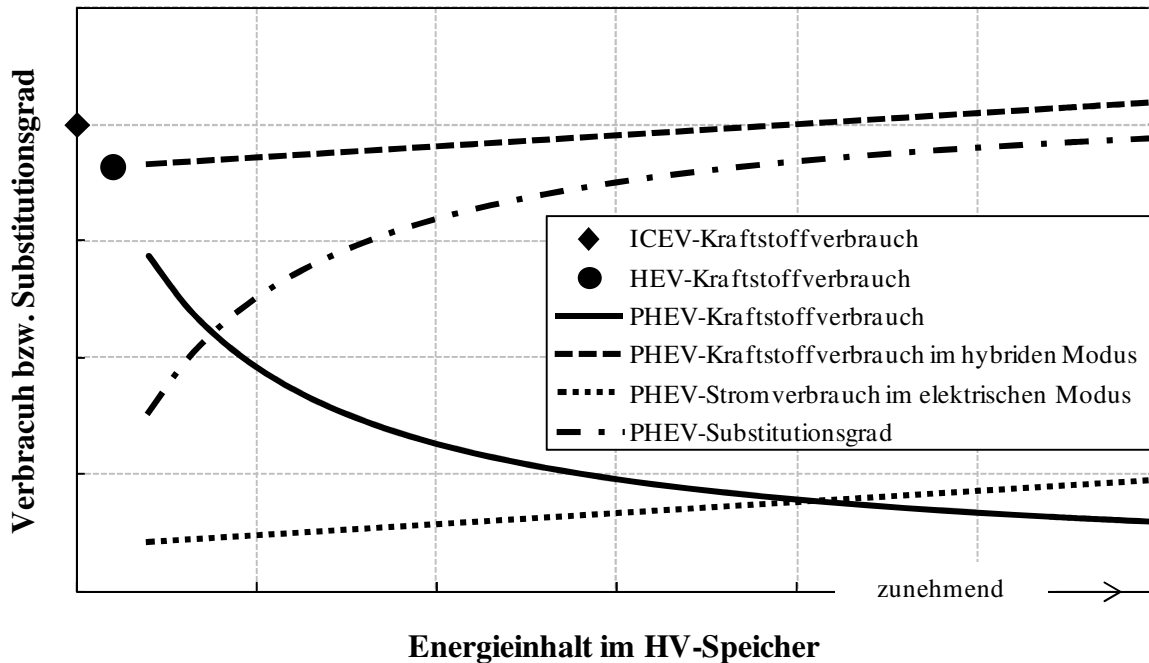


Abbildung 3.11: Darstellung des prinzipiellen Verlaufs von Verbrauch und Substitutionsgrad bei unterstellter Nutzung für verschiedene Antriebskonzepte und Betriebsmodi über dem Energieinhalt (ausschließlich energetische Zustarts bei der Nutzung von PHEVs angenommen aufgrund ausreichender elektrischer Leistung für die Fahraufgabe); in Anlehnung an: (Ried, et al., 2013a)

#### Verbrauchskosten

Für die Ermittlung der Verbrauchskosten eines PHEVs werden folgende Variablen definiert und anschließend genauer erläutert:

- $KP_{\text{Jahr}}$  = Kraftstoffpreis im jeweiligen Jahr in €,
- $SP_{\text{Jahr}}$  = Strompreis im jeweiligen Jahr in €,
- $VK_{\text{ICEV, Jahr}}$  = Verbrauchskosten (Kraftstoff) eines ICEVs im jeweiligen Jahr in €/100km,
- $VK_{\text{PHEV, Jahr}}$  = Verbrauchskosten (Kraftstoff und Strom) eines PHEVs im jeweiligen Jahr in €/100km,
- $\Delta VK_{\text{PHEV, Jahr}}$  = Verbrauchskosteneinsparung eines PHEVs gegenüber einem ICEV im jeweiligen Jahr in €/100km.

Die Energiepreise stellen Eingangsgrößen des Modells dar und sind teilweise sehr volatil und länderabhängig, da sie von verschiedenen Einflussgrößen aus Politik und Wirtschaft abhängen. Für die Analyse im NEFZ nach der ECE-Norm und im Realbetrieb werden aktuelle Durchschnittswerte für das Jahr 2011/12 und Prognosen für die Jahre 2020 und 2025 zugrunde gelegt. Die Multiplikation mit den zuvor ermittelten Verbräuchen ergibt die Verbrauchskosten für die verschiedenen Antriebskonzepte.

### 3.3.2 Modell zur Verbrauchsbestimmung

Für die Simulation der relevanten Größen zur Untersuchung von Verbrauch und Verbrauchskosten ist in einem parametrischen Modell der elektrische Antriebsstrang eines PHEVs abgebildet. Es werden Realfahrten und Zyklen mittels quasistationärer Simulation simuliert, die in der frühen Entwicklungsphase geeignet ist.

#### Dynamische und quasistationäre Simulation

Für die Modellierung der Fahrzeuglängsdynamik existieren ein dynamischer und ein quasistationärer Ansatz. Das Verhalten des Fahrzeugs wird bei der dynamischen Modellierung mit Differentialgleichungen beschrieben, wodurch infinitesimal kleine Zeitintervalle betrachtet werden. Es wird eine Vorwärtsrechnung von der Ursache zur Wirkung durchgeführt und der Fahrer übernimmt die Funktion eines Reglers, der die Soll-Geschwindigkeit mit der Ist-Geschwindigkeit vergleicht. Dieser Ansatz ist sehr detailliert, liefert exakte Ergebnisse und benötigt aber entsprechend Rechenaufwand. (Back, 2005) (Wöhl-Bruhn, 2010)

Bei der quasistationären Modellierung wird das Verhalten des Fahrzeugs in Intervalle aufgeteilt, die klein, aber nicht infinitesimal klein sind. Die Geschwindigkeit wird in den einzelnen Intervallen als konstant angesehen (quasistationär). Die Kausalitätskette wird umgekehrt und es wird eine Rückwärtsrechnung durchgeführt mit vorgegebener Ist-Geschwindigkeit. Diese Annahme ist dann gerechtfertigt, wenn die Antriebs- und Bremsleistung des betrachteten Fahrzeugs größer ist als es das vorgegebene Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil erfordert. Dieser Ansatz ist weniger detailliert, liefert aber sehr schnell Ergebnisse. (Back, 2005) (Wöhl-Bruhn, 2010)

In der frühen Entwicklungsphase fehlen oftmals die detaillierten Eingangsgrößen der dynamischen Simulation. Darüber hinaus sind viele angenommene Größen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Aus diesen Gründen ist eine quasistationäre Modellierung in der frühen Entwicklungsphase geeignet. (Back, 2005) Für die Zyklenbetrachtung wird ein Intervall von einer Sekunde angenommen, da die meisten Zyklen in diesen Zeitschritten aufgelöst sind. Für die Analyse mit Realfahrten sind höher aufgelöste Daten vorhanden und so wird mit einem Intervall von einer Zehntelsekunde simuliert. Abhängig von der Anwendung und der Phase im Produktentstehungsprozess sind unterschiedliche Detaillierungen der Simulationen und eine problemangepasste Modellierungstiefe erforderlich. Sensitivitätsanalysen sind mit eher einfacheren Modellen möglich. (Lindemann, et al., 2011)

#### **Modellaufbau des elektrischen Antriebsstrangs**

In dem parametrischen Modell in MATLAB ist der elektrische Antriebsstrang eines PHEVs abgebildet und eine Betriebs- und Ladestrategie modelliert. Auf Basis der vorgegebenen Geschwindigkeit und Beschleunigung wird mittels quasistationärer Simulation über Fahrwiderstandsgleichungen und Wirkungsgrade für jeden Zeitpunkt der Betriebspunkt und somit der Leistungsverlauf ermittelt (Guzzella, 2007). Unter Berücksichtigung von Betriebs- und Ladestrategie wird anschließend der Energiebedarf berechnet. Eingangsgrößen für das Modell sind neben Fahrzeugeigenschaften, wie Masse, Rollwiderstand und Bordnetzlast, Eigenschaften des E-Systems, wie Wirkungsgrade, Leistung und Energieinhalt. Darüber hinaus ist eine wesentliche Eingangsgröße das zugrunde gelegte Fahrprofil, dargestellt als Geschwindigkeitsverlauf von den aufgezeichneten Realfahrten und von gesetzlichen Fahrzyklen. (Ried, et al., 2013b) (Ried, et al., 2013a)

Die Kenntnis der Zwischenwerte nach den einzelnen Stufen des Antriebsstrangs im Modell, wie in Abbildung 3.12 definiert, ist hilfreich bei einer funktionalen Grunddimensionierung der Komponenten des E-Systems und bei der Implementierung einer Betriebsstrategie:

- **Stufe 1 (Fahrzeug):** Berücksichtigung der Fahrwiderstände am Fahrzeug, mit dem Rad als Schnittstelle zu Stufe 2,
- **Stufe 2 (Antriebsstrang):** Berücksichtigung der Wirkungsgrade im Antriebsstrang, mit der Antriebsseite des Getriebes bzw. der mechanischen Abtriebsseite der E-Maschine als Schnittstelle zu Stufe 3,
- **Stufe 3 (E-System):** Berücksichtigung der Wirkungsgrade im E-System, mit dem HV-Speicher am Ende der Wirkungsgradkette.

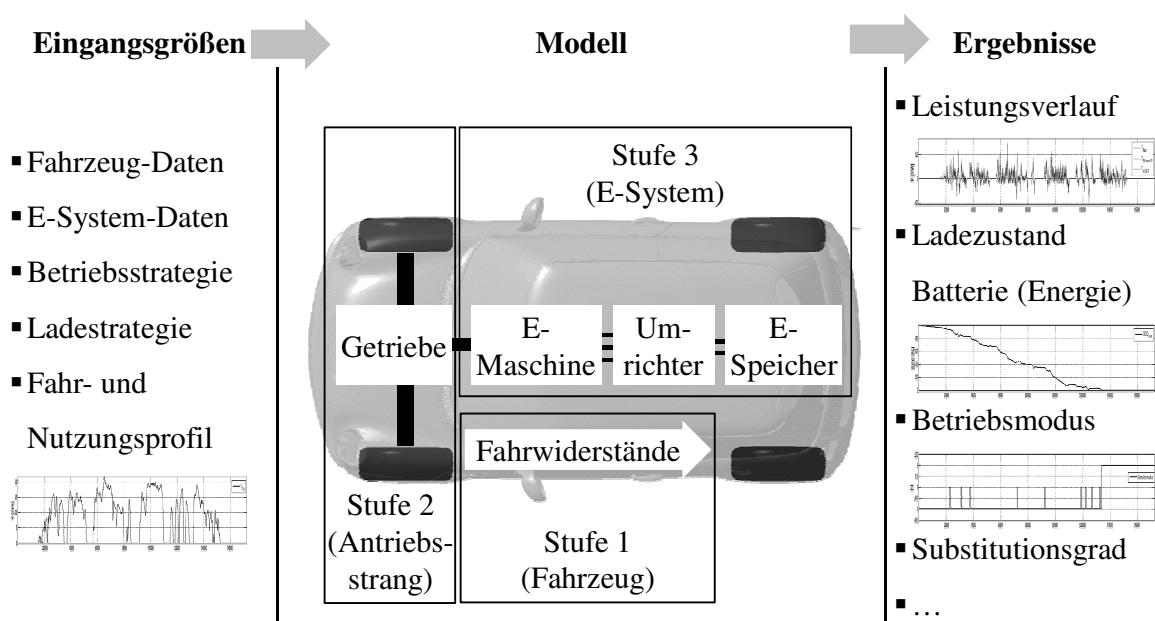


Abbildung 3.12: Funktionsweise und Stufenlogik im parametrischen Modell zur quasistationären Simulation des elektrischen Antriebsstrangs; in Anlehnung an: (Ried, et al., 2013a)

Im quasistationären Ansatz ist prinzipiell in jedem Betriebspunkt der anzusetzende Wirkungsgrad individuell zu ermitteln (Wünsch, et al., 2010). In dem parametrischen Modell sind durchschnittliche Wirkungsgrade vorgesehen, aufgrund von oftmals fehlenden Detailinformationen in der frühen Entwicklungsphase, wie beispielsweise Kennfelder oder Schaltstrategien. Da sich Zyklen und Realfahrten in ihrer Charakteristik zum Teil stark unterscheiden, sind zyklus- bzw. fahrtspezifische Wirkungsgrade von Vorteil. Ein weiterer Vorteil ist die differenzierte Betrachtung der Wirkungsgrade für eine energetische, durchschnittliche Simulation und eine Simulation im Betriebsbereich der erforderlichen Spitzenleistung. In einem Betriebspunkt hoher Leistung werden tendenziell bessere Wirkungsgrade erzielt als in einem Betriebspunkt niedriger Leistung (Wünsch, et al., 2010). Für die folgenden Analysen werden für die gewählte Antriebstopologie zwei unterschiedliche Wirkungsgrade zugrunde gelegt, die mittels Kennfeldern in Dymola-Simulationen aus einem realitätsnahen Zyklus und aus dem NEFZ ermittelt sind. Neben dem Wirkungsgrad im Bereich der Spitzenleistung dient ein durchschnittlicher Wirkungsgrad für energetische Simulationen.

### 3.3.3 Mehrstufige Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfs

Mit dem vorgestellten Modell wird für die definierten Stufen im elektrischen Antriebsstrang mittels quasistationärer Simulation über Fahrwiderstandsgleichungen und Wirkungsgrade für

jeden Zeitpunkt der Betriebspunkt und somit der Leistungsverlauf ermittelt. Anschließend wird der Energiebedarf bzw. Verbrauch berechnet.

#### Stufe 1: Fahrzeug (Rad)

Es werden die Fahrwiderstände berechnet, welche von außen auf das Fahrzeug wirken. Abbildung 3.13 zeigt die betrachteten Fahrwiderstände, welche während einer Beschleunigung entgegen der Fahrzeuggeschwindigkeit und –beschleunigung gerichtet sind. Stufe 1 ist unabhängig von der gewählten Antriebstopologie, da Wirkungsgrade und Trägheiten noch keinen Einfluss haben. Die Schnittstelle zu Stufe 2 bildet das Rad bzw. der „Latsch“. Die folgenden Definitionen, Berechnungen und Angaben für typische Werte eines Pkws basieren, wenn nicht anders gekennzeichnet, auf (Braess & Seiffert, 2011).

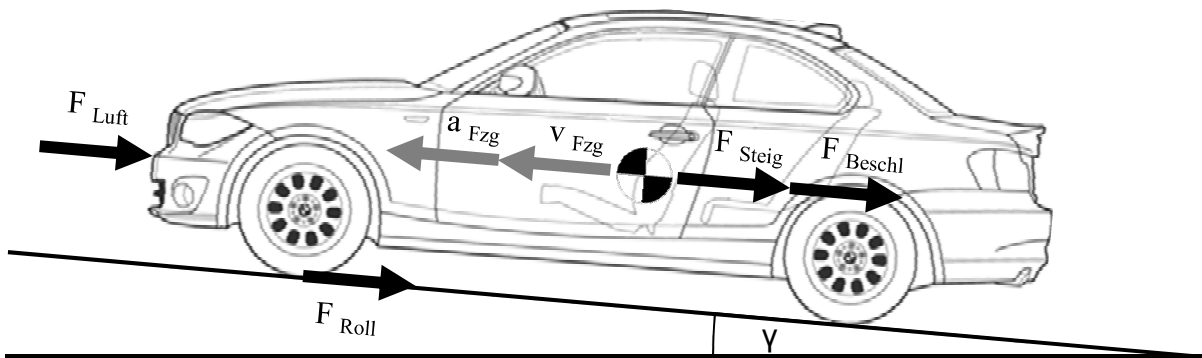


Abbildung 3.13: Stufe 1 beschreibt die Fahrwiderstände am Fahrzeug mit dem Rad als Schnittstelle zu Stufe 2

Durch die Um- und Durchströmung des Fahrzeugs entsteht ein **Luftwiderstand**. Bei höheren Geschwindigkeiten ist dieser dominierend und hat den größten Einfluss auf den Energiebedarf des Fahrzeugs:

$$F_{\text{Luft}} = c_x \cdot A \cdot \rho_L \cdot \frac{v_{\text{Fzg}}^2}{2} \quad (3.1)$$

mit

$c_x$  = Luftwiderstandsbeiwert, typische Werte eines Pkws zwischen 0,25 und 0,40,

$A$  = Querschnittsfläche, typische Werte eines Pkws zwischen 1,5 und 2,5 m<sup>2</sup>,

$\rho_L$  = Luftdichte,

$v_{\text{Fzg}}$  = Fahrzeuggeschwindigkeit.

Die Formänderungsarbeit zwischen Reifen und Fahrbahn verursacht den **Rollwiderstand**. Für Modelle in der frühen Entwicklungsphase kann vereinfacht angenommen werden, dass dieser Widerstand unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ist (Torsten, 2011):

$$F_{\text{Roll}} = f_{\text{R}} \cdot m_{\text{Fzg}} \cdot g \quad (3.2)$$

mit

$f_{\text{R}}$  = Rollwiderstandsbeiwert, typische Werte eines Pkws zwischen 0,0075 und 0,017,

$m_{\text{Fzg}}$  = Fahrzeugmasse,

$g$  = Erdbeschleunigung.

Aufgrund der Hangabtriebskraft beim Befahren von Steigungen entsteht der **Steigungswiderstand**:

$$F_{\text{Steig}} = m_{\text{Fzg}} \cdot g \cdot \sin \gamma \quad (3.3)$$

mit

$\gamma$  = Steigungswinkel.

Der **Beschleunigungswiderstand** entsteht bei einer Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit und kann deshalb positiv oder negativ sein. Neben der translatorischen Beschleunigung des Fahrzeugs werden auch rotierende Komponenten, wie Räder, Getriebe und Motoren beschleunigt, die einen weiteren Widerstand für den Antriebsstrang darstellen und in Stufe 2 berücksichtigt werden:

$$F_{\text{Beschl}} = m_{\text{Fzg}} \cdot a_{\text{Fzg}} \quad (3.4)$$

mit

$a_{\text{Fzg}}$  = Fahrzeugbeschleunigung.

Daraus ergibt sich der Gesamtwiderstand mit den relevanten Größen für die folgenden Analysen im Realbetrieb und in Fahrzyklen, in denen der Steigungswiderstand nicht berücksichtigt wird:

$$F_{\text{Fzg}} = F_{\text{Luft}} + F_{\text{Roll}} + F_{\text{Beschl}} \quad (3.5)$$

In der quasistationären Simulation kann in jedem Betriebspunkt (Zeitintervall), basierend auf dem Gesamtwiderstand und der jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeit, die erforderliche Leistung ermittelt werden. Diese Größe ist das Ergebnis der Betrachtungen aus Stufe 1 und wird an Stufe 2 übergeben:

$$P_{Fzg} = F_{Fzg} \cdot v_{Fzg} \quad (3.6)$$

### Stufe 2: Antriebsstrang

In Stufe 2 werden Wirkungsgradverluste, rotatorische Massen und Schleppverluste im Antriebsstrang berechnet, welche die erforderliche Leistung der Komponenten erhöhen. Abbildung 3.14 beschreibt die Komponenten mit den jeweiligen Eingangsgrößen in Stufe 2. Im Gegenteil zu Stufe 1 ist Stufe 2 abhängig vom Antriebskonzept, welches hauptsächlich über die Topologie und die Komponententypen definiert wird. Verluste entstehen direkt am Rad, im Differential und im Getriebe. Zusätzlich wird in dieser Stufe die Trägheit der Räder berücksichtigt. Die Schnittstelle zu Stufe 3 bildet die Antriebsseite des Getriebes, was der mechanischen Abtriebsseite der E-Maschine gleichgesetzt wird.

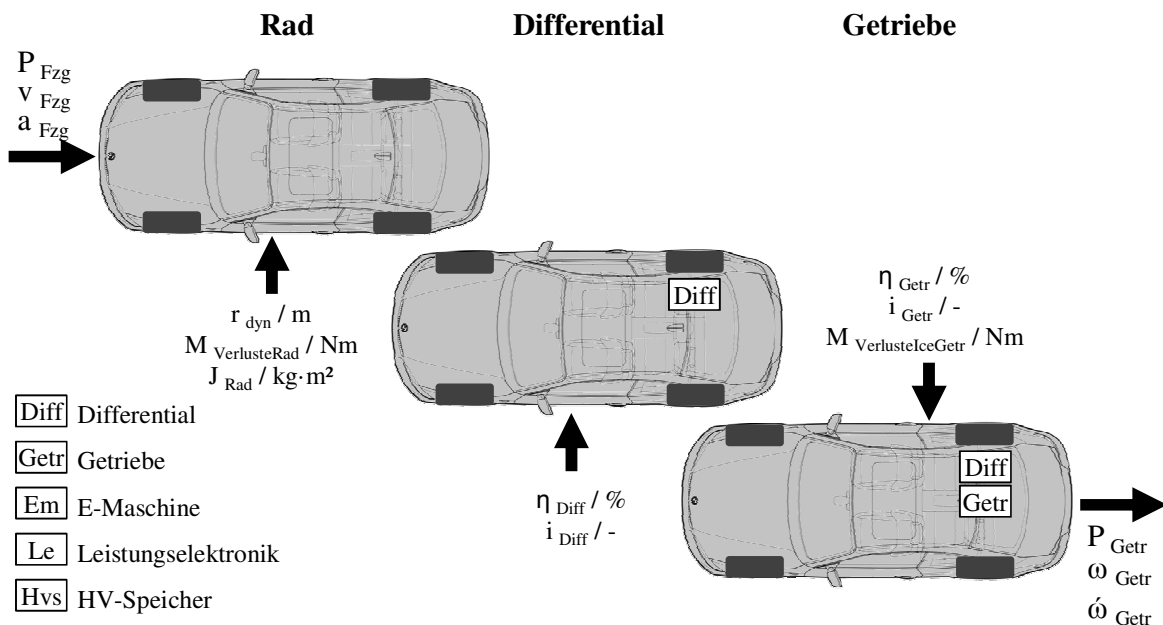


Abbildung 3.14: Stufe 2 beschreibt die Wirkungskette mit rotatorischen Massen im Antriebsstrang; Schnittstelle zu Stufe 3 ist die Antriebsseite des Getriebes

Zusätzlich zur außen am Fahrzeug anliegenden Kraft, resultierend aus den Fahrwiderständen, werden Verluste am **Rad** berücksichtigt. Neben der Trägheit zählen dazu zusätzliche Verluste, welche aus Restbremsmomenten und Radlagerverlusten resultieren:

$$P_{Rad} = \omega_{Rad} \cdot (F_{Fzg} \cdot r_{dyn} + 4 \cdot J_{Rad} \cdot \dot{\omega}_{Rad} + M_{VerlRad}) \quad (3.7)$$



mit

- $\omega_{\text{Rad}}$  = Winkelgeschwindigkeit des Rades,
- $\dot{\omega}_{\text{Rad}}$  = Winkelbeschleunigung des Rades,
- $r_{\text{dyn}}$  = dynamischer Rollradius des Rades,
- $J_{\text{Rad}}$  = Trägheit des Rades,
- $M_{\text{VerlusteRad}}$  = Verlustmoment am Rad (Radlager, Restbremsmoment).

Bei der Verrechnung des Wirkungsgrades im **Differential** (Achsgetriebe), wird zwischen Zug- und Rekuperationsphasen unterschieden. In der Zugphase wird durch Division die erforderliche Leistung erhöht und in der Rekuperationsphase durch Multiplikation die zu rekuperierende Leistung verringert. Das Ergebnis ist die Leistung auf der Antriebsseite des Differentials:

$$P_{\text{Diff}} = \begin{cases} P_{\text{Rad}} \cdot 1/\eta_{\text{Diff}} & , P_{\text{Rad}} > 0 \text{ (Zug)} \\ P_{\text{Rad}} \cdot \eta_{\text{Diff}} & , P_{\text{Rad}} < 0 \text{ (Reku)} \end{cases} \quad (3.8)$$

mit

- $\eta_{\text{Diff}}$  = Wirkungsgrad des Differentials.

Analog zum Differential werden die Leistungen im **Getriebe** auf der Antriebsseite berechnet. Schleppverluste im Getriebe des elektrischen Antriebsstrangs beinhaltet der Wirkungsgrad. Bei Antriebstopologien mit einer rein-elektrisch angetriebenen Achse (straßengekoppelter PHEV) wird zusätzlich das Schleppmoment berücksichtigt, welches das Getriebe des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs im elektrischen Betriebsmodus verursacht:

$$P_{\text{Getr}} = \begin{cases} P_{\text{Diff}} \cdot 1/\eta_{\text{Getr}} + \omega_{\text{Diff}} \cdot M_{\text{VerlusteICE-Getriebe}} & , P_{\text{Rad}} > 0 \text{ (Zug)} \\ P_{\text{Diff}} \cdot \eta_{\text{Getr}} + \omega_{\text{Diff}} \cdot M_{\text{VerlusteICE-Getriebe}} & , P_{\text{Rad}} < 0 \text{ (Reku)} \end{cases} \quad (3.9)$$

mit

- $\eta_{\text{Getr}}$  = Getriebewirkungsgrad,
- $\omega_{\text{Diff}}$  = Winkelgeschwindigkeit des Differentials auf der Antriebsseite  
(= Winkelgeschwindigkeit des Getriebes auf der Abtriebsseite),
- $M_{\text{VerlusteICE-Getriebe}}$  = Schleppverluste des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs bei straßengekoppelten PHEVs.

#### Stufe 3: E-System

In Stufe 3 sind Wirkungsgradverluste und rotatorische Massen im E-System sowie das Bordnetz modelliert, welche die Leistung beeinflussen. Abbildung 3.15 beschreibt die

Komponenten mit den jeweiligen Eingangsgrößen in Stufe 3. Wie Stufe 2 ist Stufe 3 abhängig vom Antriebs- und Speicherkonzept, welches hauptsächlich über die Topologie und die Komponententypen definiert wird. Verluste entstehen in der E-Maschine, in der Leistungselektronik und im HV-Speicher. Zusätzlich wird in dieser Stufe die Trägheit der E-Maschine und das Bordnetz berücksichtigt. Das Ergebnis der Stufe 3 ist die resultierende Leistung am HV-Speicher, woraus die erforderliche Energie ermittelt wird.

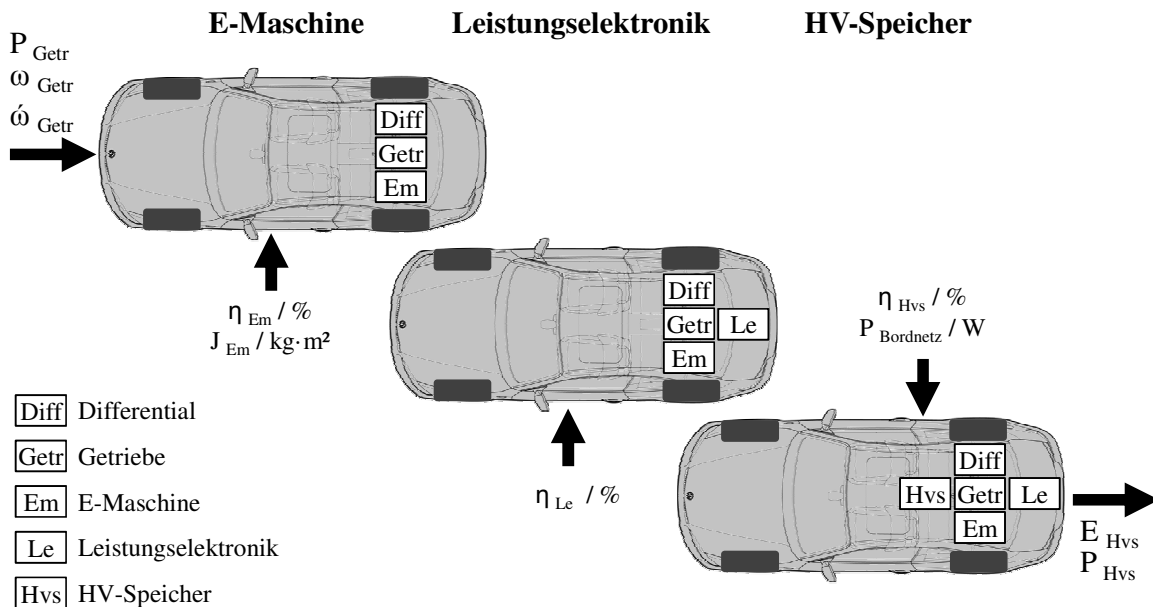


Abbildung 3.15: Stufe 3 beschreibt das Bordnetz und die Wirkungsgradkette mit rotatorischen Massen im E-System; Leistung und Energie des HV-Speichers sind das Ergebnis

Die rotierenden Teile der **E-Maschine** verursachen eine Trägheit, die die erforderliche mechanische Leistung der E-Maschine im elektrischen Antriebsstrang erhöht:

$$P_{EM\text{mech}} = P_{\text{Getr}} + \omega_{EM} \cdot \dot{\omega}_{EM} \cdot J_{EM} \quad (3.10)$$

mit

$\omega_{EM}$  = Winkelgeschwindigkeit der E-Maschine,

$\dot{\omega}_{EM}$  = Winkelbeschleunigung der E-Maschine,

$J_{EM}$  = Massenträgheit der E-Maschine.

Bei der Berücksichtigung des Wirkungsgrades der E-Maschine wird analog zu den Wirkungsgraden des Getriebes in Stufe 2 zwischen Zug- und Rekuperationsphasen differenziert. Für die elektrische Leistung der E-Maschine ergibt sich:

$$P_{EM\text{elektr}} = \begin{cases} P_{EM\text{mech}} \cdot 1/\eta_{EM} & , P_{EM\text{mech}} > 0 \text{ (Zug)} \\ P_{EM\text{mech}} \cdot \eta_{EM} & , P_{EM\text{mech}} < 0 \text{ (Reku)} \end{cases} \quad (3.11)$$

mit

$\eta_{EM}$  = Wirkungsgrad der E-Maschine.

Im E-System befindet sich zwischen E-Maschine und HV-Speicher die **Leistungselektronik**, deren Verluste auch in einem Wirkungsgrad quantifiziert werden:

$$P_{LE} = \begin{cases} P_{EM\text{el}} \cdot 1/\eta_{LE} & , P_{EM\text{el}} > 0 \text{ (Zug)} \\ P_{EM\text{el}} \cdot \eta_{LE} & , P_{EM\text{el}} < 0 \text{ (Reku)} \end{cases} \quad (3.12)$$

mit

$\eta_{LE}$  = Wirkungsgrad der Leistungselektronik.

Der **HV-Speicher** stellt neben der erforderlichen Antriebsleistung auch die Leistung für das Bordnetz. Bei einer positiven Summe aus der erforderlichen Leistung der Leistungselektronik und dem Bordnetz wird der HV-Speicher entladen und deshalb zur Ermittlung der erforderlichen Leistung des HV-Speichers durch den Wirkungsgrad dividiert. Bei einer negativen Summe wird mit dem Wirkungsgrad multipliziert, um die für die Rekuperation zu Verfügung stehende Leistung zu ermitteln:

$$P_{HVS} = \begin{cases} (P_{LE} + P_{Bordnetz}) \cdot 1/\eta_{HVS} & , P_{LE} + P_{Bordnetz} > 0 \\ (P_{LE} + P_{Bordnetz}) \cdot \eta_{HVS} & , P_{LE} + P_{Bordnetz} < 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

mit

$P_{Bordnetz}$  = Bordnetzleistung,

$\eta_{HVS}$  = Wirkungsgrad des HV-Speichers.

Das Ergebnis der Stufe 3 ist neben der Leistung am HV-Speicher die Energiebilanz:

$$E_{HVS} = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot P_{HVS\ i} \quad (3.14)$$

Mit

$n$  = Anzahl der Zeitintervalle (= Länge der betrachteten Fahrt),

$\Delta t$  = Zeitintervall der quasistationären Simulation.

#### **Prämissen für die PHEV-Konfiguration**

Für den konfigurierten PHEV in Abschnitt 2.7 sind die Ausprägungen der Parameter für das Verbrauchsmodell in Tabelle 3.5 dokumentiert. Die Ausprägungen der Parameter auf Fahrzeugebene werden vom BMW 1er Coupé abgeleitet ([www.bmw.de](http://www.bmw.de), 2013) und von (Braess & Seiffert, 2011) übernommen. Die Leermasse beinhaltet das gesamte verbrennungsmotorische System und die Komponenten des elektrischen Systems, die unabhängig von Energieinhalt und Leistung sind. Das zusätzliche Gewicht von E-Maschine und HV-Speicher wird bei den Betrachtungen im P/E-Lösungsraum für die jeweilige PHEV-Konfiguration individuell ermittelt und auf die Leermasse addiert. Die Zuladung orientiert sich an der genormten Prüfmass eines Fahrzeugs und beträgt 200 kg (DIN 70020-3, 2008). Die maximale Rekuperationsverzögerung, das Übersetzungsverhältnis des Getriebes sowie Daten der E-Maschine wurden an die Werte des BMW ActiveE angelehnt (Lieb, et al., 2012) (Jung & Hofer, 2011). Für die Trägheit der E-Maschine wird ein Wert einer HSM der Firma Brusa zugrunde gelegt ([www.brusa.biz](http://www.brusa.biz), 2013). Der durchschnittliche Wirkungsgrad eines Getriebes mit fester Übersetzung liegt bei ungefähr 95 % und erreicht einen maximalen Wert bis zu 98 % (Kasper & Schünemann, 2012). Eine typische Entladetiefe des HV-Speichers eines PHEVs ist 70 % und 400 Wh werden als erforderlicher Vorhalt für den Charge-Sustaining-Betrieb festgelegt (Cluzel & Douglas, 2012) (Pesaran & Markel, 2007). In den Simulationen werden für die durchschnittliche Bordnetzleistung im Realbetrieb 800 W zugrunde gelegt (Shiau, et al., 2010).

Tabelle 3.5: Wesentliche Parameter des Verbrauchsmodells mit den angenommenen Ausprägungen des konfigurierten PHEVs

	<b>Parameter</b>	<b>PHEV-Konfiguration</b>	<b>Einheit</b>
<b>Fahrzeug</b>	Leermasse (m), mit 90 % Tankfüllung, ohne E-Maschine und HV-Speicher	1400	kg
	Luftwiderstandsbeiwert ( $c_x$ )	0,31	-
	Querschnittsfläche (A)	2,11	m <sup>2</sup>
	Rollwiderstandsbeiwert ( $f_r$ )	0,01	-
	Reifenradius ( $r_{dyn}$ )	0,31	m
	Zuladung	200	kg
	maximale Rekuperationsverzögerung	1,6	m/s <sup>2</sup>
<b>E-Getriebe</b>	Übersetzung (i)	9,7	-
	Wirkungsgrad (bei durchschnittlicher Betrachtung)	95	%
	Wirkungsgrad (im Bereich der Spitzenleistung)	98	%
<b>E-Maschine / Leistungselektronik</b>	Trägheit der E-Maschine (J)	0,06	kgm <sup>2</sup>
	Wirkungsgrad (bei durchschnittlicher Betrachtung)	89	%
	Wirkungsgrad (im Bereich der Spitzenleistung)	90	%
<b>HV-Speicher</b>	Entladetiefe (Depth of discharge, DoD)	70	%
	Vorhalt für Charge-Sustaining-Betrieb	0,4	kWh
	Wirkungsgrad	97	%
<b>Bordnetz</b>	Leistung	800	W

### 3.3.4 Modellierung der Betriebsstrategie

Als Betriebsstrategie ist modelliert, dass bei geladenem Energiespeicher zunächst rein elektrisch gefahren wird, wodurch der Ladezustand des HV-Speichers sinkt. Dieser Betriebsmodus wird generell als Charge Depleting (CD) bezeichnet. Dieser Modus wird nochmals spezifiziert, denn falls der Betriebspunkt außerhalb des Arbeitsbereichs des E-Systems liegt, der durch die Dynamikkurve im a/v-Diagramm beschrieben wird, erfolgt ein Zustart des Verbrennungsmotors. Dieser Betriebsmodus wird Charge Depleting hybrid (CDh) genannt, im Vergleich zu reinem elektrischen Fahren (CDe). Sobald der HV-Speicher den

minimalen Ladezustand erreicht, wird der Verbrennungsmotor gestartet. Es wird in einem hybriden Betriebsmodus gefahren, im sogenannten Charge-Sustaining-Modus (CS). Die Betriebsstrategie ist ähnlich modelliert wie in (Takeuchi, et al., 2012) und (Shiau, et al., 2009). Als Ladestrategie, die ausschließlich für die Analyse im Realbetrieb notwendig ist, wird angenommen, dass der HV-Speicher einmal über Nacht voll aufgeladen wird. Eine Variation des Ladeverhaltens, wie beispielsweise zweimal Laden pro Tag, hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse (Nies, et al., 2012). Die prinzipielle Betriebsstrategie und eine beispielhafte Dynamikkurve des E-Systems sind in Abbildung 3.16 dargestellt. (Ried, et al., 2013a) (Ried, et al., 2013b)

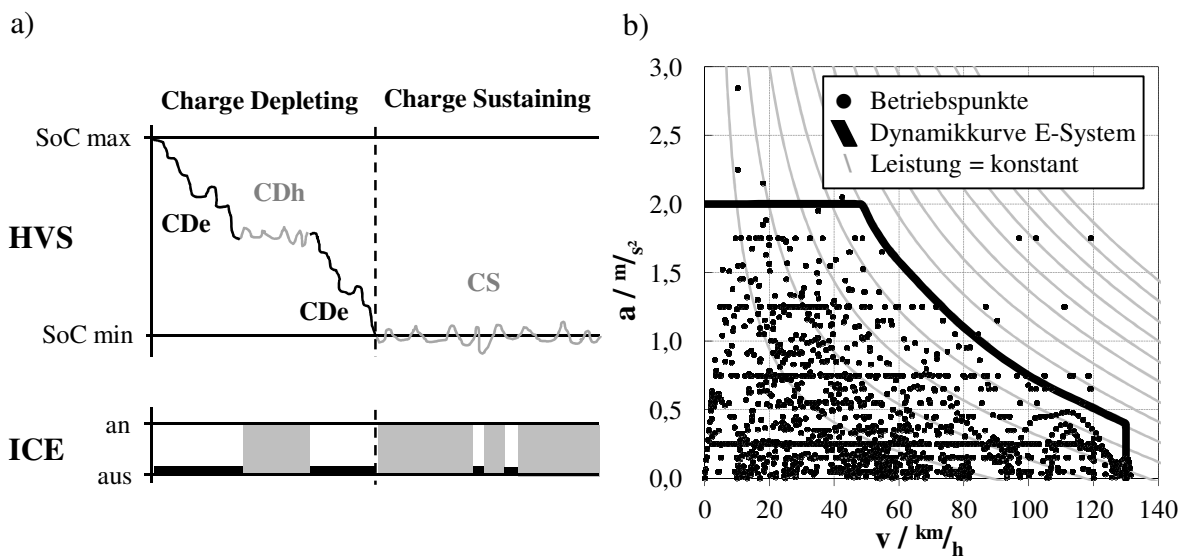


Abbildung 3.16: a) Modellierter PHEV-Betriebsstrategie mit prinzipiellem Verlauf des Ladezustands des HV-Speichers, dem sogenannten State of Charge (SoC), b) Betriebspunkte bei der Fahrzeugnutzung und eine Dynamikkurve des E-Systems eines PHEVs als Beispiel; Betriebspunkte außerhalb des Arbeitsbereichs des E-Systems verursachen einen Zustand des Verbrennungsmotors; Darstellung in Anlehnung an: (Ried, et al., 2013a)

Mit der entwickelten Methodik und den dazugehörigen Modellen werden der Leistungsverlauf und die Energiebilanz an den entsprechenden Stufen im elektrischen Antriebsstrang für Zyklen und Realfahrten ermittelt. Unter Berücksichtigung von Betriebs- und Ladestrategie werden Verbrauch und Verbrauchskosten ermittelt.

### 3.3.5 Verbrauch im Fahrzyklus

Der Verbrauch im Realbetrieb variiert zwischen verschiedenen Fahrern sehr stark. Verbrauchsangaben in Zyklen werden im Labor unter standardisierten Bedingungen getestet und somit ist ein fairer Vergleich möglich. Die folgenden Analysen basieren auf dem NEFZ und der ECE-Norm (Amtsblatt der Europäischen Union, 2012). Der NEFZ ist der Fahrzyklus zur Ermittlung des Verbrauchs und die ECE-Norm beschreibt die Methode zur Verrechnung

des Strom- und Kraftstoffverbrauchs in PHEVs. Seit 1996 wird der Kraftstoffverbrauch von Pkws in der Europäischen Union im NEFZ ermittelt. Der synthetische Fahrzyklus ist genormt und die Messung erfolgt bei 20-30°C. In Abbildung 3.17 sind das Geschwindigkeitsprofil und die Beschleunigungen im NEFZ dargestellt. Der Fahrzyklus dauert 1180 Sekunden ( $\approx 19,7$  Minuten) und besteht aus einem Anteil unter städtischen und einem unter Überland-Bedingungen. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 120 km/h und die Beschleunigungen erreichen Werte zwischen  $-1,39$  und  $1,04$  m/s<sup>2</sup>.

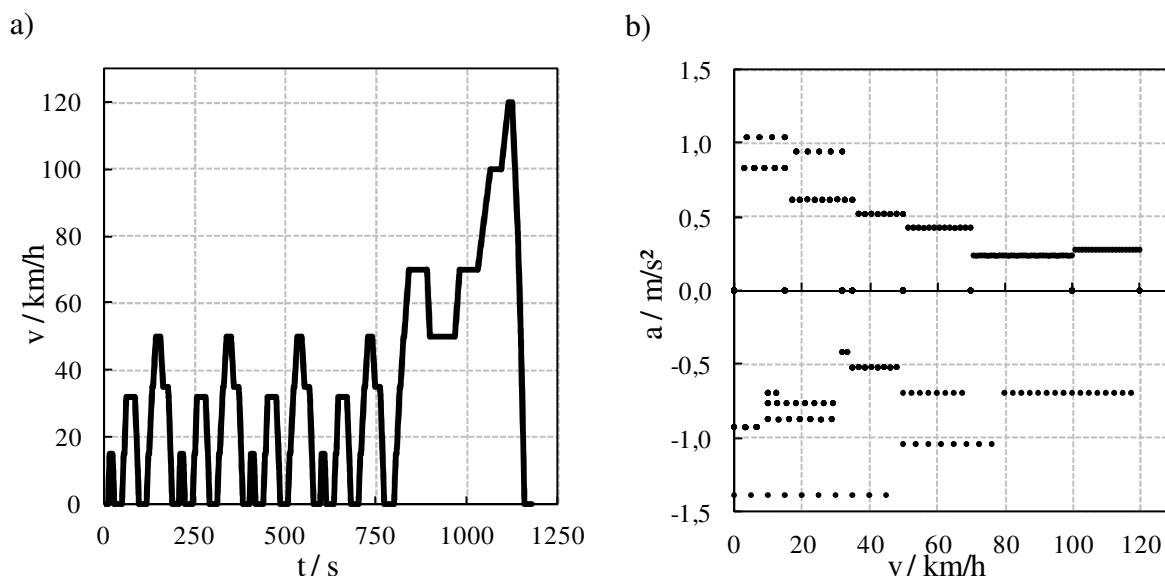


Abbildung 3.17: Charakteristik des NEFZ: a) Geschwindigkeitsprofil, b) Beschleunigungen für die einzelnen Betriebspunkte

Für alle Fahrzeuge wird von den Herstellern der Kraftstoffverbrauch im NEFZ veröffentlicht. Die Kraftstoffverbräuche einer ICEV- und einer HEV-Variante vom betrachteten Fahrzeug werden von den Herstellerangaben übernommen. Diese dienen als Basis für die folgenden Analysen, um den Verbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV zu ermitteln. Falls keine HEV-Variante des betrachteten Fahrzeugs existiert, wird der Kraftstoffverbrauch eines HEVs im NEFZ folgendermaßen bestimmt:

$$KV_{HEV,NEFZ} = KV_{ICEV,NEFZ} \cdot 0,85. \quad (3.15)$$

Der dargestellte Zusammenhang wurde empirisch mit ausgewählten Fahrzeugen ermittelt und ist konform zu den Ergebnissen aus (Klüting, et al., 2012). In den folgenden Analysen ist ein relativer Vergleich verschiedener PHEV-Ausprägungen in der frühen Entwicklungsphase damit möglich, jedoch ist der Zusammenhang nicht allgemein gültig. Ausgehend vom Kraftstoffverbrauch eines HEVs wird der des PHEVs im hybriden Betriebsmodus abgeleitet. Unter Berücksichtigung des Mehrgewichts durch das größere E-System, wird der Verbrauch

mit einem prozentualen Zuschlagsfaktor  $Z$  multipliziert, als Maß für den gewichtsabhängigen Mehrverbrauch in Hybridfahrzeugen (Pagerit, et al., 2006):

$$KV_{\text{PHEVh,NEFZ}} = KV_{\text{HEV,NEFZ}} \cdot \left( 100 + \frac{\Delta m_{\text{PHEV-HEV}} \cdot Z_{\text{HEV}}}{m_{\text{HEV}} \cdot 0,1} \right) / 100 \quad (3.16)$$

mit

$\Delta m_{\text{PHEV-HEV}}$  = Mehrgewicht des PHEVs zu einem HEV in kg,

$Z_{\text{HEV}}$  = Faktor für den Mehrverbrauch in HEVs pro 10 % Gewichtsänderung in %.

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs eines PHEVs nach der ECE-Norm im NEFZ wird in (Amtsblatt der Europäischen Union, 2012) exakt beschrieben. Zustand A in der ECE-Norm entspricht dem CD-Modus. In der folgenden Analyse wird angenommen, dass die elektrische Leistung ausreichend dimensioniert ist, um dem gesetzlichen Fahrzyklus zu folgen. Deswegen entspricht der CD-Modus dem elektrischen Betriebsmodus und es wird kein Kraftstoff verbraucht ( $KV_{\text{PHEVe,NEFZ}} = 0$ ). Mit einer Spitzenleistung der E-Maschine von ca. 40 kW ist eine rein elektrische Zyklusdurchfahrt möglich, weswegen der Bereich darunter in Abbildung 3.18 nicht dargestellt ist. Eine Auslegung mit geringerer Leistung, die Zustrats des Verbrennungsmotors im CD-Modus erfordert, wird nicht betrachtet. Die dargestellten Schnitte in Abbildung 3.18 bei 40, 60, 90 und 120 kW Spitzenleistung der E-Maschine liegen übereinander, da jeweils eine rein elektrische Zyklusdurchfahrt möglich ist. Zustand B in der ECE-Norm entspricht dem CS-Modus und somit dem hybriden Betriebsmodus. Es wird eine Strecke von 25 km zwischen zwei Batterieaufladungen angenommen. Daraus resultiert folgende Berechnung (Amtsblatt der Europäischen Union, 2012):

$$KV_{\text{PHEV,NEFZ}} = \frac{D_{e,\text{NEFZ}} \cdot KV_{\text{PHEVe,NEFZ}} + 25\text{km} \cdot KV_{\text{PHEVh,NEFZ}}}{D_{e,\text{NEFZ}} + 25\text{km}} \quad (3.17)$$

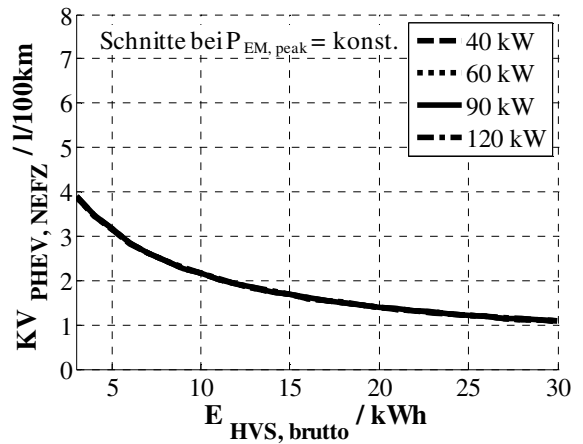
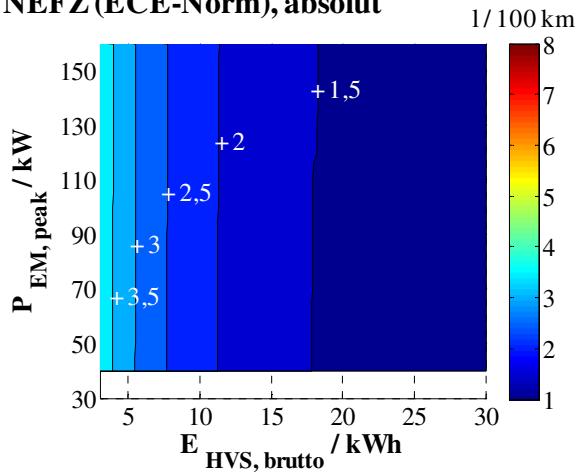
mit

$D_{e,\text{NEFZ}}$  = elektrische Reichweite eines PHEVs im NEFZ in km.

Im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs, auf Basis eines BMW 1er Coupés, wird für jede mögliche Konfiguration von Energieinhalt des HV-Speichers und Leistung der E-Maschine der Energiebedarf ermittelt. Der resultierende Kraftstoffverbrauch eines PHEVs sinkt bereits mit kleinem HV-Speicher deutlich. Die Bezugsbasis der folgenden Analysen ist der Kraftstoffverbrauch der ICEV-Variante des BMW 1er Coupés mit 6,6 l/100km im NEFZ (www.bmw.de, 2013). Mit den PHEV-Varianten wird eine Halbierung des Kraftstoffverbrauchs bereits mit ca. 5 kWh Energieinhalt im HV-Speicher erreicht, wie in Abbildung 3.18 dargestellt. Die Begründung für die anschließende Sättigung mit höherem Energieinhalt im HV-Speicher und somit steigender elektrischer Reichweite sind die konstanten 25 km im CS-Modus. Zusätzlich wird dieser Effekt durch das Mehrgewicht des größeren HV-Speichers verstärkt.



**NEFZ (ECE-Norm), absolut**



**NEFZ (ECE-Norm), relativ**

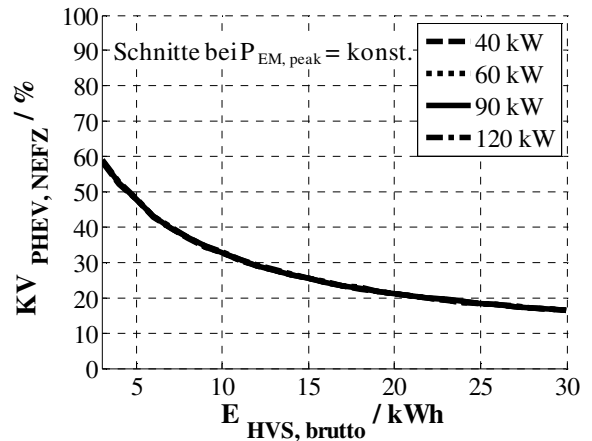
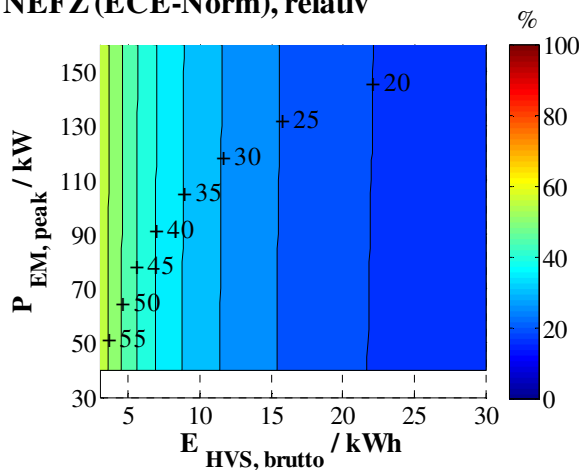


Abbildung 3.18: Absoluter und relativer Kraftstoffverbrauch im NEFZ (ECE-Norm) im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés im Vergleich zu der ICEV-Variante mit 6,6 l/100km

Für jede PHEV-Konfiguration wird mit dem jeweiligen Energieinhalt aus dem betrachteten Lösungsraum eine elektrische Reichweite mit dem vorgestellten parametrischen Modell ermittelt. In Abbildung 3.19 sind die Ergebnisse aus den Simulationen des NEFZ dargestellt. Mit einem Energieinhalt von 5 kWh erzielt der konfigurierter PHEV über 20 km elektrische Reichweite im NEFZ und mit 15 kWh über 60 km. Außerdem enthält Abbildung 3.19 eine Abschätzung zu elektrischen Reichweiten im Realbetrieb, basierend auf den Erkenntnissen in Abschnitt 3.3.7, um die Differenzen zu den Ergebnissen aus der Simulation im gesetzlichen Fahrzyklus aufzuzeigen. Im Realbetrieb werden bei einem Energieinhalt von 5 kWh ca. 15 km elektrische Reichweite erreicht und bei 15 kWh ungefähr 45 km. In diesem Beispiel wird im Realbetrieb eine um ca. 25 % geringere elektrische Reichweite erzielt. Die Ergebnisse im Realbetrieb variieren jedoch zwischen den unterschiedlichen Fahrern sehr stark, wie die folgenden Analysen zeigen.

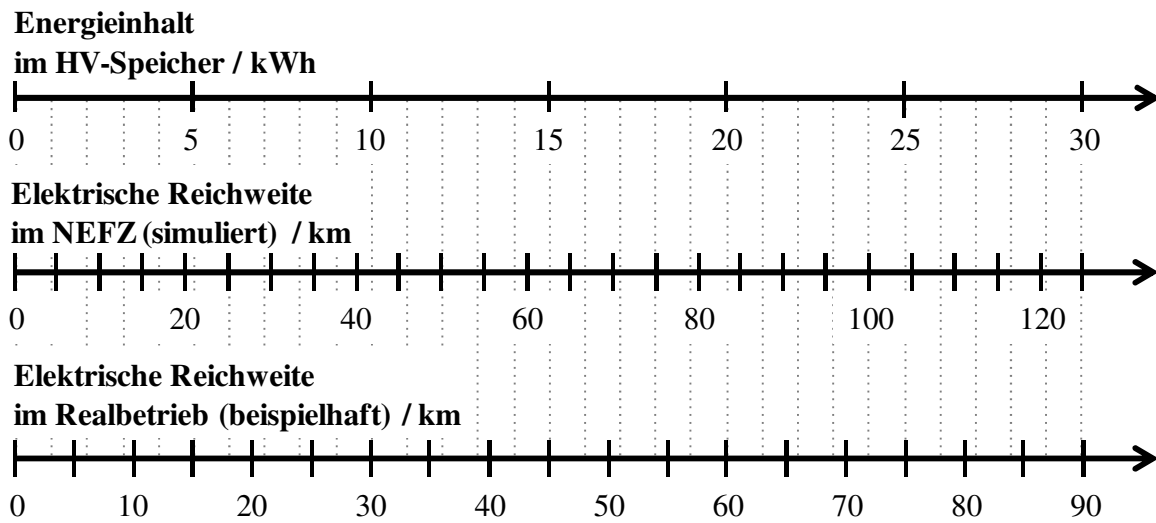


Abbildung 3.19: Elektrische Reichweite im NEFZ (simuliert) und im Realbetrieb (beispielhaft an einem gemessenen Fahrprofil) des konfigurierten PHEVs in Abhängigkeit vom Energieinhalt im HV-Speicher

#### 3.3.6 Sensitivitätsanalysen durch Parametervariation im Fahrzyklus

In dem entwickelten Modell für die Ermittlung der elektrischen Reichweite in einem Fahrzyklus werden in Sensitivitätsanalysen einzelne Parameter variiert, um deren Einfluss zu ermitteln. Für die frühe Phase der Entwicklung sind die daraus resultierenden Erkenntnisse hilfreich. Die Robustheit eines Fahrzeugkonzepts hinsichtlich einzelner Auslegungsgrößen wird dargestellt, da deren Ausprägung in dieser Phase teilweise noch nicht eindeutig bestimmt werden kann. Darüber hinaus werden in Sensitivitätsanalysen die wesentlichen Stellhebel identifiziert, für eine zielgerichtete Entwicklung im Rahmen der Fahrzeugkonzeptgestaltung. Die Sensitivitäten ausgewählter Parameter auf Gesamtfahrzeug- und Komponentenebene hinsichtlich der elektrischen Reichweite im NEFZ des konfigurierten PHEVs mit 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine und 10 kWh Energieinhalt im HV-Speicher sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Die definierten Grenzen der Parametervariation sowie die Zwischenschritte in Richtung einer Verbesserung und einer Verschlechterung sind beispielhaft gewählt. Das parametrische Modell in MATLAB ermöglicht eine beliebige Anpassung. Die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Parametern sind berücksichtigt, wie beispielsweise eine Veränderung des Fahrzeuggewichts bei Variation der Auslegung des HV-Speichers. (Ried, et al., 2012a)

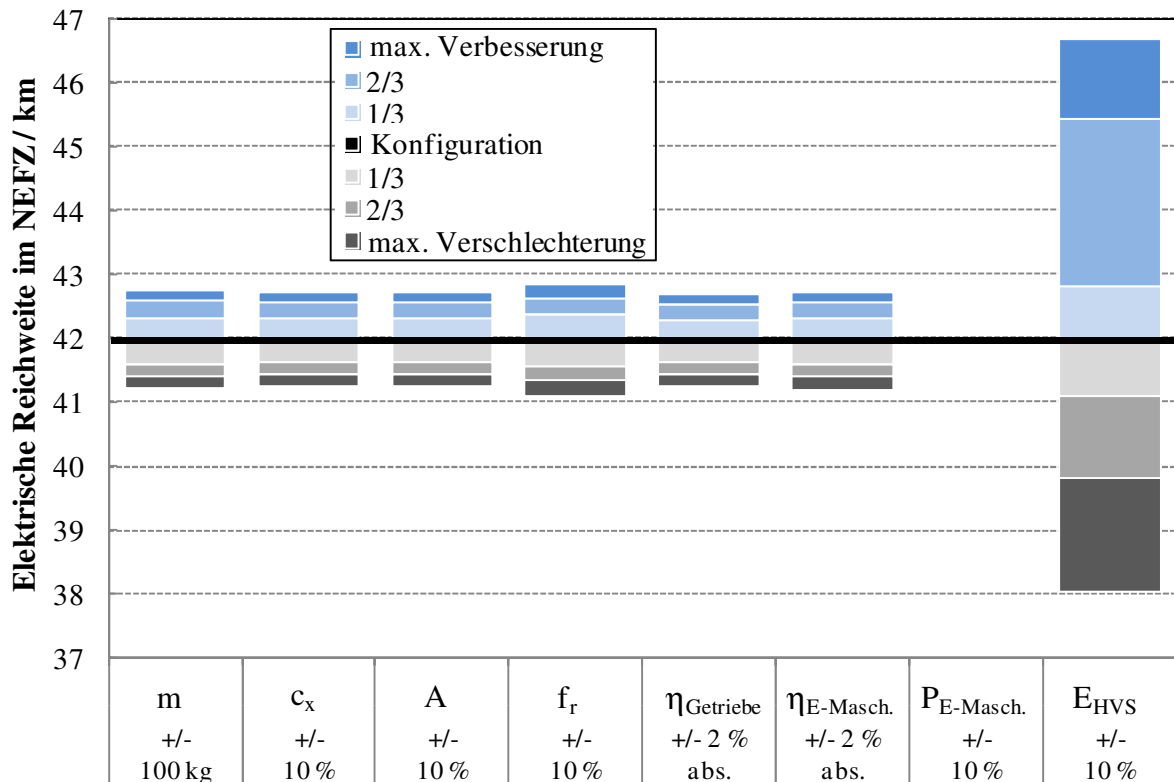


Abbildung 3.20: Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der elektrischen Reichweite des konfigurierten PHEVs im NEFZ durch Parametervariation auf Gesamtfahrzeug- und Komponentenebene innerhalb definierter Grenzen

Die Variation der Parameter auf Gesamtfahrzeugebene, wie Gewicht um +/-100 kg sowie Luftwiderstandsbeiwert und Projektionsfläche um jeweils +/-10 %, verändern die elektrische Reichweite im NEFZ innerhalb eines Kilometers. Die Parameter auf Komponentenebene zeigen eine ähnliche Bandbreite bei Variation des Rollwiderstandbeiwertes des Reifens um +/- 10 % sowie des Wirkungsgrades der E-Maschine und des Getriebes um jeweils zwei Prozentpunkte absolut. Eine variierte Spitzenleistung der E-Maschine hat keine Auswirkung auf die elektrische Reichweite, da die um 10 % gesteigerte oder verringerte Spitzenleistung des konfigurierten PHEVs ausreicht, um den NEFZ komplett elektrisch zu durchfahren. Der Energieinhalt des HV-Speichers hat einen großen Einfluss auf die elektrische Reichweite, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Auslegung nicht beliebig gesteigert werden kann, was beispielsweise die geometrischen Analysen in 4.3.5 zeigen. Der Einfluss auf die elektrische Reichweite ist nicht linear. Der NEFZ wird mehrfach hintereinander durchfahren und die Auswirkung der Parametervariation ist abhängig von der Stelle im Geschwindigkeitsprofil des letzten elektrisch durchfahrenen Zyklus, an der der HV-Speicher komplett entladen ist. Wird dieser Zustand am Anfang, bei niedrigen Geschwindigkeiten im NEFZ erreicht, siehe Abbildung 3.17, ermöglicht beispielsweise eine Steigerung des Energieinhalts eine relativ große zusätzliche elektrische Fahrstrecke. Ist der HV-Speicher dagegen am Ende des Fahrzyklus im Bereich der höheren Geschwindigkeiten komplett entladen, wird mit der

gleichen Steigerung des Energieinhalts nur eine vergleichsweise geringere zusätzliche Fahrstrecke elektrisch ermöglicht, aufgrund des höheren Leistungsbedarfs in diesem Teil des Fahrzyklus.

#### **3.3.7 Auswahl der Fahr- und Nutzungsprofile im Realbetrieb**

Verbrauchsmessungen in Gesetzeszyklen sind für eine objektive und fahrerunabhängige Betrachtung sehr gut geeignet. Die Realität wird jedoch nur bedingt abgebildet, was teilweise zu sehr großen Abweichungen im realen Fahrbetrieb führt, wie in Abschnitt 3.3.5 angedeutet. Darüber hinaus existiert eine große Spreizung des tatsächlichen Kraftstoffverbrauchs zwischen verschiedenen Fahrern, da die jeweiligen Fahr- und Nutzungsprofile sehr unterschiedlich sind. Für realitätsnahe Analysen mit PHEVs sind statt Gesetzeszyklen aufgezeichnete Realfahrten erforderlich, wie (Gonder, et al., 2007), (Klaib & Karspeck, 2010) und die folgenden Analysen zeigen.

Aufgezeichnete Fahr- und Nutzungsprofile aus dem euroFOT (European Field Operational Test) sind für die folgenden Analysen zugrunde gelegt. Das Projekt ist eine groß angelegte europäische Forschungsinitiative mit über 25 namhaften Partnern, wozu neben Automobilherstellern auch Zulieferer und Forschungsinstitute zählen. Das Ziel ist es, in einem umfangreichen Flottentest den Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit und das Fahrverhalten zu untersuchen. In diesem Projekt haben insgesamt 971 Fahrzeuge mit 1068 Fahrern teilgenommen und es wurden 35 Millionen Kilometer zurückgelegt. (www.eurofot-ip.eu, 2012) Für die folgenden Analysen sind die Fahr- und Nutzungsprofile von vier Fahrern ausgewählt, die in Tabelle 3.6 grob charakterisiert sind. Die vier Fahrer wurden in Deutschland über mehrere Monate mit einem BMW 5er exakt vermessen. Die mit Datenloggern aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofile bieten eine ausreichend große Datenmenge für eine repräsentative Analyse dieser Fahrer. (Ried, et al., 2013a) (Ried, et al., 2013b) Die Auswahl anderer Fahrer würde dementsprechend andere Ergebnisse liefern, die in der Tendenz jedoch ähnlich sind. Laut (Hennig, 2012) zeigen die Geschwindigkeitsprofile von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu elektrifizierten Fahrzeugen im relevanten Geschwindigkeitsbereich.

Tabelle 3.6: Charakterisierung des Fahr- und Nutzungsprofil der vier aufgezeichneten Fahrer (A, B, C und D) für die Analysen im Realbetrieb

Fahrer	PHEV-Eignung			Mittlere Tagesstrecke /km	Mittlere Geschwindigkeit /km/h	Jahresfahrleistung /km	Fahrhäufigkeit /%	Mess-tage /Tage
	Verbrauch über Energieinhalt	Verbrauch über Leistung	Fahrhäufigkeit					
A	+	+	+	56	26	18800	92	93
B	+	-	o	43	32	11500	74	87
C	-	o	-	57	24	11300	54	120
D	-	o	o	119	48	30400	70	112

Die PHEV-Eignung der ausgewählten Fahrer beschreibt wie sinnvoll ein PHEV im Vergleich zu einem ICEV für Käufer hinsichtlich des Verbrauchsvorteils ist. Über die Kriterien Fahrhäufigkeit sowie Verlauf des Verbrauchs über Energieinhalt und Leistung wird die PHEV-Eignung definiert. Die Fahrhäufigkeit beschreibt den Anteil der Tage, an denen während der Messdauer gefahren wird. Eine hohe Fahrhäufigkeit, was meist zu einer entsprechend hohen Jahresfahrleistung führt, hat einen positiven Effekt auf die Amortisation der Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV. Der Verlauf des Verbrauchs über Energieinhalt und Leistung beschreibt die Fläche des Kraftstoffverbrauchs im P/E-Lösungsraums des jeweiligen Fahrers, als weiteren Indikator bezüglich einer PHEV-Eignung. Es ist von Vorteil, bereits mit kleinem Energieinhalt und niedriger Leistung, einen hohen Verbrauchsvorteil zu erzielen, da dadurch das E-System kleiner dimensioniert werden kann. Dies führt zu geringeren Mehrkosten des PHEVs gegenüber einem ICEV. In (Nies, et al., 2012) sind ähnliche Überlegungen zu einer PHEV-Eignung zu finden, vor allem hinsichtlich des Verbrauchs bis zu bestimmten Geschwindigkeiten. Nicht alle Fahrer sind für einen PHEV geeignet, was die folgende Charakterisierung der vier Fahrer zeigt.

Fahrer A ist in allen drei Kriterien geeignet für einen PHEV und dient in der vorliegenden Arbeit als Referenz. Bezüglich des Verbrauchs über dem Energieinhalt ist Fahrer B genauso gut geeignet, jedoch wird mehr Leistung benötigt, um den gleichen Vorteil wie Fahrer A zu erzielen. Die Auswahl von Fahrer B dient dazu, um die Sensitivität bezüglich des Leistungsbedarfs darzustellen. Der Kraftstoffverbrauchsvorteil verbessert sich über dem Energieinhalt bei Fahrer C nur sehr langsam und erfordert einen größeren, teureren HV-Speicher, um den gleichen Vorteil wie Fahrer A oder B zu erzielen. Fahrer C wurde ausgewählt, um die Sensitivität über dem Energieinhalt darzustellen. Die folgenden Analysen zeigen, dass die mittlere Tagesfahrstrecke, welche in der Literatur oft als Auswahlkriterium verwendet wird, nur bedingt geeignet ist. Für die Entwicklung ist eine Verteilung der Strecken relevant (Klaiß & Karspeck, 2010). Fahrer A und C haben zwar die gleiche mittlere

Tagesfahrstrecke, aber aufgrund der verschiedenen Tagesstreckenverteilung in Abbildung 3.21 zeigen beide Fahrer eine unterschiedliche PHEV-Eignung. Fahrer D hat mehr als die doppelte mittlere Tagesfahrstrecke als die anderen drei Fahrer. Der Verlauf des Verbrauchs über dem Energieinhalt ist ähnlich ungünstig bezüglich einer PHEV-Eignung wie bei Fahrer C. Dieser Effekt wird deutlich durch eine hohe Fahrhäufigkeit kompensiert, was sich insgesamt positiv auf die PHEV-Eignung auswirkt.

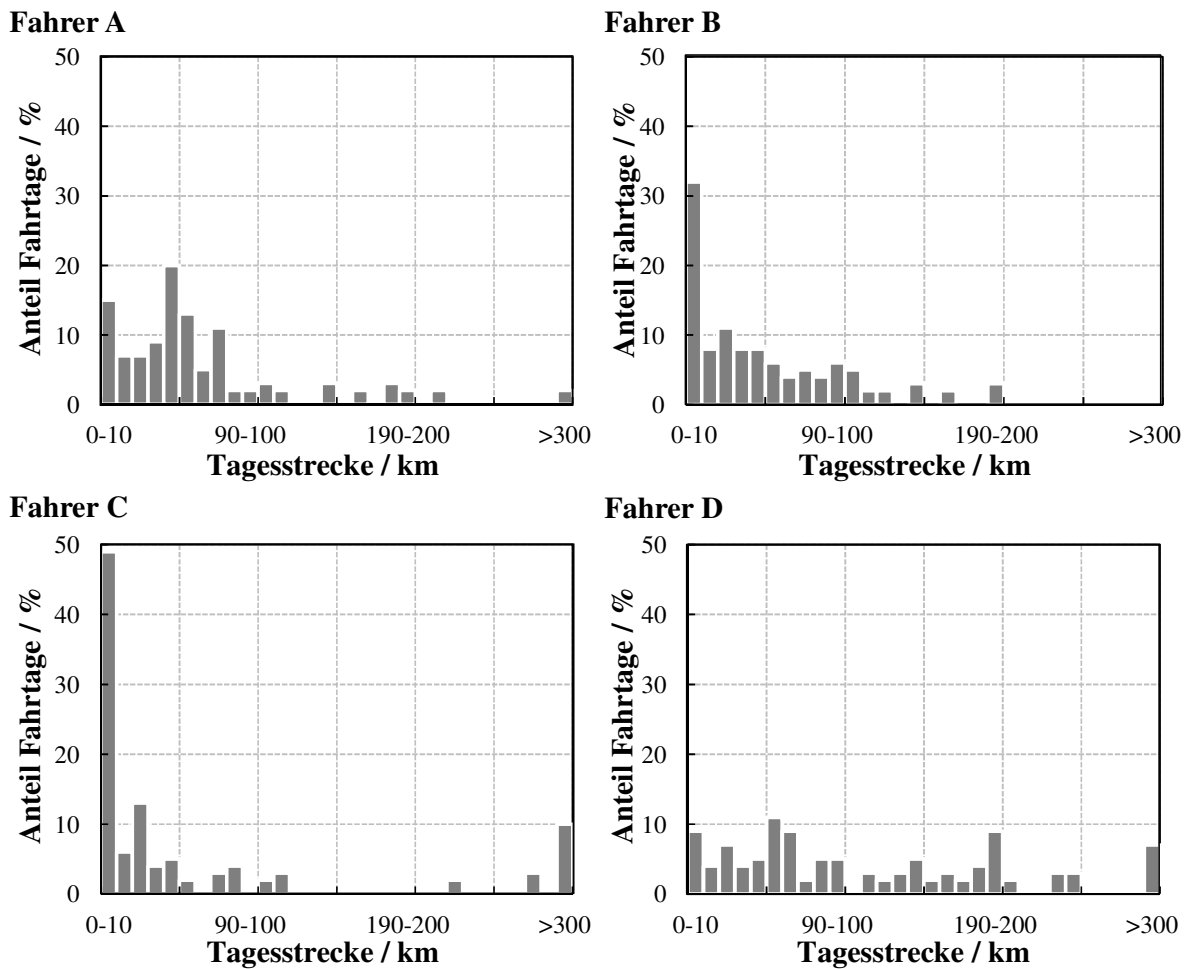


Abbildung 3.21: Tagesstreckenverteilung für die vier ausgewählten Fahrer A, B, C und D aus dem euroFOT-Projekt ([www.eurofot-ip.eu](http://www.eurofot-ip.eu), 2012) über mehrere Monate Aufzeichnungszeitraum

### 3.3.8 Verbrauch und Verbrauchskosten im Realbetrieb

Analog zur Analyse im gesetzlichen Fahrzyklus wird auch im Realbetrieb für die ausgewählten Fahrer für jede mögliche Kombination von Energieinhalt des HV-Speichers und Leistung der E-Maschine im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs der Kraftstoff- und Stromverbrauch ermittelt. Anschließend werden diese mit dem Kraftstoff- bzw. Strompreis multipliziert, um die Verbrauchskosten zu erhalten.

#### Verbrauch im Realbetrieb

Der NEFZ ist ein synthetischer Fahrzyklus, der kein reales Fahrprofil abbildet und somit für die Analysen im Realbetrieb nicht geeignet ist. Ein realitätsnäherer Verbrauch wird im „5-Cycle-Test“ der Environmental Protection Agency (EPA) in den USA ermittelt. Das Testverfahren besteht aus fünf Zyklen, in denen unterschiedliche Fahrprofile für Stadt, Autobahn und höheren Geschwindigkeiten berücksichtigt werden, sowie Klimatisierung und Heizung. (Environmental Protection Agency, 2006) Der daraus ermittelte Kraftstoffverbrauch wird in den folgenden Analysen als Kraftstoffverbrauch im Realbetrieb angenommen. Da nicht zu jedem betrachteten Fahrzeug ein Verbrauch nach dem „EPA-5-Cycle-Test“ vorliegt, sind folgende Zusammenhänge zugrunde gelegt, empirisch ermittelt mit aktuellen Werten aus (www.bmw.de, 2012) und (www.fueleconomy.gov, 2013):

$$KV_{ICEV} = KV_{ICEV,NEFZ} \cdot 1,3 \text{ und} \quad (3.18)$$

$$KV_{HEV} = KV_{HEV,NEFZ} \cdot 1,4. \quad (3.19)$$

Passend zu den ermittelten Gleichungen wird in (Wünsch, et al., 2010) ein erhöhter Kraftstoffverbrauch von ca. 30 % im Realbetrieb gegenüber dem NEFZ hergeleitet. Die dargestellten Zusammenhänge sind aufgrund der empirischen Ermittlung an ausgewählten Fahrzeugen und der starken Variation zwischen verschiedenen Fahrern nicht allgemein gültig. Diese sind jedoch geeignet für einen relativen Vergleich von PHEV-Varianten mit unterschiedlich dimensionierten E-Systemen in der frühen Entwicklungsphase. Außerdem ist dies nicht im Fokus der folgenden Analysen, da das elektrische Fahren eines PHEVs, als großer Stellhebel für die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, den Analyseschwerpunkt darstellt.

Analog zu der Vorgehensweise bei der Analyse mit Gesetzeszyklen wird ausgehend vom Kraftstoffverbrauch eines HEVs in Realfahrten der des PHEVs im hybriden Betriebsmodus abgeleitet (Ried, et al., 2013a):

$$KV_{PHEVh} = KV_{HEV} \cdot \left(100 + \frac{\Delta m_{PHEV-HEV \cdot Z}}{m_{HEV \cdot 0,1}}\right) / 100. \quad (3.20)$$

Ein weiteres Verfahren, um den Kraftstoffverbrauch eines PHEVs zu ermitteln ist in (Nies, et al., 2012) beschrieben, jedoch sind hier detaillierte aufgezeichnete Daten notwendig, wie beispielweise die Einspritzmenge des Kraftstoffs im Motor.

Der resultierende Kraftstoffverbrauch des PHEVs, unter Berücksichtigung des elektrischen und hybriden Betriebsmodus, wird in Realfahrten und im gesetzlichen Fahrzyklus unterschiedlich ermittelt. Während im gesetzlichen Fahrzyklus eine Formel die Verrechnung der Verbräuche in beiden Betriebsmodi vorgibt, wird für die Analyse im Realbetrieb der Substitutionsgrad und der Stromverbrauch des PHEVs detailliert im Modell simuliert.

Der Substitutionsgrad eines PHEVs beschreibt den Anteil der Energie, welcher durch das elektrische System übernommen werden kann. Der Quotient aus dem simulierten Energieanteil der Realfahrten, den das elektrische System übernimmt ( $E_{\text{elektrisch}}$ ), und aus der gesamten erforderlichen Energie der Realfahrten ( $E_{\text{gesamt}}$ ), definiert den energetischen Substitutionsgrad (Ried, et al., 2013a):

$$SG_{\text{PHEV}} = \frac{E_{\text{elektrisch}}}{E_{\text{gesamt}}}. \quad (3.21)$$

Der Substitutionsgrad ist sehr stark vom zugrunde gelegten Fahr- und Nutzungsprofil abhängig und ist für Fahrer A als Fläche im P/E-Lösungsraum eines PHEVs in Abbildung 3.22 dargestellt. Im Bereich mit geringem Energieinhalt des HV-Speichers steigt der Substitutionsgrad steil an, da bereits einige Fahrtanteile elektrisch gefahren werden können. Dabei wird angenommen, dass der Energiespeicher einmal über Nacht voll aufgeladen wird. Im Bereich mit höherem Energieinhalt des HV-Speichers flacht der Graph ab (Sättigung), da der Energiebedarf der täglichen Fahrstrecke die gespeicherte elektrische Energiemenge unterschreitet. Über die Leistung ist ein ähnlicher Verlauf zu beobachten, jedoch wird die Sättigung meist früher erreicht. Eine vollständige Substitution, was einem Substitutionsgrad von 100 % entspricht, wird nicht erreicht. Der Energieinhalt aus dem HV-Speicher innerhalb der betrachteten Grenzen des Lösungsraums ist für sehr weite Tagesstrecken nicht ausreichend.



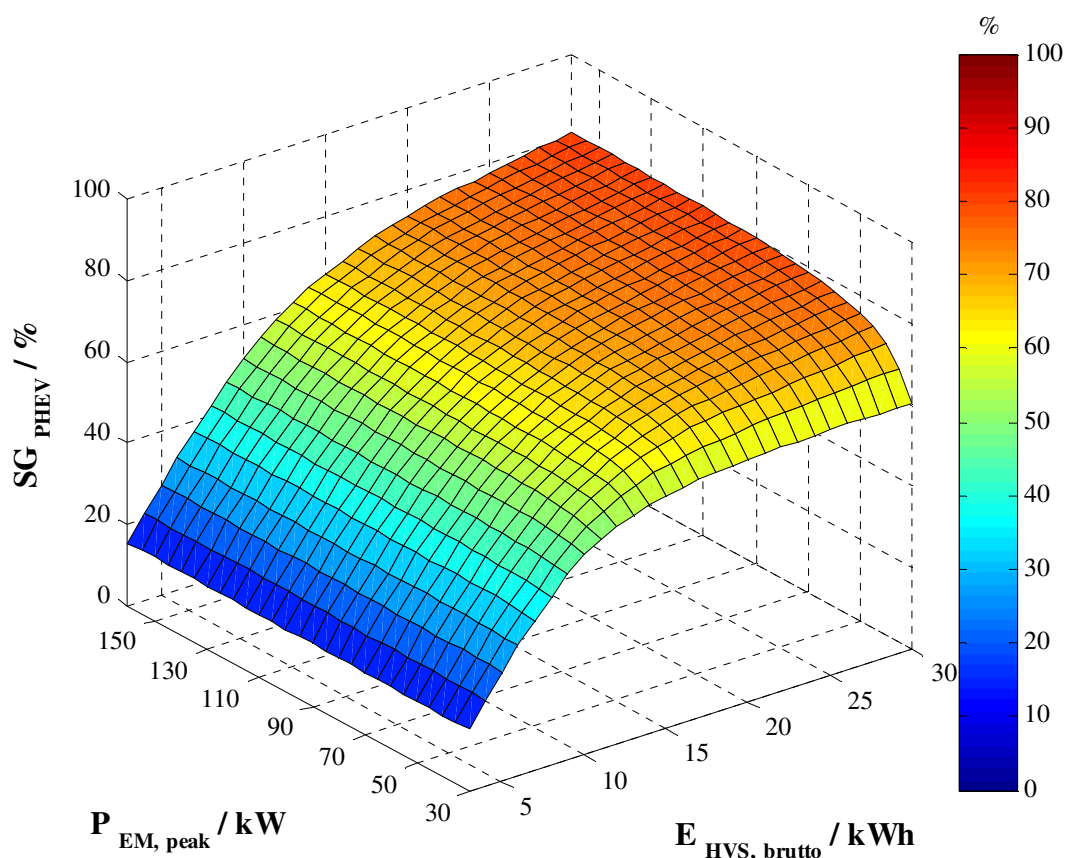


Abbildung 3.22: Substitutionsgrad von Fahrer A, im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs (dargestellt als Fläche)

Eine weitere Möglichkeit der Darstellung bietet die Draufsicht in der x-y-Ebene mit Höhenlinien, wie in Abbildung 3.23. Zur besseren Lesbarkeit ist rechts daneben der Substitutionsgrad über dem Energieinhalt dargestellt, jeweils als Schnitte bei 30, 60, 90 und 120 kW Spitzenleistung der E-Maschine. Es ist zu erkennen, dass die Höhenlinien bis ca. 15 kWh eng beinander liegen, was einem steilen Anstieg entspricht. Bei größeren HV-Speichern werden die Abstände der Höhenlinien größer und der Graph flacht ab. Die Schnitte zeigen deutlich, dass bis ungefähr 10 kWh die gesamte Energiemenge mit 30 kW für die Fahraufgabe genutzt werden kann. Eine Leistungssteigerung führt energetisch, hinsichtlich des Verbrauchspotentials, zu keiner oder nur einer geringen Verbesserung. Zu jedem Energieinhalt existiert somit eine sinnvolle Leistung, um den Energiespeicher optimal auszunutzen, was bei dieser kostenintensiven Komponente von großer Bedeutung ist. Diese Leistungen liegen ungefähr im Übergang der Höhenlinien vom vertikalen zum horizontalen Verlauf. (Ried, et al., 2013a) (Sauer & Ecker, 2013)

**Realbetrieb, Fahrer A**

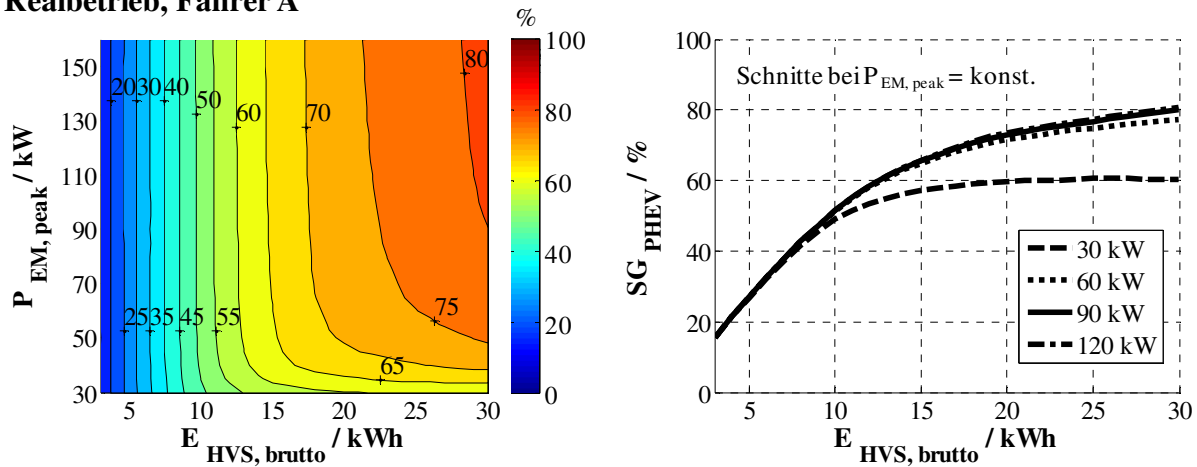


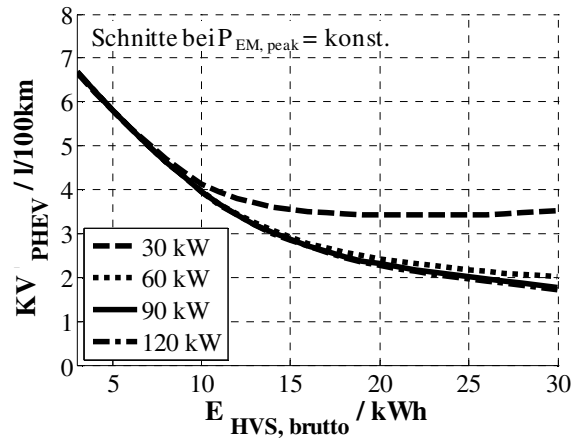
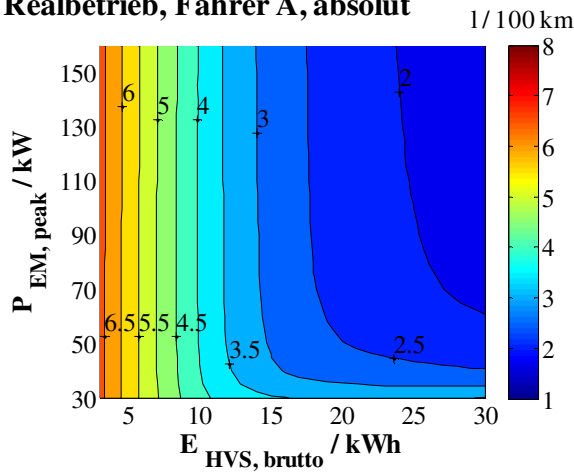
Abbildung 3.23: Substitutionsgrad von Fahrer A im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs (dargestellt als Höhenlinien und Schnitte)

Der Substitutionsgrad bildet, neben dem Kraftstoffverbrauch im hybriden Betriebsmodus, die Basis für die Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs eines PHEVs. Dabei wird berücksichtigt, dass im elektrischen Betriebsmodus kein Kraftstoff verbraucht wird (Ried, et al., 2013a):

$$KV_{PHEV} = KV_{PHEVh} \cdot (1 - SG_{PHEV}). \quad (3.22)$$

Der Kraftstoffverbrauch ist, analog zum Substitutionsgrad, sehr stark vom zugrunde gelegten Fahr- und Nutzungsprofil abhängig und ist für Fahrer A im P/E-Lösungsraum eines PHEVs in Abbildung 3.24 dargestellt. Der Kraftstoffverbrauch des PHEVs fällt, analog zum Substitutionsgrad, bereits bei kleinen Energiespeichern schnell ab und erreicht anschließend eine Sättigung. Eine Leistungssteigerung bis ca. 60 kW ist ab ungefähr 10 kWh sinnvoll, um das volle Potential zu heben. (Ried, et al., 2013b) Im Vergleich zu dem konfigurierten PHEV auf Basis des BMW 1er Coupés wird für die ICEV-Variante des gleichen Fahrzeugs im realitätsnahen Betrieb ein Kraftstoffverbrauch von 8,6 l/100km angenommen (www.fueleconomy.gov, 2013).

**Realbetrieb, Fahrer A, absolut**



**Realbetrieb, Fahrer A, relativ**

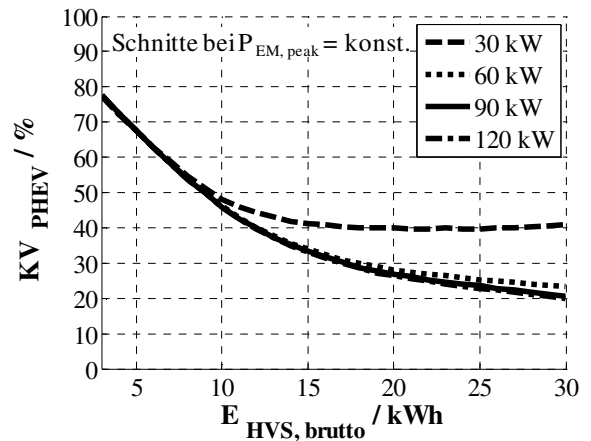
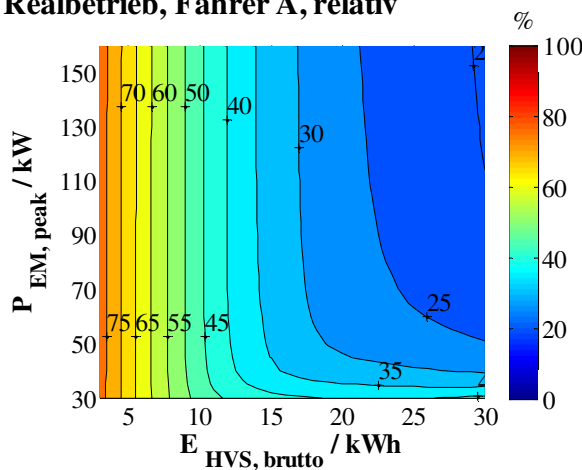


Abbildung 3.24: Absoluter und relativer Kraftstoffverbrauch von Fahrer A im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés, im Vergleich zu einer ICEV-Variante mit 8,6 l/100km im realitätsnahen Betrieb

**Sensitivitäten zu anderen Fahrern**

In Abbildung 3.25 sind die Kraftstoffverbräuche für Fahrer B, C und D im P/E-Lösungsraum eines PHEVs dargestellt. Der Einfluss der unterschiedlichen Fahr- und Nutzungsprofile ist deutlich zu erkennen. Eine darauf angepasste Auslegung der Technik zukünftiger Fahrzeuge stellt den größten Stellhebel dar, um den Kraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb zu senken (Klaiß & Karspeck, 2010).

Für Fahrer B, der energetisch für PHEVs geeignet ist, jedoch tendenziell mehr Leistung benötigt, ergibt sich wie bei Fahrer A mit großen HV-Speichern ein Kraftstoffverbrauch von 2,5 l/100km, jedoch erst bei 120 kW im Vergleich zu 40 kW. Mit einer kleineren Leistung ist es nicht möglich die komplette installierte Energiemenge für die Fahraufgabe zu verwenden und das Minimum zu erreichen.

Fahrer C ist aufgrund seiner ungünstigen Tagesstreckenverteilung weniger für PHEVs geeignet und erreicht im besten Fall einen Verbrauch von 5,5 l/100km. Die Wahrscheinlichkeit für Fahrtage mit bis zu 10 km Tagesstrecke ist mit 50 % bei Fahrer C sehr hoch. Die kürzeren Tagesstrecken können mit relativ kleinem HV-Speicher abgedeckt werden, jedoch wird der Großteil der Energie auf den weiteren Fahrten umgesetzt (Waldowski, et al., 2012). Eine Halbierung des Kraftstoffverbrauchs eines ICEVs von 8,6 l/100km in einem realitätsnahen Betrieb wird bei Fahrer C nicht erreicht. Im Vergleich dazu werden bei Fahrer A 4,3 l/100km mit ca. 10 kWh realisiert.

Einen ähnlichen Verlauf des Kraftstoffverbrauchs wie Fahrer C erzielt Fahrer D. Auch hier werden im betrachteten P/E-Lösungsraum für PHEVs bis 30 kWh die weiten Fahrten, in denen sehr viel Energie umgesetzt wird, mit dem elektrischen System nicht komplett abgedeckt.

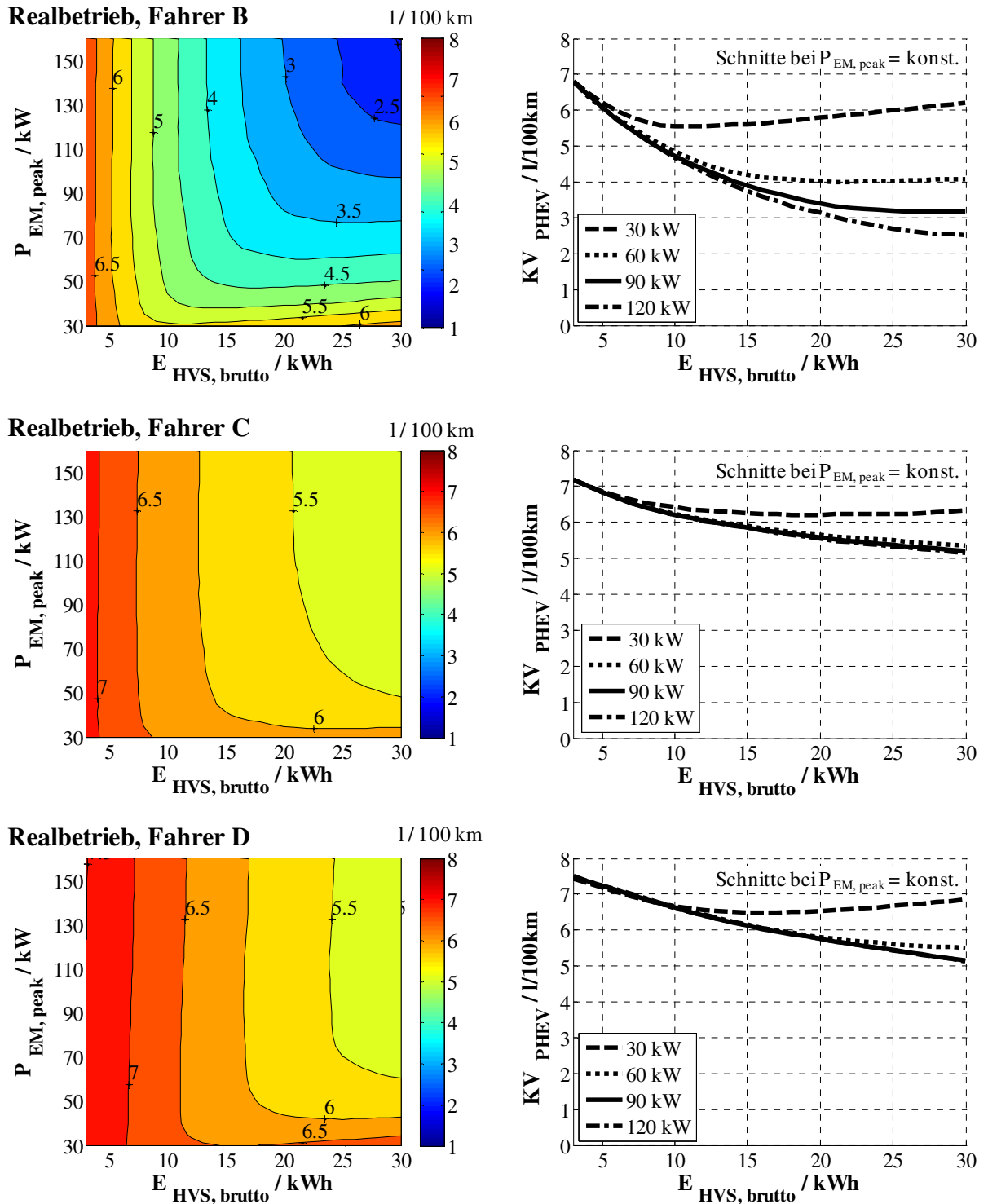


Abbildung 3.25: Kraftstoffverbräuche von Fahrer B, C und D im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés, im Vergleich zu einer ICEV-Variante mit 8,6 l/100km im realitätsnahen Betrieb

#### Verbrauchskosten im Realbetrieb

Der Kraftstoff- und Stromverbrauch wird mit den Energiepreisen für Kraftstoff bzw. Strom multipliziert, um die Verbrauchskosten pro 100 km zu ermitteln. Die aktuelle Auswertung wird mit durchschnittlichen Energiepreisen aus 2012 für Benzin (ADAC, 2013) und Strom (BDEW, 2013) durchgeführt. Für zukünftige Energiepreise wird die prognostizierte Steigerung aus (Wallentowitz, et al., 2010) zugrunde gelegt (Ried, et al., 2013b):

- 2011/12: 1,60 €/l und 0,25 €/kWh,
- 2020: 2,40 €/l und 0,28 €/kWh,
- 2025: 3,10 €/l und 0,31 €/kWh.

Die Basis für die folgenden Analysen bilden die Verbrauchskosten eines ICEVs, was den berechneten Kraftstoffkosten zum betrachteten Zeitpunkt entspricht:

$$VK_{ICEV,Jahr} = KV_{ICEV} \cdot KP_{Jahr} \quad (3.23)$$

Die Verbrauchskosten eines PHEVs setzen sich aus den Kosten für Strom und Kraftstoff zusammen. In der Simulation wird der Stromverbrauch detailliert über die gesamte aufgezeichnete Strecke analysiert und anschließend durch die Messstrecke geteilt, um einen spezifischen Stromverbrauch in Wh/km zu erhalten:

$$VK_{PHEV,Jahr} = KV_{PHEVh} \cdot KP_{Jahr} + \left( \frac{SV_{PHEV} \cdot SP_{Jahr}}{D} \cdot 100 \right) \quad (3.24)$$

mit

D = aufgezeichnete Strecke der Realfahrten in km.

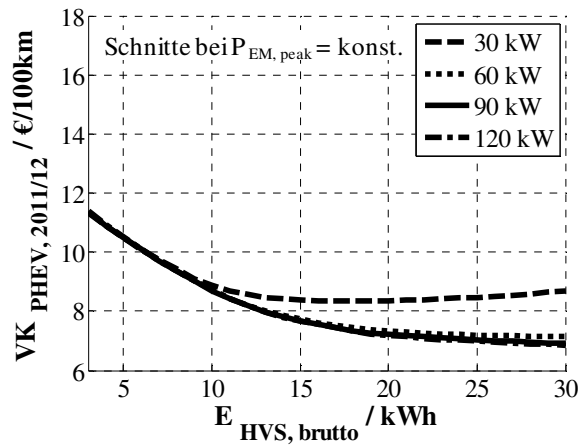
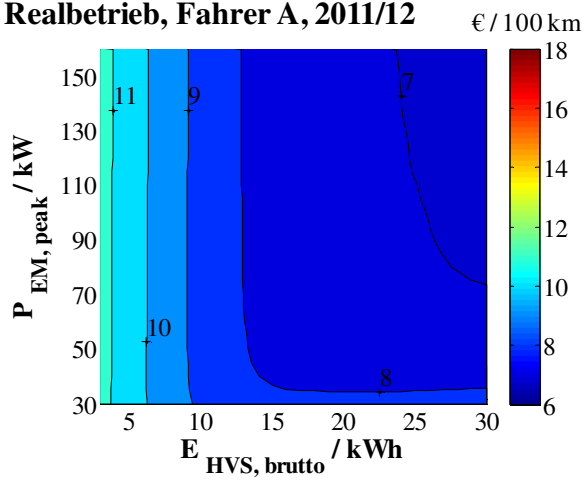
Die Verbrauchskosteneinsparung eines PHEVs gegenüber einem ICEV zum betrachteten Zeitpunkt ergibt sich folgendermaßen:

$$\Delta VK_{PHEV,Jahr} = VK_{ICEV,Jahr} - VK_{PHEV,Jahr} \quad (3.25)$$

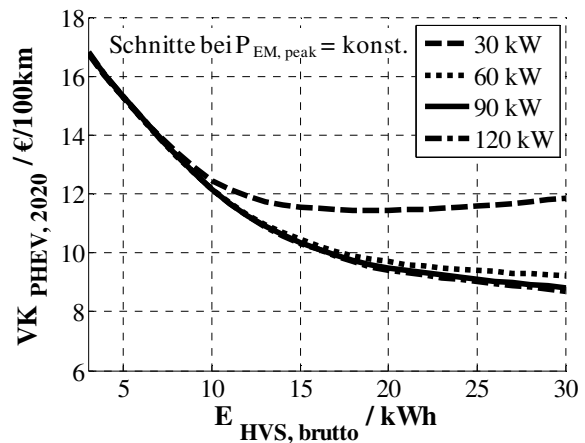
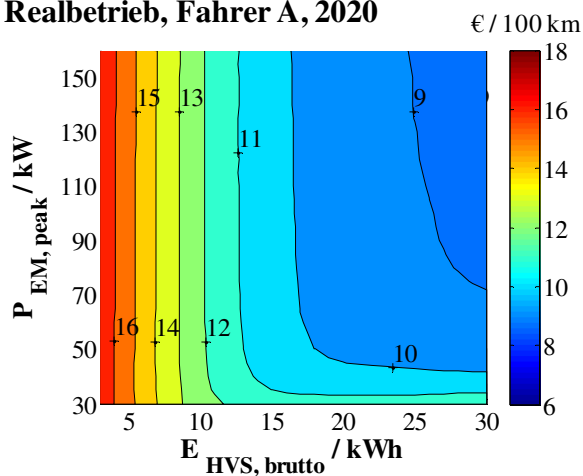
Für das betrachtete Fahrzeug (BMW 1er Coupé) ergeben sich für das Jahr 2011/12 Verbrauchskosten eines ICEVs im realen Betrieb von ca. 13,80 €/100km. Der prognostizierte Anstieg des Benzinpreises führt im Jahr 2020 zu 20,60 €/100km und 2025 zu 26,70 €/100km. Der Kraftstoffverbrauch des ICEVs wird für die Jahre 2011/12, 2020 und 2025 gleichgesetzt, um den Einfluss der Elektrifizierung deutlich herauszustellen. Die Verbrauchskosten für das Jahr 2011/12 im realen Fahrbetrieb sind für Fahrer A im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs in Abbildung 3.26 dargestellt, sowie die prognostizierte Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025. Der Verlauf in den betrachteten Zeiträumen ist ähnlich zu dem Verlauf des

Kraftstoffverbrauchs in Abbildung 3.24. Bei einem beispielhaft konfigurierten PHEV mit einem HV-Speicher mit 10 kWh und ausreichender Leistung entstehen im Jahr 2011/12 Verbrauchskosten von 9 €/100km. Für die Jahre 2020 und 2025 ergeben die Prognosen 12,50 €/100km bzw. 15 €/100km. Der geringere Zuwachs, im Vergleich zu den Verbrauchskosten eines ICEVs, ist auf die geringere, prognostizierte Steigerung des Strompreises im Vergleich zum Benzinpreis zurückzuführen. Im Jahr 2011/12 ergibt sich eine Ersparnis mit dem beispielhaften PHEV gegenüber einem ICEV von knapp 5 €/100km, für 2020 ungefähr 8 €/100km und für 2025 fast 12 €/100km.

Realbetrieb, Fahrer A, 2011/12



Realbetrieb, Fahrer A, 2020



Realbetrieb, Fahrer A, 2025

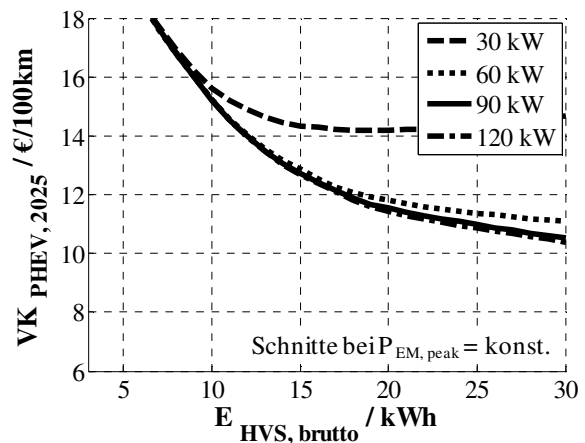
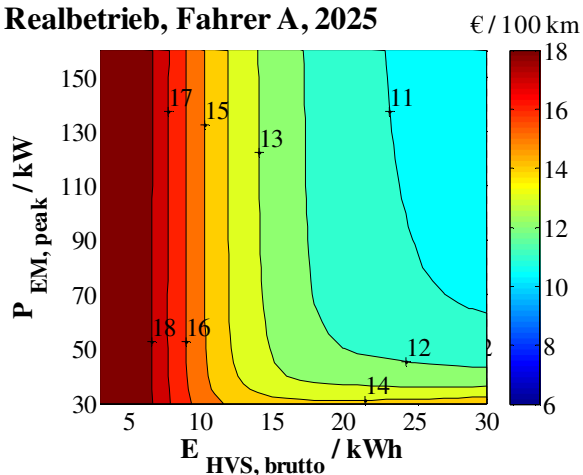


Abbildung 3.26: Verbrauchskosten von Fahrer A im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs für 2011/12 sowie eine prognostizierte Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025



### 3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse hinsichtlich Kosten und Verbrauch von PHEVs

Die Ergebnisse der vorausgegangenen Kosten- und Verbrauchsanalysen werden zu einer Wirtschaftlichkeitsanalyse für Käufer eines PHEVs kombiniert. Für die Dimensionierung des elektrischen Systems eines PHEVs wird der P/E-Lösungsraum analysiert und ein optimaler Auslegungsbereich identifiziert. In Sensitivitätsanalysen sind die Auswirkungen von Parametervariationen der Prämissen dargestellt. Die Analysen erfolgen im NEFZ nach der ECE-Norm und im Realbetrieb für das Jahr 2011/12 sowie prognostiziert für die Jahre 2020 und 2025.

#### 3.4.1 Definition des wirtschaftlich optimalen Auslegungsbereichs

Eine Möglichkeit für die Identifikation des wirtschaftlich optimalen Bereichs im P/E-Lösungsraum, unter den angenommenen Prämissen, ist die Identifikation des minimalen Quotienten aus Kosten und Verbrauch. Dazu werden die Mehrkosten für Käufer durch den Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV geteilt und das Minimum ermittelt. Eine weitere Definition des optimalen Bereichs ist die minimale Amortisationsdauer der Mehrkosten für Käufer durch die Verbrauchskosteneinsparung eines PHEVs gegenüber einem ICEV (Ried, et al., 2013b). In der Wirtschaftlichkeitsanalyse aus Käufersicht sind nicht die gesamten, sogenannten „Total Cost of Ownership“ (TCO) berücksichtigt, sondern nur die Anschaffungs- und Verbrauchskosten, da diese im Wesentlichen durch die Technik festgelegt werden (Diez & Kohler, 2010). Für eine komplette TCO-Betrachtung sind weitere Elemente zu berücksichtigen, wie beispielsweise Steuern, Wertverlust und Wartung, analog zu (Nationale Plattform Elektromobilität, 2011) und (Ernst, et al., 2011). Folgende Größen werden für die Wirtschaftlichkeitsanalyse von PHEVs aus Käufersicht eingeführt:

- $QU_{\text{PHEV, Jahr}}$  = Quotient aus Mehrkosten für Käufer und Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV in Euro pro Liter Kraftstoffeinsparung pro 100 km, im Folgenden als € / l/100km angegeben,
- $AD_{\text{PHEV, Jahr}}$  = Amortisationsdauer der Mehrkosten für Käufer über die Verbrauchskosteneinsparung eines PHEVs gegenüber einem ICEV in Jahren.

Die prinzipiellen Verläufe der Graphen bei einer Wirtschaftlichkeitsanalyse von PHEVs gegenüber ICEVs sind in Abbildung 3.27 über steigendem Energieinhalt dargestellt. Ein ähnlicher Kurvenverlauf ist auch in (Steiger, 2012) und (Du, et al., 2012) zu finden, jedoch mit anderen Größen und Randbedingungen. Für den optimalen Auslegungsbereich darf der Energieinhalt des HV-Speichers nicht zu klein gewählt werden aufgrund eines hohen Grundbetrags an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, der im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben wird. HV-Speicher mit eher höherem Energieinhalt sind auch außerhalb des Optimums wegen der stärker steigenden Mehrkosten im Vergleich zum geringer zunehmenden Verbrauchsvorteil. Es gelten nachwievor die Annahmen bezüglich gleicher Fahr- und Nutzungsprofile, Technologien sowie Verbrauch in den Jahren

2011/12, 2020 und 2025, um den direkten Einfluss der Energiepreise und der Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV darzustellen.

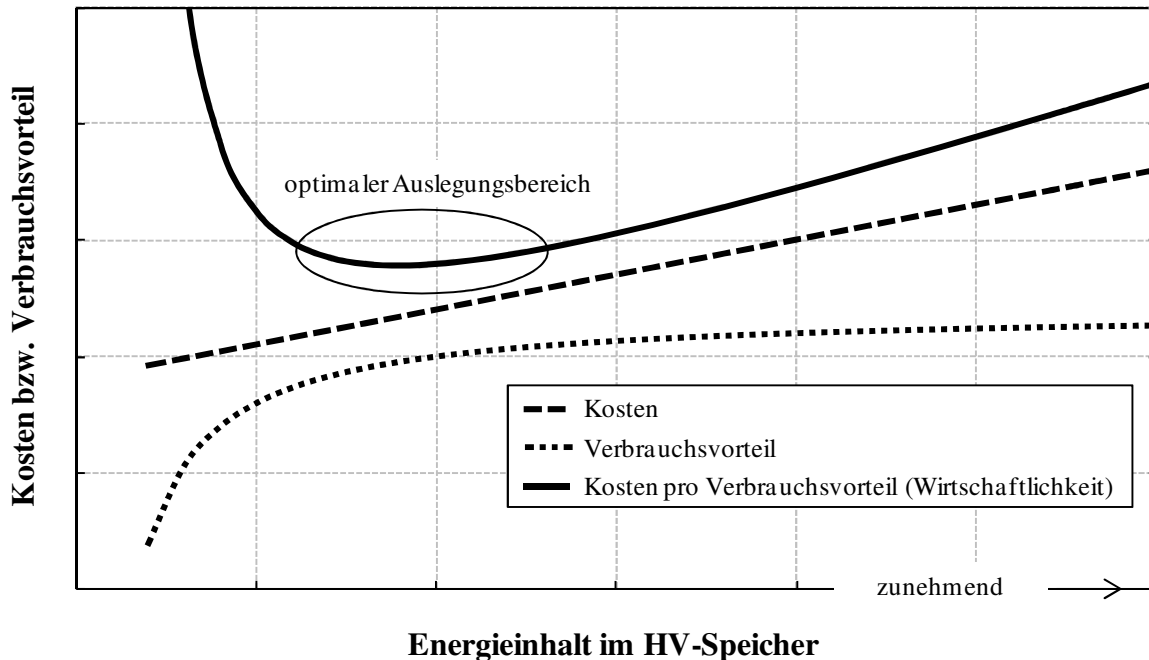


Abbildung 3.27: Prinzipieller Verlauf von Kosten und Verbrauchsvorteil für Käufer eines PHEVs bei unterstellter Nutzung sowie deren Verrechnung zur Ermittlung des optimalen Auslegungsbereichs hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht

#### 3.4.2 Lösungsraumanalyse hinsichtlich des Quotienten aus Kosten und Verbrauch

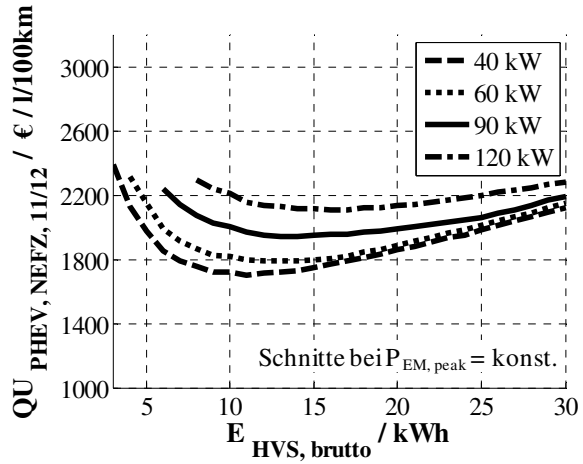
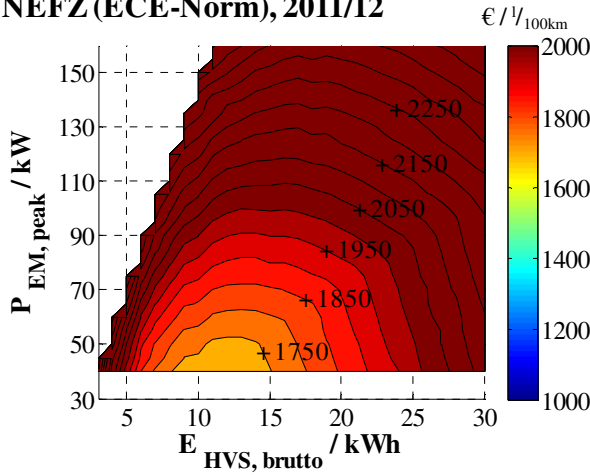
Der Quotient aus Mehrkosten für Käufer und Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV beschreibt den Geldbetrag, den ein Käufer investieren muss, um den Kraftstoffverbrauch um einen Liter pro 100 km zu senken. Die folgenden Berechnungen werden nach der ECE-Norm im NEFZ durchgeführt und im Vergleich dazu für Fahrer A im Realbetrieb, um die Differenzen aufzuzeigen. Außerdem wird der prognostizierte, zeitliche Fortschritt berücksichtigt, um die Veränderungen bis in die Jahre 2020 und 2025 darzustellen, wenn die Mehrkosten für Käufer sinken und die Energiepreise steigen.

##### Mehrkosten pro Kraftstoffverbrauchsvorteil im NEFZ nach der ECE-Norm

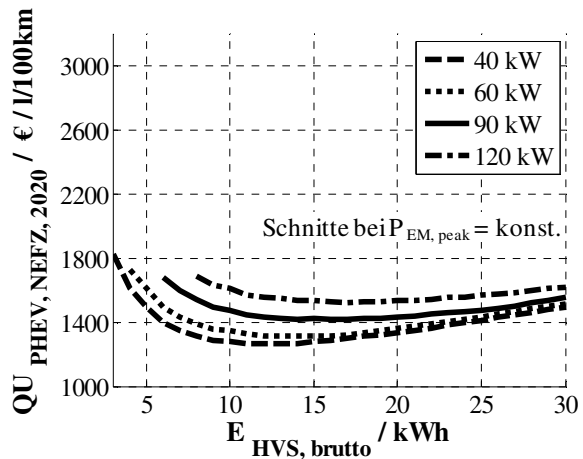
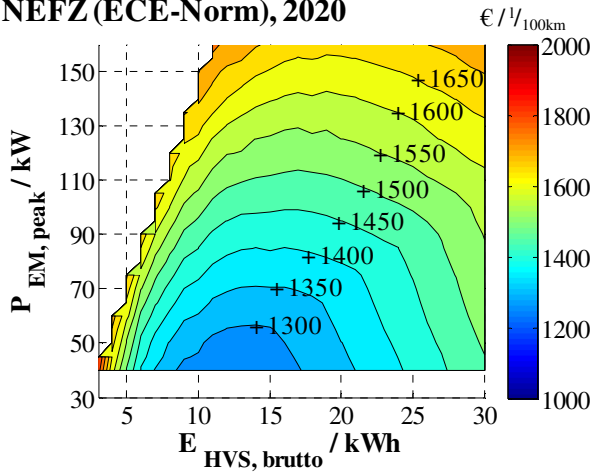
In Abbildung 3.28 ist der Quotient aus Mehrkosten für Käufer und Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV im NEFZ nach der ECE-Norm im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs dargestellt. Im P/E-Lösungsraum ist nur der Bereich über 40 kW Spitzenleistung der E-Maschine analysiert, da damit eine elektrische Zyklusdurchfahrt gewährleistet ist, wie in Abschnitt 3.3.5 beschrieben. Der

optimale Auslegungsbereich liegt zwischen 8 und 15 kWh Energieinhalt des HV-Speichers und einer maximalen Spitzenleistung der E-Maschine von 50 kW. Der zu investierende Geldbetrag des Käufers eines PHEVs beträgt im Jahr 2011/12 ungefähr 1.750 € pro l/100km. Im Jahr 2020 verringert sich der Betrag auf 1300 € pro l/100km und im Jahr 2025 auf 1.100 € pro l/100km, aufgrund der prognostizierten Reduzierung der Herstellkosten für Automobilhersteller, einhergehend mit geringeren Mehrkosten für Käufer. Außerhalb des Minimums ist ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Es existiert somit für Automobilhersteller ein optimaler Auslegungsbereich für die Elektrifizierung in einem PHEV hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht, definiert durch Kosten und Verbrauch im NEFZ nach der ECE-Norm.

NEFZ (ECE-Norm), 2011/12



NEFZ (ECE-Norm), 2020



NEFZ (ECE-Norm), 2025

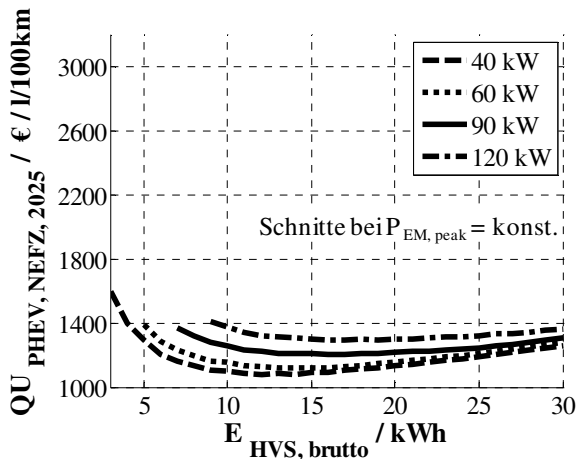
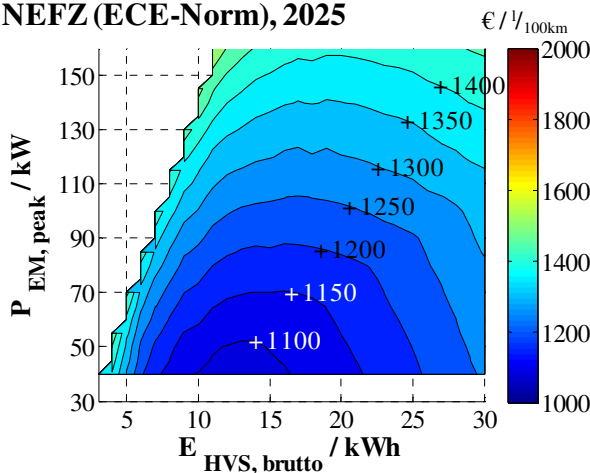
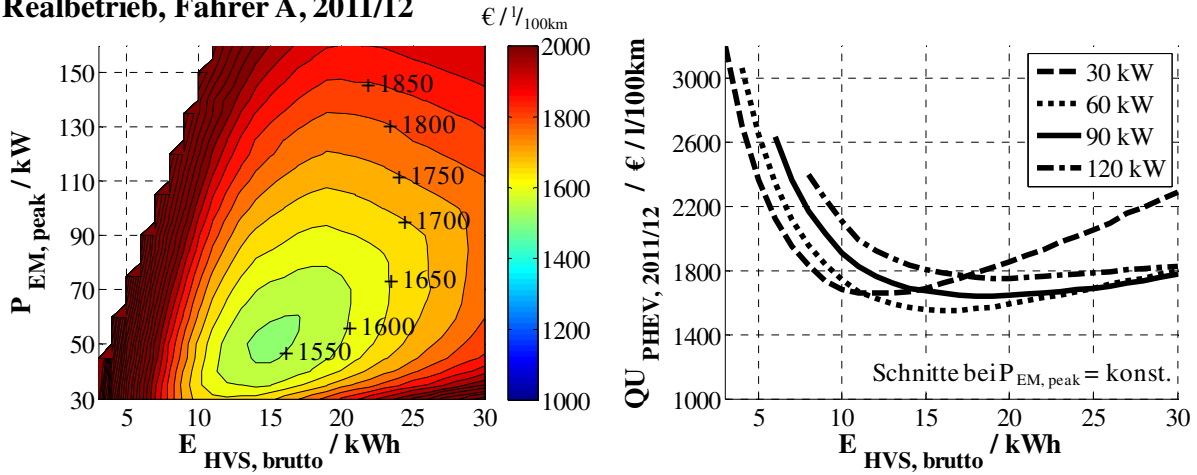


Abbildung 3.28: Quotient aus den Mehrkosten für Käufer und dem Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV im P/E-Lösungsraum für das Jahr 2011/12 sowie eine prognostizierte Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025 (Analysen im NEFZ nach der ECE-Norm für den konfigurierten PHEV auf Basis des BMW 1er Coupés)

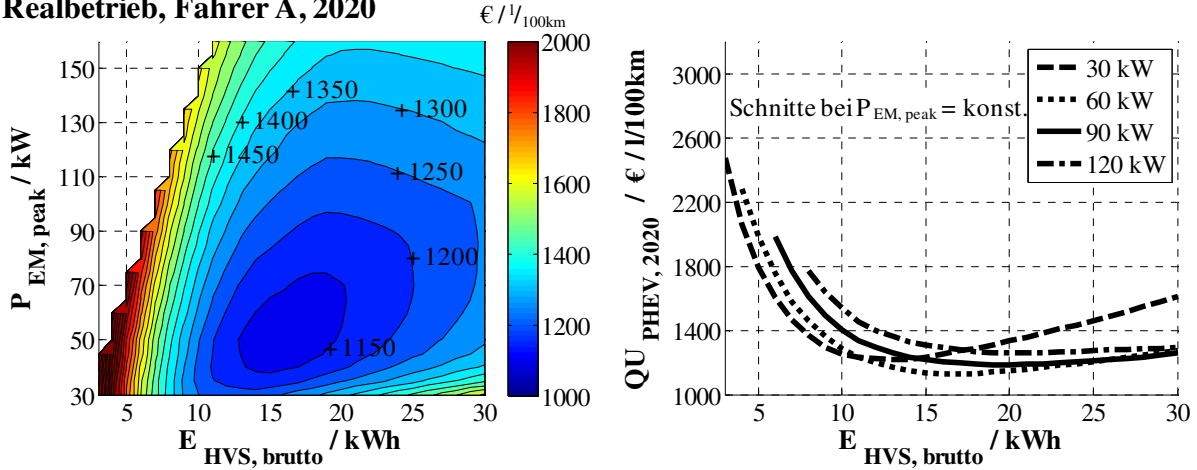
#### **Mehrkosten pro Kraftstoffverbrauchsvorteil im Realbetrieb**

Das Minimum des Quotienten aus Mehrkosten für Käufer und Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV verschiebt sich im Realbetrieb in Richtung höherer Leistung und höherem Energieinhalt. Wie in Abbildung 3.29 zu erkennen, liegt der optimale Bereich für den beispielhaft ausgewählten Fahrer A zwischen 40 bis 60 kW Leistung der E-Maschine und 14 bis 16 kWh Energieinhalt des HV-Speichers, auf einem Niveau von ungefähr 1.550 € pro l/100km. Das Niveau liegt unter dem Wert im NEFZ nach der ECE-Norm. Für die Jahre 2020 und 2025 werden geringere Mehrkosten prognostiziert, was eine Reduzierung auf 1.150 beziehungsweise 1.000 € pro l/100km zu Folge hat. Ein deutlicher Anstieg außerhalb des Minimums ist analog zu den Analysen auf Basis des NEFZ nach der ECE-Norm zu erkennen.

Realbetrieb, Fahrer A, 2011/12



Realbetrieb, Fahrer A, 2020



Realbetrieb, Fahrer A, 2025

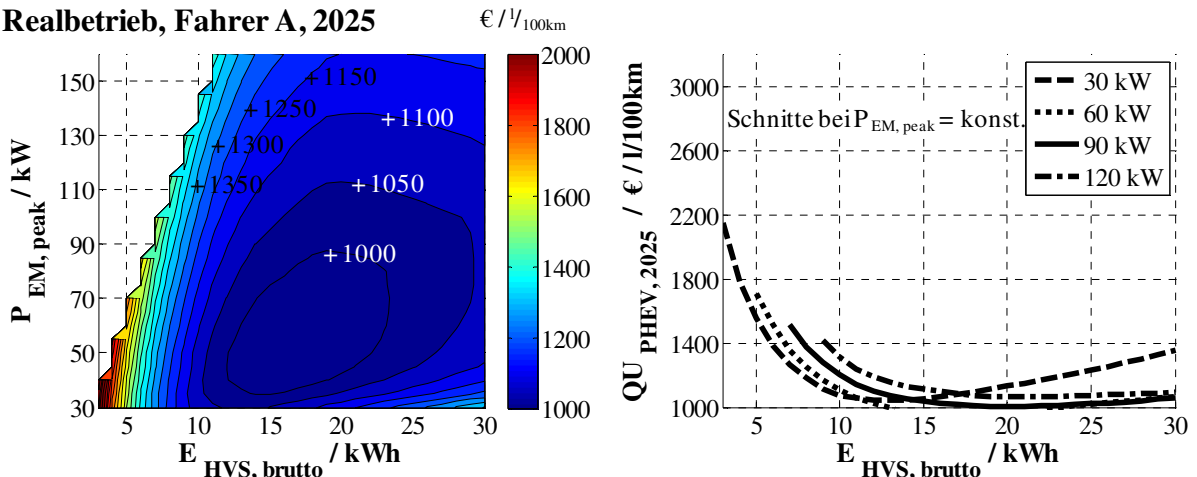


Abbildung 3.29: Quotient aus Mehrkosten für Käufer und Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV im P/E-Lösungsraum für das Jahr 2011/12 sowie eine prognostizierte Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025 (Analysen mit dem konfigurierten PHEV auf Basis des BMW 1er Coupés im Realbetrieb am Beispiel von Fahrer A)

Eine weitere Möglichkeit der Darstellung ist der Quotient aus Mehrkosten in Euro pro relativen Kraftstoffverbrauchsvorteil in Prozent. Für diese Analysen gelten die identischen Prämissen hinsichtlich Verbrauch und Kosten wie bei den Analysen im Abschnitt zuvor. Tabelle 3.7 zeigt eine Gesamtübersicht der Quotienten aus Mehrkosten pro relativen Kraftstoffverbrauchsvorteil eines PHEVs gegenüber einem ICEV in den jeweiligen optimalen Auslegungsbereichen. Das Optimum ist jeweils individuell ermittelt, da sich unterschiedliche Bereiche ergeben, abhängig von Fahrer und Betrachtungszeitpunkt. Tendenziell liegt der optimale Auslegungsbereich bei mittlerer Leistung und mittlerem Energieinhalt, innerhalb der definierten Betrachtungsgrenzen. Bei Fahrer A sind im Jahr 2011/12 ca. 130 Euro Mehrkosten erforderlich um den Kraftstoffverbrauch um ein Prozent zu reduzieren. Bis in das Jahr 2020 sinken die erforderlichen Mehrkosten für die gleiche Kraftstoffeinsparung um knapp 30 % und bis in das Jahr 2025 um weitere 15 %. Im Vergleich dazu sind für die anderen betrachteten Fahrer höhere Mehrkosten erforderlich um die gleiche Reduzierung zu erreichen, beispielsweise bei den Fahrern C und D über das Doppelte im Vergleich zu Fahrer A. Es existiert somit für jeden Fahrer individuell ein optimaler Auslegungsbereich für das elektrische System eines PHEVs hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht, definiert durch Kosten und Verbrauch. Das Ziel für die Automobilhersteller bei der Auslegung von PHEVs ist das Optimum für zielgruppenrelevante Fahrer zu erreichen.

Tabelle 3.7: Gegenüberstellung der Quotienten aus Mehrkosten pro relativen Kraftstoffverbrauchsvorteil im Realbetrieb eines PHEVs gegenüber einem ICEV im jeweiligen optimalen Auslegungsbereich von verschiedenen Fahrern und Betrachtungszeitpunkten

<b>Mehrkosten pro relativen Kraftstoffverbrauchsvorteil / €/%</b>			
	<b>2011/12</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>
Fahrer A	130	100	80
Fahrer B	170	120	100
Fahrer C	280	200	170
Fahrer D	300	210	180

#### 3.4.3 Lösungsraumanalyse hinsichtlich der Amortisationsdauer

Die Verrechnung der Mehrkosten für Käufer und der Verbrauchskosteneinsparung eines PHEVs gegenüber einem ICEV ergibt die Amortisationsdauer. Im P/E-Lösungsraum wird damit unter Berücksichtigung der angenommenen Prämissen der optimale Auslegungsbereich identifiziert. Die folgenden Analysen werden ausschließlich für den Realbetrieb durchgeführt

und nicht im NEFZ nach der ECE-Norm, da die für die Rechnung benötigte Jahresfahrleistung aus den aufgezeichneten Realfahrten abgeleitet wird. (Ried, et al., 2013b)

In Abbildung 3.30 ist die Amortisationsdauer im Jahr 2011/12 für Fahrer A im Realbetrieb als Fläche im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs dargestellt. Es ergibt sich ein Minimum zwischen sieben und acht Jahren, bei einer relativ kleinen Dimensionierung von HV-Speicher und E-Maschine hinsichtlich Energieinhalt und Leistung. Ein Anstieg der Amortisationsdauer erfolgt in den ungünstigen Bereichen bei hohen Energieinhalten und kleinen Leistungen, bzw. kleinen Energieinhalten und hohen Leistungen. Eine Auslegung von PHEVs, mit dem Ziel einer niedrigen Amortisationsdauer, erfordert ein optimales Verhältnis von Energieinhalt und Leistung in einem ähnlichen Bereich wie bei den Analysen basierend auf dem Quotienten Mehrkosten pro Kraftstoffverbrauchsvorteil.

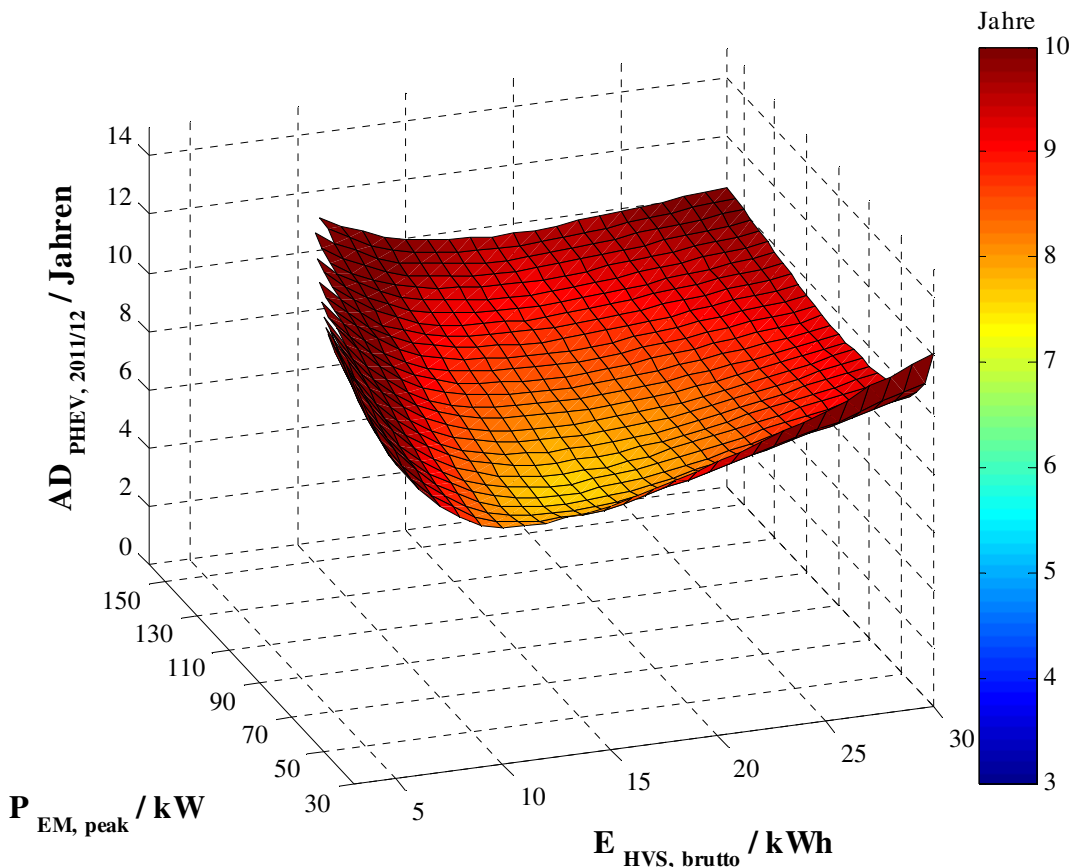


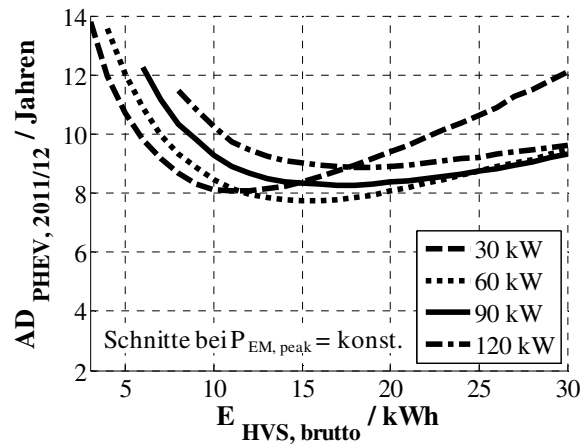
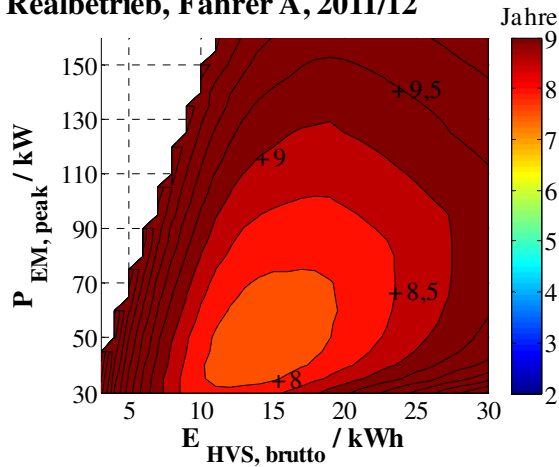
Abbildung 3.30: Amortisationsdauer von Fahrer A im Jahr 2011/12 im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs (Darstellung als Fläche)

Der optimale Auslegungsbereich für Fahrer A liegt ungefähr zwischen 10 und 20 kWh und 30 und 70 kW, was zu einer Amortisationsdauer von ungefähr acht Jahren führt, wie in Abbildung 3.31 dargestellt. Der optimale Auslegungsbereich des HV-Speichers hinsichtlich der Amortisationsdauer ist tendenziell nicht im Bereich kleiner Energieinhalte, obwohl dort bereits ein hoher Kraftstoffverbrauchsvorteil erzielt wird. Der Grund dafür ist, dass die

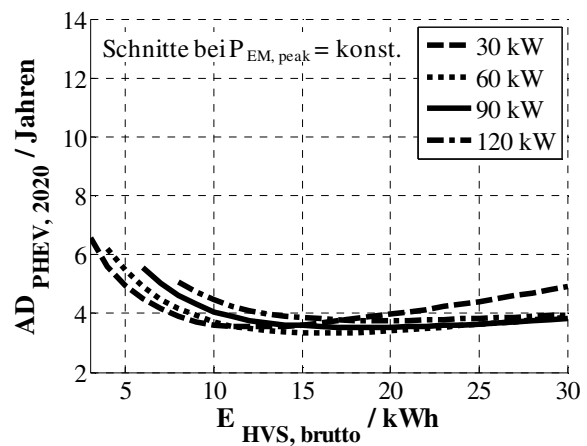
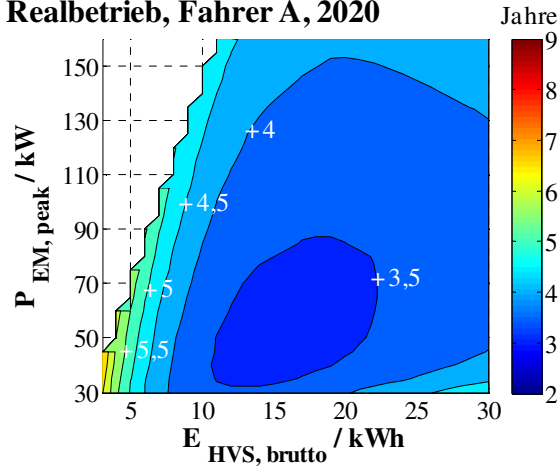


Elektrifizierung von Fahrzeugen, unabhängig von der Dimensionierung des elektrischen Systems, zu einem hohen Grundbetrag an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller führt, der im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben wird. HV-Speicher mit eher höherem Energieinhalt sind auch außerhalb des Optimums wegen der stärker steigenden Mehrkosten im Vergleich zum geringer zunehmenden Verbrauchsvorteil. (Ried, et al., 2013b) Für die Jahre 2020 und 2025 wird prognostiziert, dass die Kraftstoffpreise steigen und die Herstellkosten für Automobilhersteller sowie die damit verbundenen Mehrkosten für Käufer eines PHEVs sinken. Aus diesen Gründen ist mit einer deutlichen Reduzierung der Amortisationsdauer zu rechnen, was auch die folgenden Analysen bestätigen. Eine akzeptierte Amortisationsdauer für die erhöhten Kosten von neuen Fahrzeugkonzepten liegt für europäische Autokäufer bei sechs bis sieben Jahren (Pasaoglu, et al., 2011). Außerdem kann eine akzeptierte Amortisationsdauer über die durchschnittliche Haltdauer von Fahrzeugen hergeleitet werden, die laut (Propfe, et al., 2012) in Deutschland vier Jahre beträgt. Beide Werte werden für Fahrer A im Jahr 2020 erreicht, wie in Abbildung 3.31 dargestellt.

Realbetrieb, Fahrer A, 2011/12



Realbetrieb, Fahrer A, 2020



Realbetrieb, Fahrer A, 2025

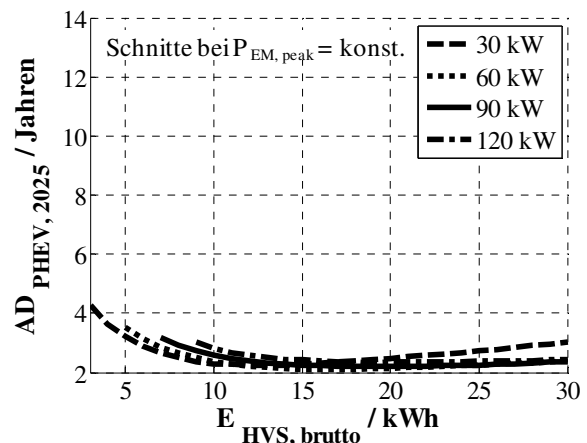
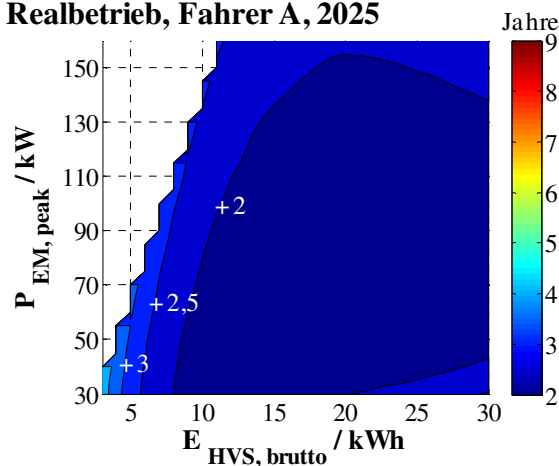


Abbildung 3.31: Amortisationsdauer von Fahrer A im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs im Jahr 2011/12 und eine prognostizierte Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025 (Darstellung mit Höhenlinien und Schnitten)

#### **Sensitivitäten zu anderen Fahrern**

Die Amortisationsdauer ist nicht nur abhängig vom betrachteten Zeitpunkt, sondern auch entscheidend von Fahrprofil und von der Nutzungscharakteristik der Fahrer. In Abbildung 3.32 sind die Amortisationsdauern von PHEVs gegenüber einem ICEV für Fahrer B, C und D im Jahr 2020 prognostiziert.

Für Fahrer B, der energetisch für PHEVs geeignet ist, jedoch tendenziell mehr Leistung benötigt, ergibt sich eine Amortisationsdauer von ca. 7,5 Jahren im Bereich von 13 bis 20 kWh und 60 bis 90 kW. Mit einer geringeren Leistung ist es nicht möglich die komplette installierte Energiemenge für die Fahraufgabe zu verwenden. Deswegen wird das Minimum nicht erreicht. Das ungünstige Verhältnis von hohen Energieinhalten und kleineren Leistungen ist in Abbildung 3.32 deutlich zu erkennen, da in diesem Bereich die Höhenlinien eng beieinander liegen, was auf einen starken Anstieg der Amortisationsdauer hindeutet. Die minimale Amortisationsdauer von 7,5 Jahren ist hoch und es ist fraglich, ob für diesen Fahrer ein PHEV hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit geeignet ist.

Fahrer C ist aufgrund seiner geringen Fahrhäufigkeit und der damit verbundenen niedrigen Jahresfahrleistung nicht für PHEVs geeignet, was eine minimale Amortisationsdauer von ca. 13 Jahren bestätigt. Das Minimum wird zwischen 7 und 16 kWh bereits mit kleinerem Energieinhalt als bei Fahrer A und B erreicht. Dies ist auf die Tagesstreckenverteilung in Abbildung 3.21 zurückzuführen. Es wird deutlich, dass es sinnvoll ist mit PHEVs ausschließlich die kürzeren Tagesstrecken abzudecken und nicht mit noch größeren HV-Speichern Tagesstrecken zu erreichen, die nur selten gefahren werden. Die sinnvolle Auslegungsgrenze ist sehr stark vom Fahr- und Nutzungsprofil abhängig und somit für jeden Fahrer individuell zu ermitteln.

Trotz einer mittleren Tagesfahrstrecke von über 120 km erreicht Fahrer D eine Amortisationsdauer von ungefähr 5,5 Jahren. Gründe hierfür sind die hohe Fahrhäufigkeit von über 70 % und eine prognostizierte Jahresfahrleistung von über 30.000 km. Die Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV amortisieren sich dadurch relativ schnell.

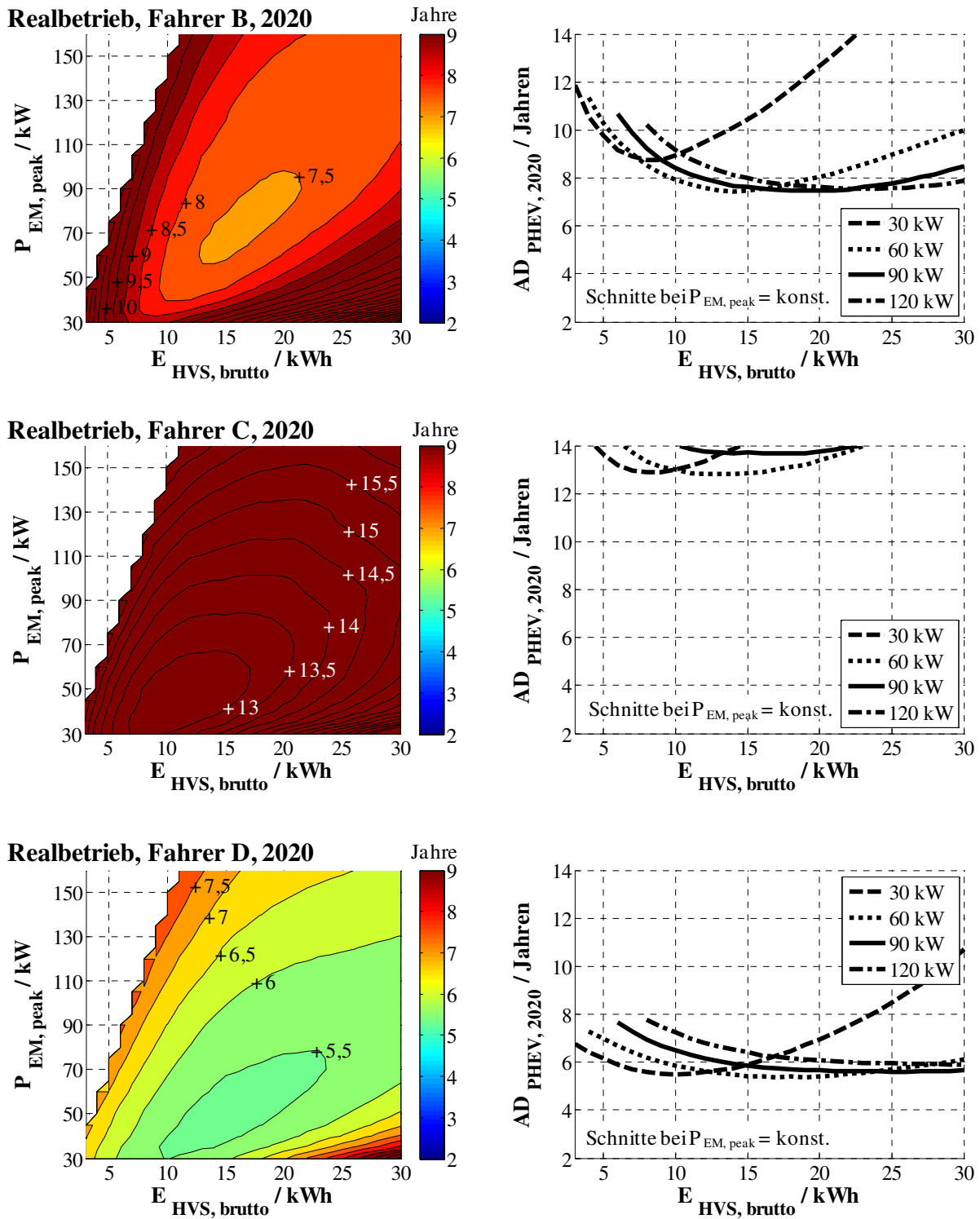


Abbildung 3.32: Amortisationsdauern für Fahrer B, C und D prognostiziert für das Jahr 2020 im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés

### 3.5 Zusammenfassung und Fazit der Wirtschaftlichkeitsanalyse

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse werden Kosten und Verbrauch eines PHEVs aus Käufersicht untersucht und der optimale Auslegungsbereich im Lösungsraum des elektrischen Systems hinsichtlich Energieinhalt und Leistung, unter vorausgesetzten Prämissen, identifiziert. Die Kosten werden als Anschaffungskosten definiert und entsprechen den Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV. Die Mehrkosten für Käufer resultieren aus den zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, die durch die Elektrifizierungsumfänge in einem PHEV entstehen. Der Verbrauch wird als Energiebedarf bei der Nutzung eines PHEVs definiert und entspricht dem Kraftstoff- und Stromverbrauch im Vergleich zu einem ICEV. Der reduzierte Kraftstoffverbrauch führt trotz zusätzlichem Stromverbrauch eines PHEVs gegenüber einem ICEV zu einer gesamthaften Verbrauchskostenreduzierung. Durch die Verrechnung wird auf den Quotienten Kosten pro Verbrauchsvorteil sowie auf die Amortisationsdauer für Käufer geschlossen. Bis in die Jahre 2020 und 2025 verbessern sich beide Größen deutlich aufgrund der prognostizierten Veränderungen der Energiepreise und der Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV. Für den optimalen Auslegungsbereich darf der Energieinhalt des HV-Speichers nicht zu klein gewählt werden aufgrund eines hohen Grundbetrags an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, der im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben wird. HV-Speicher mit eher höherem Energieinhalt sind auch außerhalb des Optimums wegen der stärker steigenden Mehrkosten im Vergleich zum geringer zunehmenden Verbrauchsvorteil. Für die Analysen sind parametrische Modelle in MATLAB für die frühe Phase der Entwicklung programmiert, um Kosten und Verbrauch für verschiedene PHEV-Konfigurationen zu ermitteln.

Die Analyse im NEFZ nach der ECE-Norm identifiziert für Automobilhersteller einen optimalen Auslegungsbereich für die Elektrifizierungsumfänge in einem PHEV bezüglich Kosten pro Verbrauchsvorteil, unabhängig vom Fahr- und Nutzungsprofil. Dieser Bereich liegt für den konfigurierten straßengekoppelten PHEV auf Basis des BMW 1er Coupés nach dem Conversion Design zwischen 8 und 15 kWh Energieinhalt des HV-Speichers und einer Spitzenleistung der E-Maschine von ungefähr 50 kW. Dies entspricht einer elektrischen Reichweite von ungefähr 35 bis 60 km im NEFZ. Bis in das Jahr 2025 vergrößert sich der optimale Auslegungsbereich hinsichtlich des Energieinhalts.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse im Realbetrieb liegen Fahr- und Nutzungsprofile verschiedener Fahrer zugrunde, deren Geschwindigkeitsverläufe über mehrere Monate aufgezeichnet wurden, um eine repräsentative Datenbasis zu erhalten. Für jeden der vier beispielhaft ausgewählten Fahrer ergibt sich ein individueller, optimaler Auslegungsbereich des Quotienten Kosten pro Verbrauchsvorteil und der Amortisationsdauer. Der optimale Auslegungsbereich für Fahrer A liegt ungefähr zwischen 10 und 20 kWh sowie 30 und 70 kW. Die minimale Amortisationsdauer beträgt sieben bis acht Jahre. Im Jahr 2020 reduziert sich diese auf unter vier Jahre und bis 2025 wird eine weitere Halbierung erwartet. Die anderen drei ausgewählten Fahrer sind aufgrund des ungünstigen Verlaufs des Verbrauchs über Energieinhalt und Leistung eher weniger für einen PHEV geeignet. Fahrer B und D kompensieren diesen Effekt durch eine relativ hohe Fahrhäufigkeit und erreichen im Jahr 2020 minimale Amortisationsdauern von 7,5 bzw. 5,5 Jahren, wohingegen sich für Fahrer C 13 Jahre ergeben.

An den Tagesstreckenverteilungen der einzelnen Fahrer wird deutlich, dass es sinnvoll ist mit PHEVs ausschließlich die kürzeren Tagesstrecken abzudecken und nicht mit noch größeren HV-Speichern Tagesstrecken zu erreichen, die nur selten gefahren werden. Generell erfordert eine optimale Auslegung von PHEVs basierend auf realen Fahr- und Nutzungsprofilen ein passendes Verhältnis von Leistung zu Energieinhalt, da eine Auslegung im ungünstigen Bereich zu einer deutlichen Verschlechterung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit führt. Im Vergleich zur Analyse im Zyklus ist die reine Auslegung der Leistung auf eine elektrische Zyklusdurchfahrt im Realbetrieb nicht ausreichend. Aufgrund der großen Sensitivitäten hinsichtlich des Fahr- und Nutzungsprofils ist die Auswahl zielgruppenrelevanter Fahrer durch die Automobilhersteller für die Analyse und der daraus abgeleiteten Optimierung des elektrischen Systems eines PHEVs entscheidend. Die vorgestellte Wirtschaftlichkeitsanalyse verrechnet Kosten und Verbrauch eines PHEVs aus Käufersicht und zeigt eine deutliche Verbesserung bis in die Jahre 2020 und 2025, unter Berücksichtigung der Prognosen. Ein PHEV stellt ein attraktives Angebot für geeignete Käufer dar, vor allem zukünftig und abhängig vom Fahr- und Nutzungsprofil.

Neben der vorgestellten kostenoptimalen Dimensionierung sind gesetzliche Vorgaben und eine Optimierung hinsichtlich Fahrleistung weitere Kriterien für eine mögliche Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs. Mithilfe der erarbeiteten Methodik und den entwickelten Modellen können stimmige Konfigurationen des E-Systems eines PHEVs mit maximaler Wirtschaftlichkeit für Automobilhersteller und Käufer abgeleitet werden, im Spannungsfeld von Kosten und Verbrauch.

---

## 4 Bauraumkonzeptanalysen für HV-Speicher in PHEVs

---

Eine große Herausforderung der geometrischen Konzeptgestaltung elektrifizierter Fahrzeuge ist im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugkonzepten die Integration von mehreren Antriebs- und Speicherkomponenten. Die Erarbeitung eines stimmigen Bauraumkonzepts erfolgt unter Beachtung der Wechselwirkungen im Gesamtfahrzeug. In der Fahrzeugtechnik wird dies als Package bezeichnet. (Braess & Seiffert, 2011) Dazu sind bereits in der frühen Phase der Entwicklung phasengerechte, computergestützte Methoden erforderlich, um die Fragestellungen schnell und effizient zu bearbeiten. Aus dem Elektrifizierungsumfang eines PHEVs beansprucht der HV-Speicher bei der geometrischen Integration den größten Bauraum im Fahrzeug und ist im Fokus der folgenden Bauraumkonzeptanalysen. Die deutlich geringere Energiedichte des HV-Speichers gegenüber Benzin führt bei dem gleichen Fahrzeug bei einer gewünschten Reichweite von ca. 100 km zu ungefähr 6 l Benzin und 200 l Batteriezellvolumen (Duesmann, et al., 2011).

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Topologien für HV-Speicher vorgestellt. Integrationen im Bereich des Tunnels, des Tanks oder einer Kombination aus beiden bieten Vorteile im Vergleich zu anderen Integrationsmöglichkeiten. Die Bauraumkonzeptanalyse erfolgt in der vorliegenden Arbeit in zwei aufeinander aufbauenden Analysen, mit jeweils konzipierten parametrischen Geometriemodellen für die frühe Entwicklungsphase von PHEVs:

- **Bauraumanalyse:** In einem Bauraummodell wird basierend auf Maßketten der verfügbare HV-Speicherbauraum im Fahrzeug ermittelt.
- **HV-Speicheranalyse:** In einem HV-Speichermodell wird basierend auf Kennzahlen der mögliche Energieinhalt des HV-Speicherkonzepts ermittelt, das in den verfügbaren Bauräumen realisiert werden kann.

Das Ziel der Methodik ist eine Eingrenzung des P/E-Lösungsraums eines PHEVs aufgrund geometrischer Randbedingungen aus den Bauraumkonzeptanalysen. In den folgenden Abschnitten werden die Modelle und die Ergebnisse der Analysen vorgestellt. Die Erkenntnisse werden mit den Resultaten der Wirtschaftlichkeitsanalyse aus Kapitel 3 kombiniert, um das Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept eines PHEVs aufzuzeigen. Zusätzlich wird die Entwicklung aufgrund des technischen Fortschritts bis in die Jahre 2020 und 2025 dargestellt.

### 4.1 Stand der Forschung

Es existieren parametrische, oftmals kommerzielle Geometriemodelle die teilweise sehr detailliert sind. Diese eignen sich deshalb hauptsächlich für spätere Entwicklungsphasen oder haben einen spezifischen Fokus, wie beispielsweise die Auslegung einer Karosseriestruktur. (Dietrich, et al., 2010) Existierende Modelle konzentrieren sich oft auf spezifische Fahrzeugtypen, wie beispielsweise auf reine Elektrofahrzeuge (Kuchenbuch, et al., 2011) oder auf verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge, wo die Fahrzeugentwicklung in den letzten Jahrzehnten größtenteils durch Weiterentwicklung vorausgegangener Ansätze geprägt war. Das entwickelte Geometriemodell in (Fuchs, et al., 2012) findet Anwendung in einem Auslegungsprozess für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Der Fokus des in dieser Arbeit vorgestellten Geometriemodells liegt auf der frühen Entwicklungsphase, in der noch viele Freiheitsgrade für die Gestaltung von Fahrzeugkonzepten existieren. Dieses Modell ist speziell für die folgenden Analysen konzipiert und berücksichtigt ausschließlich den HV-Speicher in PHEVs. PHEVs stellen generell für die geometrische Gestaltung von Fahrzeugkonzepten die größte Herausforderung dar, da verbrennungsmotorische und elektrische Antriebs- und Speicherkomponenten integriert werden. (Ried, et al., 2012b)

### 4.2 HV-Speichertopologien

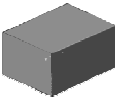
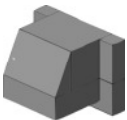
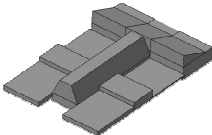
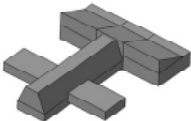
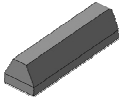
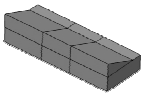
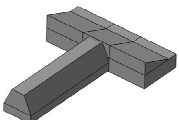
Die Speichertopologie beschreibt die geometrische Form und Integration des HV-Speichers im Gesamtfahrzeug. Für den HV-Speicher ist ein relativ großer Bauraum erforderlich, der möglichst kompakt und wenig zerklüftet ausgeprägt sein sollte, da die kleinste Einheit die Speicherzelle darstellt und diese nicht beliebig verkleinert bzw. geformt werden kann. Darüber hinaus ist eine tiefe und zentrale Position des schweren HV-Speichers im Fahrzeug zu bevorzugen, um hohe Sicherheitsanforderungen bei einem Unfall zu erfüllen und Vorteile bei der Fahrdynamik zu ermöglichen. In Fahrzeugen nach dem Conversion Design ist generell eine Integration zusätzlicher Komponenten schwierig, da in dem für den Verbrennungsmotor optimierten Bauraumkonzept nahezu kein freier Platz existiert, wie in Abschnitt 2.1.2 erläutert. Verkleinerung bzw. Ersetzen vorhandener Technik, Einschränkung des Kundenfreiraums und Vergrößerung der Fahrzeugabmessungen sind Maßnahmen, um möglich Bauräume für zusätzliche Komponenten im Fahrzeug zu generieren. (Ried, et al., 2013a)

Tabelle 4.1 zeigt wesentliche HV-Speichertopologien in Fahrzeugen nach dem Conversion Design mit Details bezüglich geometrischer und funktionaler Integration. Eine Integration des HV-Speichers im Vorder- und Hinterwagen wird für die folgenden Analysen nicht betrachtet. Im Vorderwagen wird bei PHEVs bevorzugt das verbrennungsmotorische System installiert, analog zu konventionellen Fahrzeugen. Im Hinterwagen ergeben sich für den Gepäckraum Vorteile aufgrund der entsprechenden Höhe im Vergleich zu anderen denkbaren Positionen des Gepäckraums im Fahrzeug. Darüber hinaus wird eine Integration des HV-Speichers unter den Fußbereichen beider Sitzreihen und direkt unter der ersten Sitzreihe nicht weiter betrachtet. Gründe dafür sind die geringe Bauraumhöhe und Überschneidungen mit den dort positionierten Komponenten analog des Bauraumkonzepts eines konventionellen Fahrzeugs.



Daraus folgt die Fokussierung auf eine Integration des HV-Speichers im Tunnel- oder Tankbereich sowie die Kombination aus beiden. Dies entspricht der Zone A in (Fuchs, et al., 2012), welche einen sicheren Bereich für die Integration der HV-Komponenten beschreibt. Die Integration des HV-Speichers im Tank- oder Tunnelbereich erfordert eine angepasste Abgasanlage sowie eine neue Position des Tanks. Daraus könnten Auswirkungen auf den resultierenden HV-Speicherbaureaum oder auf das Bauraumkonzept des Gesamtfahrzeugs resultieren. Darüber hinaus entsteht ein potentieller Zielkonflikt mit einem mechanischen Allradantrieb, da die Gelenkwelle vom Getriebe nach hinten zum Hinterachsgetriebe geführt wird, um ein Antrieben der Hinterräder zu ermöglichen. (Ried, et al., 2013a) Diese weiteren geometrischen und funktionalen Wechselwirkungen sind in der vorliegenden Arbeit nicht weiter detailliert und sind Bestandteil des Ausblicks in Abschnitt 5.3.

Tabelle 4.1: Wesentliche HV-Speichertopologien in Fahrzeugen nach dem Conversion Design (Fokussierung bei PHEVs auf den Tank- und Tunnelbereich sowie die Kombination aus beiden)

		<b>Details geometrischer und funktionaler Integration sowie potentielle Zielkonflikte</b>
<b>Vorderwagen</b>		bevorzugte Integration des Verbrennungsmotors; Deformationsbereich bei einem Frontcrash
<b>Hinterwagen</b>		bevorzugte Position des Gepäckraums; Deformationsbereich bei einem Heckcrash
<b>Unterflur (komplett)</b>		geringe Bauraumhöhe unter dem Fußbereich der ersten und zweiten Sitzreihe
<b>Tank, Tunnel und unter der 1. Sitzreihe</b>		Bauraumkonflikt unter der ersten Sitzreihe mit dem Fußbereich des hinteren Passagiers, mit Heizungs- kanälen und dem Querverbund für Seitencrash
<b>Tunnel</b>		bevorzugte Integration von Abgasanlage und Gelenkwelle (bei Heckantrieb) → Integration des HV- Speichers mit Maßnahmen möglich
<b>Tank (unter der zweiten Sitzreihe)</b>		bevorzugte Integration von Tank, Abgasanlage und Gelenkwelle (bei Heckantrieb) → Integration des HV- Speichers mit Maßnahmen möglich
<b>Tank und Tunnel</b>		Kombination von Tank und Tunnel → Integration des HV-Speichers mit Maßnahmen möglich

## 4.3 Bauraumanalyse mittels Maßketten

Das entwickelte Geometriemodell im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist ein parametrisches Bauraummodell für die Fahrzeugentwicklung nach dem Conversion Design. Für die betrachteten HV-Speichertopologien im Tank- und Tunnelbereich sowie deren Kombination werden mit dem Modell die Bauräume im Fahrzeug in CATIA V5 visualisiert und in MS Excel die Volumina berechnet. Das Modell basiert auf Maßketten in Form von Gleichungen mit Parametern aus dem Maßkonzept eines Fahrzeugs sowie weiteren Prämissen und Anforderungen. Im folgenden Abschnitt wird das Bauraummodell sowie die erforderlichen Parameter vorgestellt.

### 4.3.1 Grundlagen parametrischer Geometriemodelle

Für die Unterstützung des Produktentstehungsprozesses von der frühen Konzeptphase der Entwicklung bis hin zur Serienreife von Fahrzeugen sind anpassungsfähige 3D-CAD-Modelle und Methoden gefordert (Dietrich, et al., 2010). Dazu werden Modelle unterschiedlicher Aussagekraft und Komplexität entwickelt. Das Ziel ist es, Erkenntnisse über Komponenten, Systeme und Gesamtfahrzeuge zu generieren, welche in Versuchen mit Prototypen nur mit hohem Aufwand erreicht werden. Darüber hinaus wird ein verbessertes Systemverständnis erzielt und Entscheidungen herbeigeführt. (Ried, et al., 2012b)

In parametrischen Modellen werden Assoziationen zwischen Parametern, sogenannten Entwurfsgrößen, festgelegt. In der Automobilindustrie werden CAD-Systeme wie Pro/ENGINEER oder CATIA V5 angewendet, die parametrisch aufgebaut sind und komplexe Geometrie- und Parametermanipulationen erlauben. CAD-Systeme dienen als Basissysteme für den parametergestützten Fahrzeugentwurf während dem Produktentstehungsprozess (Rasenack, 1998). Mit CATIA V5 ist es möglich Parameter außerhalb des CAD-Systems mit Text- oder Excel-Dateien zu manipulieren. Visual Basic basierte Programmroutinen können innerhalb des Programmes angewendet werden. Darauf aufbauend existieren verschiedene spezifische Softwarelösungen für unterschiedliche Entwicklungsbereiche die in das CAD-Kernsystem integriert werden. (Dietrich, et al., 2010)

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Bauraummodell ist auf Basis von MS Excel mit einer Schnittstelle zu CATIA V5. Die Parameter sind Abmessungen aus dem Maßkonzept eines Fahrzeugs, ergänzt durch erforderliche Hilfsgrößen. (Ried, et al., 2012b)

### 4.3.2 Funktionsweise des Bauraummodells

In der frühen Entwicklungsphase der Fahrzeugkonzeptgestaltung werden mit dem parametrischen Bauraummodell die Volumina der idealisierten HV-Speicherbauräume ermittelt. Die Basis bilden wesentliche Abmessungen aus dem Maßkonzept eines Fahrzeugs, ergänzt mit erforderlichen Hilfsgrößen aufgrund von Anforderungen und Prämissen.

Der Begriff „Maßkonzept“ definiert wesentliche Ausprägungen, welche ein Fahrzeug mit genormten Längen (L), Breiten (W), Höhen (H) und Winkel (A) beschreiben, wie in Abschnitt 2.3 vorgestellt. Das Maßkonzept bezieht sich auf das Koordinatensystem des

Fahrzeugs. (Astier, 2011) Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, befindet sich der Ursprung im Bereich der Mitte der Vorderachse. Da nicht bei jedem Fahrzeugmodell die Mitte der Vorderachse dem Ursprung entspricht, wird dieser Abstand in x-, y- und z-Richtung exakt beschrieben. Das Maßkonzept bildet die Grundlage für das parametrische Bauraummodell zur Analyse der HV-Speicherintegration.

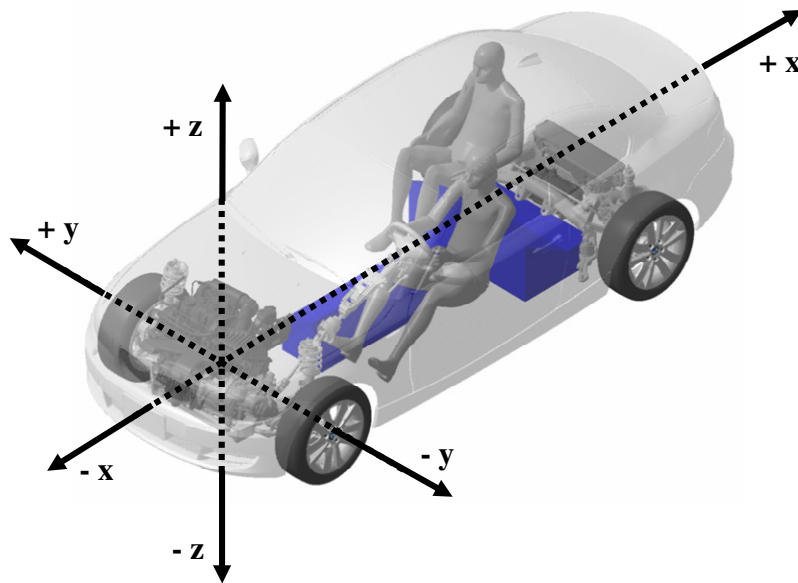


Abbildung 4.1: Koordinatensystem eines Fahrzeugs

In Abbildung 4.2 sind die in dieser Arbeit betrachteten Bauräume für die HV-Speicherintegration im Tank- und Tunnelbereich blau dargestellt. Die angedeutete Fahrzeugaußenhaut und die Position der CAD-Modelle der Menschen entsprechen dem BMW 1er Coupé, welches auch für den konfigurierten PHEV in Abschnitt 2.7 zugrunde gelegt ist.

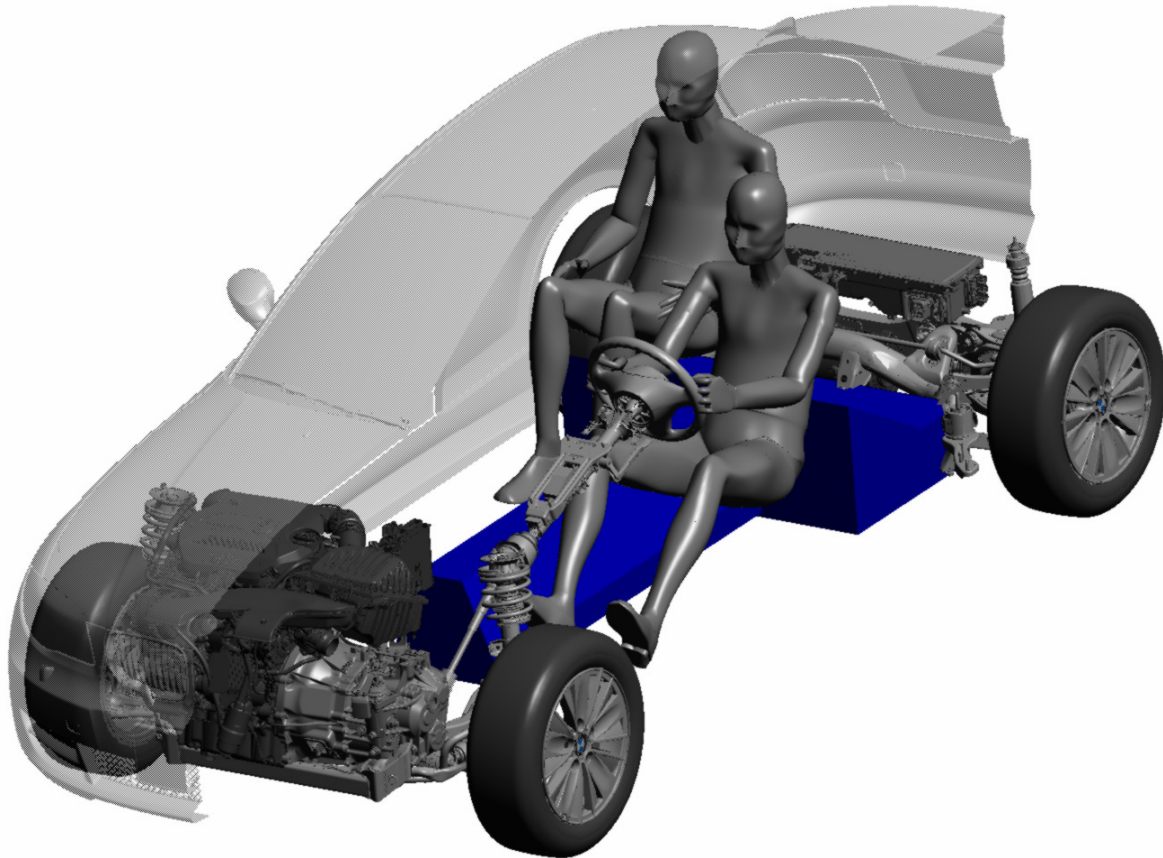


Abbildung 4.2: Darstellung der betrachteten Bauräume zur Integration des HV-Speichers im Tank- und Tunnelbereich des Fahrzeugs, beispielhaft dargestellt am BMW 1er Coupé

In Abbildung 4.3 ist die Funktionsweise des Bauraummodells dargestellt. Die Steuerung der Parametereingabe und -variation sowie die Berechnung der Bauraumvolumen erfolgt in MS Excel mit Hilfe von Visual Basic for Applications. Das Bauraummodell hat eine Schnittstelle zum parametrischen CAD-System CATIA V5 von Dassault Systèmes. Im Rahmen der vorgestellten Methode dient CATIA V5 für die Visualisierung der HV-Speicherbauräume und erlaubt zusätzlich Parametervariationen zur Analyse von Sensitivitäten. Die Übergabe der Parameter zwischen MS Excel und CATIA V5 erfolgt über Textdateien, sogenannte „design tables“.

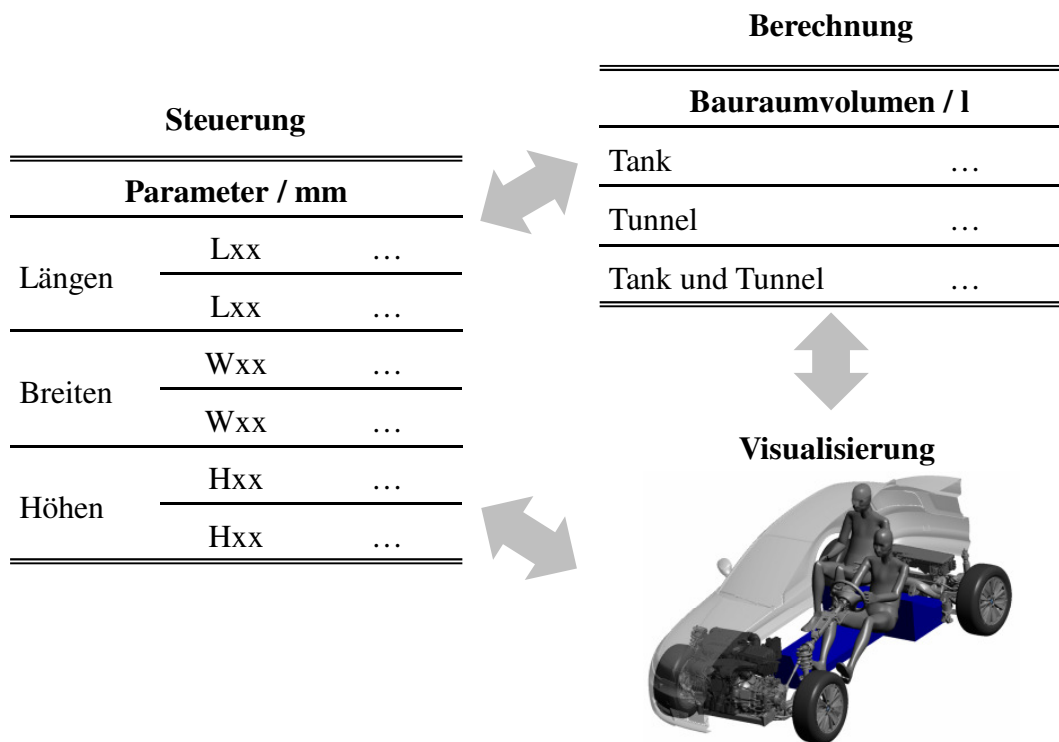


Abbildung 4.3: Prinzipielle Funktionsweise des parametrischen Bauraummodells

### 4.3.3 Parameter des Bauraummodells

Folgende Parameter des Bauraummodells sind notwendig, um in der frühen Entwicklungsphase die Bauräume im Tank- und Tunnelbereich ausreichend zu beschreiben:

- **Genormte Abmessungen:** Diese Abmessungen basieren auf dem vorgestellten Maßkonzept in Abschnitt 2.3 und werden mit den genormten Bezeichnungen gekennzeichnet.
- **Hilfsgrößen:** Diese Abmessungen beschreiben Abstände des HV-Speicherbauraums zur Karosserie bzw. zu positionierten CAD-Modellen des Menschen (Manikin) und werden in der Maßbezeichnung durch ein zusätzliches „H“ gekennzeichnet.

Eine häufig verwendete Bezugsgröße der Parameter ist der Sitzreferenzpunkt des Manikins, abgekürzt mit SRP. Für die Berechnung und Visualisierung der Bauräume sind die Ausprägungen der Parameter im Sinne eines konkreten Wertes erforderlich. Die Startwerte für die folgenden Analysen stammen aus, im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten, Datenbanken mit Ausprägungsbereichen der Parameter für verschiedene existierende Fahrzeuge, aufgeteilt nach Fahrzeugklasse und Karosserieform. Die Werte in der Datenbank für genormte Abmessungen sind aus Maßkonzeptlisten entnommen und für Hilfsgrößen an existierenden Fahrzeugen gemessen. Für die folgenden geometrischen Analysen gelten die

gleichen Prämissen wie für die Wirtschaftlichkeitsanalyse und es wird das gleiche Fahrzeug zugrunde gelegt. Die Ausprägungen der Parameter für den in Abschnitt 2.7 konfigurierten PHEV auf Basis eines BMW 1er Coupés sind in den folgenden Tabellen enthalten. Die Abbildungen 4.4, 4.5 und 4.6 zeigen die Parameter des Bauraummodells in der Draufsicht sowie in der Seiten- und Heckansicht. Die Tabellen 4.2, 4.3 und 4.4 beinhalten die Bezeichnungen der Parameter sowie die konkreten Werte für den konfigurierten PHEV.

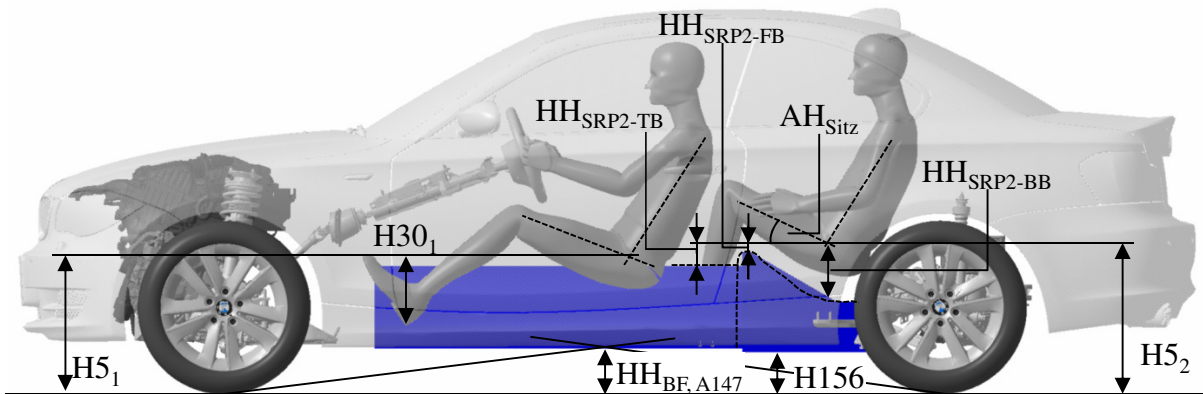


Abbildung 4.4: Darstellung der Parameter des Bauraummodells in der Seitenansicht des Fahrzeugs

Tabelle 4.2: Bezeichnung der Parameter des Bauraummodells in der Seitenansicht und Werte für den konfigurierten PHEV; genormte Abmessungen in Anlehnung an: (Astier, 2011)

	Definition	PHEV-Konfiguration
<b>H5<sub>1</sub></b>	Höhe SRP 1. Sitzreihe bis Standebene	497 mm
<b>H5<sub>2</sub></b>	Höhe SRP 2. Sitzreihe bis Standebene	507 mm
<b>H30<sub>1</sub></b>	Höhe SRP 1. Sitzreihe bis Fersenpunkt	253 mm
<b>H156</b>	Bodenfreiheit	139 mm
<b>HH<sub>BF,A147</sub></b>	Bodenfreiheit aus Rampenwinkel A147 von 14,1 ° (Hilfsgröße)	162 mm
<b>HH<sub>SRP2-BB</sub></b>	Z-Abstand SRP 2. Sitzreihe bis Bodenblech (Hilfsgröße)	180 mm
<b>HH<sub>SRP2-FB</sub></b>	Z-Abstand SRP 2. Sitzreihe bis Fersenblech (Hilfsgröße)	30 mm
<b>HH<sub>SRP2-TB</sub></b>	Z-Abstand SRP 2. Sitzreihe bis Tunnelblech im Sitzbereich 2. Sitzreihe (Hilfsgröße)	110 mm
<b>AH<sub>Sitz</sub></b>	Winkel 2. Sitzreihe (Hilfsgröße)	30 °

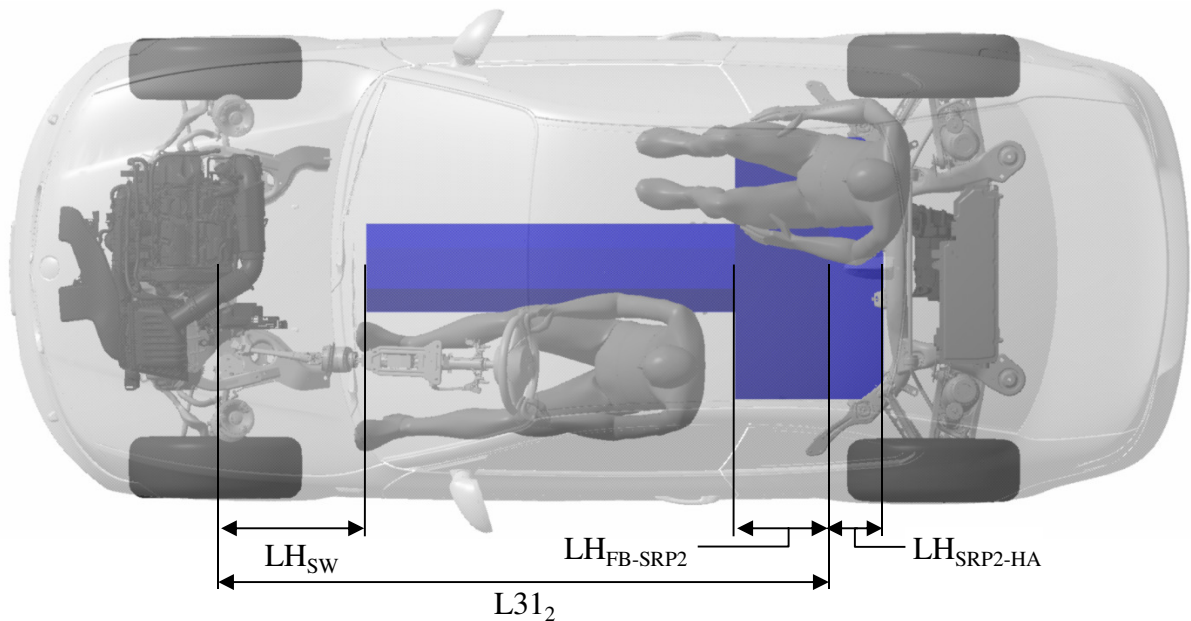


Abbildung 4.5: Darstellung der Parameter des Bauraummodells in der Draufsicht des Fahrzeugs

Tabelle 4.3: Bezeichnung der Parameter des Bauraummodells in der Draufsicht und Werte für den konfigurierten PHEV; genormte Abmessungen in Anlehnung an: (Astier, 2011)

	<b>Definition</b>	<b>PHEV-Konfiguration</b>
$L31_2$	X-Koordinate SRP2. Sitzreihe	2249 mm
$LH_{FB-SRP2}$	X-Abstand Fersenblech bis SRP 2. Sitzreihe (Hilfsgröße)	360 mm
$LH_{SW}$	X-Koordinate der Stirnwand (Hilfsgröße)	500 mm
$LH_{SRP2-HA}$	X-Abstand SRP 2. Sitzreihe bis Hinterachsträger (Hilfsgröße)	160 mm

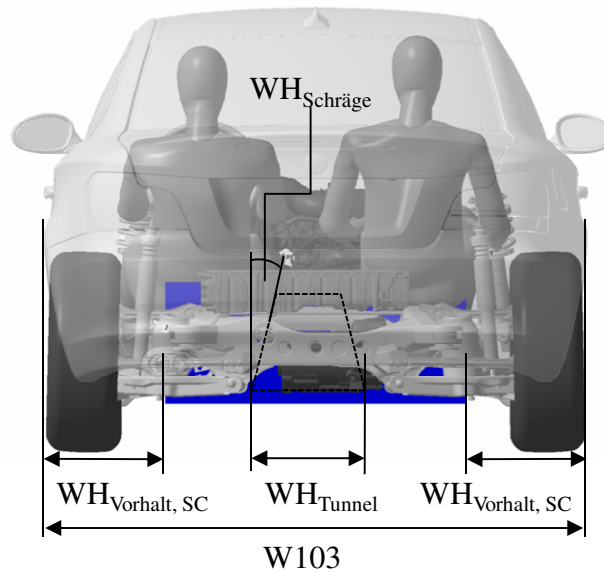


Abbildung 4.6: Darstellung der Parameter des Bauraummodells in der Heckansicht des Fahrzeugs

Tabelle 4.4: Bezeichnung der Parameter des Bauraummodells in der Heckansicht und Werte für den konfigurierten PHEV; genormte Abmessungen in Anlehnung an: (Astier, 2011)

	Definition	PHEV-Konfiguration
<b>W103</b>	Fahrzeugbreite, ohne Spiegel	1748 mm
<b>WH<sub>Tunnel</sub></b>	Tunnelbreite im Sitzbereich 2. Sitzreihe (Hilfsgröße)	330 mm
<b>WH<sub>Vorhalt, SC</sub></b>	Y-Abstand als Vorhalt für Seitencrash (Hilfsgröße)	360 mm
<b>WH<sub>Schräge</sub></b>	Tunnelschräge (Hilfsgröße)	7°

#### 4.3.4 Maßketten im Bauraummodell

Die Parameter des Bauraummodells werden in Maßketten in x-, y- und z- Richtung verknüpft, um so die jeweiligen Längen, Höhen und Breiten der HV-Speicherbauräume zu ermitteln. Tabelle 4.5 beschreibt die Begrenzungen im Fahrzeug in x-, y- und z-Richtung der betrachteten HV-Speicherbauräume. Die Begrenzungen werden durch den zugrunde gelegten Entwicklungsansatz nach dem Conversion Design vorgegeben oder resultieren aus den hohen



Sicherheitsanforderungen an den HV-Speicher, wie in (Fuchs, et al., 2012), (Busche, 2013) und (Schaub, 2011) erläutert.

Tabelle 4.5: Begrenzung im Fahrzeug in x-, y- und z-Richtung der betrachteten HV-Speicherbauräume

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
<b>Tank</b>	oben: Bodenblech hinten	vorne: Fersenblech	links: Vorhalt Seitencrash
	unten: Bodenfreiheit	hinten: Hinterachsträger	rechts: Vorhalt Seitencrash
<b>Tunnel</b>	oben: Tunnelblech	vorne: Stirnwand	links: Tunnelblech
	unten: Bodenfreiheit	hinten: Fersenblech	rechts: Tunnelblech
<b>Tank und Tunnel</b> Kombination aus Tank und Tunnel			

Die betrachteten HV-Speicherbauräume sind für die Berechnung und Visualisierung in Teilbauräume mit eindeutigen geometrischen Formen unterteilt. Der Bauraum im Tankbereich gliedert sich in sechs Teilbauräume und der im Tunnelbereich in zwei, wie in Abbildung 4.7 dargestellt. Im Tankbereich sind drei Quader und drei Prismen mit einem Dreieck als Grundfläche abgebildet. Der Tunnelbauraum besteht aus einem Quader und einem Prisma mit einem Trapez als Grundfläche. Die Teilbauräume im Tankbereich a und d sind identisch zu c und f. Die Längen- und Höhenabmessungen von b und e sind gleich, jedoch sind die Breitenmaße an den Tunnel angepasst.

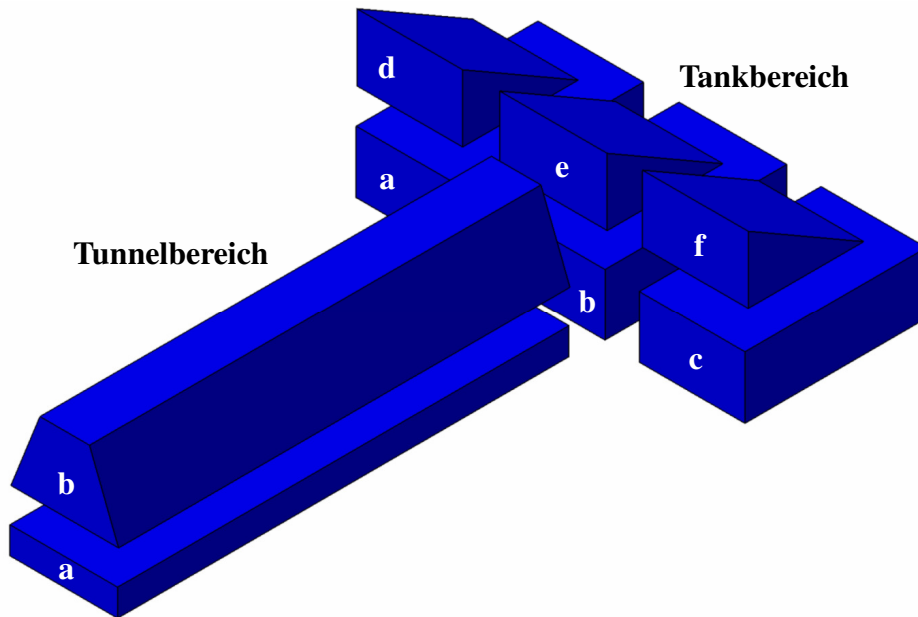


Abbildung 4.7: Aufteilung der betrachteten HV-Speicherbauräume in Teilbauräume für die Berechnung und Visualisierung

### Maßketten des Bauraums im Tankbereich

Die Volumen der quader- und prismaförmigen Teilbauräume werden jeweils über Länge, Breite und Höhe des Bauraums ermittelt. Für die Berechnung der Abmessungen werden die definierten Parameter des Bauraummodells verwendet.

Längen des Bauraums im Tankbereich:

$$L_{\text{Tank}} = \begin{cases} LH_{\text{FB-SRP2}} + LH_{\text{SRP2-HA}} , & \text{Tank a, b, c} \\ \frac{HH_{\text{SRP2-BB}} - HH_{\text{SRP2-FB}}}{\tan(\text{AH}_{\text{Sitz}})} , & \text{Tank d, e, f} \end{cases} \quad (4.1)$$

Höhen des Bauraums im Tankbereich:

$$H_{\text{Tank}} = \begin{cases} H_{52} - H_{156} - HH_{\text{SRP2-BB}} , & \text{Tank a, b, c} \\ HH_{\text{SRP2-BB}} - HH_{\text{SRP2-FB}} , & \text{Tank d, e, f} \end{cases} \quad (4.2)$$

Breiten des Bauraums im Tankbereich:

$$W_{\text{Tank}} = \begin{cases} \frac{W103 - 2 \cdot WH_{\text{Vorhalt,SC}} - WH_{\text{Tunnel}}}{2} & , \text{ Tank a, c, d, f} \\ WH_{\text{Tunnel}} & , \text{ Tank b, e} \end{cases} \quad (4.3)$$

Volumen des Bauraums im Tankbereich:

$$\text{Volumen}_{\text{Tank}} = \begin{cases} L_{\text{Tank}} \cdot W_{\text{Tank}} \cdot H_{\text{Tank}} & , \text{ Tank a, b, c} \\ 0,5 \cdot L_{\text{Tank}} \cdot W_{\text{Tank}} \cdot H_{\text{Tank}} & , \text{ Tank d, e, f} \end{cases} \quad (4.4)$$

### Maßketten des Bauraums im Tunnelbauraum

Das Volumen des quaderförmigen Teilbauraums im Tunnel wird analog zu den Teilbauräumen im Tankbereich ermittelt.

Längen des Bauraums im Tunnelbereich:

$$L_{\text{Tunnel}} = L31_2 - LH_{\text{FB-SRP2}} - LH_{\text{SW}} \quad , \text{ Tunnel a, b} \quad (4.5)$$

Höhe des Bauraums im Tunnelbereich:

$$H_{\text{Tunnel}} = \begin{cases} H5_1 - HH_{\text{BF,A147}} - H30_1 & , \text{ Tunnel a} \\ H5_2 - HH_{\text{BF,A147}} - HH_{\text{SRP2-TB}} - (H5_1 - HH_{\text{BF,A147}} - H30_1) & , \text{ Tunnel b} \end{cases} \quad (4.6)$$

Breiten des Bauraums im Tunnelbereich:

$$W_{\text{Tunnel}} = \begin{cases} WH_{\text{Tunnel}} & , \text{ Tunnel a, b}_{\text{unten}} \\ WH_{\text{Tunnel}} - 2 \cdot \tan(WH_{\text{Schräge}}) \cdot H_{\text{Tunnel,b}} & , \text{ Tunnel b}_{\text{oben}} \end{cases} \quad (4.7)$$

Volumen des Bauraums im Tunnelbereich:


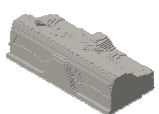
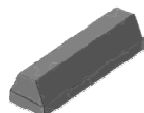
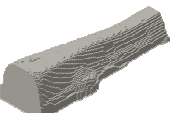
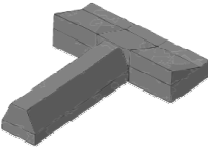
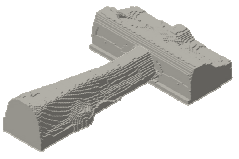
$$\text{Volumen}_{\text{Tunnel}} = \begin{cases} L_{\text{Tunnel}} \cdot W_{\text{Tunnel}} \cdot H_{\text{Tunnel}} & , \quad \text{Tunnel a} \\ 0,5 \cdot (W_{\text{Tunnel,bunten}} + W_{\text{Tunnel,boben}}) \cdot H_{\text{Tunnel}} \cdot L_{\text{Tunnel}} & , \quad \text{Tunnel b} \end{cases} \quad (4.8)$$

Für die Kombination der Bauräume (Tank und Tunnel) werden die jeweiligen Volumeneinheiten aus dem Tank- bzw. Tunnelbereich addiert. Diese Integration des HV-Speichers wird als „T-Anordnung“ bezeichnet.

### 4.3.5 Validierung des Bauraummodells

Mit dem entwickelten Bauraummodell erfolgt die Analyse für die betrachteten HV-Speicherbauräume im konfigurierten PHEV aus Abschnitt 2.7. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Für die Validierung des Modells ist es zweckmäßig für die gleichen Bauräume in einer Detailanalyse auch die Volumeneinheiten zu ermitteln und mit denen aus dem Bauraummodell zu vergleichen. Das aktuelle BMW 1er Coupé ist die Basis des konfigurierten PHEVs und der Detailanalyse in CATIA V5. Es gelten die gleichen Prämissen wie in Tabelle 4.5 festgelegt. Die Volumenermittlung in der Detailanalyse erfolgt mittels „Auslitern“ der Bauräume mit Würfeln mit einer Kantenlänge von 10 mm.

Tabelle 4.6: Volumen der HV-Speicherbauräume als Ergebnis des Bauraummodells, validiert mit den Ergebnissen der Detailanalyse in CATIA V5

	Bauraummodell		Detailanalyse		Delta
	Volumen / l		Volumen / l		Volumen / %
<b>Tank</b>		121		118	+2%
<b>Tunnel</b>		104		103	+1%
<b>Tank und Tunnel</b>		224		221	+1%

Die Validierung des Modells zeigt eine Abweichung der Volumen des Bauraummodells und der Detailanalyse von maximal zwei Prozent. Daraus folgt, dass das entwickelte Bauraummodell für Analysen in der frühen Entwicklungsphase geeignet ist. Im nächsten Schritt wird der mögliche Energieinhalt von HV-Speichern in den ermittelten Bauräumen errechnet.

### 4.4 HV-Speicheranalyse mittels Kennzahlen

In der HV-Speicheranalyse wird mit einem entwickelten Modell der Energieinhalt des HV-Speichers ermittelt, dessen Integration in den betrachteten Bauräumen maximal möglich ist. Im folgenden Abschnitt wird das HV-Speichermodell vorgestellt. Dieses ist für die frühe Entwicklungsphase geeignet und basiert auf der Energiedichte der Speicherzellen sowie dem Volumenanteil der Zellen am HV-Speicher.

#### 4.4.1 Funktionsweise des HV-Speichermodells

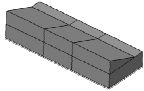
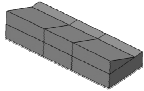
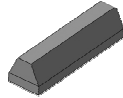
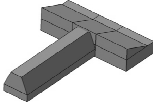
Volumetrische und gravimetrische Kennzahlen des HV-Speichers bilden die Grundlage für die Analysen in der frühen Entwicklungsphase. Das HV-Speichermodell basiert auf der volumetrischen Energiedichte der Speicherzellen und auf dem Volumenanteil der Zellen am gesamten HV-Speicher. Der Fokus der Analyse liegt auf der Energiedichte, da die Werte für die Leistungsdichte stark schwanken und von weiteren Betriebsparametern des HV-Speichers abhängig sind, wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert. Außerdem führt eine zusätzliche Analyse basierend auf der Leistungsdichte zu einer Eingrenzung des Lösungsraums im Bereich höherer Leistungen, der für die vorliegende Arbeit weniger relevant ist, was die folgenden Analysen zeigen.

Folgende Werte werden im HV-Speichermodell für die volumetrische Energiedichte der Speicherzellen aus Abschnitt 2.5.2 zugrunde gelegt:

- 2011/12: 220 Wh/l,
- 2020: 330 Wh/l (angenommene Steigerung um 50 %),
- 2025: 460 Wh/l (angenommene Steigerung gegenüber 2020 um 40 %).

Für den Volumenanteil der Speicherzellen am HV-Speicher wird der in Abschnitt 2.5.2 ermittelte Korridor zwischen 30 und 40 % angenommen. Bei der Integration des HV-Speichers in einem kompakten Bauraum im Fahrzeug, der optimal zur Zellgeometrie passt, ist der Volumenanteil größer als bei einem sehr zerklüfteten Bauraum mit Abschrägungen. Für das HV-Speichermodell in der frühen Entwicklungsphase werden die empirisch ermittelten Volumenanteile als minimale und maximale Bauraumnutzung der Speicherzellen angenommen. Diese Prämisse gilt für die Analysen im Jahr 2011/12 und für die Prognosen bis in die Jahre 2020 und 2025, da von den gleichen genormten Zellbauformen und –abmessungen ausgegangen wird. Mit diesem Modell ist es möglich, in der HV-Speicheranalyse den Energieinhalt des HV-Speichers zu ermitteln, dessen Integration in den betrachteten Bauräumen maximal möglich ist. (Ried, et al., 2012b)

Tabelle 4.7: HV-Speicheranalyse in den betrachteten Bauräumen mit einem Volumenanteil der Zellen am HV-Speicher von 30 bzw. 40 % und einer angenommenen Energiedichte für das Jahr 2011/12 von 220 Wh/l

		Bauraum- volumen / l	Energieinhalt / kWh	
			30% Anteil	40% Anteil
<b>Tank</b>		121	8,0	10,6
<b>Tunnel</b>		104	6,8	9,1
<b>Tank und Tunnel</b>		225	14,8	19,7

#### 4.4.2 Validierung des HV-Speichermodells

Die Ergebnisse der HV-Speicheranalyse werden mit Teilen des HV-Speichers im BMW ActiveE verglichen, um das HV-Speichermodell zu validieren. Der BMW ActiveE ist nach dem Conversion Design als Elektrofahrzeug konzipiert. Der vorgegebene Bauraum im BMW 1er Coupé durch den Wegfall des verbrennungsmotorischen Antriebs erforderte drei Speichereinheiten unterschiedlicher Ausformung und Größe im Tank-, Tunnel- und Stirnwandbereich, um den gewünschten Energieinhalt zu integrieren. Der HV-Speicher im BMW ActiveE besteht aus insgesamt 192 Lithium-Ionen Zellen mit jeweils 40 Ah. Zwei davon sind jeweils parallel zu einem Zellpaar verschaltet. Daraus ergeben sich 96 Zellpaare in Reihe. Die Zellen sind in insgesamt 25 kompakte Module integriert. Zur bestmöglichen Ausnutzung des Bauraums bestehen die Module jeweils aus sechs, acht bzw. zehn einzelnen Zellen. (Jung, et al., 2012)

Für die folgende Validierung wird angenommen, dass die Teile des HV-Speichers des BMW ActiveE im Tank- und Tunnelbereich auch für den in Abschnitt 2.7 konfigurierten PHEV zu Verfügung stehen. Im HV-Speicher des BMW ActiveE sind im Tankbereich unter der 2. Sitzreihe ca. 8,3 kWh installiert und im Tunnelbereich wird der Anteil bis zur Stirnwand mit ca. 8,9 kWh aus den Modulen mit jeweils sechs Zellen berücksichtigt. Diese Angaben basieren auf Speicherzellen aus dem Jahr 2011. (Jung & Hofer, 2011) Eine Integration des HV-Speichers im Stirnwandbereich ist bei dem konfigurierten PHEV nicht möglich, aufgrund der Position des Verbrennungsmotors im Vorderwagen. Die Teile des HV-Speichers des BMW ActiveE mit Relevanz für einen PHEV sind in Abbildung 4.8 dargestellt. (Ried, et al., 2013a)

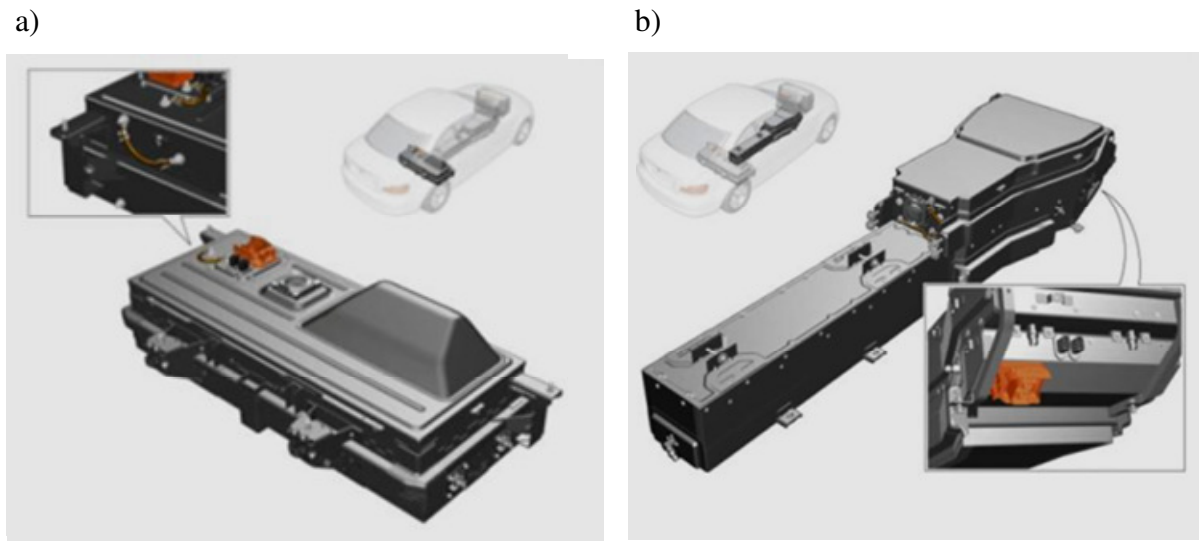
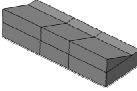
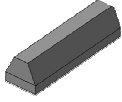
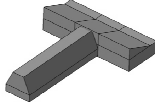


Abbildung 4.8: HV-Speicher des BMW ActiveE zur Validierung des HV-Speichermodells: a) Tankbereich, b) Tunnelbereich; Bildquelle: (Jung, et al., 2012)

Aufgrund der kompakteren Bauweise und der geringeren Abschrägungen im Tunnelbaureaum im Vergleich zum Tankbaureaum wird tendenziell ein höherer Volumenanteil der Zellen am HV-Speicher erreicht. Im Tunnelbaureaum wird mit Speicherzellen eine höhere Ausnutzung erzielt. Für die folgenden Analysen wird deshalb bei dem HV-Speicher im Tunnelbereich von einem Volumenanteil von 40 % und im Tankbereich von 30 % ausgegangen. Daraus resultieren für den konfigurierten PHEV laut Tabelle 4.8 im Tankbereich 8,0 kWh, im Tunnelbereich 9,1 kWh und bei der Kombination beider Bauräume 17,1 kWh Energieinhalt des HV-Speichers. Der Vergleich mit dem HV-Speicher im BMW ActiveE zeigt Abweichungen zwischen +3 % und -4 %. In der frühen Entwicklungsphase mit vielen Freiheitsgraden und Unsicherheiten sind diese Abweichungen akzeptabel. Die Vorgehensweise mit Energiedichten und Volumenanteilen ist für die frühe Entwicklungsphase ausreichend detailliert und wird im weiteren Entwicklungsverlauf durch ein exaktes Zell- und Modulpackage verfeinert. (Ried, et al., 2012b)

Tabelle 4.8: HV-Speicheranalyse in den betrachteten Bauräumen des konfigurierten PHEVs und Validierung des Modells mit Teilen des HV-Speichers aus dem BMW ActiveE

		<b>Modell</b>	<b>BMW ActiveE</b>	<b>Delta</b>
		<b>Energieinhalt / kWh</b>		<b>Energieinhalt / %</b>
<b>Tank</b>		8,0	8,3	-4%
<b>Tunnel</b>		9,1	8,9	+3%
<b>Tank und Tunnel</b>		17,1	17,2	-1%

## 4.5 Kombination der Wirtschaftlichkeits- und Bauraumkonzeptanalysen

Das Ziel der Methodik ist die Eingrenzung des P/E-Lösungsraums aufgrund geometrischer Randbedingungen durch das Bauraumkonzept, die von der Integration des HV-Speichers abgeleitet werden. Die Ergebnisse werden mit den Resultaten aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse verknüpft. Zusätzlich werden durch Parametervariationen aufgrund des prognostizierten Fortschritts in der HV-Speicher-Technologie bis in die Jahre 2020 und 2025 Sensitivitäten analysiert.

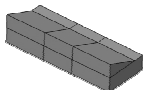
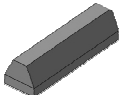
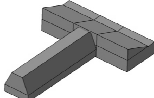
### 4.5.1 Definition des geometrisch möglichen Auslegungsbereichs

Der geometrisch mögliche Auslegungsbereich des elektrischen Systems eines PHEVs wird in der vorliegenden Arbeit durch Randbedingungen hinsichtlich des Bauraumkonzepts in einem Fahrzeug nach dem Conversion Design definiert. Der HV-Speicher stellt für die geometrische Gestaltung von Fahrzeugkonzepten die größte Herausforderung dar. Ausgehend davon sind deshalb die maximalen Auslegungsgrenzen abgeleitet. Die Methodik der Bauraumkonzeptanalysen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 bildet die Grundlage, um den geometrisch möglichen Auslegungsbereich im P/E-Lösungsraum eines PHEVs zu identifizieren. Das Ergebnis der Bauraumkonzeptanalysen sind mögliche Energieinhalte für HV-Speicherkonzepte, deren Integration in den identifizierten Bauräumen der Bauraumanalyse möglich ist. In Tabelle 4.9 sind die möglichen Energieinhalte für HV-



Speicherkonzepte in den betrachteten Bauräumen des konfigurierten PHEVs für die Jahre 2011/12, 2020 und 2025 ermittelt.

Tabelle 4.9: Maximal möglicher Energieinhalt von HV-Speicherkonzepten in den betrachteten Bauräumen im Tank- und Tunnelbereich sowie die Kombination aus beiden für die Jahre 2011/12, 2020 und 2025

		<b>Energieinhalt / kWh</b>		
		<b>2011/12</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>
<b>Tank</b>		8,0	11,9	16,7
<b>Tunnel</b>		9,1	13,7	19,2
<b>Tank und Tunnel</b>		17,1	25,6	35,9

Die Ergebnisse der Bauraumkonzeptanalysen sind in Abbildung 4.9 in den P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs von 30 bis 160 kW Spitzenleistung der E-Maschine und 3 bis 30 kWh Energieinhalt des HV-Speichers eingetragen. Es wird deutlich welcher Auslegungsbereich mit den ermittelten Energieinhalten der HV-Speicherkonzepte im Tank- und Tunnelbereich sowie deren Kombination zu erreichen ist. Die Lösungsraumanalyse hinsichtlich des Bauraumkonzepts zeigt als Ergebnis, welche HV-Speicherkonzepte für die verschiedenen Elektrifizierungsgrade und Anforderungen möglich sind. Außerdem ist zu erkennen, wie sich diese Zuordnung durch den technologischen Fortschritt im Sinne der Steigerung der Energiedichte ändert. Die Berücksichtigung der prognostizierten Technologieentwicklung ist ein wesentlicher Kern in der frühen Entwicklungsphase bei der Definition von Baukästen, da deren Laufzeiten deutlich in die Zukunft reichen. (Ried, et al., 2013a)

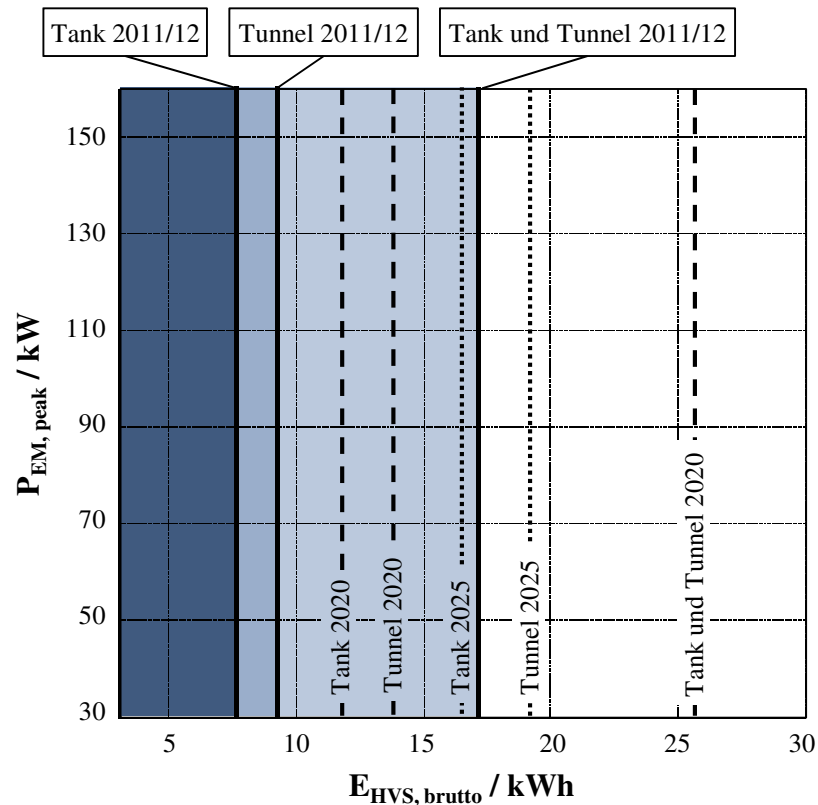


Abbildung 4.9: Darstellung der geometrisch möglichen Auslegungsbereiche (dunkel) hinsichtlich des Bauraumkonzepts im P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs für das Jahr 2011/12 sowie eine prognostizierte Entwicklung bis 2020 und 2025 (Eingrenzung durch geometrische Randbedingungen der HV-Speicherintegration basierend auf der Energiedichte)

Abbildung 4.9 zeigt deutlich, dass ein Großteil des aufgespannten Lösungsraums über dem Energieinhalt und der Leistung bei einer Integration des HV-Speichers im Tank- oder Tunnelbereich in 2011/12 ausgegrenzt wird. Die Steigerung der Energiedichte bis 2020 führt zu einem Zuwachs von ungefähr 4 kWh Energieinhalt im HV-Speicher. Bei der Kombination beider Integrationsmöglichkeiten (Tank und Tunnel) werden deutlich höhere Energieinhalte erreicht. Aktuell könnte dies für ein Fahrzeug mit „Range-Extender“ ausreichen und im Jahre 2020 wäre möglicherweise sogar ein reines Elektrofahrzeug darstellbar. (Ried, et al., 2013a) Bis in das Jahr 2025 steigert sich die Energiedichte erneut und eine kombinierte Integration des HV-Speichers im Tank- und Tunnelbereich liegt außerhalb des betrachteten Lösungsraums bis 30 kWh.

#### 4.5.2 Lösungsraumanalyse hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept

Die Ergebnisse der Bauraumkonzeptanalysen hinsichtlich der geometrischen HV-Speicherintegration werden mit den Resultaten der Wirtschaftlichkeitsanalyse kombiniert.

Das Ziel ist die Eingrenzung des P/E-Lösungsraums und die Identifikation des optimalen Auslegungsbereichs des elektrischen Systems eines PHEVs hinsichtlich Kosten und Verbrauch unter geometrischen Randbedingungen. Dadurch wird das Spannungsfeld von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept bei der Auslegung eines PHEVs deutlich. Abbildung 4.10 zeigt eine beispielhafte Lösungsraumanalyse für Fahrer A im Jahr 2011/12. Dargestellt ist die Amortisationsdauer der Mehrkosten eines PHEVs durch die Verbrauchskosteneinsparung aus Abschnitt 0 sowie die maximalen Energieinhalte von HV-Speicherkonzepten in den betrachteten Bauräumen.

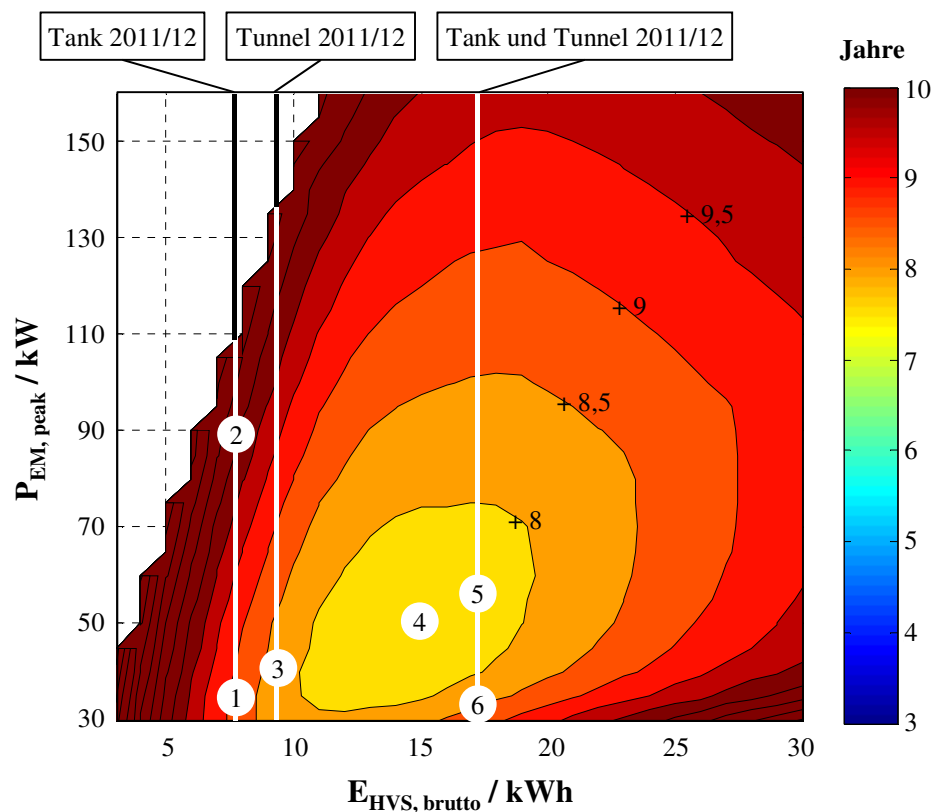


Abbildung 4.10: Analysierter P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs mit beispielhaften Auslegungen des elektrischen Systems (Darstellung der Amortisationsdauer von Fahrer A und der geometrisch möglichen HV-Speicherkonzepte im Jahr 2011/12)

In dem analysierten Lösungsraum für PHEVs hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept in Abbildung 4.10 ist eine Diskussion verschiedener Auslegungen des elektrischen Systems im Jahr 2011/12 möglich:

- Bei **Auslegung 1** ist das Volumen im Tankbereich unter der zweiten Sitzreihe als HV-Speicherbaureaum genutzt und komplett mit Speicherzellen gefüllt. Um die geringste Amortisationsdauer von Fahrer A mit einem Energieinhalt von ca. 8 kWh im HV-Speicher zu erzielen, ist eine Spitzenleistung der E-Maschine von 30 bis 40 kW ausreichend.

- Das PHEV-Konzept mit **Auslegung 2** hat ca. 90 kW Spitzenleistung der E-Maschine und somit mehr Leistung als nötig, um den HV-Speicher optimal auszunutzen. Für ein sportliches Fahrzeug ist die abgeleitete Leistung aus der Amortisationsdauer wie bei Konfiguration 1 zu gering. Für ein entsprechendes Fahrerlebnis sollte ein leistungsstärkerer elektrischer Antriebsstrang verbaut werden, was in die Richtung der Konfiguration 2 führt. Der Kraftstoffverbrauchsvorteil verbessert sich dadurch nicht. Der Charakter des Fahrzeugs ändert sich jedoch deutlich. (Ried, et al., 2013a)
- **Auslegung 3** ist die optimale Konfiguration bezogen auf die Amortisationsdauer wenn der Tunnelbereich komplett für den HV-Speicher genutzt wird. Es ist ungefähr eine Integration eines HV-Speicherkonzepts mit 9 kWh Energieinhalt möglich.
- Die geringste Amortisationsdauer für Fahrer A wird mit **Auslegung 4** erzielt. Dazu wird der HV-Speicher im Tank- und Tunnelbereich installiert, wobei diese Bereiche für 15 kWh Energieinhalt nicht komplett genutzt werden. Es stellt somit Bauraum für eine mögliche Integration weiterer Komponenten zu Verfügung, wie beispielsweise des Kraftstofftanks.
- Tank- und Tunnelbereich werden mit ca. 17 kWh Energieinhalt in **Auslegung 5** komplett für den HV-Speicher genutzt. Kombiniert mit einer Spitzenleistung zwischen 30 und 70 kW der E-Maschine wird die geringste Amortisationsdauer erzielt.
- In **Auslegung 6** ist die Spitzenleistung der E-Maschine zu gering und der installierte Energieinhalt kann nicht komplett für die Fahraufgabe verwendet werden. Der Fahrer hätte mehrfach Zustrarts des Verbrennungsmotors im Laufe des Tages, obwohl der HV-Speicher beim nächsten Ladevorgang über Nacht nicht komplett leer wäre. Deswegen liegt Auslegung 6 außerhalb des optimalen Bereichs hinsichtlich der Amortisationsdauer von Fahrer A im Jahr 2011/12.

Tendenziell wird mit steigendem Energieinhalt mehr Leistung benötigt, um den HV-Speicher optimal auszunutzen. Jedoch sollte die Leistung nicht zu hoch dimensioniert werden, um den optimalen Auslegungsbereich aus Kosten- und Verbrauchssicht zu erreichen.

Die prognostizierte Amortisationsdauer für Fahrer A im Jahr 2020 aus Abschnitt 0 wird im Lösungsraum in Abbildung 4.11 mit den prognostizierten Ergebnissen für das Jahr 2020 aus den Bauraumkonzeptanalysen kombiniert. Für die Berechnung der Amortisationsdauer sind Prognosen für die Reduzierung der Mehrkosten und für den Anstieg der Energiepreise berücksichtigt, wie in den Abschnitten 3.2.7 und 3.3.8 hergeleitet.

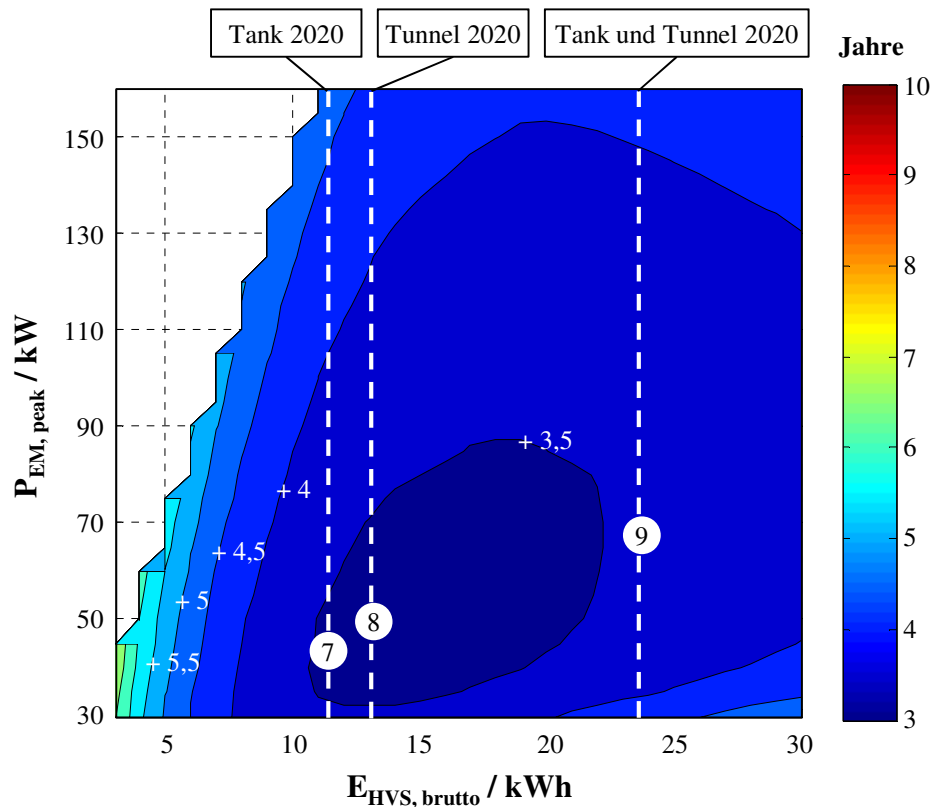


Abbildung 4.11: Analysierter P/E-Lösungsraum des konfigurierten PHEVs mit beispielhaften Auslegungen des elektrischen Systems (Darstellung der Prognosen für die Amortisationsdauer von Fahrer A und für die geometrisch möglichen HV-Speicherkonzepte im Jahr 2020)

In dem analysierten Lösungsraum für PHEVs hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept in Abbildung 4.11 ist eine Diskussion verschiedener Auslegungen des elektrischen Systems mit den Prognosen für das Jahr 2020 möglich:

- Bei **Auslegung 7** wird der Bauraum im Tankbereich komplett für den HV-Speicher genutzt, vergleichbar mit Auslegung 1. Aufgrund des technologischen Fortschritts der Zellen bis in das Jahr 2020 ist es jedoch möglich ca. 12 kWh Energieinhalt, im Vergleich zu 8 kWh, im gleichen Bauraum zu installieren. Mit Auslegung 7 wird bereits der optimale Bereich der Amortisationsdauer für Fahrer A mit einer Spitzenleistung der E-Maschine zwischen 35 und 50 kW erreicht.
- Die **Auslegung 8** des elektrischen Systems nutzt den gesamten Bauraum im Tunnelbereich für den HV-Speicher und liegt im optimalen Bereich der prognostizierten Amortisationsdauer von Fahrer A für das Jahr 2020.
- Die Bauräume im Tunnel- und Tankbereich sind für den HV-Speicher in **Auslegung 9** kombiniert. Der resultierende Energieinhalt im HV-Speicher liegt außerhalb des optimalen Bereichs.

Mit den betrachteten Bauräumen für den HV-Speicher ist bereits im Jahr 2011/12 nahezu der komplette optimale Bereich, abgeleitet aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse, zu erreichen. Mit den unterstellten Prognosen für das Jahr 2020 vergrößert sich der optimale Auslegungsbereich und bleibt trotzdem mit den betrachteten Bauräumen erreichbar.

Eine zusätzliche Diskussion möglicher Auslegungen für das Jahr 2025 wird nicht durchgeführt, da diese analog 2011/12 und 2020 verläuft. Darüber hinaus ist durch die angenommene Steigerung der Energiedichte der Lösungsraum komplett abgedeckt und es werden sogar über 35 kWh Energieinhalt ermöglicht, wie Abbildung 4.9 zeigt.

Eine weitere mögliche Anforderung und damit Einschränkung des Lösungsraums ist die elektrische Durchfahrt eines gesetzlichen Fahrzyklus, wie beispielsweise der NEFZ in Abschnitt 3.3.5. Dies führt bei PHEVs in der Regel zu einer Leistungsanforderung, die bei steigender Speichergröße ansteigt, da sich das Fahrzeuggewicht erhöht. Weitere Rahmenbedingungen stellen Baukästen mit kompletten Energiespeichern oder einzelnen Batteriezellen dar. Bei vorgegebenen Zellen ist das P/E-Verhältnis konstant und somit werden nicht alle Bereiche im Lösungsraum erreicht. Bei einer Serienschaltung der Zellen ergibt sich eine Ursprungsgerade mit dem P/E-Verhältnis als Steigung. Mögliche Speicherkonfigurationen befinden sich auf dieser Geraden.

### **4.6 Zusammenfassung der Bauraumkonzeptanalysen**

Bei der geometrischen Konzeptgestaltung von PHEVs stellt der HV-Speicher aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte im Vergleich zu Benzin oder Diesel die größte Herausforderung dar. Es existieren verschiedene HV-Speichertopologien, wobei eine Integration im Bereich des Tunnels, des Tanks oder einer Kombination aus beiden Vorteile bietet, im Vergleich zu anderen Integrationsmöglichkeiten.

Die Bauraumkonzeptanalyse erfolgt in zwei aufeinander aufbauenden Analysen, mit jeweils konzipierten parametrischen Geometriemodellen für die frühe Entwicklungsphase von PHEVs. In der Bauraumanalyse wird basierend auf Maßketten der verfügbare HV-Speicherbaureaum im Fahrzeug ermittelt. Dazu werden im Bauraummodell die wesentlichen Abmessungen des Maßkonzepts eines existierenden Fahrzeugs sowie zusätzliche Anforderungen und Prämissen des zu entwickelnden Fahrzeugs nach dem Conversion Design berücksichtigt. Das verfügbare Volumen der betrachteten Bauräume des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés liegt zwischen 100 und 220 l. In der HV-Speicheranalyse wird basierend auf Kennzahlen der mögliche Energieinhalt des HV-Speicherkonzepts ermittelt, das in den verfügbaren Bauräumen realisiert werden kann. Dazu werden im HV-Speichermodell die Energiedichten der Speicherzellen sowie der empirisch ermittelte Volumenanteil der Speicherzellen am gesamten HV-Speicher berücksichtigt. In den betrachteten Bauräumen ist eine Integration von HV-Speicherkonzepten möglich, mit einem Energieinhalt zwischen 8 und 17 kWh im Jahr 2011/12 sowie 11 und 24 kWh prognostiziert für das Jahr 2020. Die Validierung des Bauraummodells erfolgt anhand einer Detailanalyse in CATIA V5 und die des HV-Speichermodells am HV-Speicher des BMW ActiveE.

Mit der Methodik wird der P/E-Lösungsraum eines PHEVs aufgrund geometrischer Randbedingungen aus den Bauraumkonzeptanalysen eingegrenzt. Die Erkenntnisse werden

mit den Resultaten der Wirtschaftlichkeitsanalysen kombiniert, um das Spannungsfeld von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept eines PHEVs aufzuzeigen. Am Beispiel der Amortisationsdauer und der HV-Speicherkonzepte in den betrachteten Bauräumen des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés werden unterschiedliche Auslegungen des elektrischen Systems eines PHEVs diskutiert. Mit einer Parametervariation aufgrund des prognostizierten technologischen Fortschritts bis in die Jahre 2020 und 2025 werden Sensitivitäten dargestellt. Mit HV-Speicherkonzepten in den betrachteten Bauräumen ist bereits im Jahr 2011/12 nahezu der komplette optimale Bereich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht für Fahrer A im P/E-Lösungsraum zu erreichen. Mit den unterstellten Prognosen für die Jahre 2020 und 2025 vergrößert sich der optimale Auslegungsbereich und bleibt trotzdem mit HV-Speichern in den betrachteten Bauräumen erreichbar.





---

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

---

### 5.1 Zusammenfassung und Fazit

Ein verändertes Umfeld für individuelle Mobilität lässt elektrifizierte Fahrzeuge in den Fokus der Öffentlichkeit rücken. Neben reinen Elektrofahrzeugen zählen dazu Hybridfahrzeuge und vor allem PHEVs. Diese legen größere Strecken als Hybridfahrzeuge rein elektrisch zurück, da die Möglichkeit existiert, den HV-Speicher extern über das Stromnetz aufzuladen. Ein weiterer Vorteil von PHEVs im Vergleich zu Elektrofahrzeugen ist, dass bei leerer Batterie das verbrennungsmotorische System startet und eine hohe Gesamtreichweite ermöglicht.

Für die Entwicklung von PHEVs existiert ein großer technischer Lösungsraum, der eine große Bandbreite elektrifizierter Fahrzeugkonzepte mit unterschiedlichen Ausprägungen funktionaler und geometrischer Eigenschaften ermöglicht. In der frühen Phase der Entwicklung wird der Lösungsraum aufgespannt und anschließend, im Sinne von Systems Engineering, vom Groben ins Detail eingegrenzt. Der technische Lösungsraum lässt sich in vier Cluster mit wesentlichen Gestaltungsparametern gliedern, deren Ausprägungen in der frühen Phase der Entwicklung erarbeitet werden: Die Topologie beschreibt die Position der wesentlichen Antriebs- und Speicherkomponenten im Fahrzeug. Das Maßkonzept beinhaltet die Hauptabmessungen des Interieurs und Exterieurs. Auf Komponentenebene wird der Komponententyp gewählt und die Komponente grob ausgelegt. Bei PHEVs zählen dazu die wesentlichen Antriebs- und Speicherkomponenten des elektrischen und verbrennungsmotorischen Systems, wobei das verbrennungsmotorische System aus konventionellen Fahrzeugen bekannt ist. Der Fokus liegt auf den Elektrifizierungsumfängen: HV-Speicher, E-Maschine, Leistungselektronik, Ladegerät, E-Getriebe, HV-Kabel (inklusive Ladekabel), modifizierter Tank, modifiziertes Bremskonzept, Zustartsystem, Klima-, Heiz- und Kühlkonzept sowie Modifikationen an Fahrwerk und Karosserie. Ziel der Konzeptgestaltung ist es, stimmige Gesamtfahrzeugkonzepte aus dem technischen Lösungsraum zu entwickeln, welche die jeweiligen Anforderungen an die Fahrzeugeigenschaften bestmöglich erfüllen.

Auf Basis geeigneter Prämissen wird der technische Lösungsraum für PHEVs eingegrenzt und anschließend analysiert. Das Maßkonzept eines existierenden verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs wird für die Analysen zugrunde gelegt, wie es bei einer Fahrzeugentwicklung nach dem Conversion Design typisch ist. Die Antriebstopologie für die zu untersuchende PHEV-Konfiguration wird festgelegt, um den Fokus der Analyse auf verschiedenen HV-Speichertopologien zu legen. Bei der geometrischen Konzeptgestaltung von PHEVs stellt der HV-Speicher aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte im

Vergleich zu Benzin oder Diesel die größte Herausforderung dar. Es wird die Speicherintegration im Tunnel- und Tankbereich sowie deren Kombination untersucht. Außerdem werden die Komponententypen festgelegt, um einen weiteren Fokus der Analyse auf die Auslegung des elektrischen Antriebs- und Speichersystems zu legen. Es wird der Lösungsraum über dem Energieinhalt des HV-Speichers von 3 bis 30 kWh und die Spitzenleistung der E-Maschine von 30 bis 160 kW aufgespannt und analysiert.

In einem strukturierten Vorgehen wird der Lösungsraum zuerst hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit für Käufer eines PHEVs untersucht. Anschließend wird dieser unter geometrischen Randbedingungen weiter eingegrenzt, entsprechend möglicher HV-Speicherintegrationen aus den Bauraumkonzeptanalysen. Es werden Wirtschaftlichkeitsanalysen im gesetzlichen Fahrzyklus NEFZ nach der ECE-Norm dargestellt sowie im Realbetrieb anhand aufgezeichneter Fahr- und Nutzungsprofile unterschiedlicher Fahrer. In diesem ganzheitlichen Ansatz werden in Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen durch Variationen der Parameter und Prämissen dargestellt. Dabei sind beispielsweise unterschiedliche HV-Speicherbauräume, der technologische Fortschritt und die preisliche Entwicklung bis in die Jahre 2020 und 2025 berücksichtigt. Die entwickelten Modelle auf Komponentenebene in MATLAB und MS Excel bestimmen für die Analysen Gewicht, Volumen und Kosten der Komponenten des Elektrifizierungsumfangs eines PHEVs, abhängig von der Auslegung. Darüber hinaus ermitteln Modelle auf Gesamtfahrzeugebene in MATLAB, MS Excel und CATIA V5 den Verbrauch und die Mehrkosten eines PHEVs gegenüber einem ICEV sowie Bauräume für die HV-Speicherintegration.

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse werden Kosten und Verbrauch eines PHEVs aus Käufersicht untersucht und der optimale Auslegungsbereich im Lösungsraum des elektrischen Systems hinsichtlich Energieinhalt und Leistung, unter vorausgesetzten Prämissen, identifiziert. Die Kosten werden als Anschaffungskosten definiert und entsprechen den Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV. Die Mehrkosten für Käufer resultieren aus den zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, die durch die Elektrifizierungsumfänge in einem PHEV entstehen. Der Verbrauch wird als Energiebedarf bei der Nutzung eines PHEVs definiert und entspricht dem Kraftstoff- und Stromverbrauch im Vergleich zu einem ICEV. Der reduzierte Kraftstoffverbrauch führt trotz zusätzlichem Stromverbrauch eines PHEVs gegenüber einem ICEV zu einer gesamthaften Verbrauchskostenreduzierung. Durch die Verrechnung wird auf den Quotienten Kosten pro Verbrauchsvorteil sowie auf die Amortisationsdauer für Käufer geschlossen. Bis in die Jahre 2020 und 2025 verbessern sich beide Größen deutlich aufgrund der prognostizierten Veränderungen der Energiepreise und der Mehrkosten für Käufer eines PHEVs gegenüber einem ICEV. Für den optimalen Auslegungsbereich darf der Energieinhalt des HV-Speichers nicht zu klein gewählt werden aufgrund eines hohen Grundbetrags an zusätzlichen Herstellkosten für Automobilhersteller, der im Rahmen von Mehrkosten an Käufer weitergegeben wird. HV-Speicher mit eher höherem Energieinhalt sind auch außerhalb des Optimums wegen der stärker steigenden Mehrkosten im Vergleich zum geringer zunehmenden Verbrauchsvorteil. Für die Analysen sind parametrische Modelle in MATLAB für die frühe Phase der Entwicklung programmiert, um Kosten und Verbrauch für verschiedene PHEV-Konfigurationen zu ermitteln.

Die Analyse im NEFZ nach der ECE-Norm identifiziert für Automobilhersteller einen optimalen Auslegungsbereich für die Elektrifizierungsumfänge in einem PHEV bezüglich Kosten pro Verbrauchsvorteil, unabhängig vom Fahr- und Nutzungsprofil. Dieser Bereich liegt für den konfigurierten straßengekoppelten PHEV auf Basis des BMW 1er Coupés nach dem Conversion Design zwischen 8 und 15 kWh Energieinhalt des HV-Speichers und einer Spitzenleistung der E-Maschine von ungefähr 50 kW. Dies entspricht einer elektrischen Reichweite von ungefähr 35 bis 60 km im NEFZ. Bis in das Jahr 2025 vergrößert sich der optimale Auslegungsbereich hinsichtlich des Energieinhalts.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse im Realbetrieb liegen Fahr- und Nutzungsprofile verschiedener Fahrer zugrunde, deren Geschwindigkeitsverläufe über mehrere Monate aufgezeichnet wurden, um eine repräsentative Datenbasis zu erhalten. Für jeden der vier beispielhaft ausgewählten Fahrer ergibt sich ein individueller, optimaler Auslegungsbereich des Quotienten Kosten pro Verbrauchsvorteil und der Amortisationsdauer. Der optimale Auslegungsbereich für Fahrer A liegt ungefähr zwischen 10 und 20 kWh sowie 30 und 70 kW. Die minimale Amortisationsdauer beträgt sieben bis acht Jahre. Im Jahr 2020 reduziert sich diese auf unter vier Jahre und bis 2025 wird eine weitere Halbierung erwartet. Die anderen drei ausgewählten Fahrer sind aufgrund des ungünstigen Verlaufs des Verbrauchs über Energieinhalt und Leistung eher weniger für einen PHEV geeignet. Fahrer B und D kompensieren diesen Effekt durch eine relativ hohe Fahrhäufigkeit und erreichen im Jahr 2020 minimale Amortisationsdauern von 7,5 bzw. 5,5 Jahren, wohingegen sich für Fahrer C 13 Jahre ergeben.

An den Tagesstreckenverteilungen der einzelnen Fahrer wird deutlich, dass es sinnvoll ist mit PHEVs ausschließlich die kürzeren Tagesstrecken abzudecken und nicht mit noch größeren HV-Speichern Tagesstrecken zu erreichen, die nur selten gefahren werden. Generell erfordert eine optimale Auslegung von PHEVs basierend auf realen Fahr- und Nutzungsprofilen ein passendes Verhältnis von Leistung zu Energieinhalt, da eine Auslegung im ungünstigen Bereich zu einer deutlichen Verschlechterung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit führt. Im Vergleich zur Analyse im Zyklus ist die reine Auslegung der Leistung auf eine elektrische Zyklusdurchfahrt im Realbetrieb nicht ausreichend. Aufgrund der großen Sensitivitäten hinsichtlich des Fahr- und Nutzungsprofils ist die Auswahl zielgruppenrelevanter Fahrer durch die Automobilhersteller für die Analyse und der daraus abgeleiteten Optimierung des elektrischen Systems eines PHEVs entscheidend. Die vorgestellte Wirtschaftlichkeitsanalyse verrechnet Kosten und Verbrauch eines PHEVs aus Käufersicht und zeigt eine deutliche Verbesserung bis in die Jahre 2020 und 2025, unter Berücksichtigung der Prognosen. Ein PHEV stellt ein attraktives Angebot für geeignete Käufer dar, vor allem zukünftig und abhängig vom Fahr- und Nutzungsprofil.

Neben der vorgestellten kostenoptimalen Dimensionierung sind gesetzliche Vorgaben und eine Optimierung hinsichtlich Fahrleistung weitere Kriterien für eine mögliche Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs. Mithilfe der erarbeiteten Methodik und den entwickelten Modellen können stimmige Konfigurationen des E-Systems eines PHEVs mit maximaler Wirtschaftlichkeit für Automobilhersteller und Käufer abgeleitet werden, im Spannungsfeld von Kosten und Verbrauch.

Bei der geometrischen Konzeptgestaltung von PHEVs stellt der HV-Speicher aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte im Vergleich zu Benzin oder Diesel die größte Herausforderung dar. Es existieren verschiedene HV-Speichertopologien, wobei eine Integration im Bereich des Tunnels, des Tanks oder einer Kombination aus beiden Vorteile bietet, im Vergleich zu anderen Integrationsmöglichkeiten.

Die Bauraumkonzeptanalyse erfolgt in zwei aufeinander aufbauenden Analysen, mit jeweils konzipierten parametrischen Geometriemodellen für die frühe Entwicklungsphase von PHEVs. In der Bauraumanalyse wird basierend auf Maßketten der verfügbare HV-Speicherbauraum im Fahrzeug ermittelt. Dazu werden im Bauraummodell die wesentlichen Abmessungen des Maßkonzepts eines existierenden Fahrzeugs sowie zusätzliche Anforderungen und Prämissen des zu entwickelnden Fahrzeugs nach dem Conversion Design berücksichtigt. Das verfügbare Volumen der betrachteten Bauräume des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés liegt zwischen 100 und 220 l. In der HV-Speicheranalyse wird basierend auf Kennzahlen der mögliche Energieinhalt des HV-Speicherkonzepts ermittelt, das in den verfügbaren Bauräumen realisiert werden kann. Dazu werden im HV-Speichermodell die Energiedichten der Speicherzellen sowie der empirisch ermittelte Volumenanteil der Speicherzellen am gesamten HV-Speicher berücksichtigt. In den betrachteten Bauräumen ist eine Integration von HV-Speicherkonzepten möglich, mit einem Energieinhalt zwischen 8 und 17 kWh im Jahr 2011/12 sowie 11 und 24 kWh prognostiziert für das Jahr 2020. Die Validierung des Bauraummodells erfolgt anhand einer Detailanalyse in CATIA V5 und die des HV-Speichermodells am HV-Speicher des BMW ActiveE.

Mit der Methodik wird der P/E-Lösungsraum eines PHEVs aufgrund geometrischer Randbedingungen aus den Bauraumkonzeptanalysen eingegrenzt. Die Erkenntnisse werden mit den Resultaten der Wirtschaftlichkeitsanalysen kombiniert, um das Spannungsfeld von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept eines PHEVs aufzuzeigen. Am Beispiel der Amortisationsdauer und der HV-Speicherkonzepte in den betrachteten Bauräumen des konfigurierten PHEVs auf Basis des BMW 1er Coupés werden unterschiedliche Auslegungen des elektrischen Systems eines PHEVs diskutiert. Mit einer Parametervariation aufgrund des prognostizierten technologischen Fortschritts bis in die Jahre 2020 und 2025 werden Sensitivitäten dargestellt. Mit HV-Speicherkonzepten in den betrachteten Bauräumen ist bereits im Jahr 2011/12 nahezu der komplette optimale Bereich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit aus Käufersicht für Fahrer A im P/E-Lösungsraum zu erreichen. Mit den unterstellten Prognosen für die Jahre 2020 und 2025 vergrößert sich der optimale Auslegungsbereich und bleibt trotzdem mit HV-Speichern in den betrachteten Bauräumen erreichbar.

Mithilfe der erarbeiteten Methodik und den entwickelten Modellen können in der frühen Entwicklungsphase stimmige Konfigurationen des elektrischen Systems eines PHEVs abgeleitet werden, im Spannungsfeld von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept.

## 5.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von Kosten und Verbrauch unter geometrischen Randbedingungen stellt eine interdisziplinäre Fragestellung dar. Die Kosten sind ein klassisches Thema aus der Betriebswirtschaft, wobei zur Modellbildung technisches

Verständnis erforderlich ist. Für die Ermittlung des Verbrauchs im Realbetrieb sind aufgezeichnete Realfahrten über mehrere Monate erforderlich. Darüber hinaus sind Modelle zu entwickeln, wozu vor allem Kenntnisse aus dem Maschinenbau und der Fahrzeugtechnik notwendig sind. Mit Hilfe der Informationstechnik und der Mathematik wird die Programmierung optimiert, um große Datenmengen zu analysieren. Für die geometrische Analyse ist technisches Verständnis des HV-Speichers und dessen Integration ins Fahrzeug relevant. Außerdem sind Kenntnisse über die Anwendung und Programmierung von CAD-Software erforderlich, um Parameter zu steuern und Ergebnisse zu generieren, die für die frühe Phase der Entwicklung geeignet sind. Dieser ganzheitliche Ansatz ist erforderlich, um die komplexe, interdisziplinäre Fragestellung zu beantworten. Die Vernetzung der unterschiedlichen Disziplinen für die optimale Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs und die gleiche Bearbeitungstiefe aller Aspekte ist das Alleinstellungsmerkmal der hier vorgestellten Arbeit.

Konkret im Bereich der Kostenanalyse existieren Modelle in der Literatur für eine Kostenabschätzung einzelner Elektrifizierungskomponenten, die jedoch teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Diese sind nur bedingt für die Analysen des gesamten elektrischen Systems anzuwenden, da die Prämissen der spezifischen Kostenmodelle unterschiedlich sind. In der vorliegenden Arbeit sind Kostenmodelle für den gesamten Elektrifizierungsumfang unter den gleichen Prämissen konzipiert. Darüber hinaus beschränken sich viele Veröffentlichungen bei Verbrauchsanalysen eines PHEVs auf einen konstanten Verbrauch aus einem spezifischen Fahrzyklus. Dies ist eine theoretische Betrachtung, da für realitätsnahe Analysen aufgezeichnete Realfahrten erforderlich sind. Für die Verbrauchsanalysen werden in der vorliegenden Arbeit reale Fahr- und Nutzungsprofile mit unterschiedlichen PHEV-Konfigurationen exakt simuliert und die Abweichungen zu einer Zyklusanalyse sowie die Sensitivität zu unterschiedlichen Fahrern dargestellt. In der Literatur werden die einzelnen Analysen hinsichtlich Kosten und Verbrauch teilweise kombiniert, jedoch bleiben die beschriebenen Randbedingungen oder es existiert ein anderer Hauptfokus. Existierende Geometriemodelle sind teilweise sehr detailliert und sind deshalb hauptsächlich für spätere Entwicklungsphasen geeignet oder haben einen spezifischen Anwendungsschwerpunkt hinsichtlich des Funktionsumfangs oder des Antriebskonzepts. Der Fokus des in dieser Arbeit vorgestellten Geometriemodells liegt auf der frühen Phase der Entwicklung und konzentriert sich auf Bauraum- und HV-Speicheranalysen für PHEVs.

Der interdisziplinäre Ansatz mit der erstmaligen Kombination von Kosten, Verbrauch und Bauraumkonzept eines PHEVs zur optimalen Auslegung des elektrischen Systems stellt den wissenschaftlichen Beitrag dar.

### **5.3 Ausblick**

Der Hauptfokus der hier vorgestellten Arbeit liegt auf der Entwicklung eines methodischen Vorgehens und der Anwendung zur Ermittlung einer optimalen Auslegung von PHEVs. Um die Funktionsweise der Methodik und der Modelle generell zu entwickeln und zu beweisen, wird der technische Lösungsraum für PHEVs frühzeitig durch geeignete Prämissen eingegrenzt. Aufgrund des modularen Aufbaus der Methodik und der parametrischen Modelle sind ein Ausbau und eine Detaillierung einzelner Elemente möglich. Eine große

Herausforderung ist es, einen geeigneten Detaillierungsgrad für die frühe Phase der Entwicklung zu wählen, da oftmals nur wenige Eingangsgrößen vorliegen und die Unsicherheiten sehr hoch sind. Darüber hinaus ist es entscheidend, dass alle verwendeten Modelle in einem einheitlichen Detaillierungsgrad vorliegen. In der vorliegenden Arbeit wird das entwickelte methodische Vorgehen mit den erforderlichen parametrischen Modellen vorgestellt. Eine optimale Auslegung des elektrischen Systems eines PHEVs hinsichtlich Wirtschaftlichkeit unter geometrischen Randbedingungen ist mit der entwickelten Methodik und den parametrischen Modellen möglich und wird beispielhaft gezeigt. Im Laufe der Erstellung dieser Arbeit und basierend auf den Erkenntnissen sind weitere Ideen für zukünftige Forschungsarbeiten entstanden:

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse eines PHEVs aus Käufersicht ist es möglich, nach der gleichen Methodik Modelle für weitere Komponententypen zu integrieren. Dazu zählen beispielsweise Kosten- und Verbrauchsmodelle mit Asynchronmaschinen. Dieser E-Maschinentyp kommt ohne Permanentmagnete aus und bietet Vorteile bei den Kosten, jedoch mit einem schlechteren Wirkungsgrad. Darüber hinaus sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich des HV-Speichers möglich, indem die Zell- und Modulanzahl variiert wird, sowie weitere Kathodenmaterialien untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Analysen für einen straßengekoppelten PHEV durchgeführt. Daneben existieren weitere mögliche Antriebs- und Speichertopologien für die nach der gleichen Methodik Modelle entwickelt werden können, um mit der identischen Vorgehensweise den technischen Lösungsraum zu analysieren. Im Bereich der Kosten sind viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu beobachten, die zu Veröffentlichungen mit neuen Annahmen und Prognosen führen. Preise und Kosten sind Eingangsgrößen der entwickelten Modelle und erlauben deshalb ein Update. Aufgrund der gezeigten hohen Sensitivität zum Fahr- und Nutzungsprofil ist eine zielgruppenrelevante Auswahl der Fahrer von großer Bedeutung. Eine Aufzeichnung der Realfahrten über einen längeren Zeitraum, beispielsweise über ein komplettes Jahr, ermöglicht das Nutzungsverhalten noch repräsentativer abzubilden. Neben dem Geschwindigkeitssignal hilft es, zusätzlich das Beschleunigungssignal mit aufzuzeichnen, um einen möglichen Fehler bei der Ermittlung der Beschleunigung aus der Geschwindigkeit zu vermeiden. Generell ist jedoch darauf zu achten, wie auch in der vorliegenden Arbeit angewendet, die aufgezeichneten Daten vor der Analyse durch geeignete Glättung aufzubereiten, um keine Beschleunigungsspitzen durch Messfehler zu erhalten. Die Aufzeichnung von Fahrdaten mit Datenloggern oder auch anderen Methoden, wie beispielsweise über Smartphones ist ein interessantes Forschungsfeld, vor allem im Hinblick auf die Auslegung neuartiger Fahrzeugkonzepte.

Bei der Bauraumkonzeptanalyse wurde gezeigt, dass trotz der Idealisierung der Bauräume die Ergebnisse für die frühe Phase der Entwicklung akzeptabel sind. In weiterführenden Analysen können zusätzliche Integrationsmöglichkeiten betrachtet werden, wie beispielsweise im Hinterwagen. Dazu sind die Wechselwirkungen im Gesamtfahrzeug und zu anderen Komponenten zu berücksichtigen, wie beispielsweise potentielle Zielkonflikte mit Abgasanlage oder Gepäckraum. Darüber hinaus ist eine ähnliche Bauraumkonzeptanalyse für weitere Antriebs- und Speicherkomponenten eines PHEVs möglich. Neben E-Maschine und Leistungselektronik ist die Integration des Tanks interessant, wenn davon ausgegangen wird, dass der Verbrennungsmotor im Vorderwagen positioniert wird und der HV-Speicher

möglicherweise die Position des Tanks unter der zweiten Sitzreihe einnimmt. Um die Bedienung des Bauraummodells und die Steuerung der Parameter zu vereinfachen ist eine Bedienoberfläche hilfreich.

Die Methodik und die Modelle wurden speziell für die Analysen hinsichtlich PHEVs konzipiert. Es ist jedoch möglich, diese auf andere elektrifizierte Fahrzeuge zu erweitern, wie beispielsweise reine Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeuge.





---

## Literaturverzeichnis

---

- ADAC, 2013. *Entwicklung der jährlichen Durchschnittspreise*. München: Allgemeine Deutsche Automobil-Club.
- Amtsblatt der Europäischen Union, 2012. *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)*. Genf: United Nations Economic Commission for Europe.
- Argonne National Laboratory, 2012. *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles*. Chicago: U.S. Department of Energy.
- Astier, M., 2011. *Package Drawing Exchanges*. Prag: Global Cars Manufacturers Information Exchange Group.
- Back, M., 2005. *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Dissertation.
- Baum, H., Dobberstein, J. & Schuler, B., 2011. *Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität*. Köln: Kölner Diskussionsbeiträge zur Verkehrswirtschaft.
- bayme vbm, 2012. *Qualifizierung für die Elektromobilität*. München: Bayrischer Unternehmensverband Metall und Elektro e.V..
- BDEW, 2013. *BDEW-Strompreisanalyse*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V..
- Braess, H.-H. & Seiffert, U., 2011. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Busche, I., 2013. *Analysis of the vehicle architecture in the development of electrified vehicle concepts during the early concept decision phase*. Braunschweig: 10th Symposium Hybrid and electric vehicles, S.306-322.
- Cebulski, B., 2011. *Leistungselektroniken im Fahrzeugantrieb*. Wiesbaden: ATZ elektronik 01/2011 6. Jahrgang, S. 20-24.
- Cheah, L. & Heywood, J., 2010. *The cost of vehicle electrification: A literature review*. Cambridge: MIT Energy Initiative Symposium.
- Cluzel, C. & Douglas, C., 2012. *Cost and performance of EV batteries*. Cambridge: Element Energy Limited.
- Cuenca, R., Gaines, L. & Vyas, A., 1999. *Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Costs*. Argonne: Center of Transportation Research, Argonne National Laboratory.

- Daenzer, W., 1989. *Systems Engineering - Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. Zürich: Verlag Industrielle Organisation.
- Delorme, A., Pagerit, S., Sharer, P. & Rousseau, A., 2009. *Cost Benefit Analysis of Advanced Powertrains from 2010 to 2045*. Stavanger: EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium.
- Dietrich, W., Hirz, M. & Rossbacher, P., 2010. *Integration von geometrischen und funktionalen Aspekten in die parametrisch assoziative Modellgestaltung in der konzeptionellen Automobilentwicklung*. Graz: 3. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug.
- Diez, W. & Kohler, M., 2010. *Otto-, Diesel-, Elektromotor - wer macht das Rennen?*. Stuttgart: Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart.
- DIN 70020-1, 1993. *Straßenfahrzeuge - Kraftfahrzeugbau - Teil 1: Begriffe von Abmessungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..
- DIN 70020-3, 2008. *Straßenfahrzeuge - Kraftfahrzeugbau - Teil 3: Prüfbedingungen, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Elastizität, Masse, Begriffe, Verschiedenes*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..
- DIN SPEC 91252, 2011. *Elektrische Straßenfahrzeuge - Batteriesysteme - Abmessungen für Lithium-Ionen-Zellen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V..
- Dudenhöffer, F., 2010. *Hochvolt Energiespeicher - Konkurrenz in Deutschland, Europa und Asien*. Wiesbaden: ATZ elektronik 04/2010, 5. Jahrgang, S. 25-31.
- Duesmann, M., Koehn, P. & Berger, H., 2011. *Fahrzeugarchitekturen für elektrifizierte Antriebe - Grundsätzliche Überlegungen und konkrete Anwendungen am Beispiel des BMW Vision EfficientDynamics*. München: VDI-Wissensforum.
- Du, J., Wang, H. & Ouyang, M., 2012. *Parameters Optimization of PHEV Based on Cost-Effectiveness from Life Cycle View in China*. Beijing: FISITA World Automotive Congress.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. & Lindemann, U., 2005. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Berlin: Springer.
- Environmental Protection Agency, 2006. *Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates*. Washington: Detailed Test Information, Final Technical Support Document.
- Ernst, C. et al., 2011. *Battery Sizing for Serial Plug-In Hybrid Vehicles: A Model-Based Economic Analysis for Germany*. Aachen: RWTH Aachen, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior.
- Fuchs, J., Riemenschneider, T., Huber, R. & Lienkamp, M., 2012. *Impact of Electrification on the Vehicle Concept Potential of Determining Components and Technologies*. München: Conference of Future Automotive Technology.
- Gonder, J., Markel, T., Simpson, A. & Thronton, M., 2007. *Using GPS Travel Data to Assess the Real World Driving Energy Use of Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)*. Washington: Transportation Research Board.

- Gorbea Diaz, C. E., 2011. *Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis In a Age of Architectural Competition*. München: TU München, Dissertation.
- Grabner, J. & Nothaft, R., 2006. *Konstruieren von Pkw-Karosserien*. Berlin: Springer.
- Graham, R., 2001. *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options*. Palo Alto: Electric Power Research Institute (EPRI).
- Grote, K.-H. & Feldhusen, J., 2012. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer.
- Gusig, L.-O., 2010. *Fahrzeugentwicklung im Automobilbau*. München: Hanser.
- Guzzella, L., 2007. *Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization*. Heidelberg: Springer.
- Hennig, H., 2012. *Der AI e-tron im Flottenversuch*. München: Conference of Future Automotive Technology.
- Hildinger, J., Schröder, J. & Poruba, C., 2010. *Grundaspekte bei der Gestaltung elektrischer Antriebssysteme für Straßenfahrzeuge*. Aschaffenburg: Elektromobilausstellung Fachtagung - Wettbewerbe (EMA 2010).
- Howell, D., 2012. *Battery Status and Cost Reduction Prospects*. Washington: U.S. Department of Energy.
- Illiano, E., 2012. *Die Vorteile der stromerregten Synchronmaschine als alleiniges Antriebsaggregat in Vollfahrzeugen*. Aachen: Tage des Hybrids, S. 125-134.
- Jung, M. & Hofer, B., 2011. *The BMW ActiveE - The next step by BMW Group towards electric mobility*. Braunschweig: 8th Braunschweig Symposium on Hybrid and Electric Vehicles.
- Jung, M., Merwerth, J., Ueberle, H. & Vogel, F., 2012. *Der elektrische Antrieb des BMW ActiveE*. Wiesbaden: MTZ 08/2012 73. Jahrgang, S. 31-37.
- Justen, R., 2013. *Sicherheitsaspekte der Elektromobilität*. Wiesbaden: ATZ extra, Sonderheft für VDI-FVT.
- Kampker, A., Burggräf, P. & Nee, C., 2012. *Costs, Quality and Scalability: Impact on the Value Chain of Electric Engine Production*. Nürnberg: 2nd International Electric Drives Production Conference and Exhibition (EDPC).
- Karlsson, S., 2009. *Optimal size of PHEV batteries from a consumer perspective - estimation using car movement data and implications for data harvesting*. Stavanger: EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium.
- Kasper, R. & Schünemann, M., 2012. *Elektrische Fahrentriebe - Topologien und Wirkungsgrad*. Wiesbaden: MTZ 10/2012 73. Jahrgang, S. 802-807.
- Klaiß, T. & Karspeck, T., 2010. *Kundenanalysen – Der Schlüssel für innovative und kundenorientierte Produktentwicklung*. München: ATZ / MTZ-Konferenz - Energie: CO<sub>2</sub> - Die Herausforderung für unsere Zukunft.

- Klüting, M., Billig, C. & Graf, H., 2012. *ActiveHybrid - The New Full-Hybrid Powertrains of BMW in the 3, 5 and 7 Series*. Aachen: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012, S. 971-988.
- Kuchenbuch, K., Stieg, J. & Vietor, T., 2011. *Individual concepts for electric vehicles: Interaction between battery package and vehicle concept*. Stuttgart: 11th Stuttgart International Symposium.
- Lang, S., Warburton, M. & Quettawala, A. A., 2011. *Euro Autos: The Future of Powertrain, Part 2 - What Are The Real Costs of Batteries & How Much Can They Be Reduced*. Sanford: Bernstein Research.
- Le Dantec, E. & Breuer, S., 2012. *Hybrid Powertrain System Simulation for Component Durability Evaluation Under Customer Usage Profiles*. Aachen: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, S. 989-1010.
- Leidhold, R., 2012. *Elektrische Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge*. Wiesbaden: MTZ 09/2012 73. Jahrgang, S. 692-699.
- Lieb, J., Wilde, A. & Bäker, B., 2012. *Causes for torque degradation during deceleration and the effect on the driving range of battery electric vehicles*. Dresden: 2nd International Energy Efficient Vehicle Conference (EEVC).
- Lindemann, A., 2012. *Leistungselektronik im elektrifizierten Antriebsstrang*. Wiesbaden: MTZ 11/2012 73. Jahrgang, S. 898-903.
- Lindemann, M., Wolter, T.-M., Freimann, R. & Fengler, S., 2011. *Konfiguration von Hybridantriebssträngen mittels Simulation*. Wiesbaden: ATZ 05/2009 Jahrgang 111, S. 332-339.
- Lowe, M., Tokuoka, S., Trigg, T. & Gereffi, G., 2010. *Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain*. Durham: Duke University.
- März, M., 2010. *Leistungselektronik für e-Fahrzeuge*. Erlangen: DRIVE-E Akademie.
- Matsumoto, S., Takeuchi, H. & Itagaki, K., 2012. *Development of Plug-In Hybrid System for Midsize Car*. Peking: FISITA 2012 World Automotive Congress.
- Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, 2011. *Strukturstudie BW e mobil*. Stuttgart: E&B engelhardt und bauer Druck und Verlag GmbH.
- National Research Council of the National Academics, 2011. *Assessment of fuel economy technologies for light-duty vehicles*. Washington: The National Academies Press.
- Nationale Plattform Elektromobilität, 2011. *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität - Anhang*. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO).
- Nies, B., Kell, T., Wilde, A. & Lindemann, U., 2012. *Capability of a PHEV System to Reduce the Consumption Depending on the Type of Use*. Aachen: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012, S. 279-296.
- Oswald, J., 2010. *Vor- und Nachteile verschiedener Motorkonzepte für Fahrantriebe*. Erlangen: DRIVE-E-Akademie.

- Pagerit, S., Sharer, P. & Rousseau, A., 2006. *Fuel economy sensitivity to vehicle mass for advanced vehicle powertrains*. Detroit: SAE 2006 World Congress & Exhibition.
- Pasaoglu, G., Honselaar, M. & Thiel, C., 2011. *Potential vehicle fleet CO2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe*. München: Elsevier.
- Pesaran, A. & Markel, T., 2007. *Battery Requirements and Cost-Benefit Analysis for Plug-In Hybrid Vehicles*. Fort Lauderdale: The 24th International Battery Seminar & Exhibit.
- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. & Friedrich, H., 2012. *Cost analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values*. Los Angeles: International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS26).
- Rasenack, W., 1998. *Parametervariationen als Hilfsmittel bei der Entwicklung des Fahrzeug-Package*. Berlin: Schriftenreihe A des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr, TU Berlin.
- Reif, K., 2010. *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Friedrichshafen: Vieweg + Teubner.
- Ried, M., Bollig, M., Berger, H. & Schramm, D., 2012a. *Conceptual design of plug-in hybrid electric vehicles – the challenge to balance efficiency, dynamics and interior space*. Aachen: Tage des Hybrids, S. 15-31.
- Ried, M., Karspeck, T., Jung, M. & Schramm, D., 2013b. *Kosten-Nutzen-Analyse von Plug-In-Hybridfahrzeugkonzepten*. Wiesbaden: ATZ 09/2013 115. Jahrgang, S. 694-701.
- Ried, M. et al., 2012b. *Parametrische Geometriemodelle für die Konzeptgestaltung elektrifizierter Fahrzeuge*. Duisburg: 4. Wissenschaftsforum Mobilität.
- Ried, M. et al., 2013a. *Lösungsraumanalyse elektrifizierter Fahrzeuge hinsichtlich Verbrauchspotential und Speicherintegration*. Braunschweig: 10. Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge, S. 288-305.
- Roland Berger, 2011. *Powertrain 2020: Li-Ion Battery Value Chain Analysis*. Aachen: Roland Berger Strategy Consultants.
- Roland Berger, 2012. *The Lithium-Ion Battery Value Chain*. Istanbul: Roland Berger Strategy Consultants.
- Roschinski, A. et al., 2008. *Die Fahrzeugarchitektur - Eleganz, Dynamik und Komfort*. Wiesbaden: ATZextra, S. 22-28.
- SAE J1100, 2009. *Motor Vehicle Dimensions*. Washington: Society for Automotive Engineering.
- Sauer, D. U. & Ecker, M., 2013. *Batterietechnik - Lithium-Ionen-Batterien*. Wiesbaden: MTZ 01/2013 74. Jahrgang, S. 66-70.
- Schaub, N., 2011. *Erforderliche Maßnahmen zur Prüfung (z. B. Crash) alternativ angetriebener Gesamtfahrzeuge und deren Komponenten*. Berlin: 8. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Fokus Elektromobilität.

- Schramm, D., Hiller, M. & Bardini, R., 2010. *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Heidelberg: Springer.
- Seisenberger, S., Ried, M., Reupold, P. & Voigt, K.-I., 2012. *Electric vehicles - A cost model of electric propulsion systems*. Nürnberg: 2nd International Electric Drives Production Conference and Exhibition (EDPC).
- Shiau, C.-S., Samaras, C., Hauffe, R. & Michalek, J., 2009. *Impact of Battery Weight and Charging Patterns on the Economic and Environmental Benefits of Plug-in Hybrid Vehicles*. Washington: Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Shiau, N. et al., 2010. *Optimal Plug-In Hybrid Electric Vehicle Design and Allocation for Minimum Life Cycle Cost, Petroleum Consumption, and Greenhouse Gas Emissions*. New York: ASME Journal of Mechanical Design, Volume 132.
- Simpson, A., 2006. *Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology*. Yokohama: 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS-22).
- Steiger, W., 2012. *Rahmenbedingungen zukünftiger Mobilität - Strategie des Volkswagenkonzerns*. Ingolstadt: Seminarreihe VDI Bezirksgruppe.
- Takeuchi, H., Kamichi, K. & Itagaki, K., 2012. *Development of the Toyota Plug-In Hybrid System for Mass-Production*. Aachen: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012, S. 261-278.
- The Boston Consulting Group, 2010. *Batteries for Electric Cars*. Boston: The Boston Consulting Group.
- Torsten, H., 2011. *Strategien und Potenziale zur Verbrauchsreduzierung bei Verkehrsstaus*. Kassel: Universität Kassel, Dissertation.
- Tschöke, H., 2012. *Hybridantriebe - Definitionen und Lösungsvarianten*. Wiesbaden: MTZ 05/2012 73. Jahrgang.
- Tschöke, H., 2012. *Range Extender - Definitionen, Anforderungen, Lösungsmöglichkeiten*. Wiesbaden: MTZ 06/2012 73. Jahrgang, S. 414-419.
- Vezzini, A., 2009. *Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge Teil 1*. Fehrltorf: Bulletin SEV/AES 3/2009, S.19-23.
- Vezzini, A., 2009. *Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge Teil 2*. Fehrltorf: Bulletin SEV/AES 6/2009, S. 21-25.
- von Borck, F., Eberleh, B. & Raiser, S., 2010. *Lithium-Ionen-Batterie - Hochintegriertes Modul als Systemgrundlage*. Wiesbaden: ATZ Elektronik 04/2010 5. Jahrgang, S. 8-13.
- Waldowski, P., Marker, S., Schulz, A. & Schindler, V., 2012. *BEV, REEV oder PHEV? Ein Tool zur Hilfe bei der Entscheidungsfindung für die private und kommerzielle Anwendung*. Essen: Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Haus der Technik Fachbuch Band 121, S. 254-268.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. & Olschewski, I., 2010. *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstrangs*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Wietschel, M. & Roser, A., 2012. *Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten "Early Adoptern"*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI und IREES.

Wirtz, B. & Mühlkamp, H., 2010. *E-Government : Grundlagen, Instrumente, Strategien - Teil D: Wirtschaftswissenschaftliche Aspekte*. Wiesbaden: Gabler.

Wöhl-Bruhn, H., 2010. *Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe*. Braunschweig: TU Braunschweig, Dissertation.

Wünsch, E., Gao, H. & Schäfer, H., 2010. *Elektromotoren in der mobilden Anwendung*. Würzburg: VDI-Fachkonferenz.

www.bgr.bund.de, 2013. *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffpreise*. Hannover:

[http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/produkte\\_node.html#rohstoffpreise](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html#rohstoffpreise), Zugriff am 27.06.2013.

www.bmw.de, 2012. *Technische Daten aller BMW-Fahrzeuge*. München: <http://www.bmw.de/vc/ncc/xhtml/start/startWithModelSelection.faces?productType=1&country=DE&market=DE&language=de&brand=BM>, Zugriff am 13.11.2012.

www.bmw.de, 2013. *Technische Daten BMW 1er Coupé*. München: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/1er/coupe/2011/technische-daten.html>, Zugriff am 16.2.2013.

www.brusa.biz, 2013. *Technische Daten Hybrid Synchron Motor HSM1-6.17.12*. Sennwald: <http://www.brusa.biz/index.php?id=135&L=ixegoyuscpp>, Zugriff am 28.6.2013.

www.eurofot-ip.eu, 2012. *European Field Operational Test on Active Safety Systems*. Brüssel: [http://www.eurofot-ip.eu/en/about\\_eurofot/](http://www.eurofot-ip.eu/en/about_eurofot/), Zugriff am 13.11.2012.

www.fueleconomy.gov, 2013. *U.S. Department of Energy: Find and compare cars*. Washington: <http://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.shtml>, Zugriff am 8.4.2013.

www.press.bmwgroup.com, 2012. *BMW Concept Active Tourer: Kombiniert Komfort und Funktionalität mit Dynamik und Stil*. München: <https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/pressDetail.html?title=bmw-concept-active-tourer-kombiniert-komfort-und-funktionalit>, Zugriff am 24.12.2012.

www.press.bmwgroup.com, 2013a. *BMW Group Innovationstag 2011: Efficient Dynamics*. München: <https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/pressDetail.html?title=bmw-group-innovationstag-2011-efficient-dynamics>, Zugriff am 27.2.2013.

www.press.bmwgroup.com, 2013b. *Der BMW i3*. München: <https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/pressDetail.html?title=der-bmw-i3>, Zugriff am 5.9.2013.

www.varta-microbattery.com, 2013. *Data Sheet LIC18650-26 FC*. Ellwangen: [http://www.varta-microbattery.com/applications/mb\\_data/documents/data\\_sheets/DS56627.pdf](http://www.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS56627.pdf), Zugriff am 10.8.2013.

Zhang, S. et al., 2012. *Permanent Magnet Technology for Electric Motors in Automotive Applications*. Nürnberg: 2nd International Electric Drives Production Conference and Exhibition (EDPC).

Zirkler, S., 2010. *Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte*. München: TU München, Dissertation.

Zschech, D., 2010. *Li-Tec CERIO Technologie für Elektro- und Hybridfahrzeuge*. Erlangen: DRIVE-E Akademie.