

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Produktentwicklung

# **Nutzungsgerechte Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems für Plug-In Hybride**

**Benedikt Johannes Nies**

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

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann 2. Prof. Martin Steinert Ph. D., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen

Die Dissertation wurde am 09.12.2013 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen  
am 15.07.2014 angenommen.



## **VORWORT DES HERAUSGEBERS**

### **Problemstellung**

Die Mobilität im Wandel der Zeit bringt neue Anforderungen und somit Herausforderungen mit sich. Plug-In Hybrid Antriebe ermöglichen eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs in gesetzlichen Fahrzyklen und in der realen Nutzung. Durch einen großen Anteil elektrischen Fahrens können der Kraftstoffverbrauch und somit die lokalen  $CO_2$ -Emissionen reduziert werden. Die Höhe der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist jedoch stark abhängig von der Ausprägung des Mobilitätsverhaltens. Die Abbildung des Nutzungsverhaltens findet in bestehenden Auslegungsprozessen nur unzureichend Beachtung. Die Berücksichtigung dieser Daten im Auslegungsprozess elektrischer Antriebssysteme für Plug-In Hybride ist die zentrale Problemstellung der vorliegenden Arbeit.

### **Zielsetzung**

Für die Auslegung des elektrischen Antriebssystems soll das Nutzungsverhalten wesentlich mit einbezogen werden, um für identifizierte Ausprägungen im Nutzungsverhalten Systemdimensionierungen abzuleiten. Ziel ist es, einen Zusammenhang zwischen dem Nutzungsverhalten und den Systemauslegungsgrößen herzustellen. Um verschiedene Ausprägungen im Nutzungsverhalten zu identifizieren, wird auf Grundlage einer Felddatenvermessung eine Clusterbildung durchgeführt. Zusätzlich zum Nutzungsverhalten werden weitere, die Auslegung beeinflussende Parameter untersucht und für die Dimensionierung berücksichtigt. Die getroffenen Auslegungen sollen im letzten Schritt bewertet und somit das Vorgehen einer Validierung unterzogen werden.

### **Ergebnisse**

Auf Grundlage des entwickelten Ansatzes wurden unterschiedliche Ausprägungen im Nutzungsverhalten für die nutzungsgerechte Dimensionierung identifiziert. Dabei haben sich das Tagesstreckenverhalten sowie das Kraftstoffverbrauchspersentil als Hauptkriterien für die energetische Dimensionierung herausgestellt. Eine weitere wichtige Einflussgröße stellt das Ladeverhalten dar. Die nutzungsgerechte Auslegung hat sich als wertig und geeignet herausgestellt, um unterschiedlichen Nutzungsverhalten zu entsprechen und den Nutzen des Systems zu erhöhen. Die verwendeten Methoden der Systemabstraktion und die Entwicklung von Anforderungen haben den erarbeiteten Ansatz umfassend und zielgerichtet unterstützt. Das angewendete Verfahren der Clusterbildung dient dazu Nutzer gleichen Verhaltens zu identifizieren und zu gruppieren. Dies bildet somit einen Kernbestandteil des erarbeiteten Vorgehens.

### **Folgerungen für die industrielle Praxis**

Bei der Gestaltung von Plug-In Hybriden zeigen diese Ergebnisse, dass es mit einem geeigneten Ansatz möglich ist, das Nutzungsverhalten in die Systemgestaltung zu integrieren. Das vorgestellte Vorgehen wurde mit Hilfe von vermessenen Nutzungsdaten angewendet und hat gezeigt, dass die nutzungsgerechte Auslegung den Mobilitätsbedürfnissen und zudem den gesetzlichen Anforderungen gerecht wird. Anstatt der untersuchten Größe des Tagesstreckenverhaltens kann ebenso das Streckenverhalten oder die Strecke zwischen zwei Ladevorgängen untersucht werden. Damit können mögliche Sensitivitäten dieser Nutzungsparameter auf ihren Einfluss hin untersucht werden. Vor dem Hintergrund der erzielten Ergebnisse ist mit der fortschreitenden Entwicklung im Bereich der elektrischen Energiespeicher eine

Umsetzung der aus dem Nutzungsverhalten resultierenden Anforderungen ein sinnvoller Schritt.

### **Folgerungen für die Forschung und Wissenschaft**

Die Methodenanwendung an diesem Beispiel der industriellen Praxis hat gezeigt, dass ein geeignetes Vorgehen hilft, bestehende Strukturen und Prozesse neu zu gestalten. Dazu konnte ein komplexer Sachverhalt zielorientiert strukturiert und wesentliche Elemente hervorgehoben werden. Dies hat ohne Zweifel dazu beigetragen, ein hohes Maß an Verständnis für den Ansatz des Vorgehens zu erwirken.

Garching, August 2014

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München

## **DANKSAGUNG**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group AG und als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung an der Technischen Universität München von Januar 2011 bis Mai 2013. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann für das mir entgegengebrachte Vertrauen als auch die Unterstützung, mit der er meine Arbeit begleitete. Die mir zugestandene Freiheit in der thematischen Gestaltung hat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Prof. Martin Steinert Ph. D. von der TU Norwegen, Trondheim danke ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung. Die Gespräche waren für das Gelingen der Arbeit sehr wichtig und wertvoll. Mein Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für die Übernahme des Prüfungsvorsitz der Prüfungskommission und die reibungslose organisatorische Durchführung.

Während meiner Zeit als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter habe ich sowohl am Lehrstuhl für Produktentwicklung als auch bei BMW sehr viel Unterstützung und Wohlwollen erfahren. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken. Dies hat zum Gelingen der Arbeit ganz wesentlich beigetragen. Hervorheben möchte ich hier Dr.-Ing. Thomas Kell, der mir die Möglichkeit der Promotion bei BMW gegeben hat und mit viel Engagement die Betreuung gelebt hat und Dr.-Ing. Andreas Wilde, der die Betreuung im zweiten Teil übernommen hat. Zudem möchte ich im besonderen Andreas Ertlmeier, Martin Kramer, Peter Kropf, Dr. Tobias Karspeck und Felix Hanisch für die fachliche Unterstützung danken. Ein Dank gilt auch allen Studenten, die unmittelbar zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, hier hervorzuheben Herrn Manuel Haslbeck, Herrn Gerrit Küpper und Herrn Philipp Wolfgramm.

Zu guter Letzt möchte ich mich in aller Form bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für die bedingungslose und uneingeschränkte Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung danken.

München, August 2014

Benedikt Nies

Die folgenden, getätigten Veröffentlichungen sind Bestandteil der vorliegenden Promotionsschrift:

Nies, B.; Kell, T.; Kropf, P.; Lindemann, U.: Design of Plug-In Hybrid power trains with help of simulation and data records. In: Stuttgart International Symposium, S. 141-154. Stuttgart, 2012.

Nies, B.; Kell, T.; Wilde, A.; Lindemann, U.: Capability of Plug-In Hybrid (PHEV) system to reduce the consumption depending on the type of use. In: 21th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012. Aachen, 2012.

Nies, B.; Kurz, G.; Schmitz, G.; Kell, T.; Wilde, A.; Lindemann, U.: Capability of Plug-In Hybrid (PHEV) system to reduce the consumption depending on the type of use. In: 2nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology Beijing 2012. Beijing, 2012.

Nies, B.; Orawski, R.; Lindemann, U.: Customer Focused Requirement Engineering And System Design for Plug-In Hybrid Vehicles (PHEV). In: International Conference on Engineering Design, ICED 2013. Seoul, Südkorea 2013.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	7
1.2 Einordnung und thematische Abgrenzung . . . . .	7
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>11</b>
2.1 Begriffe und Definitionen . . . . .	11
2.1.1 Produktentstehungsprozess . . . . .	11
2.1.2 Anforderungsmanagement . . . . .	13
2.1.3 Anforderungen . . . . .	13
2.1.4 Systemmodellierung . . . . .	13
2.2 Spezifikation von Anforderungen . . . . .	14
2.2.1 Eigenschaften von Anforderungen . . . . .	14
2.2.2 Klassifikation von Anforderungen . . . . .	16
2.2.3 Quellen für Anforderungen . . . . .	16
2.3 Möglichkeiten der Systemabstraktion . . . . .	17
2.4 Diskussion und Reflexion . . . . .	20
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>25</b>
3.1 Ausprägungen der Elektrifizierung . . . . .	25
3.2 Funktionen eines Plug-In Hybrids (PHEV) . . . . .	28
3.3 Relevanz eines Plug-In Hybrids . . . . .	31
3.4 Eigenschaften der elektrischen Antriebskomponenten eines PHEVs . . . . .	33
3.4.1 Elektromaschine . . . . .	33
3.4.2 Hochvoltspeicher . . . . .	34
3.4.3 Wirkungsgradbetrachtung des elektrischen Antriebssystems . . . . .	36
3.5 Existierende Hybride und Plug-In Hybride . . . . .	37
3.5.1 Diesel Hybrid am Beispiel von Mercedes . . . . .	37
3.5.2 Benzin Hybrid am Beispiel von BMW . . . . .	38
3.5.3 Plug-In Hybrid Konzept von Jaguar . . . . .	38
3.5.4 Plug-In Hybrid am Beispiel vom Toyota Prius . . . . .	39
3.5.5 Weitere Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang . . . . .	42
3.6 Nutzungsbereich Plug-In Hybrid . . . . .	44
3.7 Fazit und Reflexion . . . . .	46
<b>4 Initialauslegung des elektrischen Antriebssystems für PHEVs</b>	<b>49</b>
4.1 Zentrale Bewertungsgrößen und Umfang der Initialauslegung . . . . .	49
4.1.1 Einführung von Begrifflichkeiten . . . . .	49
4.1.2 Detaillierung des Nutzungspotentials in Abhängigkeit vom Nutzungsverhalten als zentrale Bewertungsgröße . . . . .	50



4.1.3 Überblick des Vorgehensmodells zur Systemauslegung des elektrischen Antriebssystems von Plug-In Hybriden . . . . .	52
4.2 Nutzungsverhalten und technisches System im Fokus . . . . .	52
4.2.1 Analyse des Nutzungsverhaltens . . . . .	53
4.2.2 Beschreibung Nutzungsprofil . . . . .	57
4.2.3 Analyse des elektrischen Antriebssystems . . . . .	58
4.2.4 Zusammenfassung und Reflexion . . . . .	60
4.3 Anwendung der Systemmodellierung und Anforderungsentwicklung . . . . .	60
4.3.1 Darstellung der Systemmodelle . . . . .	60
4.3.2 Einordnung der Anforderung zu Systemabstraktion . . . . .	64
4.3.3 Zusammenfassung und Reflexion . . . . .	66
4.4 Abgleich des Nutzungsverhaltens mit dem technischen Lösungsraum . . . . .	67
4.4.1 Einordnung der Nutzer abhängig von einer Auslegung . . . . .	67
4.4.2 Zusammenfassung und Reflexion . . . . .	73
4.5 Berechnung einer Initialdimensionierung auf Grundlage von Nutzungsdaten . . . . .	73
4.5.1 Berechnung des Nutzungspotentials . . . . .	73
4.5.2 Berechnung des Systemnutzungsgrades . . . . .	77
4.5.3 Zusammenfassung und Reflexion . . . . .	78
<b>5 Umsetzung einer Systemauslegung . . . . .</b>	<b>79</b>
5.1 Analyse der ausgewählten Nutzer . . . . .	79
5.2 Clusteranalyse von Nutzungsdaten . . . . .	81
5.2.1 Grundlagen der Clusteranalyse . . . . .	81
5.2.2 Durchführung einer Clusteranalyse . . . . .	85
5.3 Randbedingungen des gewählten Beispiels . . . . .	91
5.4 Berechnung des Nutzungspotentials . . . . .	93
5.5 Initialauslegung des elektrischen Antriebssystems . . . . .	99
5.6 Reflexion der Auslegung . . . . .	101
<b>6 Validierung der vorgestellten Initialdimensionierung . . . . .</b>	<b>103</b>
6.1 Zur Validierung verwendete Simulationsmodelle . . . . .	103
6.2 Validierung der Größe Nutzungspotential . . . . .	104
6.3 Bewertung auf Basis der Initialdimensionierung . . . . .	106
6.3.1 Bewertung Kraftstoffverbrauch zu konventionellem Fahrzeug . . . . .	106
6.3.2 Bewertung energetische Nachhaltigkeit . . . . .	107
6.3.3 Bewertung Verfügbarkeit Hybridfunktionen bei variierenden Randbedingungen . . . . .	109
6.3.4 Bewertung in gesetzlichen Fahrzyklen . . . . .	115
6.3.5 Zusammenfassung und Reflexion . . . . .	118
6.4 Reflexion . . . . .	119
<b>7 Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>121</b>
7.1 Bearbeitete Aufgabenstellung . . . . .	121
7.2 Vorgehen . . . . .	121
7.3 Ergebnisse, Reflexion und Ausblick . . . . .	122
7.3.1 Möglichkeiten und Entwicklungsfelder des Vorgehens . . . . .	122
7.3.2 Akademische Relevanz . . . . .	123

---

7.3.3 Mehrwert für die Entwicklung und Nutzung elektrifizierter Antriebsstränge . . . . .	124
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>9 Anhang</b>	<b>133</b>



# 1 Einleitung

Der Entwicklung elektrischer Antriebssysteme für Kraftfahrzeuge kann sich heutzutage kein Fahrzeughersteller mehr entziehen. Unabhängig von den verschiedenen zur Zeit favorisierten Techniken und Systemen für das Elektroauto der Zukunft gewinnt zunehmend ein für die herkömmliche Antriebstechnik nur am Rande bedeutender Faktor für die neue Generation von Kraftfahrzeugen an Bedeutung, nämlich die Art und Weise der Autonutzung, die Mobilität der Menschen, die Autos kaufen und sie fahren, quasi das Nutzungsverhalten der Menschen des Autokäufers und Autofahrers. Wann, wie oft, wie lange und für welche Strecken ein Kraftfahrzeug im Einsatz ist, wird künftig den Autotypus und die Antriebstechnik von Kraftfahrzeugen sicherlich stärker beeinflussen als es bisher der Fall war. In den Vordergrund rückt die Mobilität des einzelnen Autofahrers und der Gesamtheit der Kraftfahrzeugnutzer. Wie sich diese Mobilität exakt erfassen lässt, wie sie sich in die Kriterien und Parameter von Ansprüchen und Zielen in der Entwicklung von Kraftfahrzeugen einordnen lässt, und wie diese Mobilität letztlich im Kontext zu den bekannten und in der Entwicklung sich befindenden elektrischen Kraftfahrzeug-Antriebssystemen zu beurteilen ist, das soll in der vorliegenden Arbeit umfassend dargelegt, analysiert und so weit bereits möglich, auch gewertet werden. Der beschriebene Ansatz wird in dieser Arbeit für Plug-In Hybriden (PHEV) beschrieben. Diese besitzen ein leistungsstarkes elektrisches Antriebssystem, deren elektrischer Energiespeicher extern geladen werden kann.

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des menschlichen Individuums. Mobilität wird gemäß (WEISS, 2005, Band 10, S. 23) als „allg. die Bewegung von Menschen in sozialen Räumen und/oder ihre regionale Beweglichkeit“ beschrieben. Nach EICHORN (2012) stellt Mobilität einen wirtschaftlichen oder sozialen Mehrwert dar. Mobilität kann hierbei als System betrachtet werden mit den notwendigen Eingangsgrößen wie Energie, Rohstoffe oder Land bei gleichzeitigen Nebenwirkungen, wie Verschmutzung oder Unfällen. Um den vielseitigen Anforderungen für Mobilität gerecht zu werden, sind technische Lösungen notwendig. Diese Lösungen haben dem Wandel der Zeit zu entsprechen. Dieser Wandel der Zeit bezeichnet DRAEGER (2010) als „verändertes Umfeld für Mobilität“. Als Treiber dieser Veränderung nennt er die Umwelt mit dem Klimawandel, die Urbanisierung, die Politik mit der Flottengesetzgebung für Kraftfahrzeuge, die Wirtschaft mit Ressourcenknappheit, die Kultur mit der Übernahme sozialer Verantwortung und die Kundenwünsche. Zudem prognostiziert er einen Anstieg der Fahrleistung pro Person und Jahr. Laut ZETSCHKE (2012) wächst „voraussichtlich bis 2020 die Weltbevölkerung um 9 Prozent, die Weltwirtschaft um 30 Prozent und der Weltautomobilmarkt sogar um 54 Prozent“.

DRAEGER (2010) sieht im Zusammenhang dieser Herausforderungen als mittel- und langfristige Maßnahmen unter anderem die Antriebsstrangelektrifizierung. EICHORN (2012) sieht die Notwendigkeit einer bedarfsgerechten Antriebsstrangelektrifizierung vom reinen Verbrennungsmotor für den Langstreckenverkehr hin zu batterieelektrischen Fahrzeugen für den Stadtverkehr. Die Automobilhersteller leisten durch die Entwicklung der technischen Lösungen für individuelle Mobilität ihren Beitrag für mehr Nachhaltigkeit. Der Begriff der Nachhaltigkeit kann in diesem energetisch geprägten Zusammenhang folgendermaßen definiert werden:

- Betrachtung der  $CO_2$ -Bilanz über den kompletten Produktlebenszyklus
- Darstellung kompletter oder teilweiser emissionsfreier Mobilität
- Bedarfsgerechte Produktgestaltung mit dem Ziel der Ressourcenschonung

Die Gesetzgeber erhöhen die Anforderungen an die Automobilersteller, in dem sie den bestehenden Herausforderungen durch ein entsprechendes Regelwerk Nachdruck verleihen. Dies äußert sich darin, dass die Flottenemissionswerte stark reduziert werden müssen. Diese Reduzierung sind mit einer rein verbrennungsmotorischen Fahrzeugflotte mitunter nicht darstellbar. Grund ist, dass durch die angebotenen Fahrzeugderivate in ihrer Größe in Kombination mit den leistungsstarken Verbrennungsmotoren der vom Gesetzgeber geforderte Flottenwert nicht realisierbar ist (MATTHIES, 2010). Neben aufwendiger technischer Maßnahmen auf verbrennungsmotorischer Seite kann durch eine Antriebsstrangelektrifizierung der  $CO_2$ -Flottenwert erheblich reduziert werden. Niedrige Kraftstoffverbrauchswerte im gesetzlichen Zyklus in Kombination mit einer entsprechenden Stückzahl in der Fahrzeugflotte können den Flottenverbrauchswert deutlich senken. Elektrisches Fahren wird als emissionsfreies Fahren bewertet und senkt somit erheblich die Verbrauchswerte von hybridisierten Fahrzeugen in gesetzlichen Fahrzyklen. Elektrisches Fahren ist lokal emissionsfrei und könnte somit beispielsweise die Luftprobleme in urbanen Lebensräumen reduzieren.

Betrachtet man auf der anderen Seite das Mobilitätsverhalten der Menschen, so ist dieses sehr individuell und unterschiedlich. Auch sind die Medien der Mobilität für Individuen verschieden. Öffentliche Verkehrsmittel wie Schienenverkehr oder Buslinien oder auch der Flugverkehr stehen in Konkurrenz zu den Personenkraftwagen. Abhängig von Familienstand, Wohnort, Arbeitsplatz und Freizeitgewohnheiten resultiert ein unterschiedlicher Mobilitätsbedarf.

Der Nutzen eines Kunden durch die Elektrifizierung hängt in hohem Maße davon ab, wie sich das Mobilitätsverhalten und die bedarfsgerechte technische Lösung kombinieren lassen. Der Nutzen des elektrifizierten Antriebsstrang wird hier interpretiert als Verbrauchseinsparung durch elektrisches Fahren des Plug-In Hybrid (PHEV). Bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden verschiedene Ausprägungen unterschieden. Zwischen dem rein verbrennungsmotorischen Antriebs und dem batterieelektrischen Fahrzeug gibt es viele Kombinationen von elektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben die als Hybride bezeichnet werden. Diese unterscheiden sich sowohl in der Dimensionierung der einzelnen Teilsysteme als auch in deren Topologie untereinander. Daraus resultieren verschiedene Funktionen in unterschiedlichen Ausprägungen.

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist es, im Bereich der Plug-In Hybride eine Methodik zur nutzungsgerichteten Auslegung des elektrischen Antriebssystems umzusetzen. Ziel ist, für Plug-In Hybride relevante Nutzungsparameter zu identifizieren und aus diesen Größen Anforderung für die Systemskalierung abzuleiten. Damit soll der Nutzen einer derartigen technischen Lösung erhöht und energetisch bewertbar gemacht werden. Von diesen Anforderungen startend werden Antriebsstränge paralleler Architektur abgeleitet und ausgelegt. Diese werden dann hinsichtlich Kraftstoffverbrauch bei verschiedenen Randbedingungen sowie in Gesetzeszyklen bewertet. Dieses Vorgehen begründet sich darin, dass die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs eines elektrifizierten Antriebsstranges sehr sensitiv abhängig von der Nutzung ist und somit eine bedarfsgerechte Auslegung einen großen Mehrwert mit sich bringt.

Die bedarfsgerechte Auslegung von elektrischen Systemen von PHEV Antriebssträngen wurde aus energetischer Perspektive beschrieben. Aber auch die Kosten spielen für diese technische Lösung eine nicht unerhebliche Rolle. Die batterieelektrischen Speicher sind hierbei ein Hauptkostentreiber. MCKINSEY (2012) sieht eine erhebliche Reduktion der Kosten für batterieelektrische Speicher in den nächsten Jahren, doch bleiben sie auf hohem Niveau. Sie reduzieren sich demnach von aktuell rund 600\$ je kWh auf 200\$ bzw. 163\$ in den Jahren 2020 bzw. 2025. Aus diesen Zahlen ist erkennbar, dass ein wirtschaftlicher Umgang auch für die Automobilhersteller von Interesse ist, um zum einen Kosten zu reduzieren, zum anderen die Fahrzeuge zu einem annehmbaren Preis am Markt anbieten zu können.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Plug-In Hybrid Antriebe ermöglichen eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs in gesetzlichen Fahrzyklen und in der realen Nutzung. Durch einen großen Anteil elektrischen Fahrens können der Kraftstoffverbrauch und somit die lokalen  $CO_2$ -Emissionen reduziert werden. Die Höhe der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist jedoch stark abhängig von der Ausprägung des Mobilitätsverhaltens (VON ESSEN & DIEZEMANN, 2013). Auch sind elektrische Antriebssysteme aktuell sehr teuer in der Herstellung, so dass eine Überdimensionierung vermieden werden sollte. Es existiert die Herausforderung, Anforderungen an die Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems abzuleiten, um eine Dimensionierung mit einer hohen Kraftstoffreduktion darzustellen. Daher ist es notwendig, das Nutzungsverhalten hinsichtlich einer Auslegung des elektrischen Antriebssystems zu analysieren, um für entsprechende Ausprägungen im Nutzungsverhalten Systemdimensionierungen abzuleiten. Zunächst ist es notwendig, die für die Auslegung relevanten Größen im Nutzungsverhalten zu identifizieren. Des Weiteren besteht der Bedarf, verschiedene Ausprägungen im Nutzungsverhalten aufzuzeigen. Der anschließende Teil der Analyse umfasst, gleichartige Nutzungsverhalten zu gruppieren, um eine systematische und gesamthafte Erfassung der verschiedenen Nutzungstypen zu identifizieren. Eine systematische Aufzeichnung der Fahrzeugnutzung über einen längeren Zeitraum ist daher notwendig. Dadurch lässt sich ein repräsentatives Nutzungsverhalten zu Grunde legen. Zentrale Frage dieser Arbeit ist daher:

Wie beeinflusst das Nutzungsverhalten das Verbrauchseinsparungspotenzial bei Plug-in Hybriden?

Daraus leiten sich folgende Entwicklungsziele für die vorliegende Arbeit ab:

- Identifikation wesentlicher Parameter im Nutzungsverhalten, die den Mehrwert eines PHEVs beeinflussen.
- Entwicklung einer Berechnungsmethode zur Abschätzung des Substitutionsgrades der benötigten Energie eines elektrischen Antriebssystems bei PHEVs abhängig vom Nutzungsverhalten (Nutzungspotential).
- Identifikation von verschiedenen Ausprägungen im Nutzungsverhalten.
- Bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebssystems für PHEVs mit dem Ziel, den Kraftstoffverbrauch bestmöglich zu reduzieren.
- Bewertung und Validierung energetischer relevanter Größen.

## 1.2 Einordnung und thematische Abgrenzung

Das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehen wurde für die Konzeptphase, also die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses entwickelt. In der Automobilentwicklung entspricht diese Phase der Produktplanung und frühen Produktentwicklungsphase. Die vorliegende Arbeit untersucht und analysiert im Schwerpunkt Aspekte der energetischen Betrachtung mit dem Fokus der Kraftstoffreduktion in realer Nutzung und gesetzlichen Fahrzyklen. Ziel ist, Anforderungen für die Initialdimensionierung des elektrischen Antriebsstrangs von Plug-In Hybriden zu treffen, die für den Nutzer eine signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ermöglicht. Weitere energetische Größen wie die Bewertung der energetischen Nachhaltigkeit oder die Bewertung des Kraftstoffverbrauchs in gesetzlichen Fahrzyklen werden ebenso thematisiert. Zudem werden sich ändernde Randbedingungen bewertet.

Die Anwendung von Qualitätsmerkmalen für Anforderungen und die Formen der Systemabstraktion werden für die dargelegten Entwicklungsziele als unterstützende Werkzeuge und Methoden eingesetzt.

Der wissenschaftliche Beitrag soll folglich den Gebrauch und den Nutzen von Qualitätsmerkmalen für Anforderungen und Systemabstraktionen auf Grundlage der gezeigten Anwendung bemessen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit folgt im Vorgehen der „Design Research Methodology“ (DRM) nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009). Ziel der DRM ist, dem wissenschaftlichen Vorgehen bei Forschungsarbeiten im Bereich der Produktentwicklung einen Leitfaden zu geben. Bei dieser Vorgehensweise werden zunächst im Nutzungsverhalten relevante Kriterien identifiziert, die ein Ziel für die Systemauslegung und den Fokus festlegen. Es folgt eine erste deskriptive Studie, um die Problemstellung explizit darzulegen und wesentliche Parameter für den eigenen Ansatz aufbereiten. Es folgt eine präskriptive Studie, die den eigenen Lösungsansatz darlegt und eine zweite deskriptive Studie, in der die entwickelten Ansätze Anwendung finden und validiert werden. Diese Vorgehen ist in Abbildung 1-1 veranschaulicht.

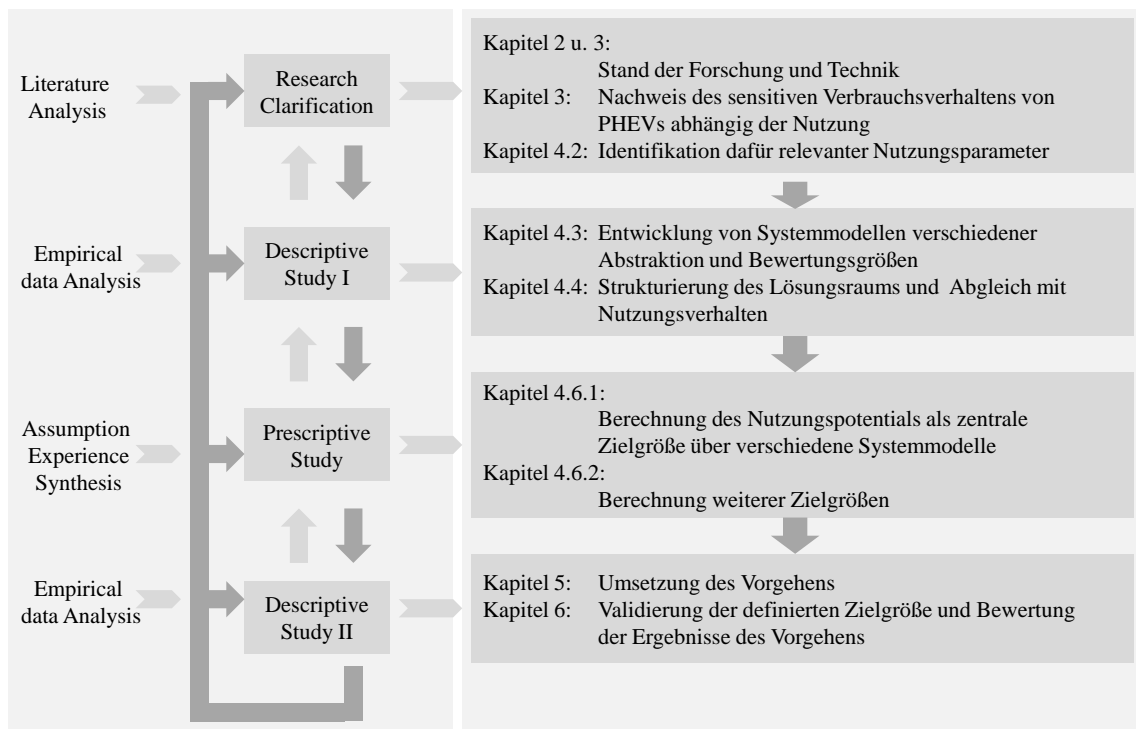


Abbildung 1-1: Forschungsmethodischer Zusammenhang nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 39)

In dieser Arbeit soll schwerpunktmäßig betrachtet werden, wie das elektrische Antriebssystem eines Plug-In Hybrid Systems ausgelegt werden kann. Dies lässt sich gut am Beispiel einer parallelen Architektur darstellen. Auf methodischer Seite besteht ein Hauptaspekt darin, Anforderungen für ein technisches System abzuleiten. Quelle für diese Anforderungen ist ein aufgezeichnetes Nutzungsverhalten. Doch besteht die Herausforderung in der schon von JUNG (2006, S. 62f) beschriebenen Verarbeitung von Kundenanforderungen in technische Anforderungen. Dabei verwenden die meisten Autoren das House of Quality (QFD). Dieses findet zwischen Erhebung der Kundenanforderung und weiteren Konkretisier-

rungsschritten der Anforderungen statt. Bei Neuentwicklung müssen aber Anforderungen neu entwickelt werden, weswegen das House of Quality nur eingeschränkt verwendet werden kann. Die Übertragung von Kundenanforderungen in technische Anforderungen wird zumeist außen vor gelassen und methodisch nicht beschrieben. Für das Vorgehen in der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung abstrahierter Systemmodelle verwendet, um die adäquate Weiterentwicklung von Anforderungen aus dem Nutzungsverhalten umzusetzen.

Zur Identifikation wesentlicher Parameter im Nutzungsverhalten wurde neben einer Literaturrecherche der zur Verfügung stehende Datensatz einer Kundenvermessung herangezogen.

Es wird eine Methodik vorgestellt, wie der Lösungsraum aufgespannt werden kann und mit dem Nutzungsverhalten abgeglichen werden kann. Zudem werden mit Hilfe einer sog. „Clusteranalyse“ Nutzer ähnlichen Verhaltens in Gruppen geordnet, die als Grundlage für die anschließende Systemskalierung dienen. Diese Systemskalierung erfolgt mit Hilfe einer entwickelten Berechnungsmethodik, die ausgewertete Nutzungsdaten verwendet. Damit ist es möglich, erste Aussagen zu Potentialen des entwickelten Systems in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen zu treffen. Der Vorschlag für eine Systemdimensionierung wird in ein Simulationsmodell für ein Gesamtfahrzeug überführt, womit eine Validierung der Auslegung als auch weitere, detailliertere Aussagen zu dem entwickelten System getroffen werden können.

Grundlage des Vorgehens ist Stand der Forschung im Bereich des Requirement Engineering (RE). Besonders die Qualitätsmerkmale von Anforderungen in Kombination mit der Systemmodellierung leisten einen großen Beitrag, ein dem Entwicklungsfortschritt entsprechendes RE umzusetzen. In dieser Arbeit wird auf bestehende Strukturen dieser Bereiche zurückgegriffen und für das Vorgehen angewendet.

Zudem wird die Abstraktion von technischen Systemen verwendet, um Anforderungen in ihrem Informationsgehalt zu verbessern und dem betrachteten System anzupassen und zu detaillieren.

Das Kapitel 3 gibt einen umfassenden Überblick zu der aktuellen Situation von Plug-In Hybrid Antrieben. Grundsätzlich bieten elektrifizierte Antriebe zusätzliche Funktionalitäten, kombiniert mit einem Zusatznutzen hinsichtlich reduziertem Kraftstoffverbrauch in gesetzlichen Fahrzyklen und in Kundenhand.

Der Zusatznutzen des reduzierten Kraftstoffverbrauchs beim Nutzer hängt jedoch stark davon ab, wie er das installierte elektrische Antriebssystem einsetzen kann. Dies wiederum hängt vom Mobilitätsverhalten und maßgebenden Randbedingungen ab.

Kapitel 4 beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung des Nutzungspotentials des elektrischen Antriebssystems, einer Hilfsgröße, die ein Maß für die Energiesubstitution des elektrischen Antriebssystems ist. Zudem können Anforderung für die elektrische Systemleistung und den geforderten Energiebedarf abgeleitet werden.

In Kapitel 5 wird die vorgestellte Herangehensweise angewendet, Kapitel 6 liefert eine Validierung der entwickelten Größe des Nutzungspotentials und eine Bewertung weiterer Größen mit der erzielten Systemauslegung.



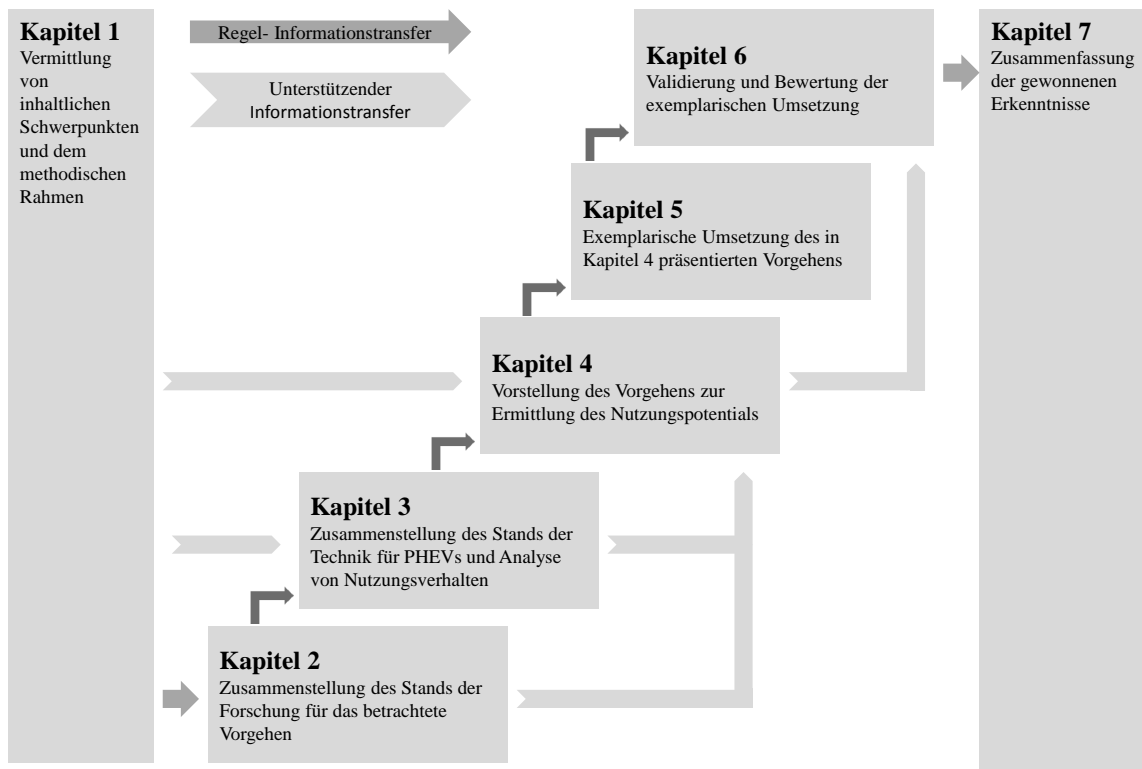


Abbildung 1-2: Übersicht zum Aufbau der Arbeit

## 2 Stand der Forschung

Ziel der Arbeit ist, eine nutzungsgerechte Dimensionierung für das elektrische Antriebssystem von Plug-In Hybrid Fahrzeugen zu beschreiben. Dies erfordert, das betrachtete technische System mit Hilfe verschiedener Systemmodellierungen zu abstrahieren, da in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses die technische Spezifikation des Systems nur in einem begrenzten Umfang möglich ist und zudem die Generierung von Anforderungen unterstützt werden kann. Dazu werden im weiteren Verlauf Begrifflichkeiten im Bereich des REs, der Anforderungsspezifikation sowie der Systemmodellierung definiert. Darüber hinaus werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen in den genannten Fachgebieten vorgestellt.

### 2.1 Begriffe und Definitionen

RE ist die Grundlage für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Anforderungen werden über den Produktentstehungsprozess hinweg weiterentwickelt und entsprechend dem Konkretisierungsgrad der Produktabbildung und -modellierung weiterentwickelt und spezifiziert (POHL & RUPP (2011), RUPP (2007, S. 12ff)). Die für diese Arbeit wesentlichen Begriffe werden beschrieben und im Weiteren detailliert aufbereitet.

#### 2.1.1 Produktentstehungsprozess

Für die Automobilentwicklung definiert BRAESS (2012, S. 117ff) den Produktentstehungsprozess als eine Phase im Leben eines Produkts. Der Produktentstehungsprozess (PEP) enthält mit der Produktplanung und -entwicklung die wesentlichen Elemente, die Einfluss auf Qualität, Kosten und Zeit haben. An diesen Größen bemisst sich der Erfolg und die Leistungsfähigkeit eines Unternehmens. Entsprechend dem Fortschritt des PEPs, müssen Entscheidungen für die Gestaltung des zu entwickelnden Produkts getroffen werden. Um die vorliegende Arbeit und Ihre Elemente entsprechend in den PEP einzuordnen wird dieser beschrieben:

Wie in Abbildung 2-1 dargestellt sind vor der Produktentwicklung die Phasen der Forschung und Produktplanung einzuordnen. Die Produktentwicklung gliedert sich in die vier Phasen der Planung, der Konzeption, des Entwurfs und der Ausarbeitung.

Die Produktplanung enthält dabei die Aufstellung einer Liste der Anforderungen, die das Produkt beschreiben. Die Konzeption enthält Vorgänge wie die Funktionsidentifikation und Strukturierung, sowie die Suche nach Lösungsmöglichkeiten. Die Entwurfsphase entwickelt bereits Funktionsträger, evaluiert und berechnet. In der Ausarbeitung erfolgt die detaillierte Dokumentation und Darstellung sowie eine Weiterentwicklung des Gesamtentwurfs.

Im Weiteren wird noch die Vorgehensweise der Konstruktion entsprechend der VDI- Norm 2221 analog Abbildung 2-2 genannt (VDI2221, 1996). Diese besitzt eine andere Unterteilung der einzelnen Schritte, startet wie der beschriebene PEP bei der Anforderungsliste und resultiert in der Produktdokumentation. Dazwischen existieren die Stufen der Funktionsstrukturen, der prinzipiellen Lösungen, der modulare Strukturen, des Vor- und des Gesamtentwurfs.

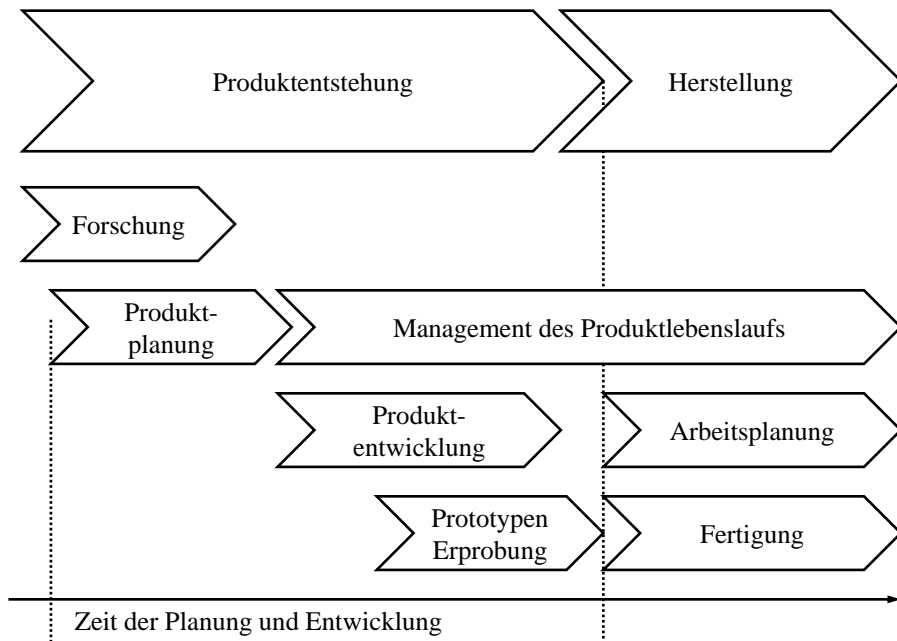


Abbildung 2-1: Der PEP in der Automobilentwicklung (BRAESS, 2012, S. 117)

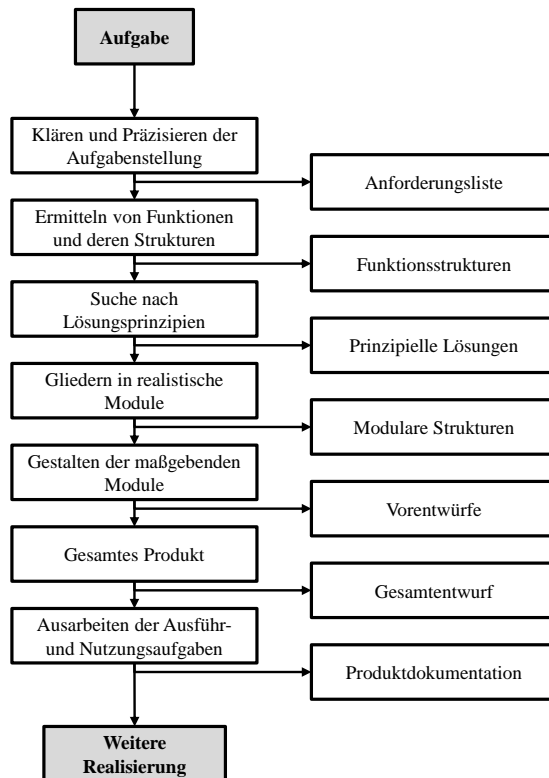


Abbildung 2-2: Die VDI Norm 2221 (VDI2221, 1996)

## 2.1.2 Anforderungsmanagement

Der Begriff Anforderungsmanagement, auch RE genannt, bezeichnet die systematische Herangehensweise, Anforderungen zu spezifizieren und zu verwalten. Ziel ist, die relevanten Anforderungen zu erfassen, abzustimmen, sowie die einheitliche Dokumentation und Verwaltung sicherzustellen. Wichtig ist zudem, die Anforderungen mit den beteiligten Stakeholdern in Einklang zu bringen. Dazu muss für die Stakeholder ein entsprechendes Verständnis aufgebaut werden (POHL & RUPP (2011), RUPP (2007, S. 13)).

Ziele sind ein wesentlicher Bestandteil für das Anforderungsmanagement (VAN LAMSWEERDE, 2001). Entsprechend der Ziele, die von einem abstrakten Niveau konkreter werden, müssen auch die Anforderungen, um diese Ziele zu beschreiben, weiterentwickelt werden. Dies geschieht auf Basis von Systembetrachtungen und entsprechender Identifikation von Problemen. Ein Ziel ist in diesem Zusammenhang als der Zweck zu verstehen, warum ein System gebraucht wird und wie es aufgebaut ist. Dazu werden die entsprechenden Randbedingungen erfasst, unter denen das System arbeitet.

## 2.1.3 Anforderungen

Eine Anforderung wird nach RUPP (2007, S. 13) und IEEE (1990) als eine „Bedingung oder Fähigkeit, die von einem Benutzer zur Lösung eines Problems oder zur Erreichung eines Ziel benötigt wird“ bezeichnet. Dies kann sich aber ebenso auf ein System oder Teilsystem beziehen, was diese „Bedingung oder Fähigkeit“ besitzen soll.

Eine Anforderung definiert sich nach PONN & LINDEMANN (2011, S. 39) über Merkmal und Ausprägung. Damit definiert sie eine Eigenschaft, die z.B. von dem Produkt erwartet wird. Das Merkmal definiert den Bezugspunkt für die Anforderung, die Ausprägung definiert die Bedatung des angeforderten Merkmals. Damit entspricht eine Anforderung einem Entwicklungsziel. Eine Vielzahl von Größen beeinflusst die Produktentwicklung und somit die Vielfalt der Anforderungen. LINDEMANN (2009, S. 97) nennt hier Quellen für Anforderungen wie Kunde, Gesellschaft, Politik oder Technologie als Treiber für neue und die Weiterentwicklung bestehender Anforderungen. Laut RUPP (2007, S. 17f) und ROBERTSON & ROBERTSON (1999, S. 9f) wird auch zwischen verschiedenen Arten von Anforderungen unterschieden. So differenziert man zwischen funktionalen Anforderungen, die ein Systemverhalten beschreiben, einer Qualitätsanforderung, die ein nicht funktionales Qualitätsmerkmal beschreibt sowie einer Randbedingung, die den Lösungsraum definiert und beschränkt.

## 2.1.4 Systemmodellierung

Die Modellierung ist eine definierte Darstellungsform eines Systems. Es geht daher darum, mittels gleicher Modellierungen verschiedene Systeme zu vergleichen, lösungsunabhängige Systemvergleiche durchzuführen oder Systeme auf definierte Ebenen zu abstrahieren. Somit soll einer Entwicklungsaufgabe bestmöglich begegnet werden (PONN & LINDEMANN, 2011, S. 69f).

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell beschreibt Arten der Systemabstraktion im Zusammenhang mit Anforderungen, die für eine definierte Systemabstraktion notwendig sind. In diesem Modell zieht sich der Anforderungsraum über alle Konkretisierungsebenen hinweg. Das heißt, dass zu den unterschiedlichen Systemmodellierungen entsprechend auch die Anforderungen existieren, um die Modelle hinreichend zu beschreiben. Systemmodellierungen können lösungsabhängig oder lösungsunabhängig sein.

Systemmodelle sind nach NUSEIBEH & ESTERBROOK (2000) zu verwenden, um weitere Informationen für den RE- Prozess zu erhalten. Bei einer Modellierung sollte stets die zentrale Frage, wofür die Modellie-

rung ist, gestellt werden. Auch SOMMERVILLE & SAWYER (1997, S. 164f) sieht den Hauptmehrwert in den zusätzlichen Informationen, die durch eine Systemmodellierung erschlossen werden können.

## 2.2 Spezifikation von Anforderungen

Anforderungen können sehr vielfältig und unterschiedlich sein. Zum einen gibt es eine Vielzahl von Eigenschaften von Anforderungen, die im Folgenden zusammengefasst werden. Zum anderen gibt es eine Vielzahl von Anforderungsquellen, aus denen Anforderungen resultieren. Hierbei besteht durchaus die Gefahr eines Zielkonflikt zwischen den Anforderungen. Ein drittes Variationsmerkmal bei Anforderungen sind die dazugehörigen Systembeschreibungen. Diese können lösungsneutral oder lösungsabhängig sein. Die Qualität der Eigenschaften von Anforderungen beeinflusst somit die Qualität der Produktbeschreibung. Je höher die Qualität der Anforderungen, desto besser die Produktbeschreibung.

### 2.2.1 Eigenschaften von Anforderungen

Eigenschaften oder auch Qualitätskriterien von Anforderungen sind für die Dokumentation von Anforderungen und für die Entwicklung von Anforderungen über den Produktentstehungsprozess wichtig. Die Dokumente dienen der Produktentwicklung und bedingen daher ein hohes Maß an Qualität. Die Qualität der Eigenschaften ist aber auch entscheidend dafür, dass die Anforderungen an Güte gewinnen und somit das bestehende System detaillierter beschreiben können, was für ein Voranschreiten im PEP notwendig ist. Vor diesem Hintergrund sollen die Qualitätskriterien für Anforderungseigenschaften dazu dienen, eine System- bzw. Produktbeschreibung weiterzuentwickeln und somit eine technische Produktbeschreibung ermöglichen.

Die Softwareentwicklung greift auf eine sehr gut entwickelte RE-Basis zurück. Qualitätskriterien für Anforderungen bilden eine notwendige Grundlage, die große Menge an Informationen für das entsprechende Projekt aufzubereiten und im Projekt weiter zu entwickeln.

Im Folgenden werden Qualitätskriterien für Anforderungen beschrieben. Diese Qualitätskriterien sind in der Literatur definiert und bilden die Grundlage für das RE in einer Produktentwicklung, um das entwickelte Produkt weiterzuentwickeln und eine definierte Qualität sicherzustellen.

- **Abgestimmt:** Die Anforderung ist in ihrer Ausprägung von allen Stakeholdern bestätigt.
- **Bewertet:** Systeme einer gewissen Größe erfordern eine Einordnung der Anforderung in das betrachtete Gesamtsystem, z.B. hinsichtlich Wichtigkeit oder Priorisierung.
- **Eindeutig:** Eine Anforderung darf keine zweideutigen Interpretationen erlauben und muss eindeutig im Verständnis sein.
- **Gültig und aktuell:** Eine Anforderung muss aktuelle Systemeigenschaften wiedergeben und für die verschiedenen Stakeholder gültig sein.
- **Vollständigkeit:** Es müssen alle Anforderungen zur Beschreibung des Systems oder der Funktion vorliegen. Andernfalls muss dies gekennzeichnet werden.
- **Beständigkeit/ Konsistent:** Anforderungen sollten nicht im Konflikt zu sich selbst oder zu anderen Anforderungen stehen. Dies gilt für die verschiedensten Abstraktionsebenen eines Produkts oder eines Systems.
- **Korrekt:** Eine Anforderung sollte den Erwartungen des oder der Stakeholder entsprechen.

- **Prüfbar:** Die Formulierung einer Anforderung hat so zu erfolgen, dass die Inhalte nachgeprüft werden können.
- **Realisierbar/ Machbarkeit:** Eine Anforderung muss in dem betrachteten Rahmen für die beteiligten Stakeholder realisierbar sein.
- **Verfolgbar:** Der Ursprung, Grund und die Umsetzung einer Anforderung müssen bekannt sein. Damit können verschieden spezifizierte Anforderungen verknüpft werden.
- **Notwendigkeit:** Eine Anforderung sollte Inhalte wiedergeben, die notwendig für Kundenfunktionen oder externe Systemanforderungen sind. Daher sollte jede Anforderung auf einen Kundenwunsch referenziert werden können. Hier werden auch verschiedene Stufen der Notwendigkeit unterschieden: Notwendig, bedingt notwendig sowie freiwillig. Die Erfüllung verschiedener Anforderungen mit verschiedenen Stufen der Notwendigkeit hat Einfluss darauf, wie akzeptabel ein Produkt für einen Kunden sein kann.
- **Priorität:** Entsprechend einer Produktversion ist jeder Anforderung eine Priorität der Umsetzung zuzuordnen.
- **Verständlich:** Die Anforderungen müssen für alle beteiligten Stakeholder verständlich sein, Begrifflichkeiten sollten definiert werden.
- **Stabilität:** Die Stabilität von Anforderungen kann beschrieben werden als die Anzahl erwarteter Änderungen von Anforderungen durch zusätzliches Wissen, Erfahrungswerte oder eintretende Ereignisse.
- **Lösungsneutral:** Eine Anforderung sollte so formuliert sein, dass keine bestimmte Lösung bevorzugt wird, sondern nur deren Funktion beschrieben wird.
- **Anpassbarkeit:** Fähigkeit des Produktes, sich an unterschiedlich definierte Umgebungen anzupassen, wobei nur dafür vorgesehene Dinge gebraucht werden, die für diese Verwendung vorgesehen waren.
- **Änderbarkeit:** Fähigkeit des Produktes oder Systems, die Umsetzung einer definierten Änderung vorzunehmen.

Diese Qualitätskriterien wurden auf Basis von PARTSCH (2010); POHL & RUPP (2011); ROBERTSON & ROBERTSON (1999); WIEGERS (2005); TRIPP (1993); RÖDER ET AL. (2012); DAVIS ET AL. (1993); BERKOVICH (2012); BALZERT ET AL. (2009); SOMMERVILLE & SAWYER (1997); BERENBACH (2009), BALZERT ET AL. (2009, S. 4744ff), RUPP (2007, S. 24ff) definiert und ausgewählt. BALZERT ET AL. (2009, S. 465f) ordnet die Qualitätsmerkmale zudem definierten Kategorien zu. Die Kategorien lauten in diesem Fall Funktionalität, Zuverlässigkeit, Benutzbarkeit, Effizienz, Portabilität und Wartbarkeit.

## 2.2.2 Klassifikation von Anforderungen

PARTSCH (2010, S. 26ff) definiert neben den Qualitätskriterien die Klassifikation von Anforderungen. Diese sollen dazu dienen, Arten von Anforderungen zu erschließen, die für die anschließende Definition der Anforderungen zu berücksichtigen ist.

- **Typ:** Der Typ unterscheidet, ob die Anforderung funktionaler oder nicht-funktionaler Art ist und inwiefern die Lösung dadurch vorgegeben wird.
- **Reife:** Die Reife beschreibt, ob der Inhalt mit den entsprechenden Stakeholdern abgestimmt ist, oder die Anforderung initial, bestätigt oder abgelehnt ist.
- **Quelle:** Die Quelle gibt darüber Auskunft, welche Anforderungsquelle zugrunde liegt (vgl. Kapitel 2.2.3).
- **Form:** Die Form beschreibt, ob die Anforderung als Text, Skalar, Tabelle oder in anderer Form vorliegt.
- **Detaillierungsgrad:** Der Detaillierungsgrad beschreibt, auf welcher Ebene des Systems die Anforderung ansetzt. Unterschieden werden kann hier beispielsweise zwischen System, Subsystem und Komponentenanforderung.
- **Scope:** Der Scope unterscheidet zwischen Benutzeranforderung, Geschäftsanforderung und technischer Anforderung.
- **Inhalt:** Der Inhalt der Anforderung beschreibt, ob es sich um eine Nutzungsanforderung, Leistungsanforderung oder Funktionalität handelt.
- **Verbindlichkeit:** Die Verbindlichkeit gibt wider, inwiefern die Anforderung verpflichtend ist, oder eher optional zu bewerten ist.
- **Priorisierung:** Die Priorisierung bewertet die Wichtigkeit sowie die Dringlichkeit der Anforderung. Die Perspektive der Bewertung wird jedoch offen gelassen.

## 2.2.3 Quellen für Anforderungen

Zur Beschreibung des zu entwickelnden Produkts müssen zunächst Anforderungen gesammelt werden. Die Sammlung von Anforderungen verschiedenster Bereiche und Quellen sollte eine vollständige Produktbeschreibung ermöglichen. Es gibt verschiedenste Möglichkeiten, das in unterschiedlichen Formen vorliegende Informationsmaterial über Anforderungen in einer Anforderungsliste zu kondensieren.

Im Folgenden soll der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Anforderungsquellen liegen. Diese Quellen sind die verschiedenen Bereiche, aus denen Anforderungen an ein Produkt gestellt werden können. LINDEMANN (2009, S. 97) stellt verschiedene Anforderungsquellen vor, wie Abbildung 2-3 veranschaulicht. Um die Anforderungsquellen Kunde und Markt sind weitere Anforderungsquellen angeordnet.

Anforderungen können ergänzender Art sein, sie können aber ebenso konkurrieren oder gegensätzlich sein. Daher ist es wichtig, frühzeitig eine komplette Anforderungsliste zur Verfügung zu haben, um mögliche Widersprüche frühzeitig zu lösen.

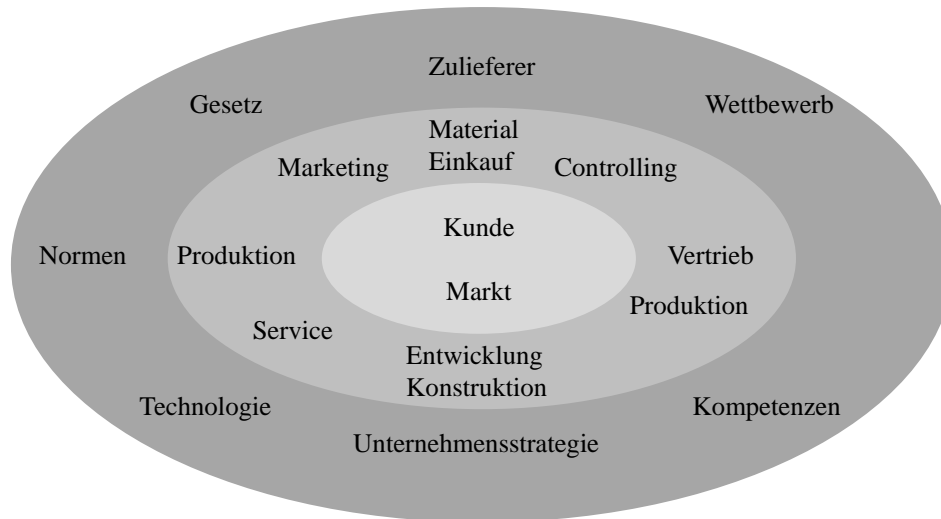


Abbildung 2-3: Quellen für Anforderungen nach LINDEMANN (2009, S. 62f)

## 2.3 Möglichkeiten der Systemabstraktion

Die Art der Systembetrachtung macht sich zu Nutze, dass ein untersuchtes System unterschiedlich stark abstrahiert werden kann. Zusätzlich kann das System aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden, so dass es gemäß dem Zweck der Betrachtung untersucht werden kann. BALZERT ET AL. (2009, S. 437f) beschreibt für eine unterschiedliche Perspektive ein Ersatzmodell. Das Modell ist in Abbildung 2-4 veranschaulicht. In diesem legen die Anforderungen die Eigenschaften fest und beschreiben somit die Problemstellung. In einem nächsten Schritt gilt es, die fachliche Lösung zu ermitteln. Hier stellt sich die zentrale Frage, wie ein Problem gelöst wird. Ist die fachliche Lösung geklärt, stellt sich wiederum die Frage, wie diese fachliche Lösung technisch realisiert werden soll. Liegt dann die technische Lösung vor, kann das Problem angegangen werden, wie dies in einem Produkt oder System dargestellt wird. Dieser mehrstufige Prozess reduziert den anfangs sehr hohen Abstraktionsgrad. Von Abstraktionsebene zu Abstraktionsebene wiederholt sich der Vorgang, so dass die Lösung zu einem Problem wird und in der detaillierten Ebene eine Lösung gefunden werden muss. Zudem existiert zwischen den Abstraktionsebenen über den Entwicklungsprozess hinweg eine Schleife des Austausches. Für die jeweils detailliertere Ebene ist relevant, welche Anforderungen existieren. Für die abstraktere Ebene ist hingegen wichtig, wie die entsprechende Lösung der Anforderung umgesetzt wurde. BALZERT ET AL. (2009) setzt diese Differenzierung in seiner Betrachtung zwischen Problemsicht und Lösungssicht fort (Abbildung 2-5). Er beschreibt den Vorgang, dass eine vorgeschlagene Lösung das Problem entgegen der Erwartung nicht löst. In diesem Fall muss das Problem entsprechend angepasst werden, um dafür eine Lösung zu finden. In dieser Iterationsschleife kann der Grad der Detaillierung entsprechend erhöht werden. BALZERT ET AL. (2009) beschreibt zudem mehrere Prinzipien anhand eines definierten Systems. Die Prinzipien sind „Grundsätze, die man seinem Handeln zu Grunde legt“. Das System wird definiert als „Ausschnitt aus einer realen oder gedanklichen Welt, bestehend aus Systemkomponenten bzw. Subsystemen, die unter-



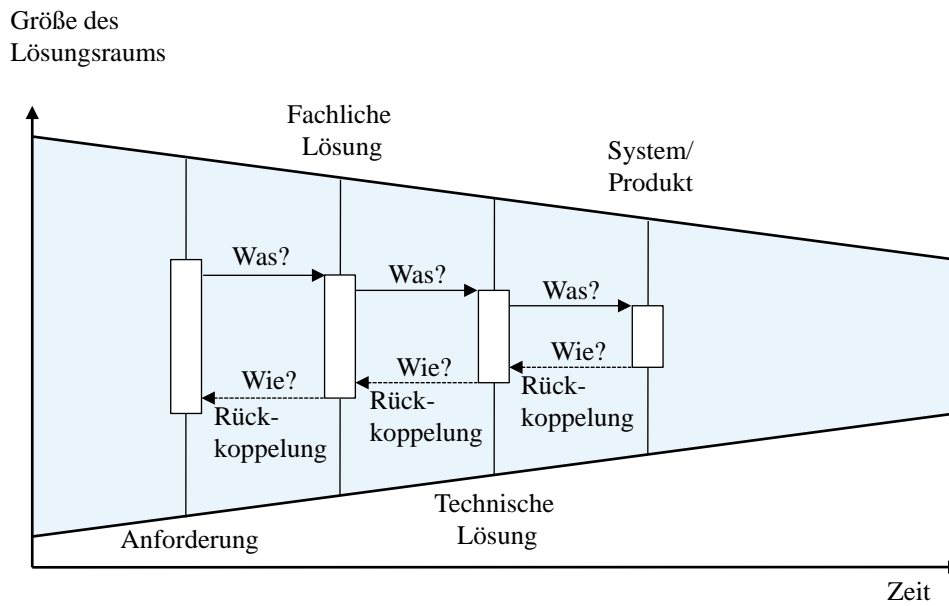


Abbildung 2-4: Ersatzmodell- Von der Anforderung zum Produkt BALZERT ET AL. (2009, S. 438)

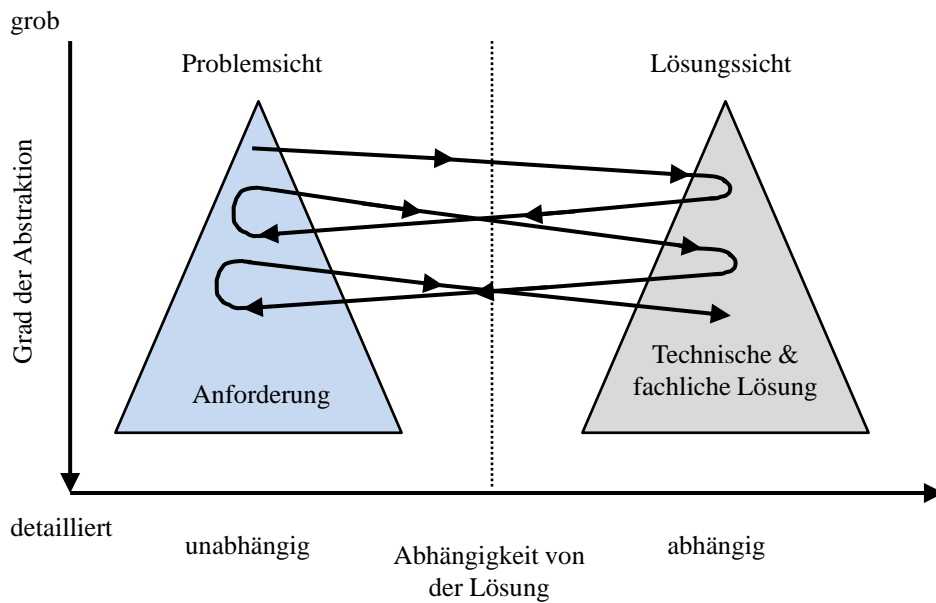


Abbildung 2-5: Ersatzmodell- Problem- und Lösungssicht nach BALZERT ET AL. (2009, S. 438)

einander in verschiedenen Beziehungen stehen“ (BALZERT ET AL. (2009, S. 26ff)).

Im Folgenden wird detaillierter auf das Prinzip der Abstraktion eingegangen: Dieses definiert BALZERT ET AL. (2009) als das Lösen von einzelnen Aspekten und dem Konkreten, dem Greifbaren. Abstrahieren ist in seiner Definition das Gegenteil von Konkretisieren, gemäß PONN & LINDEMANN (2011, S. 69). Die Abstraktion im Allgemeinen wird als sehr wichtige Technik betrachtet, da sie dazu dient, komplexe Sachverhalte zu erschließen und zu verstehen. In Form eines Modells wird die reale Welt in ihrem „charakteristischen Verhalten“ abgebildet und kann auf wesentliche und relevante Zusammenhänge reduziert werden. Diskrete Stufen der Abstraktion sind sogenannte Abstraktionsebenen. Abstraktionsebenen bezeichnen Systemmodelle, die ein definiertes Niveau an Abstraktion und Konkretisierung beinhalten. Abgeleitet aus der objektorientierten Softwareentwicklung existieren gemäß BALZERT ET AL. (2009, S. 30ff) drei verschiedene Abstraktionsebenen:

- **Die Exemplar-Ebene:** Die Exemplar-Ebene ist die Beschreibung „menschlicher Handlungen, spezifischer Ereignisse, konkreter Sachverhalte in Ihren Beziehungen und/oder zeitliche Abläufe beschrieben“ (BALZERT ET AL., 2009, S. 30). Es wird zwischen aktiven und passiven Elementen unterschieden. Auf passive Elemente wird verwiesen, aktive Elemente sind beschriebene Handlungen oder Ereignisse, die einmalig auftreten.
- **Die Typebene:** Die Typebene verknüpft Bestandteile der Exemplar Ebene. Dadurch werden Beziehungen oder Ereignisse definiert.
- **Die Meta Typen-Ebene:** Auf der Meta-Ebene werden Elemente aus gleichen Klassen zusammengefasst. Elemente aus der passiven Ebene werden als Klasse, aktiven Elementen als Operationen geclustert.

Zu unterscheiden gilt es auch zwischen ein- und mehrdimensionaler Abstraktion. BALZERT ET AL. (2009, S. 32f) beschreibt, dass hierbei mehr und stärker und in einer Vielzahl von Dimensionen abstrahiert wird. In der Softwareentwicklung sind Dimensionen wie z.B. die Statik, Dynamik oder Logik bestimmend. Vorteile der Abstraktion sind laut BALZERT ET AL. (2009, S. 34) das Erkennen allgemeiner Charakteristika, das Strukturieren und Zuordnen, die Priorisierung sowie die Identifikation des Wesentlichen.

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell nach PONN & LINDEMANN (2011, S. 26) definiert ebenfalls verschiedene Ebenen der Abstraktion der Systembetrachtung. Die verschiedenen Ebenen der Konkretisierung vom Abstrakten kommend bilden den Entwicklungsprozess in chronologischer Reihenfolge ab. Basierend auf dem Pyramidenmodell nach EHRENSPIEL (2009) und dem Modellraum des Konstruierens nach RUDE (1998) leitet PONN & LINDEMANN (2011, S. 26) das Münchener Produktkonkretisierungsmodell ab. Dieses Modell beinhaltet die Bestandteile Anforderungsraum und Lösungsraum, der in die drei Ebenen Funktionsebene, Wirkebene und Bauebene unterteilt ist (Abbildung 2-6).

- Der **Anforderungsraum** spannt sich, wie abgebildet, über alle drei Abstraktionsebenen ohne selbst diskrete, definierte Ebenen zu enthalten. Die Anforderungen werden im Laufe der fortschreitenden Entwicklung „detailliert und angepasst“ (PONN & LINDEMANN, 2011, S. 26).

Der Lösungsraum ist über drei diskret definierte Ebenen aufgespannt. Er beinhaltet somit sämtliche Lösungen, die aus den definierten Anforderungen resultieren. Die drei Ebenen Funktions-, Wirk- und Bauebene werden im Folgenden kurz vorgestellt.

- **Funktionsebene:** Die Funktionsebene modelliert und abstrahiert das System, um den Zweck hervorzuheben. Die Funktionsbetrachtung erlaubt, losgelöst von technischen Realisierungen den Funk-

tionszusammenhang herauszuarbeiten. Die Funktionen werden als die erste Konkretisierungsstufe des Lösungsraums bezeichnet.

- **Wirkebene:** Die Wirkebene beinhaltet „Lösungsideen und Lösungskonzepte technischer Problemstellungen“ (PONN & LINDEMANN, 2011, S. 27). Die wirkenden Funktionen sind im Modell entsprechend umgesetzt. Dabei werden einzelne Teilfunktionen zu Wirkprinzipien zusammengefasst und in einer Wirkstruktur gebündelt. Die Wirkebene ist auch Initialebene für die Festlegung auf ein Gesamtkonzept.
- **Baubene:** In der Bauebene wird das Produkt in seiner Gestalt festgelegt. Geometrische Anforderungen aber auch die Kosten betreffende Anforderungen sind hierbei zu beachten.

PONN & LINDEMANN (2011) schenkt im Vergleich zu RUDE (1998) den Anforderungen samt derer Entwicklung mehr Beachtung. Über die drei Abstraktionsebenen werden die Anforderungen weiterentwickelt. Ein ständiger Austausch aus Anforderungs- und Lösungsraum ist für die Bewertung und Analyse der Eigenschaften wichtig.

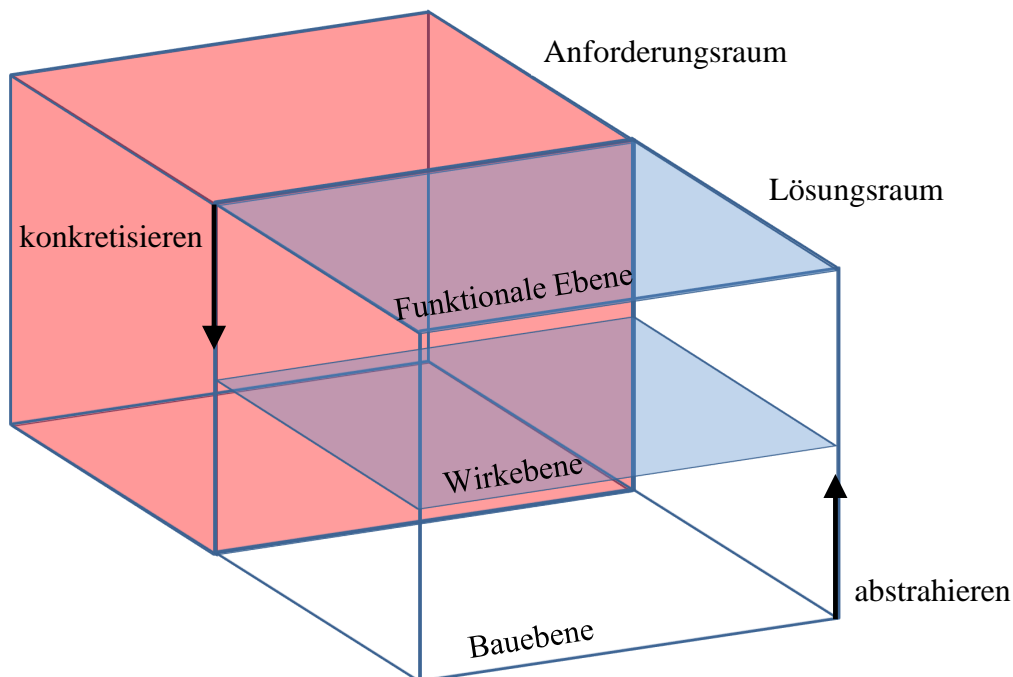


Abbildung 2-6: Das Münchner Produktkonkretisierungsmodell nach PONN & LINDEMANN (2011, S. 28)

## 2.4 Diskussion und Reflexion

Die Definition von Qualitätskriterien für Anforderungsspezifikationen ist laut RÖDER ET AL. (2012) ein zentraler Diskussionspunkt. Er fasst 32 Bewertungskriterien in einem Katalog zusammen, die er auf Basis einer breit angelegten Recherche erfasst hat. Diese 32 Kriterien umfassen sowohl grundlegende

Kriterien wie Dokumenteneigenschaften oder Sprache als auch Kriterien für die Anforderungen. In einer Gesamtbewertung gewichtet er die Kriterien nicht. Er führt als Begründung an, dass für die jeweiligen Kriterien spezifische Anwendungsfälle vorliegen, die eine Gewichtung zueinander nicht als sinnvoll erachten lassen. Je nach Anwendungsfall sind manche Kriterien nicht relevant oder passend. Alle Kriterien werden auf der gleich abgestuften Bewertungsskala eingestuft. RÖDER ET AL. (2012) stellt wesentliche Qualitätskriterien für Anforderungen vor, darunter auch die Taxonomie von BOEHM (1979), der 24 Kriterien auf einer abstrakteren Ebene unter Vollständigkeit, Konsistenz, Realisierbarkeit und Prüfbarkeit zusammenfasst. Darunter zählt er die in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Eigenschaften auf und fordert diese ebenso hinsichtlich Stabilität und Priorität zu spezifizieren. RÖDER ET AL. (2012) stuft die genannten Bewertungskriterien als geeignet ein, um die Qualität der Anforderungsspezifikation zu bewerten. Dazu zählen Identifizierbarkeit, Eindeutigkeit, Nachverfolgbarkeit, Konsistenz, Ordnung, Verifizierbarkeit, Entwurfs Offenheit, Abstraktionsgrad sowie Anwendbarkeit.

DAVIS ET AL. (1993) nennt als weitere Qualitätsmerkmale für Anforderungen den geeigneten Abstraktionsgrad. Diese Eigenschaft ist im Hinblick auf unterschiedliche Systemmodellierungen sehr bedeutend. VAN LAMSWEERDE (2004) beschreibt die Herausforderung in der Software-Industrie darin, mehr und mehr individuelle Produktlösungen bereitzustellen. Dafür ist ein qualitativ hochwertiges Anforderungsdokument notwendig. Zielorientiertes RE ist ein Vorgehen, um die Anforderungen entsprechend herauszufinden, zu entwickeln, zu ändern oder zu analysieren. Voraussetzung dafür ist ein mehrdimensionales Modell, in dem die Ziele, Vorgänge oder Szenarien mit dem Ist-Zustand und dem Soll-Zustand verknüpft sind. Die Ziele werden in unterschiedliche Modelle projiziert, die unterschiedliche Systemabstraktionen zugrunde legen. In einem zielorientierten RE werden funktionale Ziele verwendet, um funktionsfähige Modelle zu entwickeln. Zudem ermöglicht die Integration von Zielen in Anforderungsmodellen deren Vollständigkeit, sowie deren Relevanz und Wichtigkeit.

Nach VAN LAMSWEERDE & LETIER (1998) resultiert RE oft in Anforderungen, Zielen oder Annahmen, die ein zu ideales Verhalten von Akteuren voraussetzen. Dies hat zur Folge, dass Anforderungen auf Grund unerwarteten Verhaltens nicht zutreffend sein können. Dieser Mangel an Antizipation eines abweichenden Verhaltens hat unrealistische oder unvollständige Anforderungen zur Folge. Die vorliegenden Anforderungen sind also nicht robust und stabil für sich ändernde Sachverhalte.

VAN LAMSWEERDE (2000) sieht in nicht zutreffenden, nicht konsistenten, zweideutigen oder unvollständigen Anforderungen einen entscheidenden Einfluss auf das daraus resultierende Produkt. Wie aus einer Studie im Software-Bereich hervorgeht, ist RE und die Spezifikation von Anforderungen eine Voraussetzung um Softwareprobleme zu vermeiden.

Für das vorgestellte Vorgehen in der vorliegenden Arbeit geht es darum, reale Nutzungsdaten in einer ausgewählten Bannbreite möglicher Randbedingungen zu analysieren. Dies hat eine realistische Bewertung des Systems zur Folge, was sich positiv auf die Ableitung realistischer Anforderungen auswirkt. Dafür wird eine Hilfsgröße eingeführt, die über alle verwendeten Stufen der Systemmodellierung angewendet werden kann. Diese Hilfsgröße referenziert über alle Ebenen auf einen Mehrwert, aber bezogen auf die jeweilige Systemabstraktion. Die vorgestellten Qualitätsmerkmale von Anforderungen werden über alle Stufen der Systemmodellierung eingeschlossen, um die Qualität der entwickelten Anforderungen bestmöglich erfüllen zu können.

Die beschriebenen Systemmodellierungen und -abstraktionen werden im Folgenden diskutiert:

Der Prozess des RE ist aufwändig und komplex. Dies liegt unter anderem daran, dass zahlreiche Herausforderungen wie beispielsweise Nutzbarkeit, Leistungsfähigkeit, Robustheit, Kosten oder Flexibilität gewährleistet werden müssen. Hinzu kommt, dass eine Vielzahl von Interessensgruppen den RE-Prozess beeinflussen kann. Daraus können sich Zielkonflikte ergeben. Kernbestandteil des RE-Prozess sieht VAN

LAMSWEERDE (2000) in verschiedenartigen Modellierungen des betrachteten Systems. Modelle entstehen durch Ermittlung, Analyse, Detaillierung und Austausch, bieten aber auch eine Möglichkeit der Dokumentation und Weiterentwicklung. Hier ergeben sich folgende, grundlegende Fragen:

- Welche Aspekte sollen vor dem Hintergrund „warum, was und wie“ modelliert werden?
- Wie sollen entsprechende Aspekte modelliert werden?
- Wie soll das Modell genau definiert werden?
- Wie soll das Modell begründet/ geschlussfolgert werden?

NUSEIBEH & ESTERBROOK (2000) sieht die größte Herausforderung in der Erhebung von Anforderungen, welche Probleme gelöst werden sollen um daraus Systemgrenzen zu definieren. Diese Grenzen zeigen die Einbettung des betrachteten Systems in die Umgebung auf. Abhängig davon ergeben sich auch die weiteren Bereiche der Anforderungserhebung. Zudem können relevante Stakeholder, Anwendungsaufgaben und Szenarien erschlossen werden. Entscheidend ist, übergeordnete Ziele bereits in der frühen Phase der Entwicklung zu treffen. Dieses zielorientierte RE ist über den gesamten RE- Prozess fortzuführen und die Ziele bis auf die technische Ebene zu detaillieren.

Ein Verhaltensmodell ist nach NUSEIBEH & ESTERBROOK (2000) eine Möglichkeit der Systemmodellierung. Dieses bildet das funktionale oder dynamische Verhalten beteiligter Stakeholder und Systeme ab. Es ist zudem wichtig, zwischen aktuellen und zukünftigen Systemen zu differenzieren. So soll zunächst das aktuelle System modelliert und analysiert werden, um in Folge das nachfolgende System in seinem Soll-Zustand zu modellieren.

SOMMERVILLE & SAWYER (1997, S. 164f) nennt eine Vielzahl von Systemmodellen, die zur Analyse des Systems beitragen können. Den Mehrwert von Systemmodellen sieht er in den zusätzlichen Informationen, die diese Systeme beitragen können. Durch unterschiedliche Blickwinkel auf das System können diverse Probleme, Widersprüche oder fehlende Elemente identifiziert werden. Ein System leistet nur dann einen Mehrwert, wenn es zusätzliche, detaillierte Informationen beitragen kann, es verständlich ist, für den Umgang nutzbar ist und mit anderen Methoden kompatibel ist.

Für BROY ET AL. (2012) sind lösungsneutrale Anforderungen die Grundlage für eine innovative Funktionsgestaltung. Die Bildung generischer Abstraktionsebenen dient der Detaillierung von Anforderungen und der Entwicklung verschiedener Anforderungen für diverse Funktionalitäten. Lösungsneutralität gewährleistet ein hohes Maß an Wiederverwendbarkeit von Anforderungen. Zudem ist eine Nachverfolgbarkeit von Anforderungen wichtig, um Änderungen in ihrer Aus- und Wechselwirkung bewerten zu können.

BROY ET AL. (2012) definiert neben der Fahrzeugebene für sein Vorgehen eine Kundenfunktionsebene, sowie eine Ebene der Funktionsrealisierung.

Für das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Vorgehen ist die Systemmodellierung, als auch die Weiterentwicklung von Anforderungen für definierte Systemmodelle sehr entscheidend. Ausgehend von der Analyse und der daraus resultierenden Modellierung und Abstraktion des Nutzungsverhalten, sollen die Voraussetzungen geschaffen werden, Anforderungen für ein elektrisches Antriebssystem abzuleiten. Es ist, wie mehrfach genannt notwendig, zusätzliche Informationen durch entwickelte Systemmodelle zu gewinnen, um die Anforderungen in ihren Eigenschaften weiter zu entwickeln. Die Systemmodelle ermöglichen aus einem Nutzungsverhalten die Ableitung von Anforderungen für ein technisches System. Die Exemplar-Ebene nach BALZERT ET AL. (2009, S. 30f) bietet dafür einen sehr geeigneten Startpunkt an. Auch BROY ET AL. (2012) und NUSEIBEH & ESTERBROOK (2000) sehen in der Modellierung der Stakeholder und deren Verhalten einen geeigneten Ansatz. Im Verlauf wird die von PONN & LINDEMANN (2011, S. 26f) vorgestellte Systemmodellierung mit einer funktionalen Ebene, sowie einer Wirkebene, die die physika-

lischen Zusammenhänge im System abbildet und anwendet, um die Anforderungen in die Richtung des technischen Systems weiterzuentwickeln. Die Funktions- und die Wirkebene stellen dafür ein geeignetes Maß der Systemabstraktion dar. Bei den Anforderungen wurde eine Vielzahl von Eigenschaften vorgestellt, die im späteren Verlauf für die einzelnen Systemebenen individuell weiterentwickelt werden. Die Fragestellung hierbei ist, inwiefern eine Systematik in der Weiterentwicklung von Anforderungen über Systemabstraktionsebenen ersichtlich sein wird. GORBEA (2011, S. 60) sieht für die Initialphase die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Kundenanforderungen, um diese in der Konzept- und Designphase weiter zu entwickeln. Im nächsten Schritt werden Anforderungen verschiedener Quellen zusammengetragen, ehe sie im folgenden Schritt als Anforderungen, Eigenschaften und Ziele auf Fahrzeugebene formuliert werden. Es folgen Analysen im Teilsystembereich, die auf Komponentenanforderungen detailliert werden.

Treiber für Produkteigenschaften sind laut WALLENTOWITZ ET AL. (2009, S. 30f) auf Marktseite Kundenerwartungen, Gesetze, Marktentwicklung und Kundenprofil, auf der Seite des Technologieangebots die Kosten, die Technologie selbst sowie Kooperationen zwischen den Anbietern von Technologien. Dies hat unmittelbar Auswirkungen auf die Ausprägung von Produkteigenschaften. Diese Arbeit fokussiert die Berücksichtigung von Kundenanforderung für die Konzept- und Designphase, ermöglicht in Folge aber auch eine detaillierte technische Beschreibung und die Berücksichtigung weiterer Anforderung, wie beispielsweise aus der Gesetzgebung, der Marktentwicklung oder der Nachhaltigkeit.

FRICKE & SCHULZ (2005, S. 308) definiert Prinzipien der Änderbarkeit von Systemen. Diese sind die Fähigkeit zur selbstständigen Adaption, die Stabilität gegenüber Änderungen, die Flexibilität zur spontanen Änderung, sowie die Flexibilität zu Änderungen. Diese Prinzipien treffen sehr gut die Herausforderungen dieser Arbeit. Das elektrische Antriebssystem soll an ein Nutzungsverhalten flexibel angepasst werden können. Zudem kann das System beispielsweise über eine flexible Gestaltung der energetischen Betriebsstrategie, über die beispielsweise der Umfang des elektrischen Fahrens eingestellt wird, an das Nutzungsverhalten angepasst werden können. Die Anpassbarkeit kann die Robustheit und Stabilität des Systemnutzens aufrecht erhalten, der sich mit unter stark sensitiv verhält. Dies impliziert auch die geforderte Agilität an das System. ROBERTSON & ROBERTSON (1999, S. 4) verknüpft die Ermittlung von Anforderungen und die Systemmodellierung wie folgt: Das Ermitteln und Präzisieren von Anforderungen hilft, die Systemmodelle zu detaillieren. Andererseits ist es durch die detaillierte Systemmodellierung möglich, das Ermitteln von Anforderungen effizienter zu gestalten. Dadurch nimmt über die Zeit des Entwicklungsprozesses der Aufwand für die Systemmodellierung zu, wohingegen der Aufwand für das Ermitteln von Anforderungen abnimmt. Nach ROBERTSON & ROBERTSON (1999) ist die Produktnutzung für die Anforderungsermittlung ein wichtiger Bezugspunkt.

Diese Beschreibung des Zusammenhangs von Systembeschreibung und Anforderungsermittlung beschreibt den wissenschaftlichen Kern dieser Arbeit sehr treffend. In Kapitel 4 wird dieses Vorgehen mit der Anwendung in dieser Arbeit entsprechend verknüpft.



## 3 Stand der Technik

Die Elektrifizierung des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs bietet die Möglichkeit ein Fahrzeug lokal ohne Emissionen zu bewegen. Dabei gibt es auf der Lösungsseite eine Vielzahl von Möglichkeiten, lokale Emissionsfreiheit darzustellen. In diesem Kapitel werden sowohl die unterschiedlichen Ausprägungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs aufgezeigt, als auch Funktionen, Ziele, Eigenschaften, Einschränkungen, sowie Möglichkeiten aus der Perspektive der Energieeffizienz und des Leistungsvermögens vorgestellt.

### 3.1 Ausprägungen der Elektrifizierung

Ein Hybridantrieb zeichnet sich laut WEISS (2005, Band 10, S. 23) durch zwei oder mehrere Antriebsarten aus, um deren jeweilige Vorteile zu nutzen. Die zwei Antriebsarten können sich aus unterschiedlichen Anteilen der Systemgesamtleistung zusammensetzen. Zwischen den Ausprägungen des reinen verbrennungsmotorischen Antriebs bis hin zum rein batterieelektrischen Antrieb sind die Variationsmöglichkeiten sehr vielfältig.

Bei Hybridsystemen können die Leistung des elektrischen Antriebssystems sowie der Energiefluss im System stark variieren. Dies hat eine unterschiedliche Ausprägung von Funktionen zur Folge. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus der Betrachtung rein auf parallelen Hybridarchitekturen.

Hybride paralleler Architektur besitzen die Möglichkeit, dass sowohl der Verbrennungsmotor als auch die elektrische Maschine die Räder mechanisch antreiben können (REIF ET AL., 2012).

Neben den Hybridantrieben paralleler Architektur unterscheidet man noch zwischen Hybriden serieller und leistungsverzweigter Architektur, die in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Auch eine Kombination der genannten Architekturen ist möglich. Der Vorteil von parallelen gegenüber seriellen Antriebsstrukturen liegt darin, dass nur eine elektrische Maschine notwendig ist. Serielle Hybride benötigen eine zweite elektrische Maschine, die als Generator betrieben wird. Diese kann bei niedrigem SoC (State of Charge) mit Hilfe eines Verbrennungsmotors den elektrischen Energiespeicher laden oder den Betrieb durch Energiebereitstellung sicherstellen. Vorteil des seriellen Hybridantriebes ist, dass das komplette Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsspektrum mit der elektrischen Maschine darstellbar ist. Kann auch der elektrische Energiespeicher diese Leistung darstellen, so ist kein Leistungszustart, d.h. ein Zustart des Verbrennungsmotors durch zu niedrige Leistung des elektrischen Antriebssystems möglich und notwendig (TSCHÖKE, 2012). GORBEA (2011, S. 105) positioniert den Plug-In Hybrid im Grad der Elektrifizierung zwischen dem Vollhybrid und dem seriellen Hybrid. Abbildung 3-1 zeigt die Vielfalt der Hybridvarianten über die zwei Dimensionen Topologie (parallel/ seriell), sowie die Anteile elektrische Leistung und Energie in Abhängigkeit von der gesamten Systemleistung. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den PHEVs. Diese kombinieren anders als die seriellen Hybride verbrennungsmotorische und elektrische Leistung. Die elektrische Leistung deckt nicht den kompletten Leistungsumfang. Dadurch ist eine kleiner Dimensionierung der Komponenten möglich, da sich die Gesamtsystemleistung als die Summe der Einzelleistungen ergibt. Dies ist ein wesentliches Differenzierungsmerkmal zu seriellen Hybriden, das sich auch in der Topologie widerspiegelt. Serielle Hybride können sich in der Leistung des Verbrennungsmotors stark unterscheiden - von einem kleinen Verbrennungsmotor zum Zweck der



Reichweitenverlängerung bis hin zur Leistungsdimensionierung um die für die Fahraufgabe notwendige Leistung bereitzustellen, ist jede Dimensionierung denkbar. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf Plug-In Hybriden (PHEV). Diese haben die Möglichkeit, durch einen externen Ladeanschluss am Stromnetz geladen zu werden. Dieses Merkmal hat auf der Lösungsseite zur Folge, dass leistungstärkere elektrische Antriebssysteme installiert werden, mit welchen ein signifikanter Anteil elektrischer Fahrfunktionen möglich ist. Abbildung 3-1 veranschaulicht die Einordnung von PHEVs im Zusammenhang mit dem Grad der Elektrifizierung.

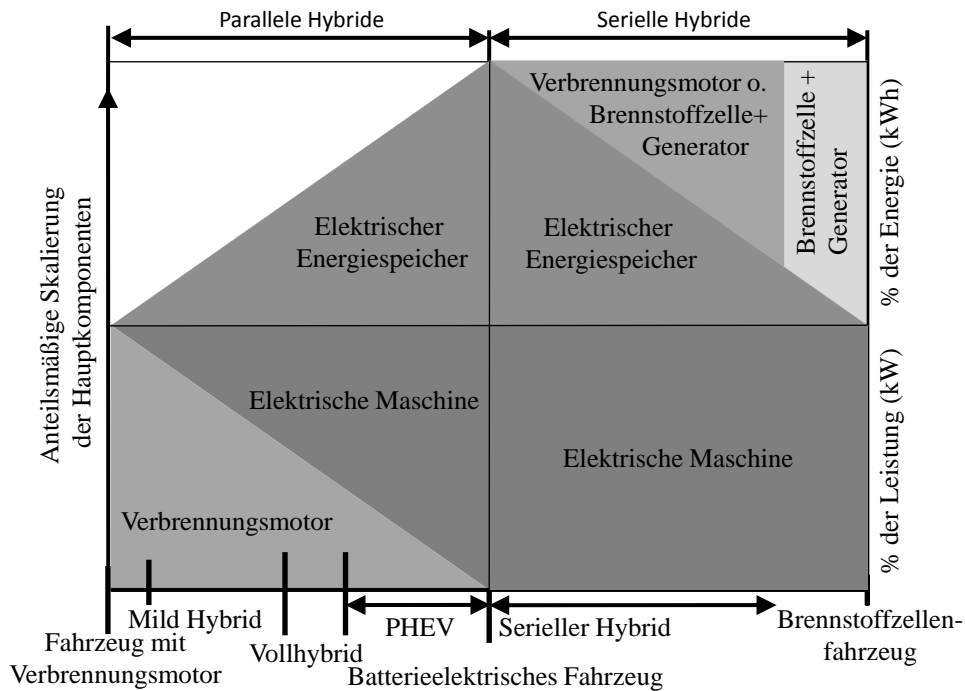


Abbildung 3-1: Hybridlösungsraum nach WALLENTOWITZ ET AL. (1999)

Abbildung 3-2 und 3-3 zeigen Größenordnungen des Leistungsvermögens und der Energiekapazität hybrider Antriebe und die Ausprägung elektrischer Fahrfunktionen.

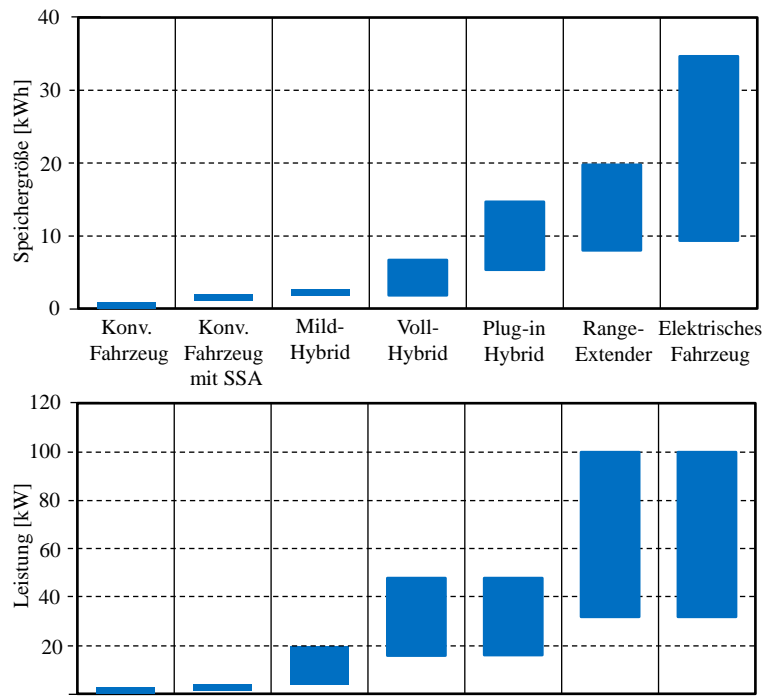


Abbildung 3-2: Systemdimensionierungen bei Hybridantrieben nach REIF ET AL. (2012, S. 64)

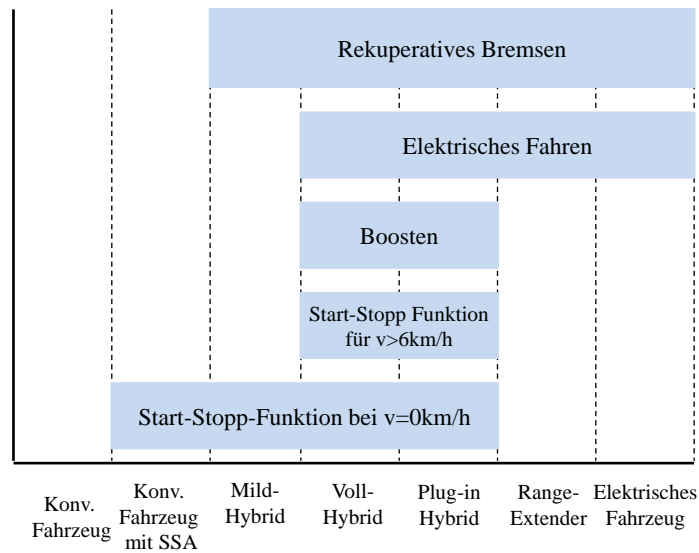


Abbildung 3-3: Funktionen bei Hybridantrieben nach REIF ET AL. (2012, S. 64)

### 3.2 Funktionen eines Plug-In Hybrids (PHEV)

Die Funktionen von PHEVs sind abhängig von den Betriebsbereichen, in denen der Antriebsstrang betrieben wird. Ein PHEV unterscheidet sich in zwei wesentlichen Betriebsbereichen. Diese differenzieren sich im Ladestand der Batterie (SoC - State of Charge) und somit in den Ausprägungen der elektrischen Antriebsfunktionen. Der Charge Depleting-Modus (CD) bezeichnet den Bereich, in dem die Batterie durch elektrisches Fahren entladen wird. Im Charge Sustaining-Modus (CS) wird durch eine Reduktion elektrischer Fahrfunktionen sowie dem Einsatz von zusätzlichen Funktionen wie Lastpunkthanhebung der SoC in einem festgelegten Ladefenster gehalten. Abbildung 3-4 veranschaulicht die beiden Modi schematisch.

Der CS-Bereich entspricht dem Betriebsbereich, der mit einem Hybrid mit leistungsschwächerem elek-

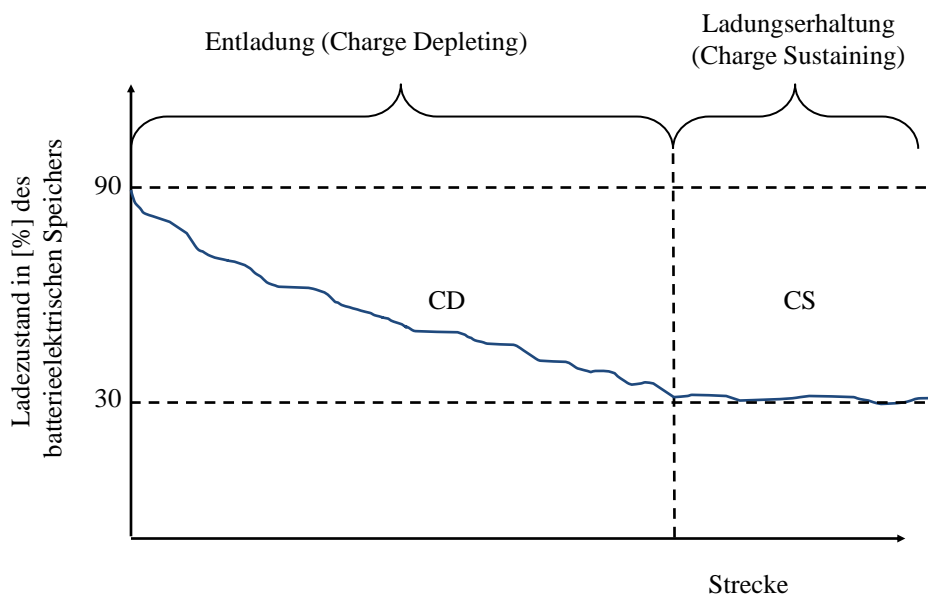


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Modi Charge Depleting (CD) und Charge Sustaining (CS) nach REIF ET AL. (2012, S. 311)

trischen Antriebssystem ebenso möglich ist. Der CD-Bereich resultiert aus dem leistungsstarken elektrischen Antriebssystem mit entsprechend nutzbarer elektrischer Energie. Signifikante Anteile elektrischen Fahrens zeichnen den CD-Bereich aus. Dies äußert sich sowohl in einem besseren elektrischen Beschleunigungsvermögen als auch einer höheren elektrischen Fahrgeschwindigkeit gegenüber einem CS-Bereich. Die Höhe der elektrischen Beschleunigung sowie die maximale elektrische Fahrgeschwindigkeit haben Einfluss darauf, wie schnell die Energie aus dem elektrischen Energiespeicher ausgegeben wird und werden kann. Danach bemisst sich auch der Nutzen dieses Systems. Ziel ist es, die gespeicherte elektrische Energie komplett für die Fahraufgaben zu verwenden. Im Folgenden werden wesentliche Fahrfunktionen eines PHEVs vorgestellt:

- **Elektrisches Fahren:** Abhängig von der Leistung des elektrischen Antriebssystems kann eine entsprechend hohe elektrische Geschwindigkeit zusammen mit einem entsprechenden Beschleuni-

gungsvermögen dargestellt werden. Analog Abbildung 3-5 ist beispielsweise im CD-Modus bei einer elektrischen Geschwindigkeit von 50 km/h ein Beschleunigungsvermögen von  $1,0 \text{ m/s}^2$  möglich. In einem CS-Bereich wird der Bereich elektrischen Fahrens entsprechend reduziert. Grund

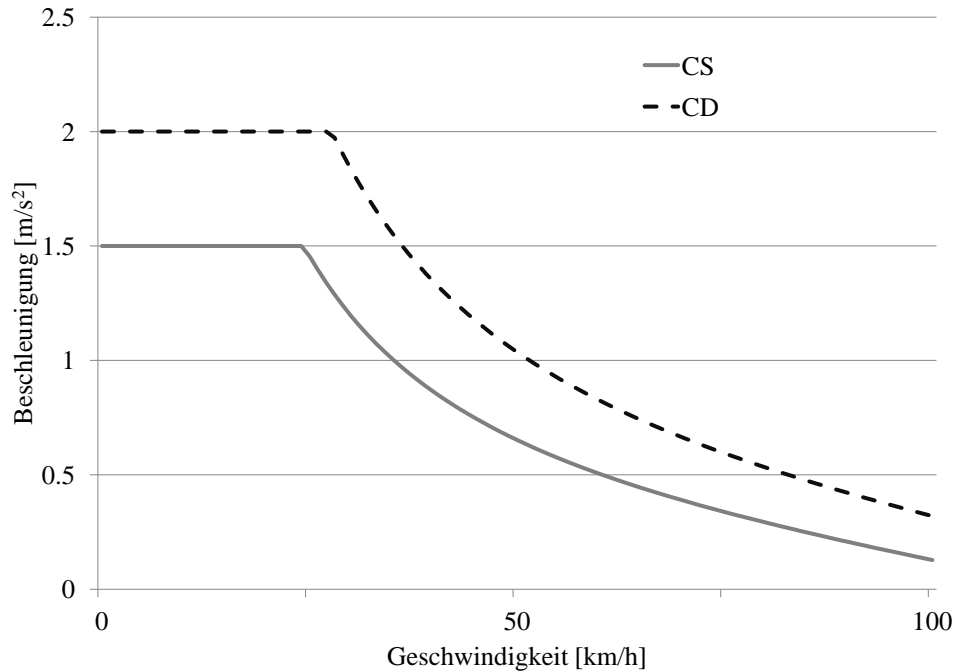


Abbildung 3-5: A-v- Diagramm

ist der reduziert verfügbare Batterieinhalt. Die Effizienz des Verbrennungsmotors entscheidet, inwiefern es sinnvoller ist, elektrisch oder verbrennungsmotorisch zu fahren. Das bedeutet, je effizienter der Verbrennungsmotor betrieben werden kann, desto weniger elektrische Fahranteile treten im CS-Bereich auf. Das ist aber ebenso abhängig von der Wahl des Verbrennungsmotors (FIALA, 2012). Mögliche Einschränkungen des elektrischen Fahrens durch eingeschränktes Leistungsvermögen der Komponenten wird in Kapitel 3.4 beschrieben.

- **Rekuperation:** Rekuperation beschreibt den Betriebszustand, in dem während des Abbremsens die kinetische Energie in elektrische Energie gewandelt wird. Die Rekuperation wird abhängig vom SoC und vom Leistungsvermögen des elektrischen Energiespeichers angesetzt. Bei beispielsweise vollem batterieelektrischen Speicher ist das Aufnahmevermögen und somit die Rekuperationsfähigkeit eingeschränkt. Neben den Einschränkungen des elektrischen Antriebssystems gibt es zudem fahrdynamische Eingriffe, denen die Rekuperation unterzuordnen ist. Die Höhe der rekuperierten Energie ist eine Funktion der Geschwindigkeit.
- **Boosten:** Boosten ist der Betriebszustand, in dem die elektrische Maschine und der Verbrennungsmotor in Leistungsaddition das Fahrzeug antreiben. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten, diese beiden Antriebe zu kombinieren. NIES ET AL. (2012a) verfolgt den Ansatz, die elektrische Maschine erst bei Volllast des Verbrennungsmotors einzusetzen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass im CD-Bereich die elektrische Energie für eine Lastpunktabsenkung verwendet wird und nicht für elektrisches Fahren. Im CS-Bereich steht aufgrund des limitierten SoC-Hubs eingeschränkt Energie für Boostvorgänge zur Verfügung. Deshalb ist ein zeitvariantes Verhalten, bedingt durch einen Mangel

elektrischer Energie möglich. Auch beim Boosten besteht die Gefahr eines zeitvarianten Verhaltens des elektrischen Antriebssystems. Das Boosten ist aufgrund der reduzierten Verfügbarkeit elektrischer Energie eingeschränkt verfügbar. Zudem ist bei niedrigem SoC das Leistungsvermögen des elektrischen Antriebssystems reduziert, so dass auch die Möglichkeit der Systemdegradation besteht. NIES ET AL. (2012a) beschreibt die verschiedenen Ausprägungen und Gründe für Systemdegradationen. Er unterscheidet zwischen energiebedingter und leistungsbedingter Systemdegradation. Zudem schlägt er verschiedene Maßnahmen vor, die Systemdegradation zu vermeiden oder zu verzögern.

Dies beginnt mit der Anforderung an das Antriebssystem und dessen Funktionalität. Können Anforderungen aus realem Nutzungsverhalten abgeleitet werden, kann das System der Nutzung angepasst werden und unterliegt nicht Anforderungen, die das System zu stark beanspruchen und somit das Leistungsvermögen unnötig reduzieren. Exemplarisch steht hierfür die Booststrategie. Durch ein bedarfsgerechtes Anforderungsmanagement ist es möglich, das Leistungsvermögen des Systems optimal zu nutzen. Für die Funktion Boosten untersucht NIES ET AL. (2012a) hierzu wiederholende Fahrmanöver als auslegungskritische Anforderung. Je mehr Wiederholungen gefordert werden, desto niedriger ist die verfügbare Systemleistung, da für die Wiederholung der Manöver ein zeitinvariantes Verhalten gefordert wird. Aus Nutzungsdaten ermittelt NIES ET AL. (2012a) ein Fahrmanöver einer dreimaligen Wiederholung von 70 auf 120 km/h. Dies ermöglicht ihm eine nutzungsgerechte Auslegung, so dass für die Nutzung möglichst keine merklichen Systemdegradationen wahrnehmbar sind. Abbildung 3-6 zeigt mit dem Erhitzungsgrad und der maximalen Entladeleistung die zwei wichtigen Parameter, die in diesem Fall Zeitvarianz verursachen können. Beide Größen sind über den relevanten Zeitraum des generierten Manövers, das aus Nutzungsdaten generiert wurde, ohne Einschränkung. Dies liegt daran, dass die elektromotorische Leistung beschränkt wird, um keine Erhitzung durch die Beschleunigung zu verursachen. Umgesetzt wird dies durch eine hohe anfängliche Leistung oberhalb der Dauerleistung mit einem anschließenden Ausblenden der motorischen Leistung. Dies ist an der sinkenden Erhitzung zu erkennen. Durch die Rekuperation erfolgt eine starke Erhitzung der Elektromaschine. Doch wird das motorische Leistungsvermögen der Elektromaschine für das untersuchte Fahrmanöver nicht beeinträchtigt, sondern so eingestellt, dass bei maximaler Rekuperation eine maximale und dennoch zeitinvariante Fahrleistung darstellbar ist.

Das elektrische Antriebssystem besitzt mit der elektrischen Maschine sowie dem batterieelektrischen Speicher zwei miteinander kombinierte Komponenten, die unterschiedliche Eigenschaften im Degradationsverhalten aufweisen. Dieser Sachverhalt hat auch Auswirkungen auf die Betriebsstrategie. Der Speicher ist in seinem Degradationsverhalten träger, die elektrische Maschine dynamischer. Die elektrische Maschine degradiert mitunter schneller, hat aber auch wieder nach einem kürzeren Zeitraum die volle Leistungsbereitschaft zurück. Dies hängt davon ab, mit welchen Nenn- und Überlasten eine elektrische Maschine betrieben werden kann (Kapitel 3.4.1) und wie dazu der batterieelektrische Speicher ausgelegt wird. Die genannten Aspekte sind sowohl bei der Systemauslegung als auch bei der Ausprägung einer energetischen Betriebsstrategie zu berücksichtigen.

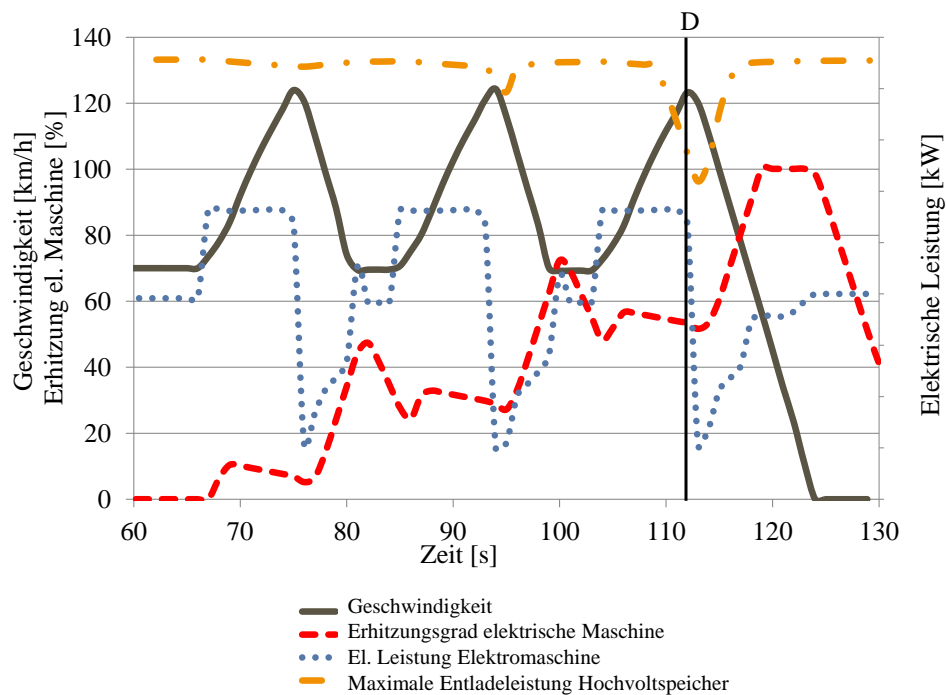


Abbildung 3-6: Nutzungsgerechte energetische Betriebsstrategie (NIES ET AL., 2012a)

- Lastpunktverschiebung:** Die Lastpunktverschiebung hat zwei Ausprägungen. Zum einen kann der Lastpunkt des Verbrennungsmotors abgesenkt werden und mit dem elektrischen Antriebssystem ergänzt werden. Zum anderen kann die Last des Verbrennungsmotors durch ein generatorisches Drehmoment der elektrischen Maschine erhöht werden und so der elektrische Energiespeicher geladen werden. Lastpunktanhebung ist für PHEV im CS-Bereich sinnvoll, um den Ladestand zu erhalten. Im CD-Bereich ist ausreichend elektrische Energie im Batteriespeicher vorhanden. Daher ist es nicht zielführend, durch einen höheren Verbrauch den elektrischen Energiespeicher noch weiter zu laden. Lastpunktabsenkung ist nur sinnvoll, wenn die elektrische Energie durch elektrisches Fahren nicht ausgegeben werden kann, da die relevante Strecke bis zum kommenden Ladevorgang, z.B. mit einer vorausschauenden Betriebsstrategie, nicht ausreicht, um die komplette elektrische Energie umzusetzen. In diesem Fall kann durch Lastpunktabsenkung die elektrische Energie zusätzlich ausgegeben werden, ohne das elektrische Fahren einzuschränken.

(REIF ET AL., 2012, S. 306ff)

### 3.3 Relevanz eines Plug-In Hybrids

PHEVs besitzen ein leistungsstarkes elektrisches Antriebssystem und bieten somit die Möglichkeit, elektrisches Fahren über größere Strecken- und Geschwindigkeitsbereiche anzubieten als einfache Hybride mit einem wesentlich eingeschränkteren elektrischen Antriebssystem. Somit ist es möglich, mehr Streckenanteile elektrisch zu bewältigen und die Anteile von Strecke und Zeit, in der der Verbrennungsmotor betrieben wird, weiter zu verringern. Dies hat zur Folge, dass der Kraftstoffverbrauch deutlich reduziert werden kann.

Voraussetzung dafür ist, dass der Nutzer den elektrischen Energiespeicher möglichst häufig lädt, um die elektrische Energie für die Fahraufgabe einzusetzen. Um hohe Anteile elektrischen Fahrens zu reali-

sieren, ist es zudem notwendig, dass der Nutzer die Betriebsbereiche des elektrischen Antriebssystems nutzt. Nur so kann der Nutzen eines elektrischen Antriebssystems zum tragen kommen (Abbildung 3-7). SCHMIDT-SANDTE & HAMMER (2012) beschreibt in diesem Zusammenhang den Kundennutzen zum

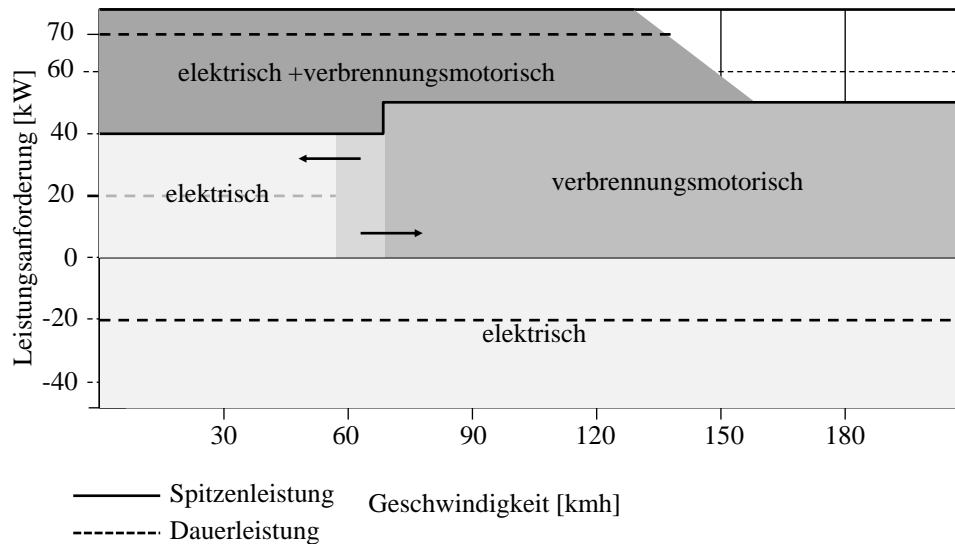


Abbildung 3-7: Betriebsbereiche PHEV nach REIF ET AL. (2012, S. 310)

einen über das elektrische Fahrerlebnis, zudem über Betriebskosten wie Besteuerung, Anschaffungskosten und Energiekosten aber auch Leistung, wie beispielsweise die Reichweite oder die Beschleunigung als Fahrleistung. Betrachtet man die von den Gesetzgebern vorgeschriebenen Fahrzyklen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs, so ist es im Hinblick auf die Flottenwerte von Automobilherstellern wichtig, einen möglichst niedrigen Kraftstoffverbrauch in gesetzlichen Fahrzyklen zu erreichen. Dieser wird, je nach gesetzlicher Grundlage unterschiedlich bewertet und bemessen. Hierbei spielen die in Kapitel 3.2 beschriebenen Betriebsbereiche CD und CS eine wichtige Rolle. Betrachtet man z.B. den europäischen Fahrzyklus NEDC, so wird der Kraftstoffverbrauch hier folgendermaßen berechnet:

$$Verbrauch = \frac{eRW \cdot V(CD) - 25km \cdot V(CS)}{25km + eRW} \quad (3.1)$$

- mit eRW ... elektrische Zyklusreichweite im NEFZ für den CD-Modus  
 V(CD) ... Kraftstoffverbrauch im CD-Modus, für den Fall eines Durchfahrens ohne Leistungszustart gleich Null  
 V(CS) ... Kraftstoffverbrauch im CS-Modus

Wie aus der Formel ersichtlich wird, haben sowohl die elektrische Reichweite im gesetzlichen Fahrzyklus als auch der Kraftstoffverbrauch im CD einen großen Einfluss. Kann der gesetzliche Fahrzyklus in diesem Fall rein elektrisch durchfahren werden, so wird der CD-Kraftstoffverbrauch V(CD) zu Null. Das heißt, durch rein elektrisches Durchfahren des gesetzlichen Fahrzyklus kann der Verbrauchswert deutlich reduziert werden ((UN/ECE), 2012).

## 3.4 Eigenschaften der elektrischen Antriebskomponenten eines PHEVs

Für die vorliegende Arbeit sollen die Eigenschaften der Komponenten elektrische Maschine und elektrischer Energiespeicher vorgestellt werden. Diese zwei Komponenten sind die maßgeblichen Bestandteile bei der Dimensionierung des elektrischen Antriebsstrangs. Die Komponenten werden in ihrem Grundeigenschaften vorgestellt und das Verhalten der Komponenten für unterschiedliche Randbedingungen wird aufgezeigt. Der Umrichter, auch Leistungselektronik bezeichnet, ist ein weiterer wichtiger Bestandteil. Diese Komponente transformiert die elektrische Energie aus dem batterieelektrischen Speicher in die Form, die für den Betrieb der Elektromaschine notwendig ist (HOFMANN, 2010). Die Leistungselektronik ist somit nur indirekt für die Funktionen und deren Ausprägung verantwortlich und soll nicht detaillierter vorgestellt werden.

### 3.4.1 Elektromaschine

Die elektrische Maschine bietet die Möglichkeit, Energie in zwei Richtungen zu wandeln. Der motorische Betrieb bezeichnet eine Energiewandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie. Der generatorische Betrieb beschreibt eine Energiewandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie (Abbildung 3-8). Der generatorische Betrieb erlaubt die in Kapitel 3.2 beschriebene Rekuperation. Kinetische Energie kann in elektrische Energie gewandelt werden und muss nicht in der Reibbremse in Wärme umgesetzt werden. Zudem ist ohne Getriebe ein Betrieb vorwärts und rückwärts möglich.

Elektrische Maschinen weisen zwei unterschiedliche Betriebsbereiche auf. Diese werden als Nennbereich und Überlastbereich bezeichnet. Der Überlastbereich erlaubt höhere Leistungen darzustellen.

Der Betrieb im Nennbereich ist zeitlich invariant möglich. Die darstellbare Leistung ist niedriger als die des Überlastbereiches, aber dauerhaft abrufbar.

Der Überlastbereich erlaubt es, deutlich höhere Leistungen über einen kurzen Zeitraum darzustellen. Limitierend für die Zeitdauer ist zum einen die Höhe der Überschreitung der Nennleistung als auch die Dauer der Überschreitung. Limitierend für die Überlast sind thermische Einschränkungen, die aus den hohen Strömen resultieren.

Weiteres Differenzierungsmerkmal zum Verbrennungsmotor neben den unterschiedlichen Betriebsbereichen ist das charakteristisch hohe Anfahrmoment ab Drehzahl Null. Hier unterscheidet sich die Elektromaschine wesentlich vom Verbrennungsmotor, der abhängig vom Typ, erst bei höheren Drehzahlen sein Nennmoment darstellen kann. Das von Drehzahl Null anliegende Drehmoment steht für den Grunddrehzahlbereich zur Verfügung. Darüber wird das Drehmoment entsprechend der Leistungsfähigkeit reduziert. Über dem Grunddrehzahlbereich wird das Drehmoment konstant gehalten. Ein geringer Abfall der Leistung durch den Einfluss von Feldschwächebereichen tritt im realen Betrieb ein. Die maximale Leistung ist am Eckpunkt, dem Übergang von Grunddrehzahlbereich zu Feldschwächebereich abrufbar (HOFMANN, 2010, S. 113ff).



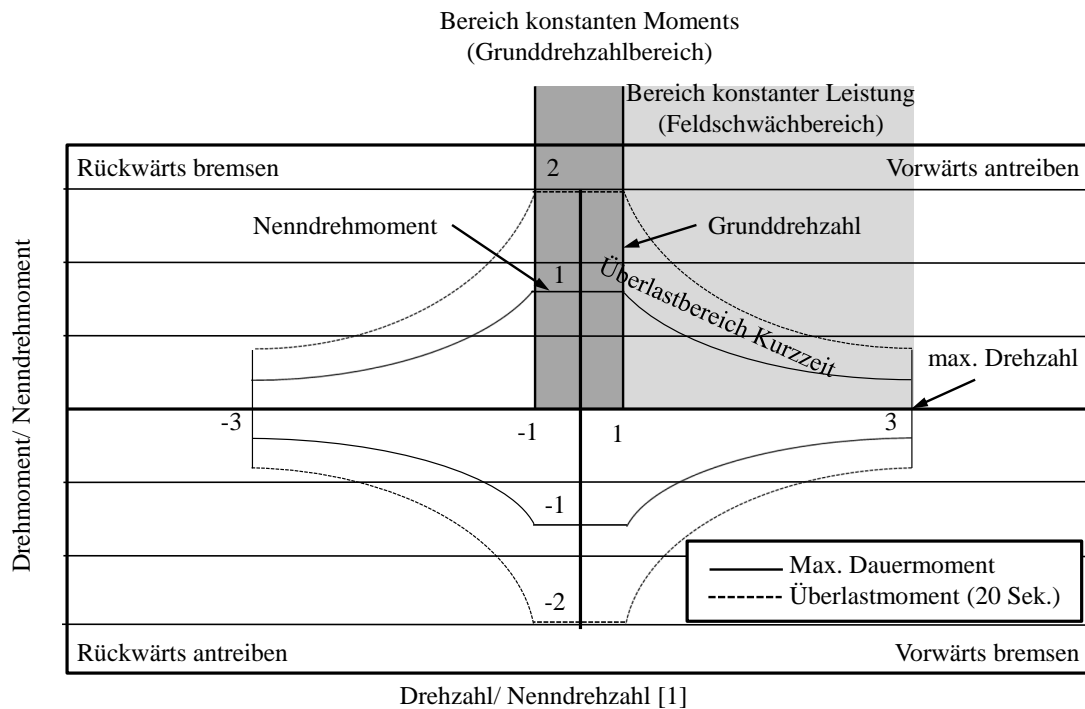


Abbildung 3-8: Betriebsbereiche der Elektromaschine nach HOFMANN (2010, S. 116)

### 3.4.2 Hochvoltspeicher

Die Anforderungen an Energiespeicher im automobilen Umfeld sind höchst anspruchsvoll. Zunächst bedarf es einer hohen Energiedichte, damit viel elektrische Energie zur Verfügung gestellt und zugleich wenig Volumen durch den Hochvoltspeicher beansprucht wird. Dazu muss ein variables Leistungsspektrum verfügbar sein, um variablen Anforderungen der Systemnutzer zu entsprechen. Dies erfolgt unter wechselnden Randbedingungen, die Temperaturschwankungen oder unterschiedliche Leistungsprofile, mitunter in Kombination, auftreten lassen. Zu diesen Anforderungen kommt hinzu, dass ein reproduzierbares Verhalten über die Nutzungsdauer eines elektrischen Energiespeichers gefordert wird. Die Anforderungen an die Nutzungsdauer, auch Zyklusfestigkeit der Energiespeicher genannt, umfasst sowohl die Leistungsfähigkeit, sowie den zur Verfügung stehenden Energiehub des elektrischen Speichers.

Für Personenkraftwagen ist der Lithium-Ionen (LI) Speicher eine sehr vielversprechende Technologie. LI-Speicher vereinen analog Abbildung 3-9 eine sehr hohe Zyklusfestigkeit bei vergleichbar hohen Energiedichten.

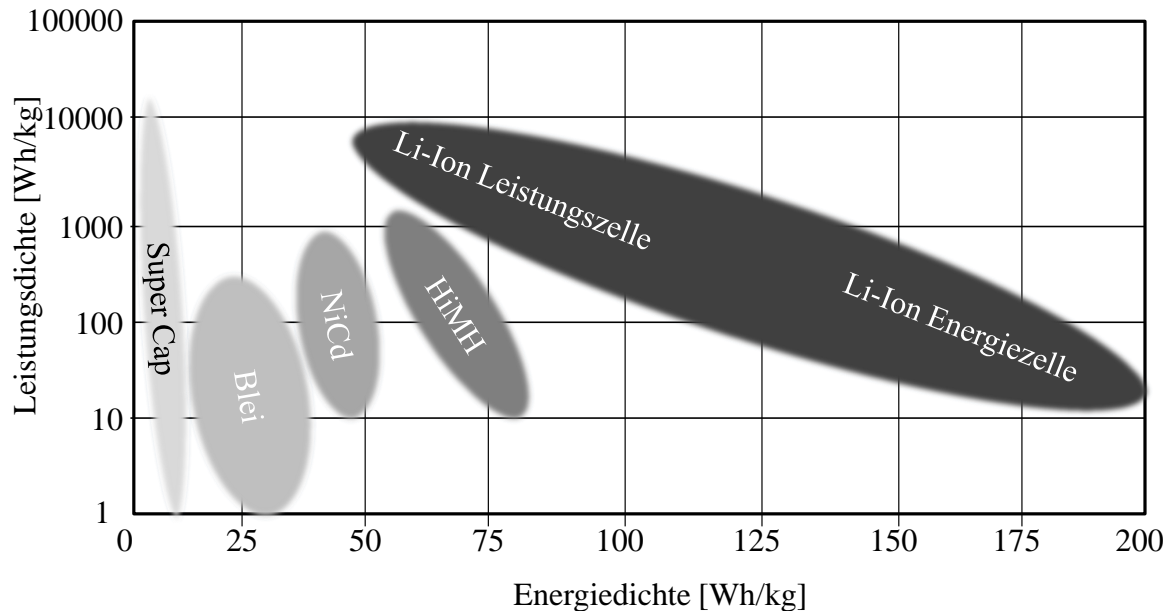


Abbildung 3-9: Energie- und Leistungsdichte von Hochvoltspeichern nach HOFMANN (2010, S. 190) und TschÖKE (2012)

Die Energiedichte ist eine wichtige Eigenschaft, weil sie in Kombination mit dem Speichervolumen den Energieinhalt festlegt. Der Energieinhalt wiederum charakterisiert Ausprägung und Umfang elektrischer Fahrfunktionen. Wie in Abbildung 3-9 skizziert, wird zwischen Leistungs- und Energiezellen bei Lithium-Ionen Zellen unterschieden. Das heißt, dass jeweils zu Gunsten der Leistungsfähigkeit oder der Energiekapazität die andere Eigenschaft entsprechend reduziert wird. VON ESSEN & DIEZEMANN (2013) sieht den Einsatz von Energiezellen im Bereich von rein elektrischen Fahrzeugen, wohingegen PHEVs mit Leistungszellen bestückt werden.

Die Leistungsfähigkeit von Fahrzeugbatterien muss der Dynamik der Nutzung entsprechen. Diese Leistung sollte gemäß NAUNIN (2006, S. 34) bei 30 kW pro/ Tonne Fahrzeuggewicht liegen, für Hybridfahrzeuge also zwischen 30 und 60 kW. Batterien besitzen einen sogenannten Entladegrad DOD (Depth of Discharge). Diese Größe beschreibt, wie viel von dem nominell vorhandenen Energieinhalt genutzt werden kann (HOFMANN, 2010, S. 156). Als begrenzendes Kriterium kann die Zyklenanzahl genannt werden. Diese schwankt in dem Beispiel von 5% Entladetiefe und 80% Entladetiefe zwischen größer 2500 Zyklen und größer 25.000 Zyklen. Weitere die Entladetiefe beeinflussende Größen sind beispielsweise Zelltyp oder Leistungsvermögen der Zelle.

Für die Lebensdauer werden Anforderungen im Bereich von 10 Jahren oder 200.000 km und mehr veranschlagt. Dies kann bis zu 10.000 kompletten Ladezyklen entsprechen (NAUNIN, 2006, S. 35).

Neben der Alterung des Hochvoltspeichers gilt es, weitere Randbedingungen zu berücksichtigen, die Einfluss auf die Funktion des Hochvoltspeichers haben. Für die vorliegende Arbeit wurde mit der ein-

geschränkten Leistungsfähigkeit durch Leistungsdegradation (Kapitel 3.2) eine maßgebliche Einschränkung beschrieben werden. Weitere Einschränkungen wie Alter, Zyklenzahl, SOC oder der Zelleninnenwiderstand werden nicht betrachtet.

Die verfügbare Leistung, die eine Batterie bereitstellen kann, hängt maßgeblich davon ab, wie dynamisch der angeforderte Leistungsverlauf an das System ist. Einflüsse, wie SoC oder Komponententemperatur beeinflussen die Leistungsfähigkeit der Batterie. Die darstellbare Leistung im System resultiert aus Zelltypen oder Zellanzahl und dem sich ergebenden maximalen Entladestrom (NAUNIN, 2006, S. 46ff). Mit Hilfe eines Batteriemangementsystems können entsprechend Eingriffe in das System vorgenommen werden, um eine Schädigung der Batterie zu vermeiden. Dieses Management kann auch präventiv eingreifen, um eine komplette Reduktion der Batterieleistung zu vermeiden (NIES ET AL., 2012a).

Die eingeschränkte Leistungsbereitschaft einer Lithium-Ionen Batterie bei niedrigen bzw. hohen Temperaturen ist in der Zellchemie begründet. Mögliche Reaktionen wie Gasungsspannung oder erhöhte Wasserzersetzung erfordern eine Reduktion der Leistungsbereitstellung durch das Batteriemangement, um die Zelle und somit Ihre Funktion nicht nachhaltig zu beeinträchtigen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Batterie auf einem konstanten Temperaturniveau zu halten, um somit Leistungsschwankungen vorzubeugen. VON ESSEN & DIEZEMANN (2013) beziffert die Leistungseinbußen bei Batterietemperaturen unter 0°C mit 40% und mehr. Das gleiche gilt bei Temperaturen über 40°C.

### 3.4.3 Wirkungsgradbetrachtung des elektrischen Antriebsystems

Elektrische Maschine und Hochvoltspeicher sind die maßgeblichen Komponenten im elektrischen Antriebsstrangverbund. Wird ein Fahrzeug elektrisch angetrieben, so wirken diese zwei Komponenten sowie eine Leistungselektronik in Reihe zusammen. Das Produkt der Einzelwirkungsgrade ergibt den Gesamtwirkungsgrad. Diese werden im Folgenden aufgezeigt, da die Wirkungsgradkette für die Dimensionierung des Hochvoltspeichers einen unmittelbaren Einfluss besitzt. Abbildung 3-10 zeigt die einzelnen Komponenten schematisch. Je nach Architektur des Antriebstrangs kann zudem ein Schaltgetriebe Bestandteil sein.

Elektrische Maschinen besitzen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren einen hohen energetischen Gesamtwirkungsgrad. HOFMANN (2010, S. 130) analysiert drei Grundtypen elektrischer Maschinen. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem Wirkungsgrad der Maschine, sowie dem der Ansteuerung zusammen.

- Bei der Synchronmaschine unterscheidet er Gleichstrom-, elektrisch erregte und permanent erregte Gleichstrommaschinen. Der Wirkungsgrad liegt hier im Bereich von 80% bis 92%. Die Gleichstrommaschine fällt vom Gesamtwirkungsgrad gegenüber den anderen beiden Synchronmaschinen leicht ab und liegt bei 80% bis 85%.
- Die Asynchronmaschine kann mit einem Gesamtwirkungsgrad von 83% bis 91% betrieben werden.
- Die geschaltete Reluktanzmaschine wartet mit einem Gesamtwirkungsgrad zwischen 83% und 91% auf.

Bei der spezifischen Leistung, wie auch beim spezifischen Drehmoment pro kg, ist die Synchronmaschine der Asynchronmaschine sowie der geschalteten Reluktanzmaschine überlegen.

Hochvoltspeicher als Lithium-Ionen Batterien realisieren in der automobilen Anwendung Wirkungsgrade zwischen 92% und 96% (KASPER, 2012). Der Wirkungsgrad kann durch wechselnde Randbedingungen wie z.B. Temperaturschwankungen variieren. Ursachen für niedrigere oder auch hohe Wirkungs-

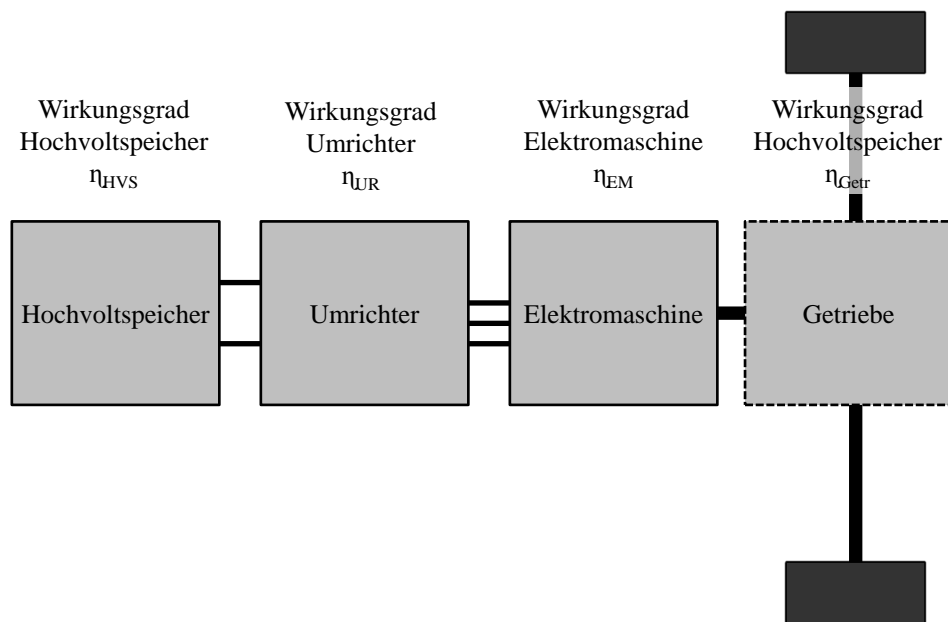


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung eines elektrischen Antriebsstrangs

grade können beispielsweise elektrochemische Reaktionskinetik sein (NAUNIN, 2006, S. 55). Dies kann den genannten Wirkungsgradbereich zum Positiven als auch zum Negativen beeinflussen. Die Höhe der Abweichung variiert in Abhängigkeit von den in Kapitel 3.4.2 genannten Parametern. Der Wirkungsgrad von Leistungselektroniken liegt im Bereich zwischen 95% und 97% (KASPER, 2012).

Der elektrische Antriebsstrang besteht aus einer Reihe von Komponenten mit sehr hohen Einzelwirkungsgraden. Die Wirkungsgrade sind aber analog der Verbrennungskraftmaschine abhängig vom Betriebspunkt und beim Hochvoltsspeicher zudem von Randbedingungen wie SoC. Eine Betrachtung der Wirkungsgrade in Kombination ist daher wesentlich. Dazu kommt, dass die genannten Wirkungsgrade für den gleichen Betriebspunkt nicht zwingend vorliegen und die Bestpunkte in unterschiedlichen Betriebspunkten liegen. Daher ist eine Abstimmung der Komponenten aufeinander wichtig.

## 3.5 Existierende Hybride und Plug-In Hybride

Verschiedene Hersteller bieten Fahrzeuge mit Hybridantrieb und sogar Plug-In Hybrid-Antrieb an. Die Anzahl von am Markt angebotenen Plug-In Hybriden verschiedenster Ausprägungen steigt mit der Zeit. So präsentierte DUESMANN (2012) einen Sportwagen, realisiert als Plug-In Hybrid. Hier werden ein Verbrennungsmotor mit drei Zylindern mit einer leistungsstarken elektrischen Maschine kombiniert. Trotz sehr guter Fahrleistungen kann ein niedriger Verbrauch in gesetzlichen Fahrzyklen dargestellt werden. Im Folgenden sollen ausgewählte Modelle in Funktionen sowie Vermögen, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, vorgestellt werden.

### 3.5.1 Diesel Hybrid am Beispiel von Mercedes

Im Mercedes-Benz Diesel Hybrid wird ein Dieselmotor mit vier Zylindern und einer Leistung von 150 kW mit einer elektrischen Maschine mit 20 kW kombiniert. Die elektrische Maschine ist zwischen Ver-

brennungsmotor und Getriebe integriert und kann mittels einer Kupplung vom Verbrennungsmotor mechanisch getrennt werden. Somit sind die Funktionen eines Vollhybriden analog Abbildung 3-3 darstellbar.

Beim Energiespeicher handelt es sich um eine Lithium-Ionen Batterie mit 35 Zellen zu je 6,5 Ah mit resultierenden 820 Wh verfügbarem Speicherinhalt. Der nutzbare Speicherhub ist entsprechend geringer. Für ein Fahrzeug in der oberen Mittelklasse ergibt sich mit diesem Antriebsstrang ein Verbrauch von 4,2 l/100km Dieselkraftstoff im NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus), gleichbedeutend mit 109 g/km  $CO_2$ . Dies entspricht einer Reduktion gegenüber dem Basismodell von rund 16 %. Wird ein Antriebsstrang gleicher Topologie mit einem Dieselmotor mit sechs Zylindern gleichermaßen hybridisiert, so ergibt sich eine Verbrauchsreduktion von 28 % gegenüber der nicht hybridisierten Basis im Referenzzyklus NEFZ. Das Zusatzgewicht durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs wird mit 110 kg beziffert. (WEISS ET AL., 2012)

### 3.5.2 Benzin Hybrid am Beispiel von BMW

Das BMW Hybrid- System wird in Fahrzeugen verschiedener Größe in der gleichen Kombination aus Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine verwendet. Es handelt sich hierbei ebenso um einen Vollhybriden, dessen elektrische Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe integriert ist. Die elektrische Maschine leistet 40 kW, der Verbrennungsmotor 225 kW. Beim Verbrennungsmotor handelt es sich um einen turboaufgeladenen Benzinmotor mit sechs Zylindern.

Der elektrische Energiespeicher ist eine Lithium-Ionen Batterie. Diese besteht aus 96 Zellen mit einer nominellen Gesamtspannung von 317 V. Bei einer nominellen Kapazität von 4 Ah pro Zelle ergibt sich ein Energieinhalt von 1350 Wh. Die maximale Entladeleistung beträgt 43 kW.

Für den vorgestellten Hybrid liegt das Verbrauchseinsparungspotential im Bereich zwischen 14 % und 16 %. Für den Referenzzyklus NEFZ wird der Kraftstoffverbrauch um 16% reduziert. Für ein Fahrzeug in der oberen Mittelklasse ergibt sich hier ein Verbrauch von 6,4 l/100km oder 149 g/km  $CO_2$ . Rund 80 % der entladenen Energie im NEFZ geht in elektrisches Fahren, die elektrisch verfügbare Energie setzt sich zu 65 % aus Lastpunktanhebung und rund 35 % aus Rekuperation zusammen.

Die elektrische Reichweite für das beschriebene System liegt bei 3-4 km im konstanten Geschwindigkeitsbereich. Das Zusatzgewicht für das installierte Hybridsystem wird mit bis zu 150 kg beziffert.

(KLÜTING ET AL., 2012)

### 3.5.3 Plug-In Hybrid Konzept von Jaguar

Das Demonstrationsfahrzeug von Jaguar wurde vor dem Hintergrund entwickelt, ein großes, komfortorientiertes Fahrzeug mit niedrigen Kraftstoffverbrauch zu realisieren. Die Wahl fiel deshalb auf einen PHEV, weil bei einem reinen Elektrofahrzeug eine Batterie aufgrund der geringen Energiedichte sehr viel Volumen, Gewicht und Kosten verursachen würde. Damit wäre sowohl der Nutzwert als auch die Attraktivität des Produkts eingeschränkt. Ergebnis ist ein Fahrzeug in der Geländewagenklasse. Als Topologie wurde ein paralleler Hybrid mit an dem Getriebe angeflanschter elektrischer Maschine gewählt. Diese hat 69 kW und wird von einem 12 kWh großen Lithium-Ionen Speicher gespeist. Die Dimensionierung resultiert auf einer Umfrage in Großbritannien zu der mit dem Auto gefahrenen Strecken bei Einzelfahrten. Ergebnis der Umfrage war, dass 77 % der Fahrten kürzer als zehn Meilen ausfallen und mit 100 Meilen 99 % der Fahrten abgedeckt werden können. Eine elektrisch installierte Reichweite von mehr als 20 km oder rund 12 mls war das daraus abgeleitete Ziel.

Für den NEFZ wurde ein  $CO_2$ -Ausstoß von 89 g/km erreicht, die elektrische Reichweite im Fahrzyklus

war 22,6 km. Im Vergleich zu dem Fahrzeug mit dem konventionellen Antriebsstrang erzielt der PHEV in der Hand von Kunden einen deutlich niedrigeren Verbrauch. Mit bis zu 80 mpg verglichen mit rund 30 mpg für ein konventionelles Fahrzeug kann der Verbrauch abhängig von der Tagesstrecke stark reduziert werden.

(RICHARDSON ET AL., 2012)

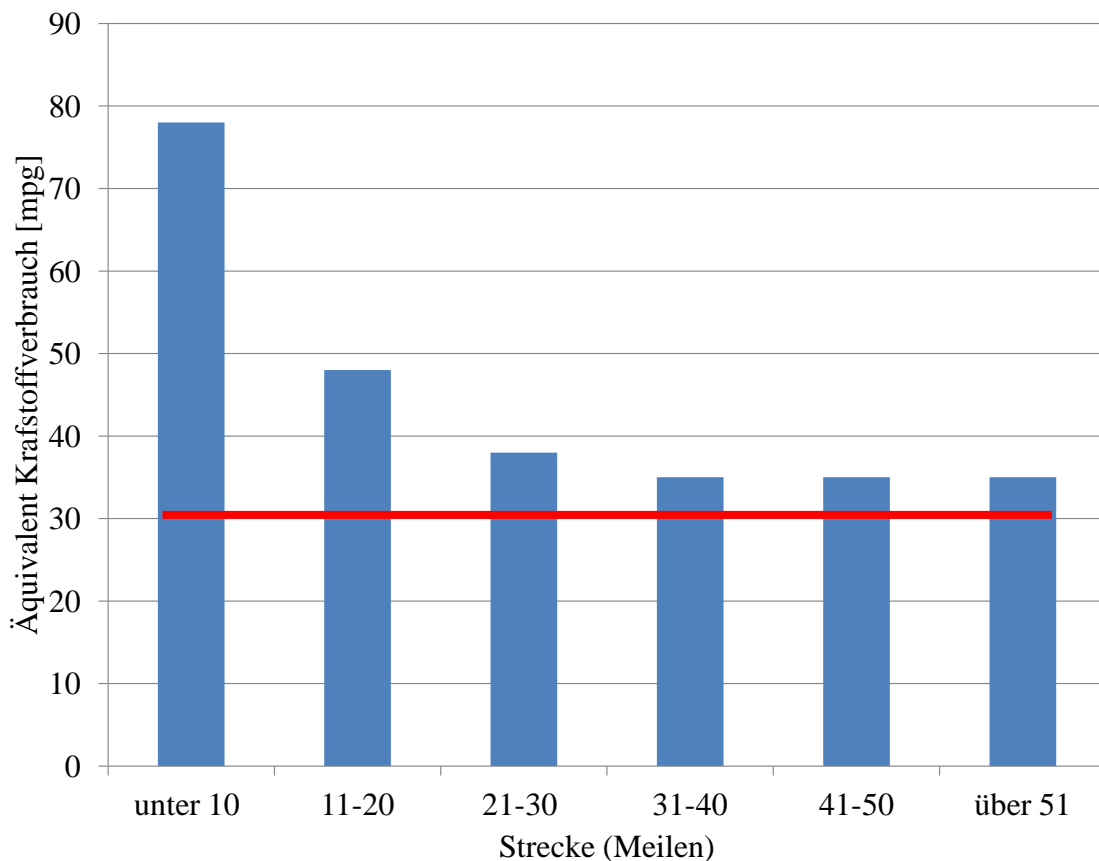


Abbildung 3-11: Verbrauch abhängig von der gefahrenen Strecke (RICHARDSON ET AL., 2012)

Beim Ladeverhalten in Kundenhand wurde festgestellt, dass nach anfänglichem häufigeren Laden, von den Kunden bewusster abgewogen wurde, wie die mögliche Ladezeit sich hinsichtlich der verfügbaren Reichweite auswirken würde. Auch hatten Randbedingungen wie das Wetter Einfluss auf das Ladeverhalten (RICHARDSON ET AL., 2012).

### 3.5.4 Plug-In Hybrid am Beispiel vom Toyota Prius

Toyota ist mit dem Prius, einem Fahrzeug, das nur als Hybrid Fahrzeug erhältlich ist, der Vorreiter in der Hybrid Technologie. Bereits 2005 wurden 300.000 Hybrid Fahrzeuge verkauft, 2011 rund 800.000 Einheiten. Seit 2009 hat Toyota daher eine Validierungstestphase mit einem Prius PHEV durchgeführt, um die Erkenntnisse in die Systemgestaltung einfließen zu lassen. Hierzu wurden 300 Fahrzeuge in den USA, Frankreich, Japan und Toyota Stadt an Kunden gegeben. In Toyota Stadt erhielten die Kunden Ladboxen in der eigenen Garage, dazu wurden 42 Ladestationen an häufig frequentierten Orten installiert. Das entwickelte Hybrid System für den Prius erreicht im NEFZ 59 g/km  $CO_2$  und eine elektrische Reichweite von 21,7 km. Bei der Topologie handelt es sich um ein Toyota Hybrid System mit einem

Plantengetriebe, zwei elektrischen Maschinen und einem Verbrennungsmotor, einem sog. leistungsverzweigten Hybriden. Die Lithium-Ionen Batterie hat 56 Zellen zu je 21,5 Ah. Daraus ergibt sich ein Brutto-Energieinhalt von 4,4 kWh bei 82 kg. Bei dem Verbrennungsmotor handelt es sich um einen Vierzylinder- Motor mit 1,8 Liter Hubraum, der im Atkinson-Brennverfahren betrieben wird. Die Leistung beträgt 99 kW (SCHRIEBER, 2011).

Der Einsatz der in der Lithium-Ionen Batterie gespeicherten Energie ist abhängig vom Fahrprofil. Besteht die Möglichkeit, die elektrische Energie für urbanes Fahren oder Strecken in höheren Geschwindigkeitsbereichen zu nutzen, so ist das urbane Fahren zu bevorzugen. Grund sind sowohl die niedrigeren Energieverluste als auch die Tatsache, dass bei hohen Geschwindigkeiten überproportional viel Energie für die Überwindung von Fahrwiderständen benötigt wird.

Ein Großversuch an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Randbedingungen soll den Nutzen des entwickelten Antriebssystems zeigen. In dem durchgeführten Großversuch wurden sowohl Nutzungsverhalten, als auch die Verbrauchseinsparung durch das Antriebskonzept analysiert. Die wichtigsten Zahlen sind in Tabelle 3-1 vermerkt. Zu beobachten ist eine Korrelation der Ladevorgänge und der Anzahl der Fahrten. Betrachtet man in Abbildung 3-12 die Länge einzelner Fahrten, so haben die in den USA und in Frankreich vermessenen Fahrzeuge einen 60 %-igen Anteil von Fahrten weniger als 50 km, wohingegen der Anteil der Fahrten in Japan und Toyota City bei 70 % bzw. 50 % liegt. Bei den Fahrten über 50 km haben die in Japan vermessenen Fahrzeuge einen Anteil von rund 20 %, die Fahrzeuge in Toyota City haben hier einen Anteil von rund 40 % der Nutzungstage verglichen zu rund 30 % in Frankreich und den USA.

	Frankreich	USA	Japan	Toyota Stadt
Anzahl der Autos	67	45	145	25
Gefahrene Strecke	1.302.885 km	595.510 km	1.262.363 km	46.292 km
Durchschnittliche jährliche Fahrstrecke	19.000 km	13.400 km	9.500 km	8.000 km
Anzahl Fahrten	108.025	53.397	167.884	8.552
Anzahl Ladevorgänge	20.821	10.672	37.448	3.143
Durchschnittliche Anzahl der Fahrten pro Ladevorgang	5,2	5,0	4,5	2,7
Durchschnittliche Anzahl der gefahrenen Strecke pro Ladevorgang	62,6 km	55,8 km	33,7 km	14,7 km

Tabelle 3-1: Zusammenfassung des Großversuchs nach TAKEUCHI ET AL. (2012)

Betrachtet man in Abbildung 3-13 die Distanzen zwischen zwei Ladevorgängen, so sind bis auf die Vermessung in Toyota City die Ladestrecken unter 50 km unter 5 %, in über 80 % der Fälle wird nach 50 km oder mehr geladen. In Toyota City beträgt der Anteil der Ladestrecke für 50 km oder mehr rund 40 %. Die Anzahl der Ladevorgänge pro Tag liegt hier bei 2,1, in den drei weiteren Gebieten liegt die durchschnittliche Anzahl der Ladevorgänge pro Tag zwischen 0,6 und 0,9. Das wirkt sich unmittelbar auf den Kraftstoffverbrauch aus. Dieser liegt zwischen 3,26 und 4,28 l/100km, in Toyota City bei 2,23 l/100km. Dem Ladeverhalten kann somit eine wichtige Rolle bei der Verbrauchseinsparung attestiert werden, unter Berücksichtigung, dass hier der Anteil von Kurzstrecken im Vergleich höher liegt.

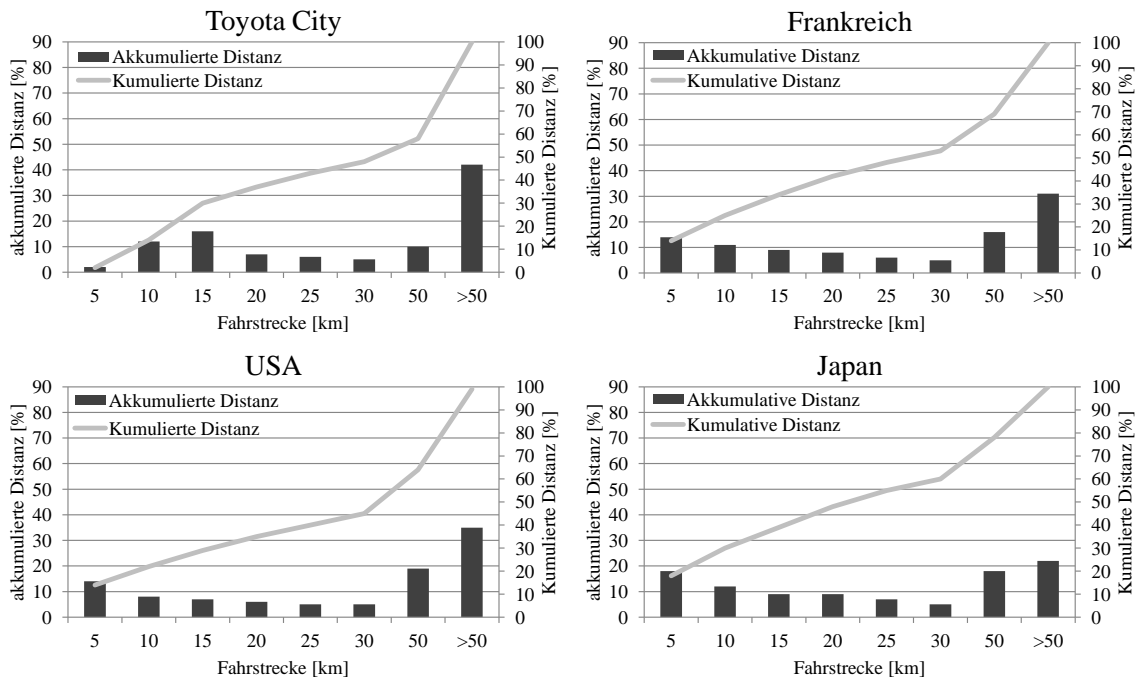


Abbildung 3-12: Vergleich der verschiedenen vermessenen Märkte im Streckenverhalten (TAKEUCHI ET AL., 2012)



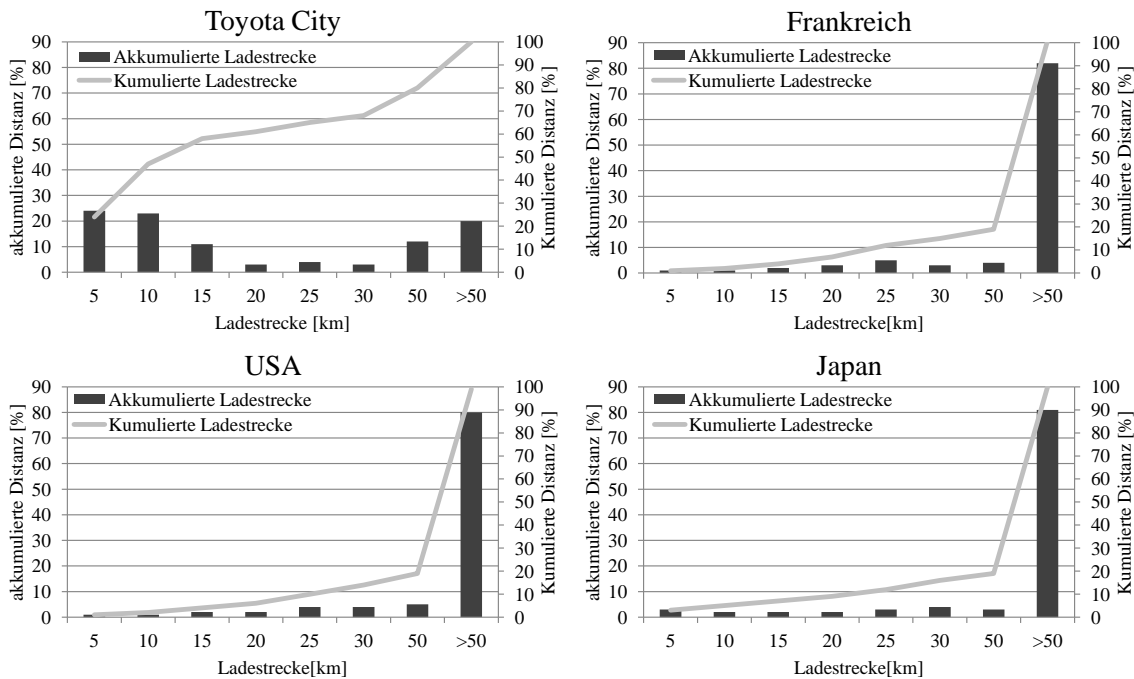


Abbildung 3-13: Vergleich der verschiedenen vermessenen Märkte in der Strecke zwischen zwei Ladevorgängen (TAKEUCHI ET AL., 2012)

Abschließend kann konstatiert werden, dass in Toyota City der Kraftstoffverbrauch um rund 70 % reduziert wurde, bei den vermessenen Fahrzeugen in Frankreich, den USA und in Japan liegt die Einsparung im Bereich von 50 %. Von dem auf 50 % reduzierten Verbrauch fallen wiederum 40 % auf Strecken mit einer Länge größer 50 km an. In Toyota City verteilen sich die verbleibenden 30 % auf Strecken der Länge 10 bis 30 km (TAKEUCHI ET AL., 2012).

### 3.5.5 Weitere Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang

Im Folgenden sollen weitere Fahrzeuge mit hybridem oder komplett batterieelektrischen Antriebsstrang vorgestellt werden. Dabei geht es darum, die Leistungsfähigkeit aktuell am Markt befindlicher Fahrzeuge aufzuzeigen.

ÜBLER (2012) analysiert den BMW Active E an der Leistungsgrenze. Der batterieelektrische Antriebsstrang mit 125 kW PSM Antrieb kombiniert mit einem 32 kWh Lithium-Ionen Speicher bei 1860 kg Fahrzeugleergewicht wird mit dem Fokus des zeitvarianten Verhaltens auf einer Rennstrecke getestet. Dabei verschlechtert sich die Rundenzeit um rund 14% über 16 Runden, nach denen der Speicherinhalt aufgebraucht ist. Die elektrische Reichweite in dem beschriebenen Test waren 41,6 km, Zyklusreichweite sind laut Hersteller 160 km. Die maximale Geschwindigkeit reduziert sich im Verlauf von 140 km/h auf 115 km/h. Der Energieverbrauch lag auf der Rennstrecke bei 720 Wh/km.

GULDE (2010) stellt mit dem Nissan Leaf einen Kleinwagen mit rund 1600 g Leergewicht vor. Er greift auf 24 kWh Speicherkapazität bei einer elektrischen Leistung von 80 kW zurück. Höchstgeschwindigkeit

keit sind 140 km/h, elektrische Reichweite laut Hersteller 160 km.

Volvo kombiniert einen Dieselmotor mit 155 kW mit einer 55 kW starken Elektromaschine als PHEV. Die Speicherkapazität beträgt 12 kWh. Die Topologie ist ein PHEV mit elektrischer Hinterachse. Die elektrische Reichweite beträgt bis zu 50 km bei maximal 120 km/h elektrischer Geschwindigkeit. Optional ist es möglich, die beiden verschiedenen Antriebsarten zu kombinieren und somit einen Allradantrieb darzustellen. Als Verbrauch im Referenzyklus NEFZ werden 1,9 l/100km angegeben (VON MAYDELL, 2012).

MALTZAN (2012) untersucht die Reduktion der verfügbaren Reichweite bei Elektrofahrzeugen im Umfeld niedriger Temperaturen. Bei den vier untersuchten Fahrzeugen reduziert sich die Reichweite zwischen 20 % und 35 % im Vergleich zu Normalbedingungen. So ist bei den gemessenen -14 °C die absolute Reichweite auf Werte zwischen 61 km und 85 km im Vergleich zu 100 km bis 117 km bei normalen Temperaturen gesunken. Leistungsverluste durch die niedrigen Temperaturen sind bei keinem der Fahrzeuge im Test festzustellen.

SCHRIEBER (2011) vergleicht den Prius Hybrid und dem Prius PHEV von Toyota. Beide Fahrzeuge verfügen über einen Verbrennungsmotor mit rund 73 kW, der im Toyota-Hybrid-System, einer leistungsverzweigten Topologie eingesetzt wird. Dazu kommt eine elektrische Leistung von 60 kW in beiden Fahrzeugen. Im Leergewicht unterscheiden sich beide Fahrzeuge um 116 kg (1400 kg bzw. 1516 kg). Der Hybrid hat eine nominelle Batteriekapazität von 1,3 kWh, der PHEV von 5,24 kWh. Die elektrische Reichweite des PHEV beträgt rund 20 km. Im Test werden drei verschiedene Nutzungsverhalten verglichen. Je ein Pendler mit 10, 40 und 90 km pro Tag bei einmal täglich Laden. Alle drei Nutzer sind im Schwerpunkt im städtischen Bereich unterwegs, wobei bei dem dritten Nutzer mit 90 km Tagesreichweite auch Überland- und Autobahnanteile vorhanden sind. Die Bewertung findet auf monetärer Ebene statt und zeigt: Der Prius PHEV mit 8000 Euro Aufpreis im Vergleich zum HEV rechtfertigt seinen Mehrwert in keinem der simulierten Nutzungsfälle. Großer Vorteil des PHEV ist, dass im Bereich von 20 km Tagesreichweite ein reines Elektrofahrzeug verfügbar ist.

DELEKER (2012) vergleicht mit dem Nissan Leaf, Renault Fluence und dem Volvo C30 electric drei batterieelektrische Fahrzeuge in der gleichen Größenklasse. Alle drei Fahrzeuge verfügen über einen Lithium-Ionen Speicher, die 22 kWh bzw. 24 kWh Kapazität aufweisen, davon 22 kWh bzw. 20 kWh nutzbar. Die Höchstgeschwindigkeiten werden zwischen 130 km/h und 145 km/h angegeben. Im TÜV-Süd Fahrzyklus für elektrische Fahrzeuge (RESCH, 2013) liegen die gemessenen Reichweiten zwischen 106 km und 135 km bei 23 °C. Bei -7 °C sinken diese Reichweiten um bis zu 38 % auf 83 km bis 91 km.

BLOCH (2012) stellt einen Dauertest des in Kapitel 3.5.4 beschriebenen Toyota PHEV vor. Ergebnis ist, dass 18 % der Strecken elektrisch zurückgelegt wurden. Die maximale Reichweite einer Batteriefüllung betrug 23 km, in geringsten Fall wurden 9 km erreicht. Durchschnittlich wurde ein Verbrauch von 4,0 l/100km erreicht. Bei einem angenommenen DOD (Depth of Discharge) von 80 % nach BRAUN ET AL. (2010) entspricht das einem Energiebedarf pro km von 182 Wh/km oder 466 Wh/km für 23 km bzw. 9 km elektrische Reichweite.

Die vorgestellten Fahrzeuge in ihren Funktionalitäten zeigen Hauptmerkmale und Entwicklungsfelder elektrischer Antriebssysteme: Die Größenordnung der Leistungsfähigkeit steht häufig im Mittelpunkt von Analysen. Die Leistungsfähigkeit zeigt sich bei Elektrofahrzeugen in der elektrischen Reichweite, aber auch in der Robustheit dieses Wertes, der wie gezeigt, stark schwanken kann. Der Vergleich von HEV und PHEV zeigt auf, inwiefern das Nutzungsverhalten eine wichtige Rolle spielt, in diesem Fall aus betriebswirtschaftlicher Perspektive analysiert. Dazu kommen Eigenschaften, wie das zeitvariable Verhalten bei hohem und kontinuierlichem Leistungsbedarf, die teilweise hohe Reduktion der elektrischen Reichweite bei niedrigen Temperaturen, was für PHEVs eine starke Reduktion elektrischer Funktionen

bedeutet, sowie ein sensitives Verhalten für die Art der Fahrzeugnutzung.

### 3.6 Nutzungsbereich Plug-In Hybrid

Die zentrale Frage für den Nutzungsbereich von PHEVs ist, welches Nutzungsverhalten für die technische Lösung eines PHEVs aus energetischer Sicht einen Mehrwert darstellt. In diesem Kapitel ist das Ziel, dem Nutzungsverhalten einen technischen Lösungsraum zuzuordnen und den Vorteil von PHEVs für entsprechende Nutzer zu beschreiben.

Angrenzende Technologien eines Plug-In Hybrids sind ein batterieelektrisches Fahrzeug auf der einen Seite und ein Hybrid Fahrzeug (HEV) auf der anderen Seite. Der PHEV ist nach SHINICHI ET AL. (2013) eine Kombination, in der die jeweiligen Vorzüge von HEV und BEV kombiniert werden. Er führt hier an, dass man zum einen lokal emissionsfrei fahren kann, ohne aber die Einschränkungen der reduzierten Reichweite zu haben. Bei einem PHEV kann der Fahrer selbst entscheiden, wann er konventionell verbrennungsmotorisch und wann elektrisch angetrieben wird.

Der PHEV ermöglicht durch seine Komponenten sowie deren Kombination in Anordnung und Dimensionierung ein breites Spektrum von Funktionen und der Verfügbarkeit. Dennoch muss die Frage gestellt werden, welchen Nutzungsraum der PHEV besitzt. Hierzu zählen die technische Systemdimensionierung sowie die Ausprägungen im Nutzungsverhalten.

Der erste Teil des Nutzungsbereiches beschreibt, inwiefern das technische System vorteilhaft genutzt werden kann und die Technologie in den Markt eintreten kann:

MATTHIES (2010) beschreibt in seinem Bericht die Chancen der Elektromobilität im Allgemeinen. Danach können PHEVs 2020 je nach Szenario einen Marktanteil von bis zu 30 % haben. Er sieht eine sinnvolle Realisierung von PHEV Fahrzeugen im Mittel- und Kleinwagensegment im Bereich von niedrigen und mittleren Tagfahrstrecken bis 120 km. Für große Fahrzeuge und hohe Tagfahrstrecken sind der Hybridantrieb sowie rein verbrennungsmotorische Antrieb und Range Extender die geeignete technische Lösung, wie in Abbildung 3-14 schematisch skizziert.

HOFMANN (2010, S. 48) analysiert die Streckenverteilung auf dem deutschen Markt. 85 % der Fahrstrecken liegen unter 30 km. 95 % der Tagesstrecken überschreiten nicht die 50 km. Daraus leitet er für Strecken bis 50 km ein batterieelektrisches Fahrzeug als geeignete Lösung ab, für Strecken darüber hinaus ein batterieelektrisches Fahrzeug mit Range-Extender. Alternativ kann die gesamte Bannbreite mit einer technische Lösungsmöglichkeit dargestellt werden. Hybridantriebe kategorisiert HOFMANN (2010) als „Allzweckfahrzeuge“, da sie in ihren unterschiedlichen Ausprägungen, vom Mild- bis zum Full Hybrid, vom Hybrid bis zum Plug-In Hybrid viele Anwendungsfälle abdecken und somit bedarfsgerecht und kostenoptimiert dem Nutzungsverhalten ausgeprägt werden können. Zudem haben PHEVs nicht die Einschränkung in der darstellbaren Reichweite, wie dies bei batterieelektrischen Fahrzeugen der Fall ist. BRAUN ET AL. (2010) ordnet den PHEV im Bereich von 10 kW bis 100 kW elektrischer Leistung bei einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von 5 bis 15 kWh. Bei den Zellkapazitäten geht er von 20 Ah im Vergleich zu 50 Ah bei Elektrofahrzeugen aus. Nach Abbildung 3-9 liegt demnach für den PHEV eine Lithium Ionen-Leistungszelle mit geringerer Kapazität und höherer Leistung vor. RIED ET AL. (2013) beschreibt den PHEV über elektrische Leistung und elektrische Energie. Der PHEV liegt in dem fahrzeugunabhängigen Bereich oberhalb von 70 kW Peakleistung und zwischen 5 kWh und 20 kWh elektrisch installierter Energie, wobei der Bereich zwischen 15 kW und 20 kWh einem batterieelektrischen Fahrzeug mit Reichweitenverlängerung zugewiesen wird. RIED ET AL. (2013) betrachtet in einem weiteren Schritt das geometrische Package für 2011 und als Prognose für 2020. In den verschiedenen Konfiguration sieht er für 2011 zwischen maximal 8 kWh bis knapp 18 kWh in ein Fahrzeug integrierbar. 2020

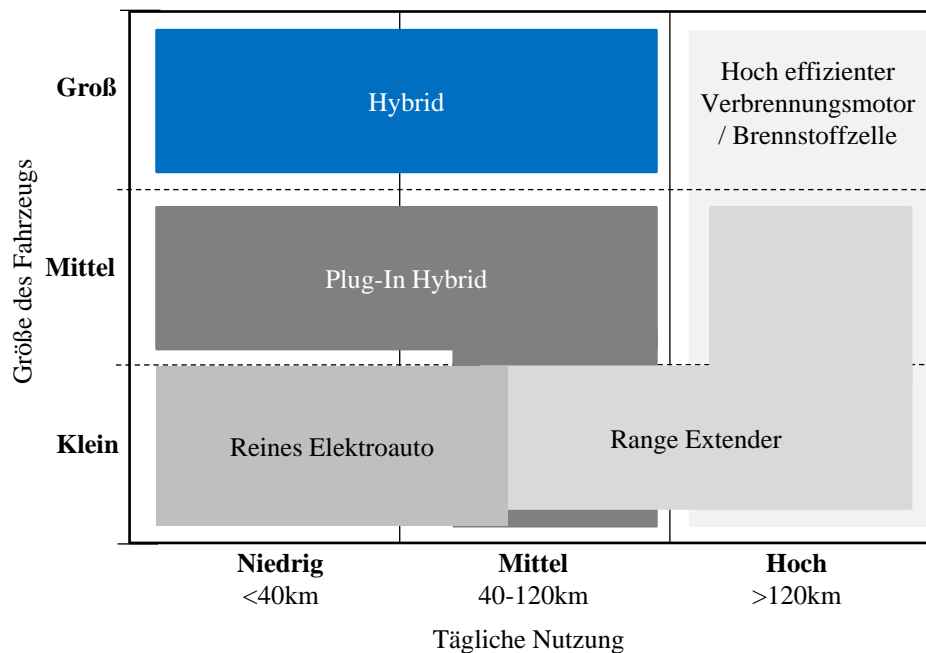


Abbildung 3-14: Szenario Abgleich Technologie- Nutzungsverhalten (MATTHIES, 2010)

liegt der Wert zwischen 12 kWh und 24 kWh. LIENKAMP (2012, S. 28) nennt für PHEVs eine elektrische Reichweite von 25 km bis 50 km.

Für bevorzugte Geschwindigkeitsbereiche einzelner Antriebsarten schlägt VON ESSEN & DIEZEMANN (2013) für den Bereich von Null bis 70 km/h den elektrischen Antrieb wegen des guten Wirkungsgrades vor, ab 70 km/h kann mit Verbrennungsmotoren ein gutes Verhältnis aus Reichweite und Energieeffizienz ermöglicht werden.

Der zweite Teil der Betrachtung des Nutzungsbereichs untersucht das Spektrum der möglichen Mobilitätsverhalten:

Mobilitätsverhalten beschreibt in diesem Zusammenhang die Art und Weise der Nutzung eines Fahrzeugs. Hier existieren unterschiedliche Ausprägungen und Nutzungsparameter, die es zu unterscheiden gilt: Am häufigsten wird im Zusammenhang mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs die Verteilung der täglichen Fahrstrecke als Kundenmerkmal genannt. Die geringe Energiedichte des HochvoltSpeichers (vgl. Kap. 3.4.2) resultiert in der eingeschränkten Bereitstellung elektrischer Energie, was sich wiederum limitierend auf die mögliche elektrische Reichweite auswirkt (vgl. Kap. 3.4.2). MATTHIES (2010) nennt in diesem Zusammenhang eine schwerpunktmäßige Nutzung von bis zu 120 Tageskilometer ein geeignetes Verhalten für die Plug-In Hybrid Technologie. HOFMANN (2010) und REIF ET AL. (2012) sehen im niedrigen Geschwindigkeits- und Leistungsbereich den geeigneten Nutzungsbereich für das elektrische Antriebssystem von PHEVs. Grund dafür ist die niedrige Energieeffizienz des Verbrennungsmotors in diesen Betriebsbereichen und der niedrigere Bedarf elektrischer Energie pro Kilometer in diesen Geschwindigkeitsbereichen.

Neben der Tagesstrecke nennen er die Ladeinfrastruktur als weiteren wesentlichen Punkt, der Einfluss auf den Erfolg der Elektromobilität hat. Hiermit zusammenhängend ist die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten wichtig. Das ist abhängig davon, ob am Wohnort oder Arbeitsplatz die Möglichkeit zur Batterieladung besteht. Hat der Nutzer eine eigene Garage oder eine verfügbare Tiefgarage, so ist das

Laden unabhängig von der öffentlichen Infrastruktur möglich. Einfluss darauf hat auch, ob der Nutzer im eng besiedelten urbanen Bereich lebt oder außerhalb. Die Ladeinfrastruktur kann das Ladeverhalten signifikant beeinflussen und so den Wert eines technischen Systems reduzieren oder erhöhen. Neben der Tagesstreckenbetrachtung kann alternativ auch eine Fahrstreckenbetrachtung zugrunde gelegt werden (SHINICHI ET AL., 2013; TAKEUCHI ET AL., 2012). Wie in den Abbildungen 3-12 und 3-13 ersichtlich, kann sowohl die einzelne Streckenverteilung analysiert werden als auch das Perzentil. Abhängig von einem Ladeverhalten kann mit der Einzelfahrstreckenverteilung oder dem Tagesstreckenverhalten der Kunde beschrieben werden.

Nach SAMMER ET AL. (2008) kann auch eine Unterscheidung der Nutzungstage am Wochenende und von Montag bis Freitag stattfinden. SAMMER ET AL. (2008) untersucht die Häufigkeiten der Einzelfahrtstrecken und Tagesfahrstrecken und versucht somit abhängig von den Wochentagen unterschiedliches Nutzungsverhalten zu beschreiben. Das Resultat ist davon abhängig, welche technische Lösung ein Nutzer benötigt.

SHINICHI ET AL. (2013) betrachtet kombiniert die Tagesstreckenverteilung mit dem Ladeverhalten, das in einer Kundenvermessung ermittelt wurde. Diese Nutzungsparameter betrachtet er hinsichtlich der erzielten Kraftstoffreduktion.

Für das vermessene Fahrzeug mit dem identischen PHEV-System ergeben sich so unterschiedliche Kraftstoffverbräuche für unterschiedliche Ausprägungen im Nutzungsverhalten. Der Nutzer hat mit seinem Verhalten Einfluss auf die Höhe des Kraftstoffverbrauchs.

Das Ladeverhalten kann, wie SHINICHI ET AL. (2013) zeigt, durch eine adäquate Ladeinfrastruktur unterstützt werden. Nach SCHLOTT (2012) ist beispielsweise für Deutschland die Anzahl der Lademöglichkeiten stark eingeschränkt. Der Bedarf bis 2020 liegt bei rund 900.000 installierten Ladepunkten, doch ist dies in Anbetracht der aktuellen Situation eher kritisch zu sehen. Dies gilt vor allem für eine öffentliche Ladeinfrastruktur in Großstädten. Weiterer wichtiger Punkt ist hier auch die Ladetechnologie und damit einhergehend Eigenschaften wie Ladedauer und Ladekomfort für beispielsweise induktives Laden.

### 3.7 Fazit und Reflexion

Nach DEUTCH (2010) streuen die Prognosen für die Entwicklung der Preise für elektrische Speicher relativ stark zwischen 100 \$ und 400 \$ pro kWh auf Systemebene für 2020, so dass aktuell keine Aussage möglich ist.

McKINSEY (2012) prognostiziert Batteriekosten für das Jahr 2020 von 200 \$/kWh, für 2025 163 \$/kWh. 2012 bewegen sich die Kosten aktuell noch zwischen 500 und 700 \$/kWh. Mit dieser Preisentwicklung ist, wie auch Abbildung 3-15 zeigt, die Attraktivität aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Elektromobilität gegeben. Nach SCHRIEBER (2011), der den Toyota Prius HEV mit dem PHEV vergleicht, ist aktuell kein finanzieller Vorteil durch ein größer dimensioniertes elektrisches Antriebssystem vorhanden. Tritt die Prognose von McKINSEY (2012) in seinen wesentlichen Elementen ein, so rücken PHEVs als technische Lösung weiter in den Fokus. Sie bieten unabhängig von der Batteriekapazität uneingeschränktes Reichweitenverhalten durch den vorhandenen Verbrennungsmotor und haben dadurch einen wesentlichen Vorteil gegenüber rein elektrischen Fahrzeugen. Zwar wird eine Verbesserung der Speicherfähigkeit bis 2020 von bis zu 50 % für realistisch gehalten, doch besteht auch dann die Problematik der begrenzten Reichweite.

Wird neben der betriebswirtschaftlichen Analyse untersucht, welche Nutzer welche Vorteile von einem PHEV haben, trifft man in vielen Fällen auf Untersuchungen von durchschnittlichen Nutzungsverhalten oder der Quantifizierung des Mehrwert auf Basis bestehender PHEV-Konzepte. Eine bedarfsgerechte

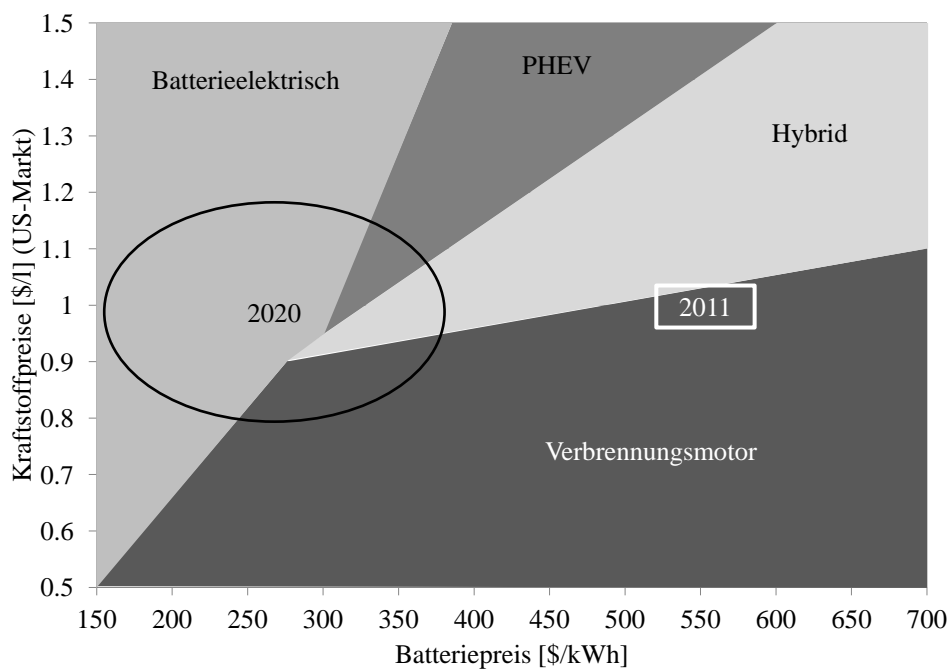


Abbildung 3-15: Batteriekosten nach McKinsey (2012)

Auslegung und eine systematische Herangehensweise zur Auslegung des elektrischen Antriebssystems liegt für PHEV-Antriebe nicht vor. Um eine bedarfsgerechte Auslegung überhaupt darzustellen, ist es notwendig, das Nutzungsverhalten in seinen verschiedenen Ausprägungen zu analysieren. In Folge muss eine Aufbereitung stattfinden um es in Anforderungen für eine Systemauslegung zu dimensionieren. RIED ET AL. (2013) verfolgt die Bewertung eines entwickelten Konzepts für einen ausgewählten Benutzer, doch erfolgt keine Analyse des Nutzungsverhaltens. TAKEUCHI ET AL. (2012) bewertet ebenfalls ein existierendes Konzept unterscheidet aber nicht unterschiedliche Nutzungsverhalten, sondern verschiedene Märkte, die analysiert wurden. BALAZS ET AL. (2012) analysiert eine Auslegung am Beispiel der kundennahen Artemis-Zyklen. Unabhängig von einer möglichen Systemdimensionierung weist er Nutzungspotentiale aus und beschreibt den Vorteil des PHEVs im urbanen Umfeld. Weder eine Nutzungsanalyse, noch eine spezifische Systemauslegung werden durchgeführt, zumal die gewählten Fahrzyklen kein repräsentatives Nutzungsverhalten ersetzen können. Auch ist eine Betrachtung unterschiedlicher Nutzungsverhalten notwendig. Eine Auslegung auf Grundlage eines mittleren Nutzungsverhalten ist für PHEVs nicht zielführend. Die Reduktion eines Systemnutzens bei abweichendem Nutzungsverhalten ist hier schlicht zu groß. RICHARDSON ET AL. (2012) entwickelt ein Konzept auf Basis einer Umfrage. Daraus entnimmt er einen Wert für die Systemdimensionierung. Die Möglichkeit verschiedener Nutzungsverhalten hinter diesem verwendeten Wert sieht er aber nicht. DIESS (2013) identifiziert unterschiedliche, marktspezifische Nutzungscharakteristika, die sich in für die Auslegung relevanten Ausprägungen unterscheiden. Doch ergeben sich in diesem Fall die Eigenschaften als Mittelwerte verschiedener Fahrzeugmodelle ohne die Streuung des Nutzungsverhalten der unterschiedlichen Kunden zu betrachten.

Ein geeigneter Bereich der Nutzung für PHEVs wird für Anwender gesehen, die einen bestimmten Anteil an Nutzungstagen haben, die mit batterieelektrischen Fahrzeugen nicht darstellbar sind. Die Reichweiten aktueller Elektrofahrzeuge liegen im Bereich von 150 km. Beispielhaft wären hier der BMW Active E oder der Nissan Leaf zu nennen (BLESSING, 2013).

Aufgrund der niedrigen Energiedichte batterieelektrischer Speicher ist es sinnvoll, Nutzer mit einem Geschwindigkeitsschwerpunkt im städtischen Bereich abzudecken, die einen Schwerpunkt im niedrigen Tagesstrecken- oder Streckenbereich haben. Hier ist es möglich, ein elektrisches System anteilig häufiger einzusetzen und somit den Kraftstoffverbrauch wesentlich zu reduzieren. Im hohen Geschwindigkeitsbereich kann der Verbrennungsmotor sehr effizient betrieben werden, was zudem für einen elektrischen Betrieb im niedrigen Geschwindigkeitsbereich spricht, wie auch Abbildung 3-7 veranschaulicht. Entscheidende Parameter für die Nutzung sind die Tagesstreckenverteilung und die Streckenverteilung abhängig von der Geschwindigkeit, aber auch das Ladeverhalten. Das Ladeverhalten hat großen Einfluss auf den Nutzen eines PHEVs. Der Name des PHEV impliziert, dass mit dem Ladeverhalten ein wesentlicher Stellhebel besteht, um den Nutzen zu beeinflussen.

Eine durchgeführte Studie in den Vereinigten Staaten von Amerika hat das Ladeverhalten in Abhängigkeit von Ladeinfrastruktur und abhängig davon untersucht, ob ein Elektroauto oder ein PHEV genutzt wurde. Insgesamt nahmen über 7000 Fahrzeuge an der durchgeführten Studie teil. Die BEVs waren Fahrzeuge vom Typ Nissan Leaf, der PHEV war ein Chevrolet Volt. Die Datenmenge umfasst eine Fahrstrecke von 60 Mio. Meilen und 1,6 Mio. Ladevorgänge bei knapp 7000 privaten Ladestationen und rund 2500 öffentlichen Ladepunkten. Ergebnis war, dass mit der Anzahl zur Verfügung gestellter Ladepunkte das Ladeverhalten positiv beeinflusst werden kann. Doch finden im Durchschnitt über 75 % der Ladevorgänge an der privaten Ladestation statt. Zudem ist ein Ergebnis, dass mit PHEVs häufiger geladen wird, als mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). So liegt die Häufigkeit für PHEVs durchschnittlich bei 1,4 Ladevorgängen pro Fahrtag, wohingegen sie bei BEVs bei 1,1 Ladevorgängen pro Fahrtag liegt. Die durchschnittliche Strecke zwischen zwei Ladevorgängen lag bei den vermessenen PHEVs bei rund 45 km (ECOTALITY, 2012).

Wird nicht mit einer entsprechenden Häufigkeit geladen, so wird aus dem PHEV ein gewöhnlicher Hybrid (analog Kapitel 3.5) mit den Nachteilen des Mehrgewichts durch das große elektrische Antriebssystem. Durch das Mehrgewicht kann der Vorteil mitunter komplett verschwinden. Ein proaktives Ladeverhalten, eine entsprechende Infrastruktur vorausgesetzt, kann den Nutzen eines PHEVs, sofern er die genannten Nutzungsparameter erfüllt erheblich steigern, auch wenn lediglich ein kleines elektrisches Antriebssystem installiert ist. Wird jedoch die Möglichkeit des Ladens kaum in Anspruch genommen, so ist auch der Nutzen eines großen elektrischen Antriebssystems sehr begrenzt.

Dies wirft die Frage auf, wie klein kann ein PHEV-System ausgelegt werden? Diese Frage trifft auch den Kern des im folgenden Kapitel vorgestellten Vorgehens, entsprechend dem Nutzungsverhalten ein möglichst kleines System mit großem Nutzen auszulegen. Bisherige Betrachtungen analysieren das Nutzungsverhalten, doch verwenden sie durchschnittliche Werte als Referenz für die Auslegung und das Ableiten von Anforderungen. Durch die Betrachtung durchschnittlicher Nutzungsdaten gehen Informationen verloren, die für die Qualität von Anforderungen maßgeblich sind. Diese durchschnittlichen Daten sind ein guter erster Richtwert, doch kann das Nutzungsverhalten im hohen Maße davon abweichen, so dass der Mehrwert des entwickelten Systems sehr gering ist. VAN LAMSWEERDE & LETIER (1998) beschreibt dies als zu ideale Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt.

Letztlich bedeutet das: Sollen Nutzungsdaten in geeignetem Umfang für die Ableitung von Anforderungen verwendet werden, müssen zunächst für PHEVs geeignete Nutzer identifiziert werden. Für diese Nutzer soll es möglich sein, Anforderungen für ein bedarfsgerechtes elektrisches Antriebssystem für PHEVs zu generieren und Vorschläge für eine Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems zu entwickeln.

# 4 Initialauslegung des elektrischen Antriebssystems für PHEVs

Das vorliegende Kapitel beschreibt das entwickelte Vorgehen zur bedarfsgerechten, initialen Auslegung eines elektrischen Antriebssystems für Plug-In Hybride.

## 4.1 Zentrale Bewertungsgrößen und Umfang der Initialauslegung

Zu Beginn werden Begrifflichkeiten und Umfang der Bewertung aufgezeigt und beschrieben.

### 4.1.1 Einführung von Begrifflichkeiten

Dieses Kapitel umfasst die Vorstellung eines Vorgehens zur Auslegung eines elektrischen Antriebssystems für Plug-In Hybrid Antriebsstränge. Die hierfür verwendeten Begrifflichkeiten werden im Folgenden in ihrer Bedeutung beschrieben.

- **Nutzungspotential:** Mit der Elektrifizierung des Antriebsstranges wird das Ziel verfolgt, dem Nutzer Vorteile in Form eines reduzierten Kraftstoffverbrauch zu ermöglichen. Das kann durch einen hohen Anteil elektrisch zurückgelegter Strecke realisiert werden. Dieser hängt von der Systemdimensionierung des elektrischen Systems auf der einen Seite und dem Mobilitäts- und Nutzungsverhalten auf der anderen Seite ab. Zur Berechnung dieses Vorteils wird das Nutzungspotential als zweistufige Bewertungsgröße eingeführt. In der ersten Stufe erfolgt eine Berechnung der Höhe der Kraftstoffsubstitution abhängig von einer nutzbaren, installierten elektrischen Reichweite und einer elektrischen Geschwindigkeit. Diese basiert auf vermessenen Felddaten konventioneller Fahrzeuge. In der zweiten Stufe erfolgt eine Berechnung der Höhe der Kraftstoffsubstitution abhängig von der installierten elektrischen Energie im Hochvoltspeicher. Relevante Größen wie Fahrzeugparameter (z.B. Masse, Rollwiderstand, Klimatisierungsbedarf) oder Energieintensität der Nutzung (z.B. sportlich, sparsam) finden Berücksichtigung. Auch diese Berechnung des Nutzungspotentials basiert auf der Verwendung vermessener Fahrzeugnutzer. Das Nutzungspotential in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt nicht die Substitution des Kraftstoffverbrauchs im ladungserhaltenden Hybridbetrieb.

Die Berechnung des Nutzungspotentials wird in Kapitel 4.5.1 detailliert ausgeführt.

- **Zykluspotential:** Das Zykluspotential beschreibt die Verbrauchsreduktion eines Fahrzeug mit Plug-In Hybrid Antriebsstrang zu einem vergleichbaren Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang in dem gleichen gesetzlichen Fahrzyklus. Der Kraftstoffverbrauch als Referenz für die Reduktion setzt sich aus der ermittelten Reichweite im CD-Mode und dem erzielten Kraftstoffverbrauch im CD und CS-Mode zusammen. Die Zusammensetzung der Zyklusverbräuche ist marktspezifisch. Einzelne Märkte haben Fahrzyklen mit zugrundeliegenden Randbedingungen, auf Basis derer die Zyklusverbräuche unter bestimmten Randbedingungen ermittelt werden. Das Zykluspotential ist mit einem festgelegten Fahrzeug zu ermitteln.
- **Nutzungstyp:** Ein Nutzungstyp beschreibt die Ausprägung eines Nutzungsverhaltens. Der Nutzungstyp trifft eine Aussage über die Höhe des Energiebedarfs pro Kilometer in Wh/km, die ein



Nutzer im Durchschnitt für das Zurücklegen eines Kilometers für einen festgelegten Geschwindigkeitsbereich benötigt. Diese Größe kann nur mit einem ausgewählten Fahrzeug ausgewiesen werden, da vorhandene Fahrwiderstände und Antriebstopologien und -komponenten Einfluss nehmen. Rekuperierte Energie aus Bremsvorgängen sind in diesem Wert bereits enthalten.

#### **4.1.2 Detaillierung des Nutzungspotentials in Abhängigkeit vom Nutzungsverhalten als zentrale Bewertungsgröße**

Die Substitution des Kraftstoffverbrauchs durch elektrisches Fahren ist der zentrale Vorteil eines Fahrzeugs mit PHEV Antriebsstrang. Das Nutzungsverhalten und somit die Systemnutzung bestimmt die Höhe der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs für ein festgelegtes elektrisches Antriebssystem im Fahrzeug. Kerngrößen der Systemdimensionierung bilden die installierte elektrische Leistung, sowie die nutzbare elektrische Energie im CD- Modus. Das zusätzliche Gewicht, das das elektrische Antriebssystem mit sich bringt, reduziert den Nutzen, da der Energiebedarf pro Kilometer im Fahrbetrieb dadurch erhöht wird.

Für diese Arbeit wurde mit dem Nutzungspotential eine Größe entwickelt, die bemisst, wie viel anteilig am gesamten Energiebedarf für die Fahraufgabe durch den elektrischen Antriebsstrang abgedeckt werden kann. Die Berechnung der Höhe der Kraftstoffsubstitution kann auf verschiedenen Abstraktionsebenen des Systems erfolgen. Es wurden zwei Ebenen der Abstraktion gewählt, um in dem vorgestellten Vorgehen von der Vermessung von Nutzern auf Anforderungen für das elektrische Antriebssystem zu gelangen. Zunächst wird das Nutzungspotential auf den zwei gewählten Abstraktionsebenen vorgestellt, den das nachfolgend vorgestellte Vorgehen im Kern behandelt.

Auf der lösungsunabhängigen Ebene wird das Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich berechnet. Es ergeben sich in Abhängigkeit von Tagesstreckenverhalten sowie der Strecken- und Verbrauchsverteilung, die über die Geschwindigkeit variieren, verschiedene Substitutionsgrade. Diese Substitutionsgrade gelten unter der Bedingung, dass die geforderte Reichweite jederzeit verfügbar ist und der vorgegebene Bereich des elektrischen Fahrens jederzeit technisch darstellbar ist. Die angenommene elektrische Reichweite ist unabhängig von einer festgelegten Antriebstopologie oder einem gewählten Fahrzeug. Der Einfluss des Nutzungstyps kommt ebenfalls nicht zum Tragen, da die elektrische Reichweite analog Abbildung 4-1, oberer Teil, unabhängig von diesen Einflussgrößen ist.

Die lösungsabhängige Betrachtung analysiert das Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Energie in Kilowattstunden (kWh), die für elektrisches Fahren im CD-Modus verfügbar ist. Für diese Größe spielen zusätzlich die Fahrzeugparameter als auch die Art der Fahrzeugnutzung eine entscheidende Rolle, da sie unmittelbar den Energiebedarf und somit auch das Nutzungspotential beeinflussen. Dazu werden auch der Bedarf von Bordnetz, Klimatisierung oder das zusätzliche Fahrzeuggewicht gezählt. Mit diesen Größen kann analog Abbildung 4-1, unterer Abschnitt, ein Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Energie berechnet werden. Diese Elemente sind Bestandteile, die den Energiebedarf pro Kilometer abhängig von der Geschwindigkeit beeinflussen.

Ergebnis der Bewertung ist eine Aussage für das Nutzungspotential in Abhängigkeit von einer installierten elektrischen Reichweite oder einer installierten elektrischen Energie und eines festgelegten elektrischen Fahrbereichs. Beide Größen können für verschiedene Nutzungsverhalten angewendet werden. Das Nutzungspotential einer installierten elektrischen Energie kann in Abhängigkeit von unterschiedlichen Nutzungstypen, Fahrzeuggrößen, Topologien und Randbedingungen entwickelt und berechnet werden.

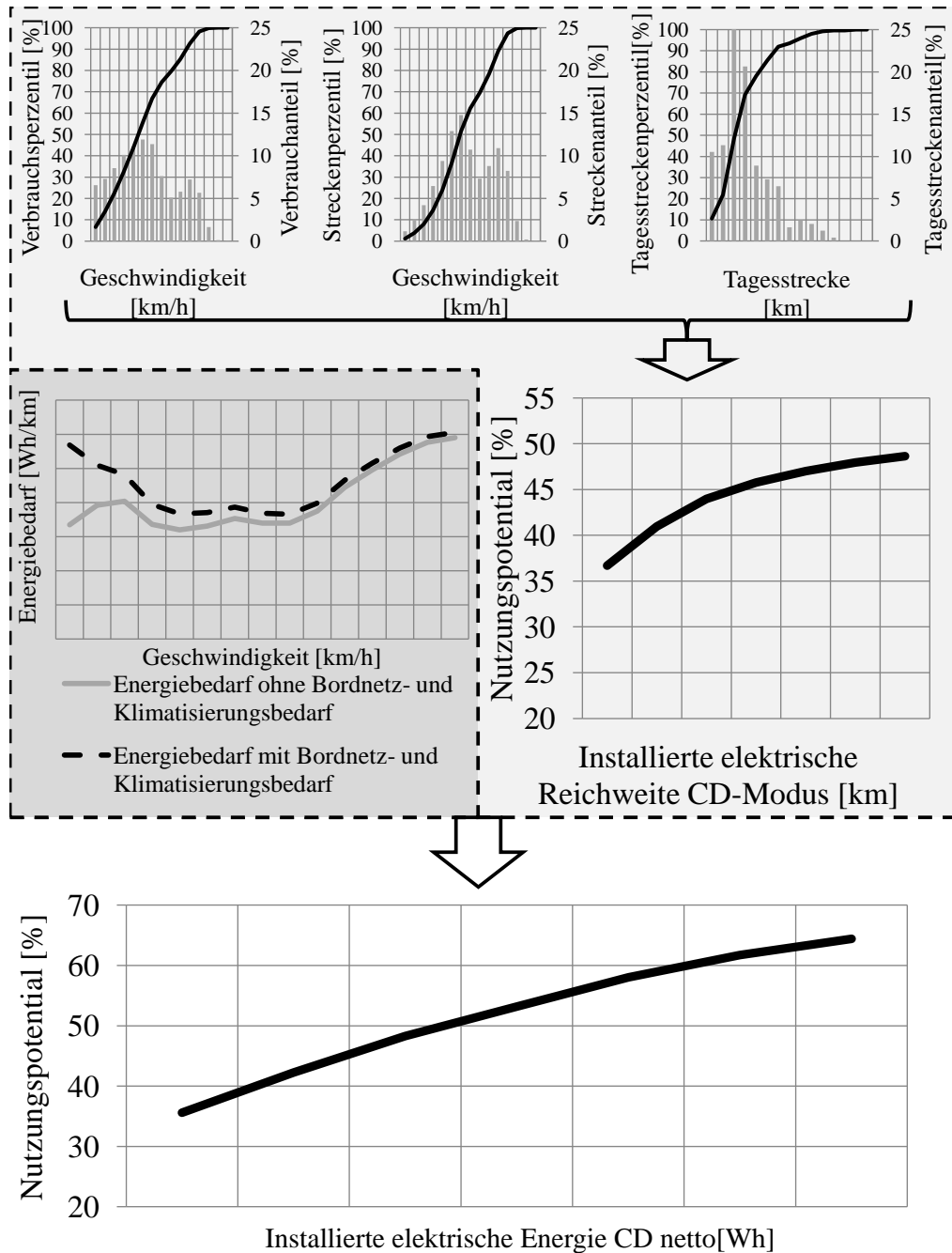


Abbildung 4-1: Systemmehrwert als Funktion der installierten elektrischen Reichweite und der installierten elektrischen Energie

### 4.1.3 Überblick des Vorgehensmodells zur Systemauslegung des elektrischen Antriebssystems von Plug-In Hybriden

Das entwickelte Vorgehensmodell zur Systemauslegung des elektrischen Antriebssystems wird in drei Hauptschritte unterteilt.

- Analyse von System und Nutzer (Kapitel 4.2, 4.4, 5.2): Das Ziel dieses Schrittes ist, Anforderungen aus einem Nutzungsverhalten abzuleiten, die für die Systemskalierung notwendig sind. Grundlage ist ein Nutzungsprofil, in dem das Nutzungsverhalten für eine Initialauslegung in seinen wesentlichen Bestandteilen beschrieben wird. Voraussetzung dafür ist eine geeignete Aufbereitung des Nutzungsverhaltens. Um aus einer großen Anzahl vermessener Nutzer, Verhalten gleicher Ausprägung zu identifizieren, wird eine dafür geeignete Clusteranalyse verwendet. Die verschiedenen Nutzungsgruppen werden nach ihren Eigenschaften in Verhalten und Fahrzeugsegment einer spezifischen Nutzungsausprägung zugeordnet. Diese wird über zwei wesentliche Nutzungsparameter beschrieben.

Für das PHEV-System werden die Zusammenhänge zum entwickelten Nutzungsprofil und Nutzungsverhalten hergestellt. Dieser Schritt ist notwendig, um im nächsten Hauptschritt Nutzungsanforderungen in technische Anforderungen an das System zu übersetzen.

- Systemskalierung und Auslegung (Kapitel 4.5): Die Systemskalierung beruht auf der Nutzungsanalyse und hat zum Ziel, Aussagen für das Nutzungspotential basierend auf einer installierten elektrischen Reichweite oder einer elektrisch installierten Energie im CD-Modus zu treffen. Dafür wird auf Parameter des Nutzungsverhaltens zurückgegriffen. Für eine Aussage über den elektrischen Energieinhalt werden fahrzeugspezifische Parameter, sowie den Nutzer detaillierter beschreibende Eigenschaften hinzugenommen. Mit dieser Initialauslegung kann in Folge eine Komponentenauslegung erfolgen, mit der wiederum noch detailliertere energetische Bewertungen möglich sind.
- Validierung der Größe des Nutzungspotentials und Bewertung der Systemauslegung (Kapitel 6.3): Im ersten Schritt wird die entwickelte Größe des Nutzungspotentials validiert, indem mit einem Simulationsmodell die Aussage der Substitutionshöhe des Energiebedarfs parallel berechnet wird. Das Ziel des PHEVs ist es, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Bis zu diesem Zeitpunkt im Vorgehen wurde nur das Potential für den Nutzer evaluiert. Nun sollen auch gesetzliche Zyklen für die entwickelte Auslegung untersucht werden. Dazu kommt, dass nicht nur die  $CO_2$ -Emissionen im Betrieb, sondern ebenfalls die in der Herstellung und dem Recycling von Bedeutung sind. Eine Untersuchung, basierend auf realen Nutzungsdaten erhöht die Qualität dieser Betrachtung über den gesamten Produktlebenszyklus. Eine weitere Analyse vergleicht den Kraftstoffverbrauch mit einem konventionellen Fahrzeug. Wie groß ist die Einsparung zu beispielsweise einem hocheffizienten Vergleichsfahrzeug mit Benzinmotor?

## 4.2 Nutzungsverhalten und technisches System im Fokus

Im folgenden Kapitel wird das Nutzungsverhalten in seinen maßgeblichen Bestandteilen analysiert. Dazu erfolgt eine Untersuchung des Plug-In Hybrid Antriebssystems um wesentliche Zusammenhänge zum Nutzungsverhalten zu identifizieren.

### 4.2.1 Analyse des Nutzungsverhaltens

Das Ziel der Analyse des Nutzungsverhaltens ist, die Kondensation auf seine ausschlaggebenden Bestandteile und eine geeignete Form zu identifizieren, so dass Anforderungen für die nutzungsorientierte Systemauslegung abgeleitet werden können. Dazu wird in Folge analog Abbildung 4-2 das Nutzungsverhalten zunächst in Tagesprofile unterteilt und in Folge genauer analysiert.

Wie in Kapitel 3.6 werden bei der Analyse des Nutzungsverhaltens für elektrifizierte Antriebsstränge in

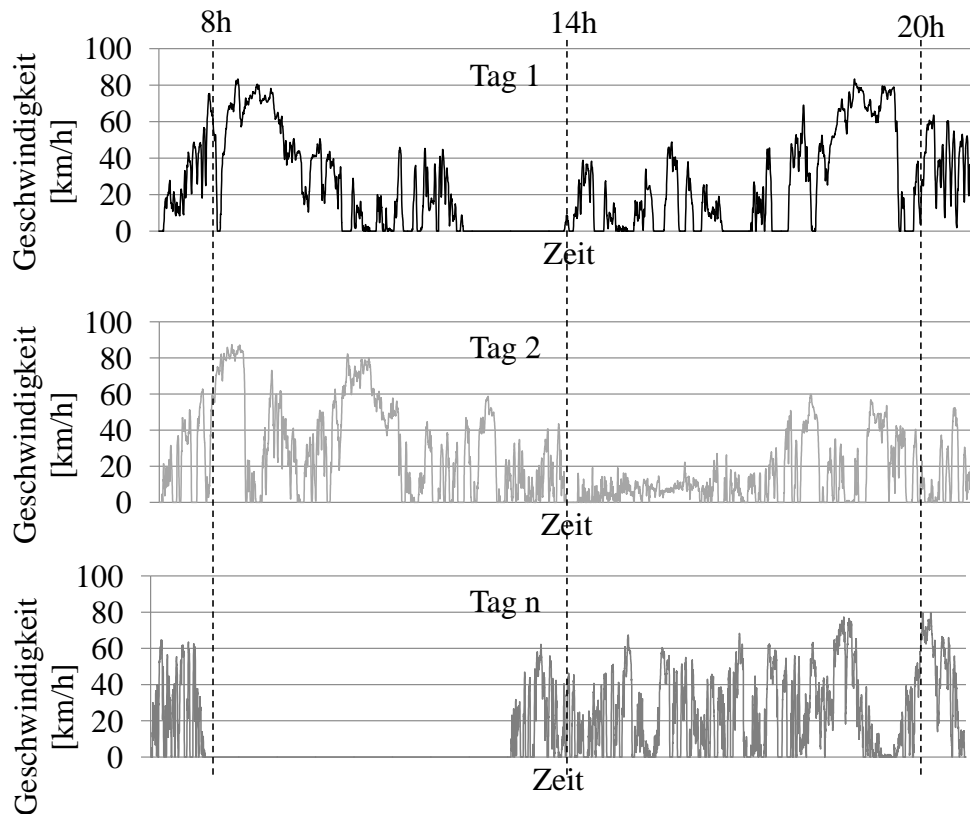


Abbildung 4-2: Detaillierte Betrachtung der Nutzer in Tagfahrprofilen

der Regel Tagesstrecken oder Einzelfahrstrecken herangezogen. Dies ist auf die geringe Energiedichte des batterieelektrischen Speichers, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, zurückzuführen. Die Möglichkeit des Ladens des Energiespeichers favorisiert die Betrachtung von Tages- oder Einzelstrecken. In Abhängigkeit vom Ladeverhalten und der Häufigkeit kann der zu analysierende Zeitraum angepasst werden. Das Ladeverhalten hat einen bedeutenden Einfluss auf das Nutzungspotential.

Die Unterteilung der Nutzung in Tagesfahrprofile ermöglicht eine Bemessung des energetischen Bedarfs. Für eine detailliertere Bewertung, beispielsweise des Ladeverhaltens, ist eine Betrachtung von Fahrdauern und Abstellzeiten in Kombination mit einer vorhandenen Ladeinfrastruktur zielführend. Für die vorliegende Arbeit wird neben der Tagesstreckenverteilung zusätzlich die Verbrauchsverteilung abhängig von der Geschwindigkeit untersucht (Abbildung 4-3, Abbildung 4-4). Mit Hilfe dieser Größen, sowie zusätzlich dem Energiebedarf pro Kilometer, der auch eine nutzungsspezifische Größe wiedergibt, können die für die Berechnung notwendigen Größen analysiert und ermittelt werden. Die Tagesstreckenverteilung ist, wie bereits erwähnt, eine Schlüsselgröße für die Dimensionierung des elektrischen Energiespeichers. Neben dieser Größe wird die Verteilung des Kraftstoffverbrauchs über der Geschwindigkeit

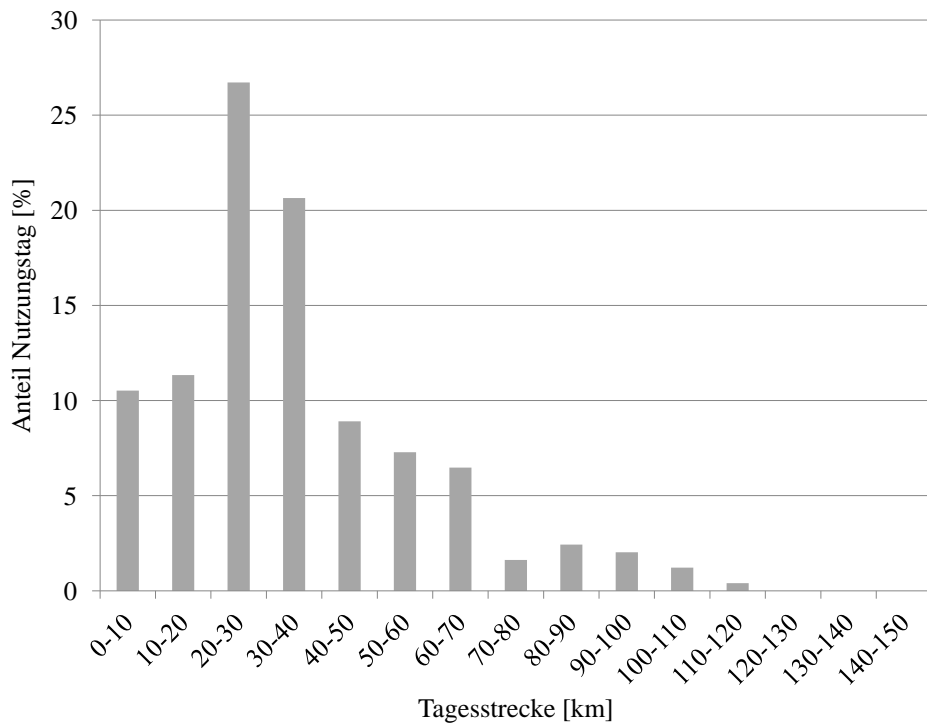


Abbildung 4-3: Beispielhafte Tagesstreckenverteilung

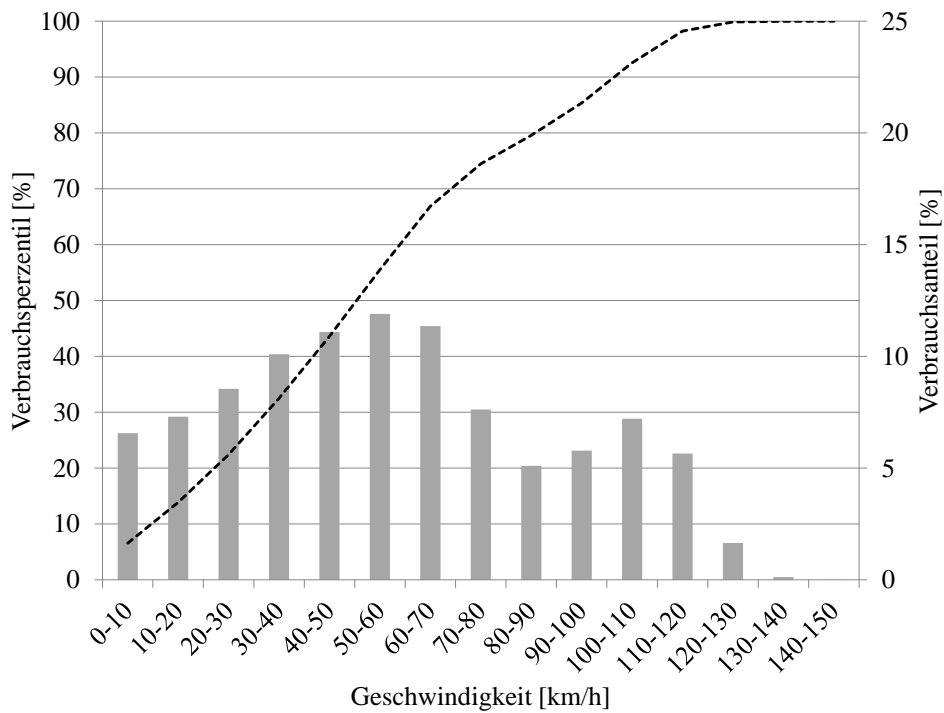


Abbildung 4-4: Beispielhafte Verbrauchsverteilung abhängig von der Geschwindigkeit

analysiert. Dieser Parameter ist ein Maß für den Energieumsatz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Diese Größe hat wesentliche Aussagekraft darüber, in welchen Geschwindigkeitsbereichen anteilig mehr Kraftstoffverbrauch und somit Energie umgesetzt wird. Diese Analyse unterstützend wird die Streckenverteilung abhängig von der Geschwindigkeit analog Abbildung 4-5 betrachtet. Die Verteilung des Energiebedarfs über der Geschwindigkeit kann je nach gewähltem Verbrennungsmotor unterschiedlich sein. Werden die zwei genannten Auswertungen kombiniert, so erhält man eine wertvolle Aussage dar-

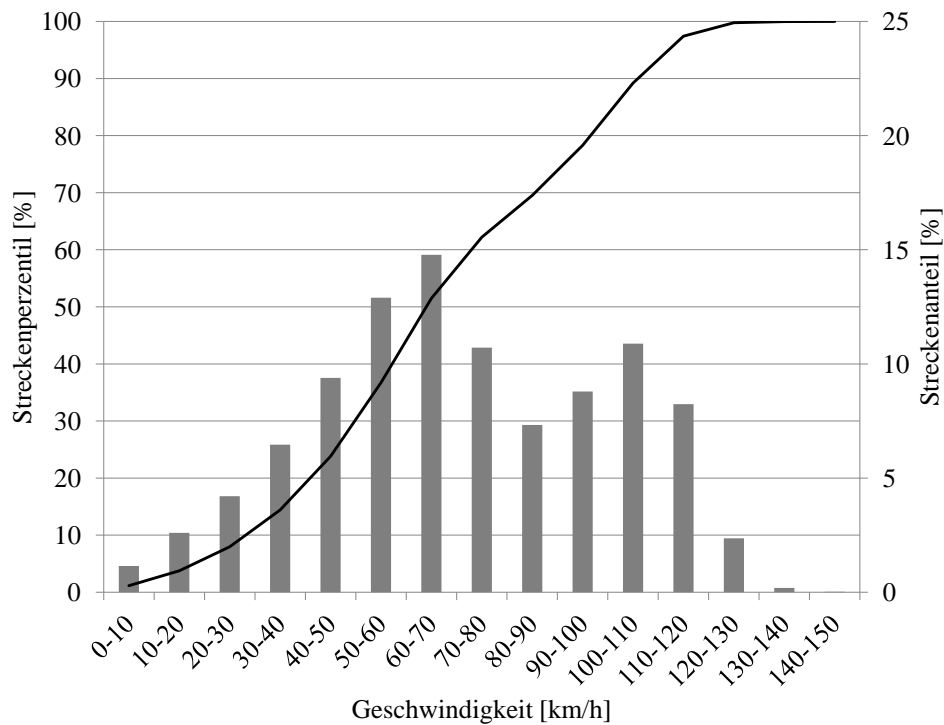


Abbildung 4-5: Beispielhafte Streckenverteilung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

über, in welchen Geschwindigkeitsbereichen große Anteile der gefahrenen Strecke zurückgelegt werden und entsprechend viel Energie umgesetzt wird.

Im nächsten Schritt wird das Nutzungsverhalten detailliert analysiert. Ausgangspunkt ist eine Untersuchung der Dynamik im Fahrverhalten. Dynamik soll für die vorliegende Arbeit mit der vorgestellten physikalischen Größe des Nutzungstyps beschrieben werden. PESARAN & LABORATORY (2009) verwendet diese Größe ebenfalls, um Anforderungen für die Dimensionierung der Batterie zu formulieren. Er weist den Wert unabhängig von der Geschwindigkeit aus und spezifiziert lediglich zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen und Betriebsmodi. Diese Betriebsmodi unterscheiden sich unter anderem in der Geschwindigkeit. WALLENTOWITZ ET AL. (2010) verwendet diese Größe ebenso für die gesetzlichen Zyklen. Er differenziert verschiedene Fahrzeuggrößen nach dem Energiebedarf pro Kilometer für betrachtete Referenzfahrzyklen. Dieses Vorgehen erlaubt, verschiedene Nutzungstypen zu identifizieren und die Energiebedarfe für verschiedene Fahrzeugklassen und Nutzungstypen zu analysieren. Dazu ist es möglich, neben dem Energiebedarf für die Fahraufgabe zusätzlich Energiebedarfe für Klimatisierung bei unterschiedlichen Außentemperaturen, sowie das Bordnetz analog Abbildung 4-6 zu berücksichtigen. Damit ist eine Bewertung bei wechselnden Randbedingungen für unterschiedliche Nutzungstypen auf das Nutzungspotential möglich.

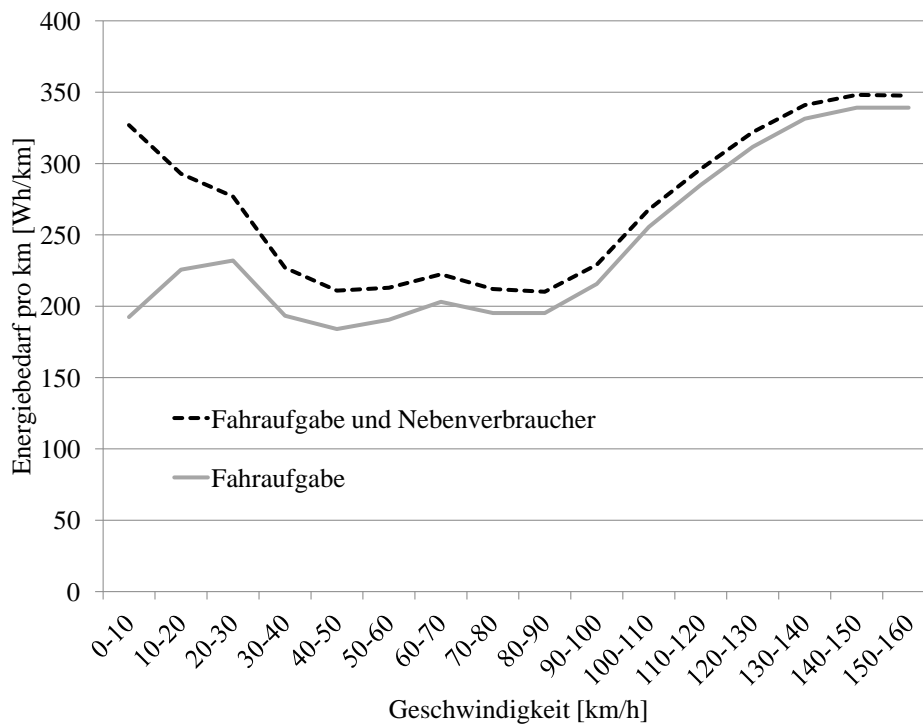


Abbildung 4-6: Energiebedarf abhängig von der Geschwindigkeit

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Nutzungsverhalten ist das Beschleunigungsverhalten und die damit verbundene Leistungsdimensionierung. Dieses kann sehr vielfältig analysiert und ausgewertet werden. Auch gibt es etliche Größen, wie Beschleunigungshöhe, Geschwindigkeit, Beschleunigungsdauer oder die Abfolge von Beschleunigungen, die untersucht werden könnten. Da die Auswertung der Nutzungsdaten für eine Initialauslegung in der frühen Phase des PEP (vgl. Kapitel 2.1.1) durchgeführt wird, die zudem fahrzeugunabhängig erfolgt, soll für diese Betrachtung das Beschleunigungsverhalten über die Geschwindigkeit analog Abbildung 4-7 analysiert werden. Diese Abbildung zeigt die Zeitanteile für verschiedene Geschwindigkeiten und entsprechende Beschleunigungswerte. Die Daten stammen von einem Nutzer, der über den Zeitraum eines halben Jahres vermessen wurde. Geschwindigkeits- und Beschleunigungsanteile wurden in die abgebildete Darstellung überführt. Die Abbildung zeigt, dass in dem zugrundeliegenden Nutzungsverhalten der Schwerpunkt der Beschleunigungsanteile bei ca. 60 km/h im Bereich bis ca.  $0,75 \text{ m/s}^2$  liegt.

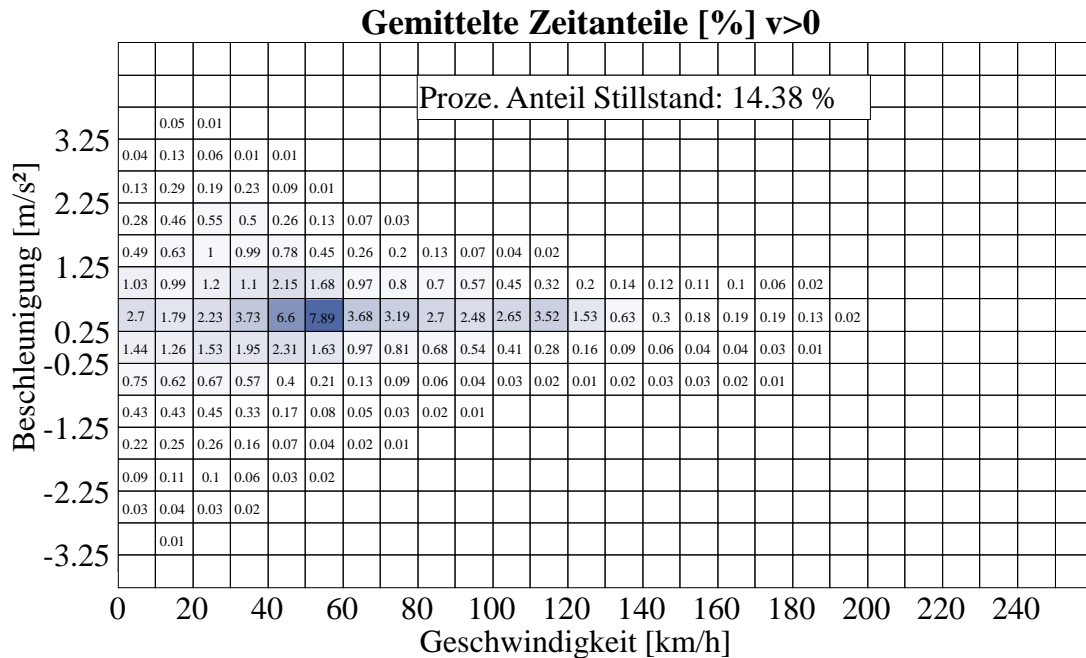


Abbildung 4-7: Beispielhaftes Beschleunigungsverhalten abhängig von der Geschwindigkeit

Diese Analyse kann durch sogenannte Perzentilkurven erweitert werden. Diese weisen Beschleunigungswerte für entsprechende Geschwindigkeiten auf, an denen zu z.B. 90% der Zeit der Beschleunigungen der Nutzer erfasst wären.

#### 4.2.2 Beschreibung Nutzungsprofil

Die analysierten Nutzungsdaten sollen für eine Initialdimensionierung des elektrischen Antriebssystems verwendet werden. Dazu ist es notwendig, die Daten für einen Nutzer in eine standardisierte Form zu überführen. Um eine Initialauslegung darstellen zu können, bedarf es folgender Nutzungsgrößen:

- Tagesstreckenverteilung
- Verbrauchsverhalten abhängig von der Geschwindigkeit
- Streckenanteile abhängig von der Geschwindigkeit
- Beschleunigungsverhalten

Mit den aufgeführten Nutzungsgrößen sollen unabhängig von einem ausgewählten Fahrzeug oder einer festgelegten Topologie des Antriebsstrangs Aussagen für das Nutzungspotential getroffen werden. Um eine fahrzeugabhängige Bewertung des Nutzungspotentials umzusetzen, werden folgende, lösungsabhängige Größen zusätzlich analysiert:



- Wahl der Fahrzeugklasse
- Wahl des Nutzungstyps (Energiebedarf pro Kilometer in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit)
- Randbedingungen (Ladeprämisse, Temperaturbereich)

Abbildung 4-8 zeigt die beschriebenen Größen in eine Benutzeroberfläche integriert. Hinter dieser Benutzeroberfläche ist die Berechnung des Nutzungspotentials für die verschieden abstrahierten Systemmodelle hinterlegt. Damit erfolgt die Berechnung des Nutzungspotentials (KÜPPER, 2013) in Kapitel 4.5.1.

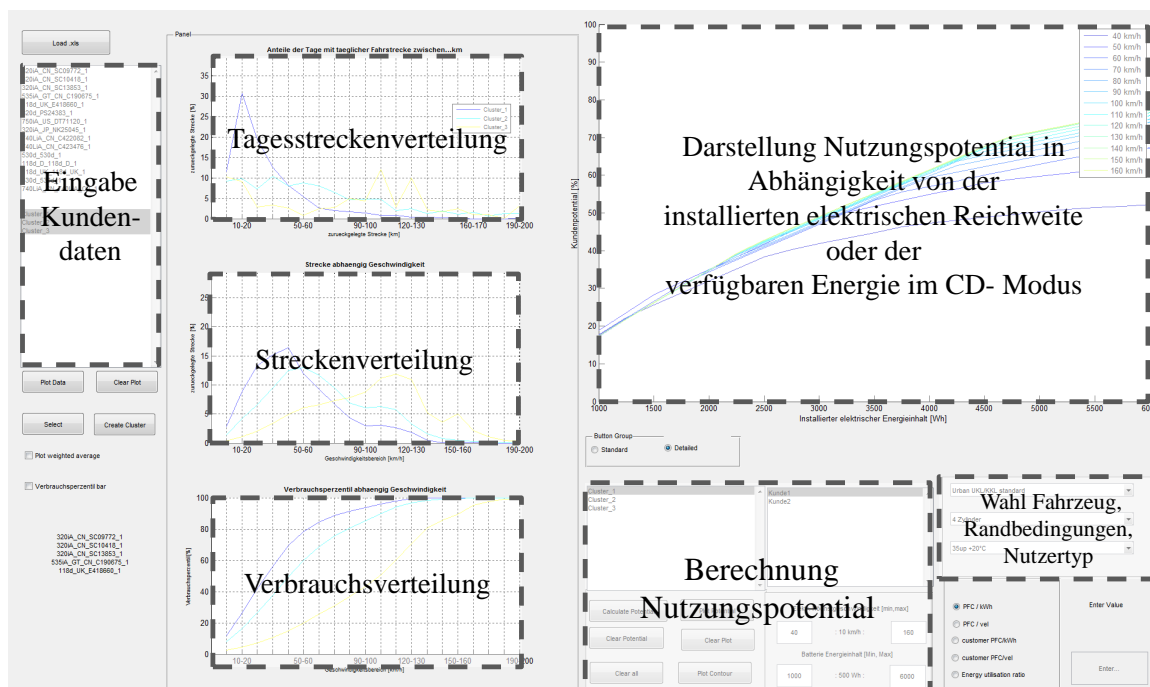


Abbildung 4-8: Benutzeroberfläche zur Berechnung des Nutzungspotentials

### 4.2.3 Analyse des elektrischen Antriebssystems

Für die vorliegende Betrachtung wird das elektrische Antriebssystem eines PHEV als die verfügbare elektrische Leistung des gesamten elektrischen Antriebssystems und die elektrisch nutzbare Energie aus dem elektrischen Energiespeicher festgelegt. Daraus ergeben sich in Kombination mit Fahrzeugparametern wie Fahrzeugmasse oder Rollwiderstand darstellbare Fahrfunktionen. Diese vereinfachte Systembeschreibung dient dazu, die wesentlichen Zusammenhänge für das elektrische Antriebssystem aufzuzeigen. Viele, von der Auswahl des Fahrzeugs abhängige Größen, als auch nutzungsspezifische Eigenschaften beeinflussen die Festlegung der Leistung und der Anforderung an den elektrischen Energieinhalt im Speicher.

Beginnend mit der Anforderung für die elektrische Leistung und für den elektrischen Energiebedarf können die unmittelbaren Einflussparameter auf diese Systemgrößen identifiziert werden.

Die Beschleunigungsanforderung für eine gewählte Geschwindigkeit bestimmt die Leistungsanforde-

ung an die elektrische Maschine maßgeblich. Dies kann wiederum abhängig vom Nutzer sein, oder auf einen gesetzlichen Fahrzyklus referenzieren. Dazu sind Fahrzeugparameter wie geometrische Abmessungen, eine Masse, Rollwiderstände aber auch die Topologie des Antriebsstrangs zu berücksichtigen. Die unmittelbaren Einflussfaktoren auf die zwei Systemgrößen sind in Abbildung 4-9 veranschaulicht. Die Anforderungen für eine elektrische Leistung gelten gleichermaßen für den batterieelektrischen Spei-

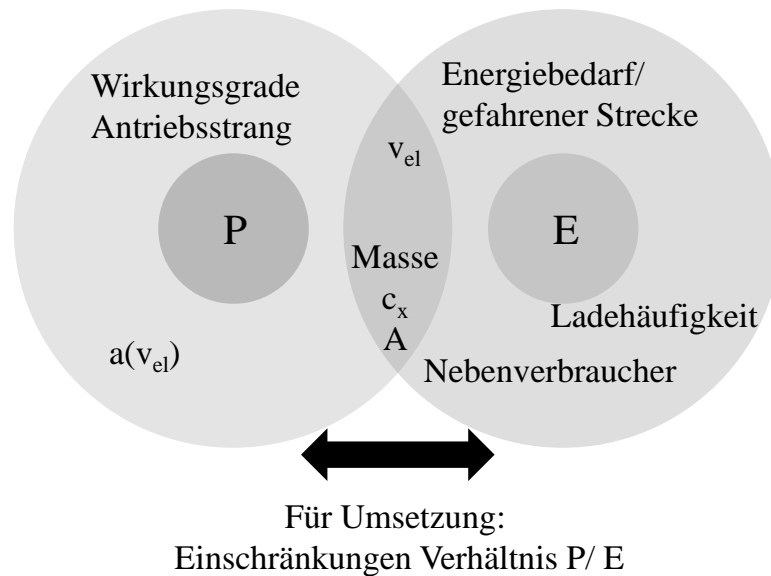


Abbildung 4-9: Einflüsse auf Systemleistung und Energie

cher. Diese Anforderungen sind im Gegensatz zu den Leistungsanforderungen der elektrischen Maschine unabhängig von der Geschwindigkeit. Wesentlich ist, dass die Anforderungen für die elektrische Leistung an das System zeitinvariant darstellbar sein sollte. Hohe Leistungsanforderungen über eine festgelegte Zeit können dazu führen, dass der batterieelektrische Speicher in der Leistungsbereitstellung degradiert. Dies ist in den hohen Strömen, die aus der Leistung resultieren, begründet. Die Degradation ist eine präventive Reduktion der bereitgestellten Leistung zum Schutz des Systems (NIES ET AL., 2012a). Für die elektrische Maschine kann das gleiche Phänomen auftreten, für den Fall, dass sie in Überlast betrieben wird.

Wird der elektrische Energiebedarf analysiert, so hängt dieser sowohl von geometrischen Größen als auch von der gewählten elektrischen Fahrgeschwindigkeit ab. Wie in Kapitel 4.2.1 dargelegt, ist der Energiebedarf abhängig vom Fahrertyp zu ermitteln und die Randbedingungen sind festzulegen.

Der elektrische Energiebedarf hängt von vier wesentlichen Größen ab:

- Geschwindigkeitsbereich elektrischen Fahrens
- Energiebedarf pro gefahrener Strecke (abhängig von der Fahrzeuggröße, gewählter Topologie und Nutzungstyp)
- Elektrische Reichweite in Abhängigkeit von einem geforderten Verbrauchspotentials (abhängig von der Randbedingung Ladeverhalten)
- Zusätzlichen Energiebedarfe zur Fahraufgabe (Bordnetz, Klimatisierung)

Sowohl für die elektrische Antriebsmaschine, als auch für den elektrischen Energiespeicher besteht die Möglichkeit, die Anforderungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen des Systems zu formulieren.

Diese Anforderungen unterscheiden sich in ihrer Qualität, um der entsprechenden Systemmodellierung gerecht zu werden. Ziel der Systemmodellierung ist es, Anforderungen verschiedener Bereiche für Festlegung der elektrischen Leistung und der elektrischen Energie zu berücksichtigen.

Dies wird für das vorgestellte Vorgehen auf verschiedenen Ebenen der Systemabstraktion vollzogen.

Im folgenden Kapitel sollen die gewählten Systemmodelle in dem Grad ihrer Abstraktion vorgestellt werden.

#### **4.2.4 Zusammenfassung und Reflexion**

Kapitel 4.2 beschreibt den Nutzer und das elektrische Antriebssystem. Der Nutzer wird in seinem Verhalten auf die für die Initialdimensionierung relevanten Verhaltensgrößen reduziert. Eigenschaften, wie Interessen der Nutzer oder Fahrverhalten, über die GORBEA (2011) ein Kundenprofil charakterisiert werden nicht untersucht. Der Grund dafür ist, dass sie nicht für die Bewertung erfassbar sind. Es werden lediglich objektiv erfassbare Daten verwendet.

Durch die Reduktion der vermessenen Daten geht eine Menge der ursprünglich verfügbaren Informationen verloren. Für das Vorgehen wird beispielsweise eine Reduktion der Tagesfahrprofile auf Tagesstreckenbetrachtung vorgenommen. Bei Bedarf kann diese Auflösung auf eine Einzelfahrstreckenbetrachtung geändert werden. Die Vielzahl verschiedener Ausprägungen würde die Komplexität erheblich steigern. Die Berücksichtigung von Parametern wie Streckenlänge, Fahrdauer oder Standzeiten beinhaltet bereits eine hohe Vielfalt möglicher Kombinationen. Findet dann noch eine Variation für verschiedene Ladeverhalten statt, ist eine zielführende Bewertung nur eingeschränkt möglich. Vielmehr kann mit eindeutig festgelegten Randbedingungen eine Bewertung stattfinden. Die Sensitivität der Parameter kann so untersucht und bewertet werden. Die Reduktion der analysierten Parameter des Nutzungsverhaltens ermöglicht zudem, Änderungen im Verhalten selbst zu untersuchen. Dies ist z.B. dann interessant, wenn für ein verändertes Nutzungsverhalten das Nutzungspotential ermittelt werden soll.

Die Analyse des elektrischen Antriebssystems findet lediglich in den Größen der elektrischen Leistung und der elektrischen Energie statt und wird auf den Hochvoltspeicher und die elektrische Maschine referenziert. Eine Festlegung auf vorgegebene Komponenten findet nicht statt, das gestalterische Freiheiten lässt.

### **4.3 Anwendung der Systemmodellierung und Anforderungsentwicklung**

Im folgenden Kapitel 4.3 wird die Entwicklung der Anforderungen über die erstellten Systemmodelle beschrieben. Analog NIES ET AL. (2013) werden zunächst verschiedene Systemmodelle auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen entwickelt. Im Anschluss werden verschiedene Qualitätsmerkmale anhand der Anforderung für den Energiebedarf des CD-Energiehubs dargelegt.

#### **4.3.1 Darstellung der Systemmodelle**

Für das in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgehen wurden drei Systemabstraktionsebenen (SAE) erstellt. Diese dienen dazu, die Anforderungen aus einem Nutzungsverhalten in konkrete Anforderungen für die Systemauslegung zu überführen.

Startend bei Nutzungsdaten in Form eines Geschwindigkeitsprofils dienen die gebildeten Ebenen dazu Anforderungen für eine Initialdimensionierung des elektrischen Speichers und Leistungsanforderungen

zu entwickeln. Als zum technischen System abstrakteste Ebene wird analog der von BALZERT ET AL. (2009, S. 30) eine Exemplar-Ebene für das technische System PHEV betrachtet. Im Fokus stehen gemäß BALZERT ET AL. (2009) u.a. menschliche Handlungen, sowie zeitliche Abläufe. Diese menschlichen Handlungen werden unabhängig von existierenden Systemfunktion oder Lösung analysiert und sind in Abbildung 4-10 als SAE 0 gekennzeichnet. Der Zweck dieser Betrachtung ist, die Grundlage für eine später Ausleitung von Anforderungen zu legen und das Nutzungsverhalten für das Auslegungsziel aufzubereiten. Hauptbestandteile dieser Systembetrachtung sind zum einen der Nutzer, zum anderen sein Verhalten. Der Nutzer wird über die Wahl seiner Fahrzeuggröße als auch die Marktzugehörigkeit beschrieben. Sein Verhalten wird über die genannten Nutzungscharakteristika Tagesstreckenverteilung, Verbrauchsverteilung abhängig von der Geschwindigkeit sowie Streckenverteilung abhängig von der Geschwindigkeit beschrieben. Über die genannten Eigenschaften kann der Nutzer gemäß Kapitel 4.4 in der Logik des Zielsystems eingeordnet werden.

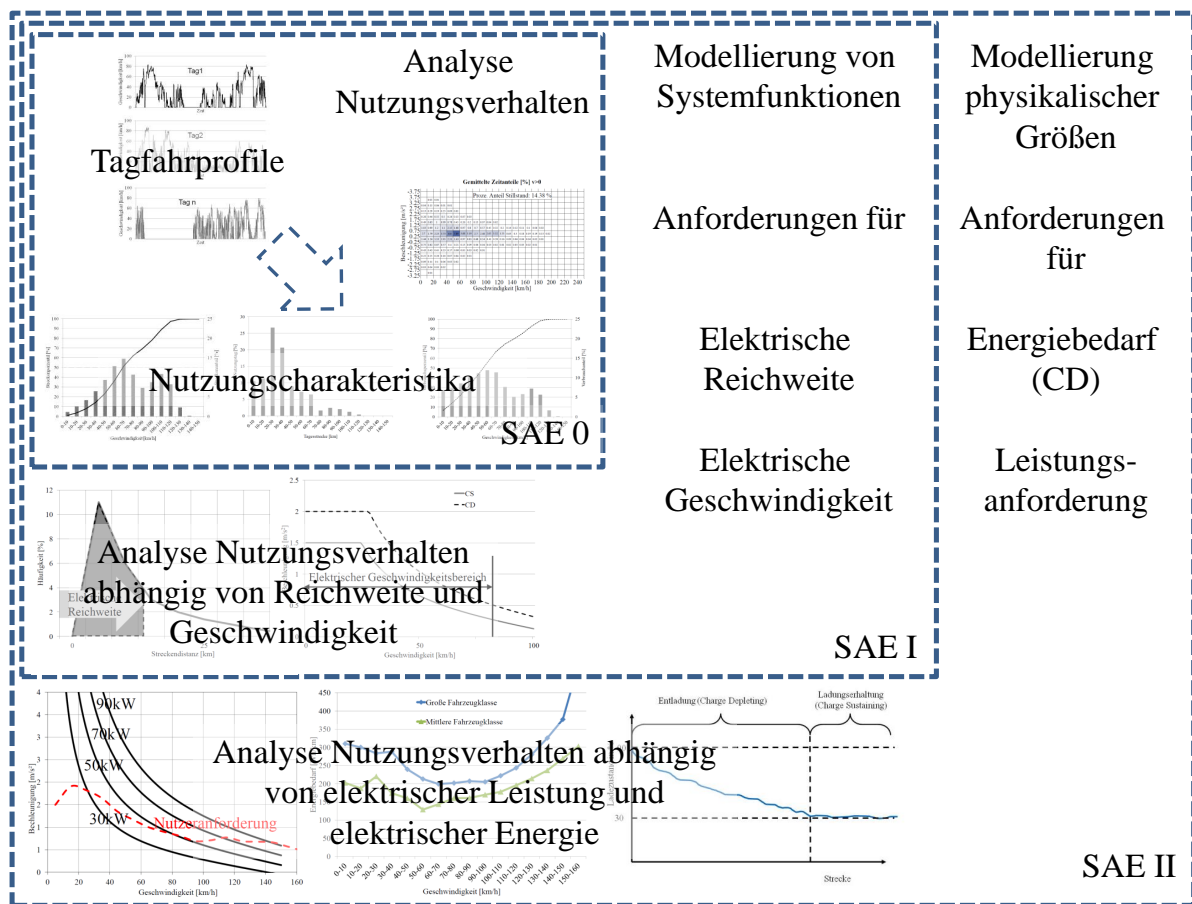


Abbildung 4-10: Systemabstraktionsebenen (SAE) im Überblick, Einzelgrafiken siehe Kapitel 3.2, 4 und 5.5

In der nächsten Systembetrachtungsstufe, der sog. SAE I, fließen Elemente der funktionalen Ebene von PORN & LINDEMANN (2011, S. 28) ein. Diese Elemente sind wichtig, um die menschlichen Handlungen in Zusammenhang mit Funktionen des auszulegenden Systems zu bringen. Das System wird in Abbildung 4-11 veranschaulicht.

Geordnet ist diese Systemebene nach Funktionen und Ausprägungen des Systems. Als wesentliche Funk-

tion liegt der Fokus auf dem elektrischen Fahren. Zielgröße dieser Systemabstraktion ist die Höhe des Nutzungspotentials abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite und Geschwindigkeit. Für die elektrische Leistung werden die Beschleunigungsanteile und -höhen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit analysiert. Die Beschleunigungshöhe sowie der Geschwindigkeitsbereich sind wesentliche Ausprägungen des elektrischen Fahrens. Die dritte Systemabstraktionsebene SAE II ist bereits eine Modellierung des elektrischen Antriebssystems auf einem abstrakten Niveau, die physikalischen Größen quantifiziert.

Die Exemplar-Ebene analysiert das Nutzungsverhalten, um so Anforderungen abhängig von Nutzungsparametern zu generieren. Nun gilt es, dies in technisch formulierte Anforderungen zu überführen. Dazu muss neben den hybriden Fahrfunktionen und deren Ausprägung auch das Fahrzeug genauer spezifiziert werden, um die Anforderungen angemessen weiterzuentwickeln. Folgende Größen sollten erfasst sein, um eine Anforderung ausreichend genau zu formulieren:

- Fahrzeugdaten: Masse, Aerodynamische Kennzahlen, Rollwiderstandsgrößen
- Antriebsstrangtopologie

Diese fahrzeugspezifischen Größen werden mit dem Nutzungstyp kombiniert und konkretisieren den Energiebedarf des Nutzers abhängig von der Geschwindigkeit pro Streckeneinheit. Dazu können noch zusätzlich Anforderungen für Nebenverbraucher anfallen, wie beispielsweise Bordnetz oder Klimatisierung. Weitere Aspekte, wie die sich ändernde Ladehäufigkeit können abhängig von der Systemmodellierung in einem festgelegten Umfang betrachtet werden. Mit der Systemebene II ist eine Initialdimensionierung des PHEV Systems möglich, ohne detaillierte Informationen über die Komponenten zu besitzen. Hier wird auf bereits existierende Komponenten zurückgegriffen, die für eine Initialdimensionierung ein sehr detailliertes Ergebnis liefern. Die Zielgröße dieser Systemebene ist eine Aussage über das Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Energie.

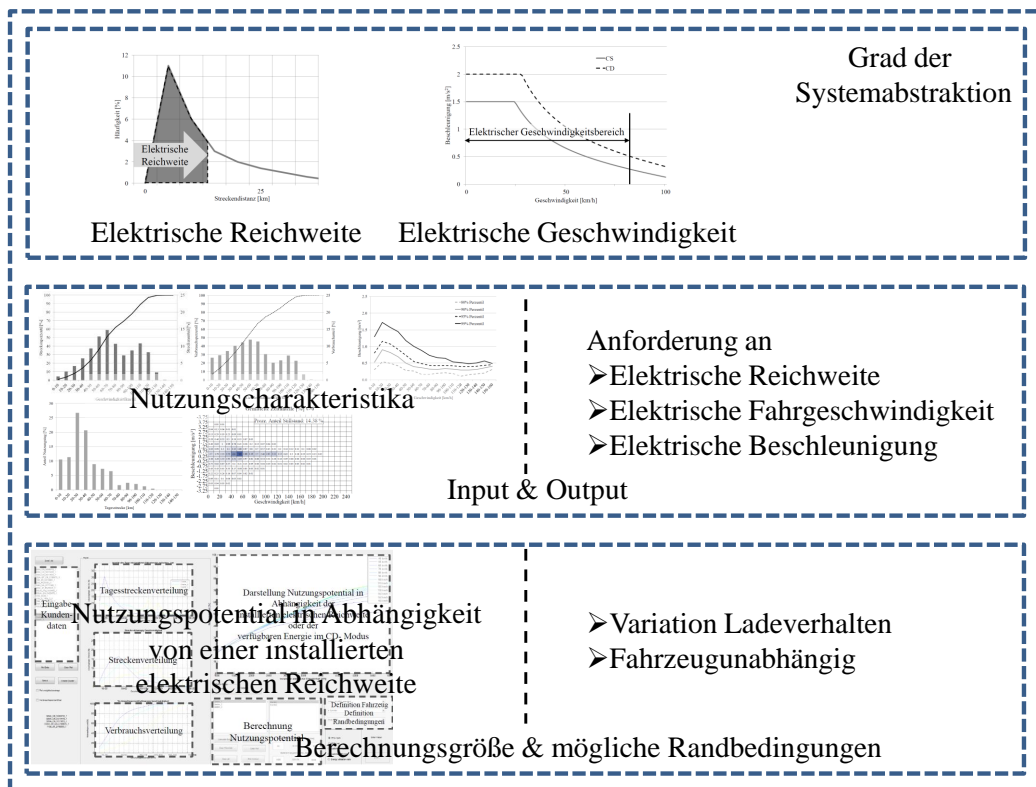


Abbildung 4-11: Systemmodell 1, Einzelgrafiken siehe Kapitel 3.2, 4 und 5.5

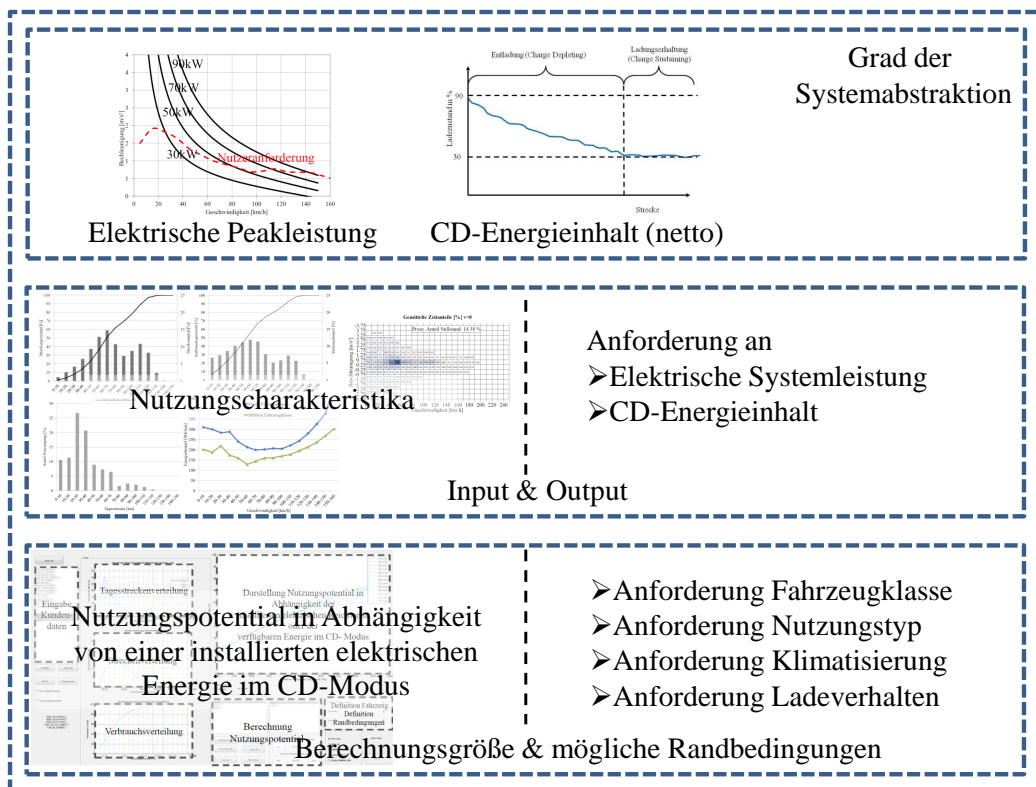


Abbildung 4-12: Systemmodell 2, Einzelgrafiken siehe Kapitel 3.2, 4 und 5.5

Die beschriebenen Systemmodelle auf den unterschiedlich gewählten Abstraktionsebenen werden durch unterschiedliche Berechnungsgrundlagen bedient. Entsprechend dem Abstraktionsgrad der Systemmodelle ist die Berechnung verschieden umfangreich. In Kapitel 4.5.1 wird die Berechnungsgrundlage für die Systemebenen I und II vorgestellt.

Wurde auf Basis der SAE II eine Initialdimensionierung getroffen, so ist der nächste Schritt die Detaillierung von Komponenten. Ist dies geschehen, so kann eine Validierung der Systemauslegung erfolgen. Im folgenden Kapitel sollen nun die Entwicklung der Qualität der Anforderungen entsprechend der Systemmodellierungen beschrieben werden. Ziel ist es aufzuzeigen, in welchen Aspekten die Anforderungen weiterentwickelt werden, um Anforderungen für die Initialdimensionierung des Systems abzuleiten.

Die verwendete Größe des Nutzungspotentials dient über alle Abstraktionsebenen und Systemmodelle hinweg als Referenz, an der die Entwicklung der Anforderungen beobachtet werden kann.

### 4.3.2 Einordnung der Anforderung zu Systemabstraktion

Die festgelegten und beschriebenen Systemmodelle in Kapitel 4.3.1 dienen dazu, aus einem Nutzungsverhalten Anforderungen an das elektrische Antriebssystem für PHEVs zu entwickeln. Ergebnis sind Anforderungen für die elektrische Leistung und elektrische Energie, die entsprechenden Zielen für ein Nutzungspotential bei einem entsprechenden Nutzungsverhalten genügen.

Nachfolgend wird am Beispiel der Anforderung für elektrische Energie die Entwicklung von Anforderungseigenschaften über die verschiedenen entwickelten Systemmodelle aufgezeigt und ihre Entwicklung analysiert. Ziel dieser Betrachtung ist es, die Notwendigkeit aufzuzeigen, dass und wie Anforderungen entwickelt werden müssen, um Anforderungen entsprechender Qualität formulieren zu können. Dafür ist sowohl die Notwendigkeit einer Exemplar-Ebene erforderlich, um das Nutzungsverhalten zu analysieren und zu verwenden, als auch eine weitere Systemabstraktion, um die Anforderungen weiter zu entwickeln und zusätzliche Informationen zu gewinnen.

Die finale Anforderung für eine verfügbare elektrische Energie startet im Nutzungsverhalten als Verteilung der Tagesstrecken. Diese Verteilung der Tagesstrecken wird im nächsten Schritt in eine verfügbare elektrische Reichweite überführt. Diese ist abhängig von einer Geschwindigkeit, was aber keine weiteren Anforderung in dieser Systemebene mit sich bringt. Wird nun konkretisiert auf Basis eines verfügbaren Energieinhalts das Nutzungspotential ausgewiesen, so wirken hier Aspekte mit, die die Qualität der Anforderung erhöhen. Zu nennen sind hier die Wahl des Fahrzeuges und der Antriebstopologie sowie des Nutzungstyps, die alle Auswirkungen auf den Energiebedarf pro Kilometer haben. Dazu kommt zusätzlich der Energiebedarf für Nebenverbraucher und die Randbedingung der Ladehäufigkeit.

Ist dann die Komponente konkret festgelegt, können weitere Anforderungen formuliert werden, die eine Komponente detaillierter beschreiben.

Im Folgenden werden die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Anforderungseigenschaften im Verlauf der Systemmodelle analysiert. Tabelle 4-1 zeigt, inwiefern sich die ausgewählten Eigenschaften entwickelt haben und weist der Entwicklung quantitative Gründe zu (“+“ entspricht Entwicklung der Eigenschaften über Systemmodelle erfolgt).

- Das Qualitätskriterium der Eindeutigkeit bleibt über die betrachteten Abstraktionsebenen hinweg konstant, wird aber im Detaillierungsgrad einer Anforderungsklassifikation weiterentwickelt.
- Die Gültigkeit und Aktualität ist aus Nutzersicht durchweg gegeben, doch liegen hier Einschränkungen im Bereich der Gesetzgebung vor, da die finale Beschreibung der Rahmenbedingungen des Fahrzyklus WLTP noch nicht erfolgt ist (vergleiche Kapitel 6.3.4).

- Die Beständigkeit der Anforderungen ist über alle Ebenen der Systembetrachtung gegeben, da durchweg die Zielgröße des Nutzungspotentials analysiert und ausgewertet wird.
- Die Prüfbarkeit der Anforderungen ist durchweg gegeben, da durch eine entsprechende Simulation die Möglichkeit der Validierung der Ergebnisse besteht.
- Die Verfolgbarkeit der Anforderungen für elektrische Leistung und verfügbare elektrische Energie ist mit dem Nutzungsverhalten jederzeit vorhanden, da sie auf ein Nutzungsverhalten zurückgeht. Damit ist es auch möglich, andere Zusammenhänge zu identifizieren, da eine erneute, anderweitige Analyse der Nutzerdaten möglich ist.
- Die Stabilität von Anforderungen kann als die Anzahl von Änderungen beschrieben werden, die durch zusätzliches Wissen erfolgt ist. In Systemebene I werden aus der Exemplar-Ebene Anforderung aus einem festgelegten Nutzungspotential abgeleitet, woraus die erste Änderung erfolgt. Wird dann zu Systemebene II hin weiter konkretisiert, erfolgt die nächste Änderung. Werden in Folge konkrete Komponenten festgelegt erfolgt die nächste Änderung, die aber in dem Produktentwicklungsprozess geplant und notwendig ist, um die Qualität der Bewertung zu ermöglichen.
- Eine Lösungsneutralität ist über das komplette Vorgehen gegeben, als dass keine Topologie oder Fahrzeug bevorzugt wird, sondern dies unabhängig gehandhabt werden kann. Dennoch ist es notwendig, sich ab Systemebene II zu detaillieren und lösungsabhängige Entscheidungen zu treffen, da sonst eine Verbesserung der Bewertungs- und Aussagequalität nicht möglich ist.
- Die Anpassbarkeit an verschiedene Umgebungen und Randbedingungen ist in großem Maße gegeben, sowohl was die Ausprägung einzelner Randbedingungen betrifft, als auch, dass unterschiedliche Nutzungsverhalten betrachtet werden können. Doch hängt die Anpassbarkeit auch mit dem Abstraktionsgrad des benutzten Systemmodells zusammen.
- Die Notwendigkeit für Nutzerfunktionen der Anforderungen ist in hohem Maße gegeben, da sie ermöglichen, auf den konkreten Nutzungsbedarf hin auszulegen. Der Nutzungsbedarf wiederum wird als der Anteil der Substitution notwendiger Energie für die Fahraufgabe beschrieben.

Qualitätsmerkmal	Ausprägung (+/o/-)
Eindeutigkeit	+
Gültigkeit und Aktualität	+/-
Beständigkeit	+
Verfolgbarkeit	+
Stabilität	+
Lösungsneutralität	+/o
Anpassbarkeit	+
Notwendigkeit	+

Tabelle 4-1: Qualitätsmerkmale der Anforderungen für die Bewertungsgröße Nutzungspotential

Es ist keine Systematik im Verhalten der Qualitätseigenschaften über die Abstraktionsebenen festzustellen. Die Entwicklung der Eigenschaften ist aber unmittelbar abhängig von der Größe des Nutzungspotentials. Diese Größe wurde als Bewertungsgröße entwickelt, um das Nutzungsverhalten über verschiedene Abstraktionsebenen in Anforderungen zu überführen.



### 4.3.3 Zusammenfassung und Reflexion

Das Requirement Engineering ist ein komplexer Vorgang, der vielen Anforderungen wie Robustheit, Kosten oder Nutzbarkeit genügen muss (VAN LAMSWERDE, 2000). Kernbestandteil ist ihm zufolge die Systemmodellierung, die durch Ermittlung, Analyse, Detaillierung und Austausch entsteht. Hieraus ergeben sich Kernfragen, die den Umfang und die Art der Modellierung in den Fokus stellen. Dazu kommt, dass Anforderungen oft zu ideales Nutzungsverhalten annehmen und andere Schwerpunkte setzen (VAN LAMSWERDE & LETIER, 1998) und dadurch an Stabilität und Robustheit verlieren. Daher werden in diesem Vorgehen Anforderungen aus realer Nutzung abgeleitet und unter verschiedenen Randbedingungen analysiert. Dies spiegeln die berücksichtigten Anforderungseigenschaften Verfolgbarkeit, Gültigkeit und Anpassbarkeit wider. Die Beständigkeit ist durch die Betrachtung der Bewertungsgröße des Nutzungspotentials gewährleistet. Dies trägt auch zur Eindeutigkeit der Anforderungen bei. Die Systemmodelle und die damit verbundenen zusätzlichen Informationen beeinflussen die Stabilität durch entsprechende Änderungen. Auch wird die Stabilität durch realistische, nicht zu ideal formulierte Anforderungen gestärkt. Die Lösungsneutralität wird ebenso durch die Systemabstraktionen beeinflusst und verändert. Mit der Systemebene II ist die Lösungsunabhängigkeit in Teilen nicht mehr gegeben, da ein Fahrzeug in seinen Eigenschaften, die den Energiebedarf pro Kilometer beeinflussen, hinterlegt ist.

Die individuelle Produktlösung benötigt ein mehrdimensionales Modell, um Ziele mit dem aktuellen Zustand zu verknüpfen. Dafür bedarf es verschieden abstrahierter Systemmodelle. Die verschiedenen Systemmodelle tragen gemäß SOMMERVILLE & SAWYER (1997, S. 165) zum Erschließen weiterer Informationen bei. Daher wurden in diesem Vorgehen drei Systemabstraktionen erstellt. Die Exemplar-Ebene dient als abstrakteste Ebene dazu, das Nutzungsverhalten zu verstehen und zu analysieren. PONN & LINDEMANN (2011, S. 26ff) stellt analog Kapitel 2.3 ein Modell mit drei Ebenen der Systemabstraktion vor. Da die Exemplar-Ebene hauptsächlich dazu dient, das Nutzungsverhalten aufzubereiten, um im Anschluss Anforderungen abzuleiten, stellt sich die Frage, wo die Funktion dieser Ebene in dem Modell der Systemabstraktionen integriert ist. Ist der Anforderungsraum geeignet, oder wäre eine weitere Ebene der Systemabstraktion analog der Exemplar-Ebene von BALZERT ET AL. (2009, S. 30) dem Zweck entsprechend? Der Grund für diese Anwendung eine weitere Ebene einzuführen ist schlicht darin begründet, dass die Systemfunktion unmittelbar auf das Nutzungsverhalten angewendet werden kann und daraus abgeleitet wird. Auch BROY ET AL. (2012) und NUSEIBEH & ESTERBROOK (2000) bewerten den Ansatz der Kundenfunktions- bzw. Verhaltensmodellierung als geeigneten Ansatz. Das Nutzungsverhalten ist somit sehr nah an der Funktionsbetrachtung, was eine Modellierung als weitere Systemabstraktionsebene rechtfertigen würde.

Die Robustheit der Auslegungen hängt von der Streuung im Nutzungsverhalten, sowie dem referenzierten System ab. Zudem stellt sich auch die Frage, ob sich abweichende Ausprägung im Nutzungsverhalten vor- oder nachteilig für das Nutzungspotential auswirken.

Die nutzungsgerechte Auslegung impliziert, dass die Auslegung für ein betrachtetes Nutzungsverhalten große Vorteile bieten kann. Für ein davon abweichendes Nutzungsverhalten kann das aber zugleich ein Nachteil sein, da es von den Anforderungen abweicht. Hier besteht die Möglichkeit, eine Auslegung zu realisieren, die mehr Nutzer in der Breite abdeckt, da sie beispielsweise größer dimensioniert ist. Dies hängt aber auch davon ab, wie viele Nutzer für eine charakteristische Ausprägung vorliegen und somit eine gesonderte Auslegung rechtfertigen.

Die entwickelten Systemmodelle auf Grundlage der Theorie von BALZERT ET AL. (2009) sowie PONN & LINDEMANN (2011) ermöglichen eine kontinuierliche Entwicklung der Anforderungen, um am Ende

das Nutzungsverhalten in technische Systemanforderungen zu übersetzen. Die Funktion von Systemmodellen ist es, zusätzliche Informationen zu generieren. Diese Informationen dienen dazu, aus einem Nutzungsverhalten Anforderungen für ein elektrisches Antriebssystem zu entwickeln. Auf Basis dessen wurde auch der Abstraktionsgrad der Systemmodelle gewählt. Diese Abstraktionen erlauben eine stetige Entwicklung der Anforderungen, ermöglichen aber auch, zum einen in Abhängigkeit von der Lösung, zum anderen unabhängig von der Lösung, Aussagen für ein bestimmtes Nutzungsverhalten zu treffen. Systemmodelle von SOMMERVILLE & SAWYER (1997, S. 165), die Prozesse oder Datenströme abbilden, sind für diese Anwendung weniger geeignet.

Die Entwicklung der Qualität von Anforderungen ist unterschiedlich, je nach betrachtetem Kriterium. Wie Tabelle 4-1 zeigt, ist es für das betrachtete Beispiel notwendig, dass die aufgelisteten Qualitätskriterien allesamt über die einzelnen Systemabstraktionsebenen erfüllt werden. Ausnahmen bilden Gültigkeit und Aktualität sowie Lösungsneutralität. Die Einschränkung der Gültigkeit besteht, da aus gesetzlicher Sicht die Rahmenbedingungen noch unklar sind. Das wäre Voraussetzung für die Erfüllung dieses Kriteriums. Es hängt aber nicht unmittelbar an dem vorgestellten Vorgehen. Die Erfüllung des Kriteriums Lösungsneutralität erfährt dadurch Einschränkungen, dass durch die Detaillierung der Anforderungen eine Lösungsneutralität nicht mehr gewährleistet werden kann, um damit Bewertungen entsprechender Qualität zu tätigen. Bei der Entwicklung eines Produktes oder eines Systems ist ab einem bestimmten Punkt die Lösungsneutralität nicht mehr zu vermeiden. Vielmehr ist es dann wichtig, die Lösung an sich über Anforderungen zu beschreiben und zu entwickeln.

## 4.4 Abgleich des Nutzungsverhaltens mit dem technischen Lösungsraum

Das vorliegende Kapitel hat zum Ziel, den Lösungsraum über Ausprägungen im Nutzungsverhalten zu detaillieren. Darüber wird die Eignung eines Nutzungsverhaltens für PHEVs abgeleitet.

### 4.4.1 Einordnung der Nutzer abhängig von einer Auslegung

In Kapitel 3.6 wurde der Nutzungsraum von Plug-In Hybriden aus Sicht des Nutzungsverhaltens und der technischen Umsetzung untersucht.

Das Ziel des Vorgehens in der vorliegenden Arbeit ist, für unterschiedliche Nutzungsverhalten ein elektrisches Antriebssystem auszulegen. Dabei hängt die Höhe des Nutzungspotentials wesentlich von der Systemauslegung ab. Für die Auslegung in dieser Arbeit sind folgende Ziele für den Nutzungsbereich von PHEVs maßgebend:

- Das Ziel besteht darin, mit einem möglichst kleinen elektrischen Antriebssystem hohe Nutzungspotentiale und somit Verbrauchspotentiale zu realisieren. Dies bedeutet, dass eine Auslegung abhängig vom Nutzungsverhalten sein soll.
- Trotz nutzungsgerechter Auslegungen sollen mit einer Auslegung viele Nutzer mit ähnlich hohem Nutzen zusammengefasst werden. Zentrale Frage ist, inwiefern verschiedene Auslegungen mit jeweiligem hohem Verbrauchspotential welche und wie viel Nutzer abdecken.
- Untersuchung verschiedener Fahrzeugklassen in Wechselwirkung mit dem Nutzungsverhalten.

Aus diesen Kriterien und den in Kapitel 3.6 beschriebenen Nutzungsbereichen sollen Nutzungsverhalten betrachtet werden, die einen signifikanten Anteil von Nutzungstagen im niedrigen Tageskilometerbereich haben. Dazu werden hauptsächlich Nutzer betrachtet, die einen hohen Energieumsatz im niedrigen Ge-

schwindigkeitsbereich besitzen. Damit ist es möglich, durch Fahranteile im niedrigen Geschwindigkeitsbereich den Einsatz des elektrischen Antriebssystems zu erhöhen. Der Einsatz des elektrischen Antriebssystems ist im niedrigen Geschwindigkeitsbereich am wirkungsvollsten, da in den niedrigen Lastbereichen der Verbrennungsmotor schlechtere Wirkungsgradbereiche aufweist als in hohen. Auch VON ESSEN & DIEZEMANN (2013) bewertet den Einsatz des elektrischen Antriebssystems im Geschwindigkeitsbereich bis 70 km/h als am effizientesten eingesetzt. Der Schwerpunkt im niedrigen Tagesstreckenbereich erhöht die Anzahl der Tage, an denen das im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen kleinere elektrische System den Verbrauch signifikant reduzieren kann. Die Kombination dieser Ausprägungen ermöglicht, auch große Fahrzeugklassen zu betrachten. Im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen ist zudem ein uneingeschränkter Betrieb für große Tagesfahrstrecken möglich (SHINICHI ET AL., 2013). Jedoch ist das Nutzungspotential an Tagen mit hoher Laufleistung geringer. Die gewählten Nutzungsparameter sind unabhängig von gewählten Fahrzeugen und somit technischen Lösungen. Diese eignen sich folglich sehr gut, um das Nutzungsverhalten generisch zu analysieren.

Durch eine Strukturierung des Lösungsraums besteht die Möglichkeit, entsprechende Ausprägungen im Nutzungsverhalten in dem festgelegten Raum anzuordnen. Diese Ausprägungen entsprechen identifizierten Clustern. Die Ordnung des Lösungsraums ändert die Ausprägungen und Eigenschaften der Cluster nicht, berücksichtigt jedoch verschiedene Ausprägungen im Nutzungsverhalten mit entsprechenden Anforderungen in der Systemskalierung. Die Einteilung der Grenzen erfolgt nach den verschiedenen Ausprägungen im Nutzungsverhalten. Je nachdem, wo es sinnvoll ist, für die Systemdimensionierung eine Unterscheidung zu treffen, kann die Abgrenzung spezifisch erfolgen.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Matrix entwickelt, die je drei Ausprägungen für die zwei Größen Kraftstoffverbrauch und Tagesstreckenverteilung kombiniert. Diese neungliedrige Matrix soll die Eignung von Nutzern für ein hohes Nutzungspotential durch die einzelnen Kombinationsmöglichkeiten darstellen. Daraus können konkrete Lösungen abgeleitet werden, die für die jeweiligen Nutzergruppen einen großen Nutzen darstellen können. Abbildung 4-13 zeigt die entwickelte Matrix. Die verschiedenen Zeilen charakterisieren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verschiedene Ausprägungen der jeweiligen Energieumsätze. Die erste Zeile beschreibt Nutzer mit einem hohen Energieumsatz im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, wohingegen die dritte Zeile Nutzer charakterisiert, die im hohen Geschwindigkeitsbereich viel Energie umsetzen. Die Spalten beschreiben die unterschiedlichen Ausprägungen im Tagesstreckenverhalten. Hat ein Nutzer einen hohen Anteil an Nutzungstagen im niedrigen Tagesstreckenbereich, ist er in der Spalte der „Kurzstrecke“ wiederzufinden. Hat der Nutzer hohe Anteile im mittleren Tagesstreckenbereich, so ist er der Spalte „Mittelstrecke“ zugehörig. Ein hoher Anteil langer Tagesstrecken ordnet den Nutzer in die Spalte „Langstrecke“.

Werden Nutzer für die zwei betrachteten Charakteristika analysiert, so können sie in der Matrix einem Feld zugewiesen werden. Die konkrete Festlegung von Grenzen innerhalb der Matrix kann individuell erfolgen. Diese Charakterisierung verschiedener Nutzungstypen dient dazu, die neungliedrige Matrix in wenige Bereiche zu unterteilen, die in einer Lösungsausprägung zusammengefasst werden können. Ziel von PHEVs ist die Substitution eines Teils des Energieumsatzes durch den elektrischen Antriebsstrang. Analog Abbildung 4-6 und 4-14 nimmt zu steigenden Geschwindigkeiten der Energiebedarf zu, um ein angestrebtes Nutzungspotential zu erzielen. Je höher der Anteil mittlerer oder großer Tagesfahrstrecken ist, umso höher ist auch der Energiebedarf zur Substitution eines bestimmten Anteils benötigter Energie. Für dieses Vorgehen werden drei verschiedene Bereiche festgelegt, die in einer Anforderung für eine Systemdimensionierung resultieren. Feld 1 in Abbildung 4-13 charakterisiert lösungsseitig das kleinste elektrische System. Hier wird für niedrige Geschwindigkeiten und hohe Anteile im kurzen Tagesstreckenbereich eine Systemanforderung ausgeleitet. Die Felder 2 bis 4 leiten Anforderungen für eine

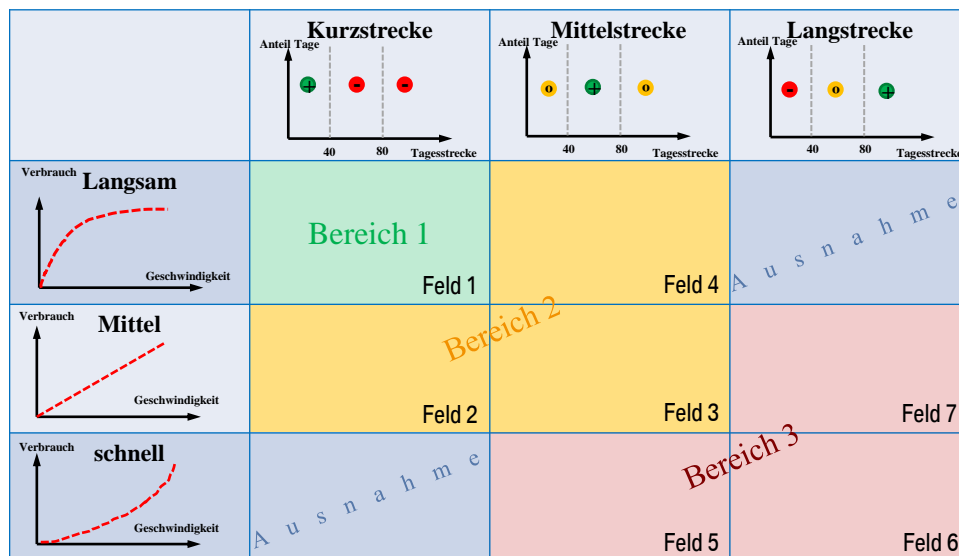


Abbildung 4-13: Strukturierung des Lösungsraums

Systemdimensionierung aus, die über dem von Feld 1 liegen. Feld 3 bildet hier die kritische Kombination aus einem hohen Anteil mittlerer Tagesfahrstrecken sowie ein erhöhter Energieumsatz im mittleren Geschwindigkeitsbereich. Feld 2 und 4 sind in Kombination jeweils unkritischer, da entweder mehr Energie im niedrigen Geschwindigkeitsbereich umgesetzt wird oder ein höherer Anteil kurzer Tagesfahrstrecken vorliegt.

Eine weitere Gruppierung erfolgt mit den Feldern 5, 6 und 7. Diese Felder können über hohe Anteile großer Tagesfahrstrecken und einen Energieumsatz im hohen Geschwindigkeitsbereich beschrieben werden. Feld 6 erweist sich analog der zweiten Gruppierung zum kritischen Feld dieses neuen Bereichs. Für ein festgelegtes elektrisches Antriebssystem wird Bereich 1 das größte Nutzungspotential bergen, Bereich 3 das kleinste. Um diese drei Bereiche nun konkret abzugrenzen, können Geschwindigkeitsschwellen bestimmt werden und Bereiche mit Anteilen einer Tagesfahrstrecke. Für die vorliegende Arbeit wird folgende Unterteilung gewählt:

Bereich 1 betrachtet Nutzer, die bis 70 km/h mindestens 70% des benötigten Energie umsetzen und sich 50% der Tage im Bereich bis 40 Tageskilometer aufhalten. Dieser Nutzer soll einem ausgeprägten Stadtnutzer entsprechen. Daher wurde der betrachtete Geschwindigkeitsbereich bis 70 km/h gewählt. Die Grenze bis 40 Tageskilometer wurde auf Basis von MATTHIES (2010) festgelegt, wonach 70% der Europäer weniger als 40 Kilometer pro Tag zurücklegen.

Die zweite Schwelle wird bei 120 km/h festgelegt. Dieser Geschwindigkeitsbereich umfasst den Überlandbereich sowie in Ansätzen Autobahnstrecken. Je nach Nutzungsland kann mit 120 km/h ein hoher Autobahnstreckenanteil erfasst werden. Der Tagesstreckenbereich wird für den zweiten Bereich bei 80 Tageskilometer bestimmt. Mit dieser elektrischen Fahrgeschwindigkeit ergeben sich mitunter hohe Anforderungen an den elektrischen Energiebedarf. Dazu kommt, dass mit 80 km Tagesstrecke nach Kapitel 3.6 ein sehr großer Anteil aller Tagesfahrstrecken erfasst wird. Liegt in diesem Tagesstreckenbereich eine erhöhte Nutzung vor, so kann mit einem entsprechenden elektrischen System ein erhebliches Potential

umgesetzt werden. Der Energiebedarf pro Kilometer und die Leistung sind in realistischen und darstellbaren Größenordnungen. Eine Verteilung der Nutzung in diesen Tagesstrecken- und Geschwindigkeitsbereichen charakterisiert Nutzer, die in einem installierten elektrischen Antriebssystem in entsprechendem Maße einen Mehrwert generieren können. Trotz der niedrigen Energiedichte des elektrischen Speichers können in diesen Bereichen Fahranteile elektrisch dargestellt werden, die das Nutzungspotential vergrößern. Das ist auch der Grund, warum der dritte Bereich oberhalb der zwei beschriebenen Bereiche für die Auslegung von Plug-In Hybriden nicht weiter betrachtet werden soll. Bei Fahrten in hohem Geschwindigkeitsbereich ist der Leistungs- und Energieumsatz sehr hoch. Dies hat zur Folge, dass überproportional große elektrische Energiespeicher notwendig wären, um überhaupt ein bestimmtes Nutzungspotential zu realisieren. Aufgrund der geringen Energiedichte elektrischer Speicher und den sich daraus ergebenden Konsequenzen in Bereichen wie Kosten, Gewicht oder Package soll dieser Bereich nicht weiter betrachtet werden. Das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand ist schlicht zu gering, um eine Realisierung voranzutreiben (EICHORN, 2012). Die Zuordnung von Nutzern in einen der drei entwickelten Bereiche impliziert eine Eignung für ein PHEV System. Ändert sich das Nutzungsverhalten, kann dies zu einer unterschiedlichen Einordnung und somit anderen Eignung gemäß der Matrix in Abbildung 4-13 führen. Werden nach der beschriebenen Logik die von DIESS (2013) beschriebenen Nutzungscharakteristika eingeordnet, ergibt sich folgendes Bild: Der sogenannte 'Urban'-Nutzer mit kurzen durchschnittlichen Tagesstrecken von 39 km und durchschnittlichen Geschwindigkeiten von 24 km/h ist Feld 1 zuzuordnen, wohingegen der 'Commute'-Nutzer mit 62 km durchschnittlicher Tagesreichweite und 45 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit Feld 3 zuzuordnen ist. Es erfolgt keine detaillierte Auflösung der Tagesstreckenverteilung, was eine genauere Zuordnung der Nutzungscharakteristika nicht zulässt. Die verwendeten Durchschnittswerte sind eine gute Orientierung, lassen jedoch keine detailliertere Analyse zu.

Der PHEV bietet allen Nutzergruppen die Möglichkeit, ob geeignet oder ungeeignet, durch den installierten Verbrennungsmotor auch Fahrten oberhalb der elektrischen Reichweite ohne Einschränkungen durchzuführen. Für ein rein batterieelektrisches Fahrzeug ist es nicht möglich, einen signifikanten Anteil von Nutzungstagen oberhalb der batterieelektrischen Reichweite darzustellen, da sonst die Beschränkungen für die Fahrzeugnutzung durch beispielsweise lange Ladevorgänge zu groß wären. Zwischen elektrischem Fahrzeug und parallelem PHEV ist der serielle Hybrid einzuordnen (GORBEA, 2011). Dieser erlaubt elektrisches Fahren in der Größenordnung eines Elektroautos mit der Möglichkeit der Reichweitenverlängerung bei niedrigem SoC oder der Leistungsbereitstellung eines Verbrennungsmotors über den kompletten SoC.

Innerhalb dieser Tagesstreckenkilometerbereiche können sich die Nutzer sehr unterschiedlich verhalten. Dem muss durch entsprechende Differenzierung in der Identifikation von Nutzungstypen Rechnung getragen werden. Die Ordnung nach Nutzungsverhalten enthält keine weiteren Informationen zum Nutzer. Eine wesentliche Größe, die für die Systemdimensionierung und somit die Lösung wesentlich ist, ist die betrachtete Fahrzeugklasse. Die Fahrzeugklasse hat einen beachtlichen Einfluss auf den Energiebedarf pro Kilometer und somit die Dimensionierung. Abbildung 4-14 zeigt jeweils die Anforderung für ein Fahrzeug der sog. Kompaktkwagenklasse (z.B. VW Golf, BMW 1er) und die Anforderung in der Oberklasse (Mercedes S-Klasse, BMW 7er). Auch der Leistungsbedarf wächst zu einer größeren Fahrzeugklasse auf Grund steigender Fahrwiderstände wie Aerodynamik oder Rollwiderstand. Abbildung 4-15 zeigt den Leistungsbedarf für eine reale Nutzung für zwei Fahrzeuge unterschiedlicher Klassen. So kann der dargestellten Beschleunigungsperzentilkurve mit der gleichen verfügbaren Leistung in verschiedenen Fahrzeugklassen in unterschiedlichem Umfang gefolgt werden. Die unterschiedlichen Fahrzeugklassen unterscheiden sich in relevanten Parametern, die die Fahrwiderstände wie Rollwiderstand oder Luft-

widerstand festlegen. Kombiniert man nun die verschiedenen identifizierten Nutzungstypen mit den

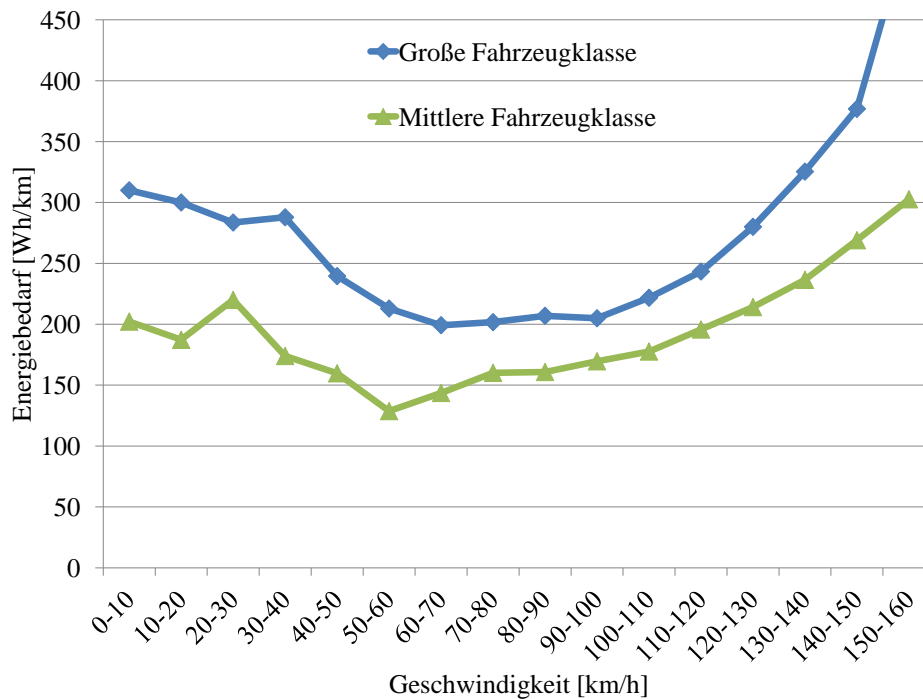


Abbildung 4-14: Energiebedarf pro Kilometer abhängig von der Geschwindigkeit und einer gewählten Fahrzeugklasse

Fahrzeugklassen, kann der Lösungsraum wie in Abbildung 4-16 veranschaulicht, in vier verschiedene Dimensionierungen eingeteilt werden. Abhängig von der Ausprägung des unterschiedlichen Verhaltens, besteht die Möglichkeit, dass die Anforderungen für Systemskalierungen in der gleichen Größenordnung liegen. Wäre dem so, könnte eine einzige Dimensionierung für zwei verschiedene Nutzungstypen und möglicherweise Fahrzeugklassen umgesetzt werden. In diesem Beispiel könnten so Urban-Nutzer der großen Fahrzeugklasse mit dem gleichen elektrischen Antriebssystem wie Commute-Nutzer der kleinen Fahrzeugklassen ausgestattet werden. Vorteil wäre eine reduzierte Anzahl von Systemvarianten bei individueller Systemskalierung.

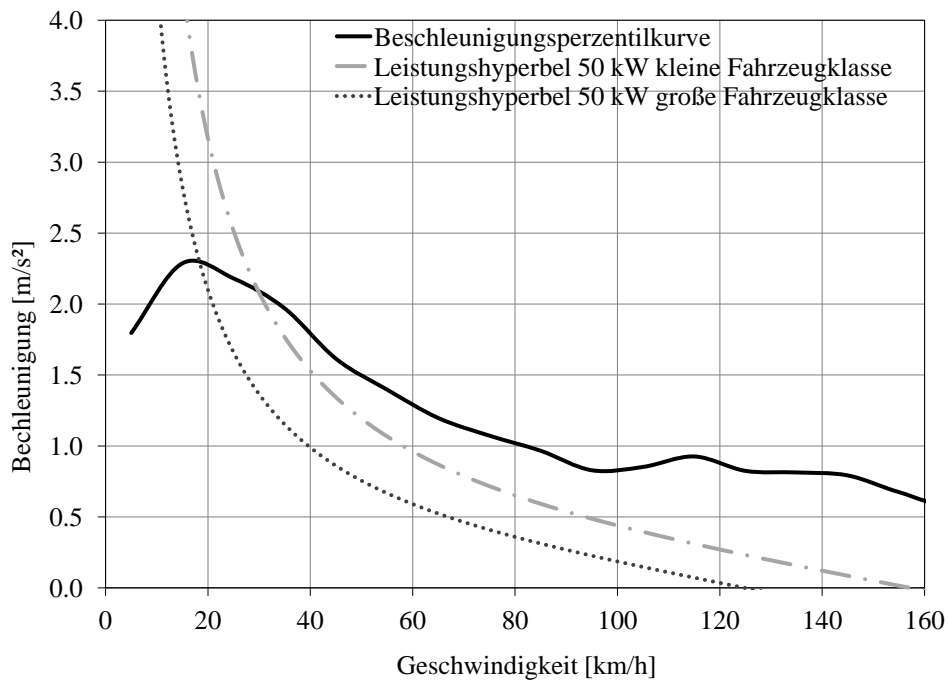


Abbildung 4-15: Beschleunigungsvermögen bei gleicher Leistung in Abhängigkeit von der gewählten Fahrzeugklasse

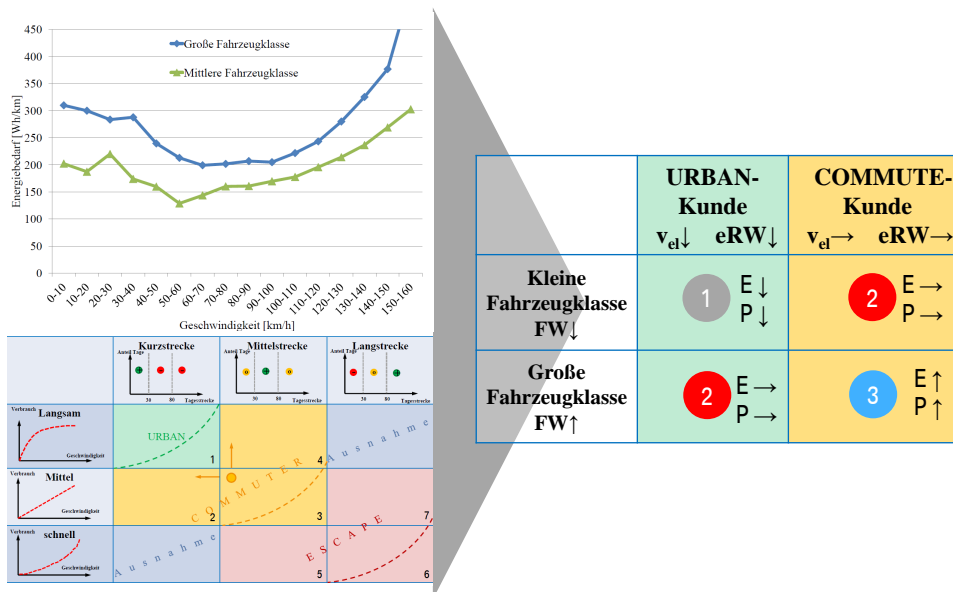


Abbildung 4-16: Lösungsraum abhängig von verschiedenen Nutzungstypen und Fahrzeugklassen

#### 4.4.2 Zusammenfassung und Reflexion

Die Zusammenführung des Nutzungsverhaltens in seinen Ausprägungen mit skalierbaren Größen des Lösungsraums ist das Ergebnis, das durch die Analyse des Nutzungsverhaltens und die anschließende Modellierung abstrahierter Systemmodelle ermöglicht wurde. Die gewählte Darstellung ist eine Vereinfachung und Reduktion von Nutzer und technischem System auf wenige Schlüsselgrößen. Diese Reduktion ermöglicht, eine erste Ordnung der Nutzungsverhalten durchzuführen. Nach der Zuordnung auf dieser Ebene der Abstraktion des Nutzungsverhaltens kann eine größere Tiefe in der Detaillierung erreicht werden. Die Ordnung in drei unterschiedliche Arten von Nutzern kann zu einer nicht optimalen Einordnung durchaus geeigneter Nutzer führen. Durch die Einführung der festgelegter Grenzen für Tagesstrecken samt jeweiliger Häufigkeiten werden Nutzer entsprechend klassifiziert. Doch ist diese Klassifizierung nur eine Orientierung um die Strukturierung zu unterstützen. Die Bildung von Klassen zeigt auf, wo die Eignung von Nutzern, von einem elektrischen Antriebssystem zu profitieren, besonders hoch oder eher gering ist.

Die Strukturierung des Lösungsraums nach Abbildung 4-16 ist ein Vorschlag, der darauf abzielt trotz bedarfsgerechter Auslegung die Variantenvielfalt nicht zu groß werden zu lassen. Die Entscheidung über die Anzahl der Varianten hängt letztendlich auch davon ab, für welches Nutzungsverhalten in welchen Fahrzeugklassen ein Derivat entwickelt wird und wie gut die unterschiedlichen Nutzungsverhalten in Kombination mit den unterschiedlichen Fahrzeugdimensionierungen zusammenpassen. Die aufgezeigte Ausprägung ist sicherlich eine ideale Vorstellung, aber durchaus mit ins Kalkül zu ziehen. Kapitel 5.5 wird anhand des durchgeführten Beispiels die Möglichkeit der Reduktion der Varianten an dem dort durchgeführten Beispiel veranschaulichen.

### 4.5 Berechnung einer Initialdimensionierung auf Grundlage von Nutzungsdaten

Das Kapitel 4.5 umfasst die zwei Bestandteile: Die Berechnung des Nutzungspotentials nach NIES ET AL. (2012b) sowie die Berechnung des Systemnutzungsgrades und des Anteils elektrischen Fahrens bezogen auf einen festgelegten Geschwindigkeitsbereich. Gegenstand des Nutzungspotentials ist die energetische Dimensionierung des Speichers.

#### 4.5.1 Berechnung des Nutzungspotentials

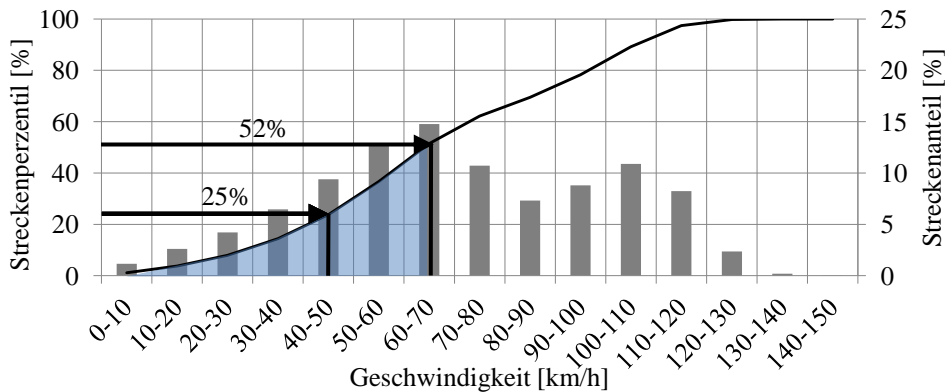
Das Nutzungspotential weist den Grad der Substitution des Kraftstoffs zu einem konventionellen Antrieb durch elektrisches Fahren im CD-Modus aus. Abhängig von den Eingangsdaten wird das Nutzungspotential in Abhängigkeit von einer installierten elektrischen Reichweite oder des verfügbaren Speicherhubs ausgewiesen.

Grundlage für die Berechnung sind das Verbrauchsperzentil abhängig von der Geschwindigkeit, das Streckenperzentil abhängig von der Geschwindigkeit, sowie die Verteilung der Tagesstrecken. Diese liegen in einer Auflösung von 10 km bzw. 10 km/h-Klassen vor. Der erste Schritt in der Berechnung ist, abhängig von der Tagesstrecke einen Streckenanteil für festgelegte Geschwindigkeitsbereiche zu ermitteln. Dafür wird für verschiedene Tagesfahrstrecken und Geschwindigkeitsbereiche eine elektrische Strecke ausgewiesen (vgl. Abbildung 4-17). Folgende Berechnung liegt diesem Schritt zugrunde:



$$TEF(v_i) = TS \cdot SP(v_i) \tag{4.1}$$

mit  $TEF(v_i)$  ... Theoretisch elektrische Fahrstrecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v_i$   
 $TS$  ... Tagesstrecke  
 $SP(v_i)$  ... Wert des Streckenperzentil für Geschwindigkeit  $v_i$



Geschwindigkeitsbereich [km/h]	Streckenperzentil [%]	Tagesstrecke [km]	TEF [km]
0-50	25	10	2,5
0-70	52	10	5,2
0-50	25	20	5
0-70	52	20	10,4

Abbildung 4-17: Elektrischer Streckenanteil in Abhängigkeit von dem Geschwindigkeitsbereich

Der Zweck der Berechnung ist, dass für eine angenommene, maximale elektrische Fahrgeschwindigkeit eine theoretisch mögliche elektrische Fahrstrecke (TEF) abhängig von der Tagesstrecke ausgewiesen wird.

Im nächsten Schritt wird der Kraftstoffverbrauch mit der Fahrstrecke in Verbindung gebracht. Hierzu wird für einzelne Tagesstrecken und unterschiedliche Geschwindigkeiten eine hypothetisch installierte elektrische Reichweite (IER) angenommen. Beispielsweise wird für eine Tagesstrecke von 10 km eine installierte elektrische Reichweite von 2 km bei einer elektrischen Fahrgeschwindigkeit bis 50 km/h angesetzt. Abhängig davon, wie hoch die theoretisch mögliche elektrische Fahrstrecke (TEF) ist, kann der Kraftstoffverbrauch in diesem Geschwindigkeitsbereich komplett oder nur teilweise substituiert werden. Ist die TEF bis 50 km/h für diese Tagesfahrstrecke beispielsweise 5 km, so wird der Kraftstoffverbrauch in diesem Geschwindigkeitsbereich nur teilweise ersetzt werden. Wurde ermittelt, welche Streckenanteile in einem Geschwindigkeitsbereich elektrisch gefahren werden können, so kann darüber ermittelt werden, welcher Anteil am Kraftstoffverbrauch substituiert werden kann. Dafür wird das Verbrauchsperzentil für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich ausgewertet. Je nach dem, ob für die vorliegende Tagesfahrstrecke der betrachtete Geschwindigkeitsbereich teilweise oder komplett abgedeckt werden kann, ergibt sich ein entsprechender Anteil der Verbrauchssubstitution. Damit kann in Abhängigkeit von einer täglichen Fahrstrecke eine Verbrauchsreduktion berechnet werden. Dies gilt unter der Prämisse,

dass das System leistungsbedingt nicht degradiert.

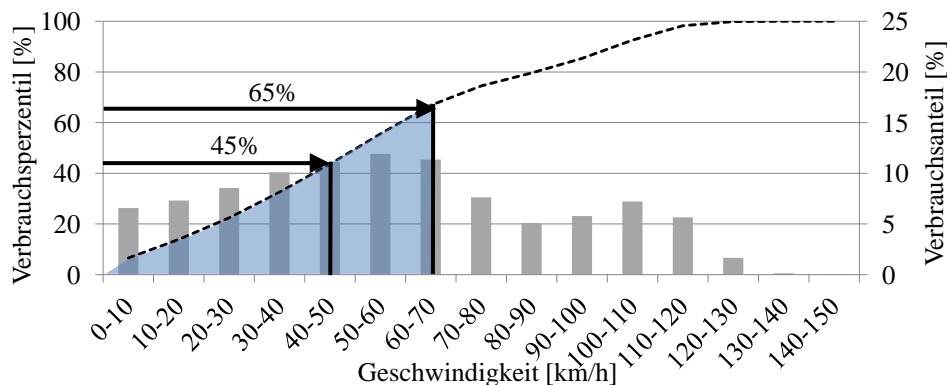
$$NP(TS) = IER(v_i) \cdot VP(v_i) \cdot (TEF(v_i, TS))^{-1} \tag{4.2}$$

- mit NP(TS) ... Nutzungspotential in Abhängigkeit von der Tagesstrecke TS
- IER(v<sub>i</sub>) ... Installierte elektrische Reichweite in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v<sub>i</sub>
- TEF(v<sub>i</sub>, TS) ... Theoretische installierte elektrische Fahrstrecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v<sub>i</sub> und der Tagesstrecke TS
- VP(v<sub>i</sub>) ... Wert des Verbrauchsperzentils für Geschwindigkeit v<sub>i</sub>

Im letzten Schritt erfolgt die Berechnung eines Nutzungspotentials für die Summe aller Nutzungstage. Dazu wird das Potential für einzelne Nutzungstage abhängig von einer bestimmten elektrischen Fahrgeschwindigkeit berechnet. Daraus wird eine gewichtete Summe verwendet. Die Gewichtung beinhaltet die Häufigkeit der einzelnen Nutzungstage (AN). Davon abhängig ist auch der Einfluss auf das gesamte Nutzungspotential. Der Berechnung liegt folgender mathematischer Zusammenhang zugrunde:

$$NP = \sum_{TS=0}^{TS} VP(TS) \cdot AN(TS) \tag{4.3}$$

- mit NP ... Nutzungspotential
- AN(TS) ... Häufigkeit Nutzungstag mit Strecke TS



Geschwindigkeitsbereich [km/h]	Tagesstrecke [km]	TEF [%]	IER [km]	NP [%]
0-50	10	2,5km	2	36
0-70	10	5,2km	2	26
0-50	20	5km	2	18
0-70	20	10,4km	2	13

Abbildung 4-18: Berechnung der Verbrauchsreduktion

Dieser Ansatz setzt voraus, dass bis zu einer geforderten elektrischen Fahrgeschwindigkeit dem Geschwindigkeitsprofil ohne Leistungszustart des Verbrennungsmotors gefolgt werden kann. Das impliziert, dass das elektrische Antriebssystem den Leistungsanforderungen des Fahrprofils entsprechen kann. Zudem gilt die Prämisse eines über die Geschwindigkeit gleichbleibenden Verbrauchumsatzes unabhängig von der Tagesstrecke.

Mit den drei vorgestellten Schritten kann ein Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite für einen elektrischen Geschwindigkeitsbereich bei einer vorliegenden Verbrauchs- und Tagesstreckenverteilung berechnet werden.

Neben der Berechnung des Nutzungspotentials abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite soll nun die Berechnung des Nutzungspotentials in Abhängigkeit von einem installierten elektrischen Energiehub im CD-Modus in seinen Schritten vorgestellt werden.

Diese Berechnung schließt an Gleichung 4.2 der vorhergehenden Berechnung an. Notwendige Information für diese Berechnung ist der Energiebedarf pro Kilometer. Dieser hängt, wie bereits beschrieben vom Fahrzeug, der Antriebstopologie und dem Nutzungstyp, in detaillierterer Betrachtung aber auch von Randbedingungen wie Nebenverbrauchern oder Anforderungen für Klimatisierung, ab. Entscheidend ist, dass die Wirkungsgradverluste, die durch die Topologie beeinflusst werden, berücksichtigt werden. Um für die Berechnung auf eine Wertetabelle des Energiebedarfs pro Kilometer zurückgreifen zu können, ist es notwendig, zur Vorbereitung verfügbare Nutzungsdaten mit einem PHEV-Simulationsmodell zu ermitteln. Dabei kann ein Durchschnittswert vieler Nutzer oder bewusst der Energiebedarf eines bestimmten Nutzers verwendet werden. Ziel ist es, aus einer Vielzahl vermessener Nutzer für ein festgelegtes Referenzmodell einen durchschnittlichen Verlauf des Energiebedarfs pro Kilometer abhängig von der Geschwindigkeit zu ermitteln.

Wurde der Energiebedarf entsprechend ermittelt, so ist es möglich das Nutzungspotential zu berechnen. Dies wird für verschiedene Energieinhalte und mögliche elektrische Fahrgeschwindigkeiten berechnet. Dafür wird abhängig von der elektrischen Fahrgeschwindigkeit und der Streckenverteilung ein streckengewichteter Energiebedarf pro Kilometer berechnet. Dieser ist notwendig um eine verfügbare elektrische Reichweite für einen vorgegebenen Speicher zu berechnen. In den streckengewichteten Energiebedarf fließt ein, welcher Streckenanteil in welchem Geschwindigkeitsbereich wie energieintensiv gefahren wird. Der beschriebene Wert berechnet sich wie folgt:

$$SE = \sum_{v=0}^{v_{\text{maxelektrisch}}} EB(v) \cdot SA(v) \cdot \left( \sum_{v=0}^{v_{\text{maxelektrisch}}} SA \right)^{-1} \quad (4.4)$$

mit SE ... Streckengewichteter Energiebedarf in  $\frac{Wh}{km}$   
 SA(v) ... Streckenanteil eines Geschwindigkeitsbereichs für den festgelegten Gesamtgeschwindigkeitsbereich  
 EB(v) ... Energiebedarf pro Kilometer abhängig von der Geschwindigkeit

Dieser streckengewichtete Energiebedarf kann für verschiedene elektrische Fahrbereiche ermittelt werden. Die elektrische Reichweite für einen verfügbaren elektrischen Energiehub ergibt sich in Folge zu:

$$IER(v) = \frac{EE}{SE} \quad (4.5)$$

mit IER(v) ... Installierte elektrische Reichweite in Abhängigkeit von der elektrischen Geschwindigkeit  
 mit EE ... Elektrische Energieinhalt im CD-Modus

Die Änderung des verfügbaren Energieinhaltes hat auch eine Rückwirkung auf die Speichergröße und folglich das Fahrzeuggewicht. Dieses muss entsprechend bei der Variation des Energiehubs berücksichtigt werden.

Die Potentialberechnung erfolgt dann analog dem Nutzungspotential in Abhängigkeit von einer installierten elektrischen Reichweite. Für eine Speichergröße und unterschiedliche Bereiche elektrischer Fahrgeschwindigkeit können entsprechend Potentiale berechnet werden. Die Berechnung wird analog Formel 4.2 und Formel 4.3 durchgeführt.

#### 4.5.2 Berechnung des Systemnutzungsgrades

Eine weitere wichtige Größe ist der elektrische Fahranteil für die Nutzung. Dieser kann zum einen auf die gesamt gefahrene Strecke oder auf die theoretisch mögliche elektrische Fahrstrecke für einen Geschwindigkeitsbereich bezogen werden. Für diese Arbeit wurde der elektrische Fahranteil auf die theoretisch mögliche elektrische Fahrstrecke bezogen. Grund dafür ist, dass diese Betrachtung eine bessere Einschätzung ermöglicht, welchen Nutzen zusätzliche elektrische Reichweite bei gleichbleibender elektrischer Geschwindigkeit hätte. Dieser berechnet sich wie folgt:

$$ESA = \sum_{TS=0}^{max} EFS(TS) \cdot H(TS) \cdot (TEF)^{-1} \quad (4.6)$$

mit	ESA	...	Elektrischer Streckenanteil bezogen auf die theoretische mögliche elektrische Strecke für eine konstante Geschwindigkeit
	TEF	...	Theoretische elektrische Fahrstrecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Tagesstrecke
	EFS(TS)	...	Elektrisch gefahrene Strecke in Abhängigkeit von der Tagesstrecke
	H(TS)	...	Häufigkeit einer Tagesstrecke TS

Eine weitere Größe, die zur Bewertung und Einschätzung einer Systemskalierung dient, ist der sogenannte Systemnutzungsgrad. Hierbei handelt es sich um eine mathematische Größe. Diese ist für den Wertebereich von Null bis 100 skaliert. Der Wert 100 bedeutet, dass an 100% der Nutzungstage die relevante elektrische Tagesstrecke der installierten elektrischen Reichweite entspricht. Diese Größe soll zum einen erfassen, wenn an Nutzungstagen die installierte elektrische Reichweite zu gering ist, als auch wenn an Nutzungstagen die installierte elektrische Reichweite zu groß ist. Beide Fälle wirken sich negativ auf den Nutzungsgrad aus. Der Nutzungsgrad hat den besten Wert, für den Fall, dass die verfügbare elektrische Reichweite mit der zu fahrenden elektrischen Strecke übereinstimmt. Der Nutzungsgrad hängt von den Größen streckengewichteter Energiebedarf pro Kilometer, der elektrischen Fahrgeschwindigkeit, dem Nutzungstyp sowie der verfügbaren elektrischen Energie ab.

Für eine installierte elektrische Reichweite größer der relevanten elektrischen Tagesstrecke ergibt sich:

$$NG(TS) = \frac{ETF(v_{el}, TS)}{IEE} \quad (4.7)$$

mit	NG(TS)	...	Nutzungsgrad in Abhängigkeit von der Tagesstrecke TS
	ETF( $v_{el}$ , TS)	...	Energie für theoretisch mögliche elektrische Fahrstrecke in Abhängigkeit von $v_{el}$ und Tagesstrecke TS
	IEE	...	Installierte elektrische Energie im CD-Modus

Für eine installierte elektrische Reichweite kleiner der relevanten elektrische Tagesstrecke ergibt sich:

$$NG(TS) = \frac{IEE}{ETF(v_{el}, TS)} \quad (4.8)$$

Der Nutzungsgrad ergibt sich somit zu:

$$NG(v_{el}, IEE) = \sum_{TS=0}^{300} NG(TS) \cdot H(TS) \cdot \left( \sum_0^{300} H(TS) \right)^{-1} \quad (4.9)$$

Die beschriebenen Werte des elektrischen Fahranteils sowie des Systemnutzungsgrades können in eine Darstellung mit dem Nutzungspotential als ISO-Linien visualisiert werden. Ziel ist, die Entscheidungsgrundlage für eine Systemdimensionierung zu verbreitern und neben dem Nutzungspotential weitere Größen zu Grunde zu legen, die eine bestimmte Dimensionierung unterstützen.

### 4.5.3 Zusammenfassung und Reflexion

Das in diesem Kapitel berechnete Nutzungspotential ist eine Bewertungsgröße, die entwickelt wurde, um über die unterschiedlichen Abstraktionsebenen der Systemmodellierung eine vergleichbare Größe zu haben, mit deren Hilfe ein Systemnutzen in Form einer Kraftstoffsubstitution ausgedrückt werden kann. Die Eingangsgrößen des Nutzungspotentials sind vermessene Nutzungsdaten und Fahrzeugparameter. Es ist aber auch möglich, anstatt der Nutzungsdaten ein hypothetisches Nutzungsprofil zu verwenden und hierfür Potentiale zu ermitteln, da die verwendeten Eingangsdaten ausgewertete Daten der Vermessung sind und nicht mehr die ursprüngliche Auflösung besitzen. Ein Nachteil ist, dass durch die Bildung von 10 km und 10 km/h-Klassen Unschärfen in der Berechnung des Nutzungspotentials entstehen. Dies ist durch die Verfügbarkeit der verwendeten Daten vorgegeben.

Das Nutzungspotential wird abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite und abhängig von einer installierten elektrischen Energie ausgewiesen. Die Möglichkeit einer absoluten Kraftstoffverbrauchs-aussage ist mit dem Nutzungspotential nicht möglich. Die Größe des Nutzungspotentials ist für eine relative Bewertung der Energiesubstitution geeignet, nicht aber für eine Bestimmung des absoluten Kraftstoffverbrauchs. Grund dafür liegt im Auflösungsvermögen der Berechnungsmethode, die existierende Nutzungsdaten konventioneller Antriebe als Referenzbasis verwendet. Geeignet ist das Nutzungspotential, um zu quantifizieren, wie hoch ein Substitutionsgrad des Kraftstoffverbrauchs sein kann. Diese Berechnung erfolgt mit Hilfe von Daten existierender Antriebsstrangkomponenten. Um eine absolute Berechnung des Kraftstoffverbrauchs in realer Nutzung zu ermitteln, ist eine detaillierte, hochauflösende Simulation des Nutzungsverhaltens mit einem exakt modellierten Antriebsstrang notwendig. Hierfür liefert das Nutzungspotential einen wesentlichen Beitrag, da eine geeignete Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems vorbereitet werden kann und mit einer aufwendigen Simulation gezielter berechnet werden kann.

In Kapitel 6 erfolgt eine Validierung und Bewertung der Größe des Nutzungspotentials, die darstellt, wie stark die entwickelte Bewertungsgröße von detailliert simulierten Ergebnissen abweicht.

# 5 Umsetzung einer Systemauslegung

Im vorliegenden Teil der Arbeit soll das in Kapitel 4 vorgestellte Vorgehen für die Auslegung des elektrischen Antriebssystems beispielhaft durchgeführt werden. Dazu werden 15 verschiedene Nutzer analysiert und bedarfsgerechte Initialauslegungen für elektrische Antriebssysteme für die einzelnen Nutzungsgruppen ermittelt.

## 5.1 Analyse der ausgewählten Nutzer

Als Datenbasis dienen Nutzer verschiedener Fahrzeuge, die jeweils ca. sechs Monate vermessen wurden. Für eine möglichst repräsentative Vermessung von Kunden wurde zunächst eine große Auswahl von Kunden eingehend befragt und interviewt, um das Nutzungsverhalten abhängig von den Fahrzeugen zu ermitteln. Aus den Befragten wurden im Anschluss repräsentative Kunden ausgewählt und vermessen. Die Vermessung umfasst im Schwerpunkt Fahrzeugmodelle, die große Volumina darstellen und einen großen Anteil von Kunden wiedergeben (KLAISS, 2010). Der aktuelle Stand umfasst über 260 Kunden in Europa, USA, China und Japan mit Fahrzeugen verschiedener Klassen und Motorisierungen (DIESS, 2013).

Aus Gründen der Geheimhaltung kann für das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehen keine repräsentative Kundenauswahl vorgenommen werden. Jedoch wird das Vorgehen für geeignete Kundentypen angewendet. Für die anstehende Untersuchung wurden aus Gründen der Geheimhaltung Daten von 15 nicht repräsentativen Nutzern aus den rund 260 vermessenen Nutzern beliebig ausgewählt. Dies gilt sowohl für die Wahl der Märkte als auch für die Wahl der Fahrzeuggröße. Die 15 zu analysierenden Nutzer sind geographisch verschiedensten Märkten wie China, USA, Europa oder Japan zuzuordnen. Auch bei den Fahrzeugklassen ist eine breite Verteilung über verschiedene Klassen analog Abbildung 5-1 festzustellen.

Betrachtet man die für die Auslegung kritischen Größen Verbrauchsverteilung abhängig von der Geschwindigkeit, sowie die Tagesstreckenverteilung der jeweils einzelnen Nutzer, so existieren in beiden Größen verschiedene Ausprägungen. In Abbildung 5-2 ist zu erkennen, dass starke Unterschiede in der Verbrauchsverteilung existieren. Es sind Nutzer zu beobachten, die bis 70 km/h rund 90 % des Kraftstoffverbrauchs und somit der Energie umsetzen. Aber ebenso Nutzer, die bis 70 km/h erst 40 % oder weniger ihres Verbrauchs umgesetzt haben, zeigt die Abbildung 5-2. Auch bei der Tagesstreckenverteilung in Abbildung 5-3 zeigt sich ein heterogenes Bild. So sind Nutzer erkennbar, die im Bereich bis 20 Tageskilometer einen signifikanten Anteil haben, aber auch Nutzer die bis 110 Tageskilometer hohe Nutzungsanteile haben. Zudem existieren auch Nutzer mit Ausreißern über 120 km. Das bedeutet, dass eine Clusteranalyse verschiedene Gruppen identifizieren kann, die sich je nach Ausprägung in der Nutzung verschieden stark unterscheiden.

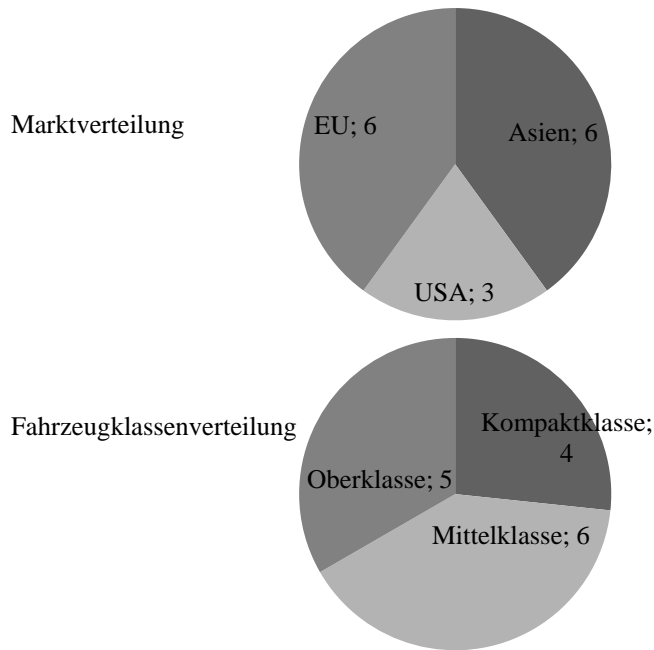


Abbildung 5-1: Verteilung der Fahrzeugklassen und verschiedenen Märkte

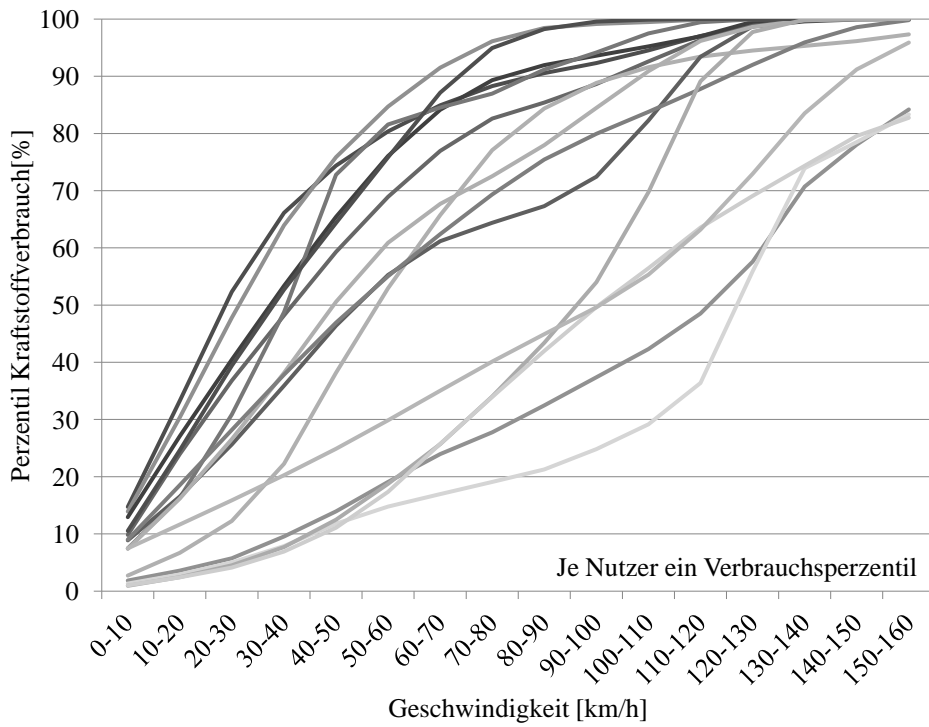


Abbildung 5-2: Verbrauchsperzentile der einzelnen zu analysierenden Nutzer

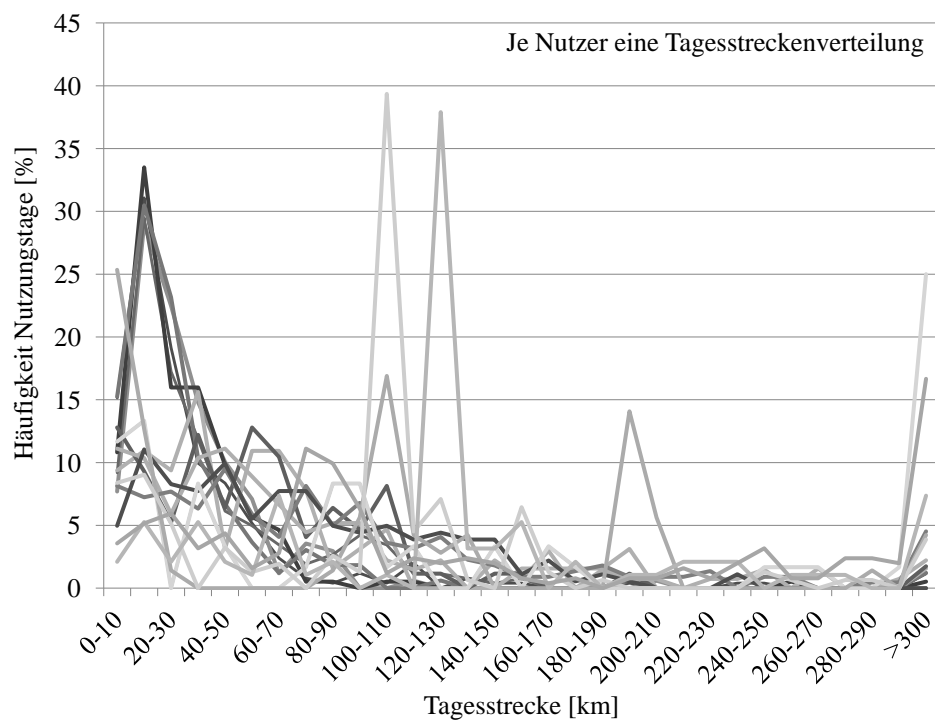


Abbildung 5-3: Tagesstreckenverteilung der einzelnen zu analysierenden Nutzer

## 5.2 Clusteranalyse von Nutzungsdaten

Die Clusteranalyse von Nutzerdaten ist notwendig, um aus einem durchgeführten Feldversuch unterschiedliche Ausprägungen in der Nutzung zu identifizieren. Cluster gleicher Ausprägung ergeben sich durch eine Ansammlung mehrerer Einzelnutzer ähnlichen Verhaltens. Unterschiedliche Ausprägungen des Nutzungsverhaltens resultieren ihrem Verhalten entsprechend in unterschiedlich dimensionierten elektrischen Antriebssystemen und unterscheiden sich in den für die Auslegung relevanten Parametern. Die Clusteranalyse erfolgt vor dem Hintergrund der energetischen Dimensionierung des Systems. Die Höhe der geforderten Leistung erfolgt über Perzentilkurven der Beschleunigungshöhe.

### 5.2.1 Grundlagen der Clusteranalyse

Um Nutzer hinsichtlich ausgewählter Kriterien clustern zu können, wurden zunächst die vermessenen Nutzer in geeigneter Weise einheitlich ausgewertet. Eine Clusteranalyse verfolgt die Gruppierung von Elementen mit Eigenschaften oder Parametern ähnlicher Ausprägung (BACKHAUS ET AL., 2011, S. 397). Bei der Clusteranalyse gibt es zwei Hauptbestandteile, die für die Qualität des Resultats wesentlich sind. Dies sind die Berechnung des Proximitätsmaßes, der Ähnlichkeit und die nachfolgende Ordnung der zu clusternden Elemente in Gruppen mit Hilfe des Fusionierungsalgorithmus.

Das Proximitätsmaß definiert die Ähnlichkeit von zwei verglichenen Elementen für festgelegte Merkmale. Es umfasst in dieser Betrachtung zwei verschiedene Arten. Das Distanzmaß definiert den Abstand zweier Objekte, das Ähnlichkeitsmaß die Korrelation der Ausprägung der einzelnen Elemente. So können beispielsweise zwei Nutzer in den betrachteten Elementen stark korrelieren. Betrachtet man aber das Distanzmaß, so können die Nutzer trotz der starken Korrelation weit distanziert voneinander sein (BACKHAUS ET AL., 2011, S. 400). Als Beispiel sei zu nennen, dass zwei betrachtete Nutzer unterdurchschnittlich



häufig zwischen 10 und 20 Tageskilometer fahren, Nutzer 1 aber 0 % aller Nutzungstage zwischen 10 und 20 km pro Tag fährt, wohingegen Nutzer 2 nur 10 % aller Tage zwischen 10 und 20 Tageskilometer fährt. Damit korrelieren beide Nutzer, unterscheiden sich aber in dem Niveau, in dem die Korrelation auftritt wie Abbildung 5-4 veranschaulicht. Für die vorliegende Untersuchung ist ein geringes Distanzmaß entscheidend, da somit gewährleistet ist, dass Nutzer mit ähnlicher Tagesstrecken- und Verbrauchsverteilung gruppiert werden können.

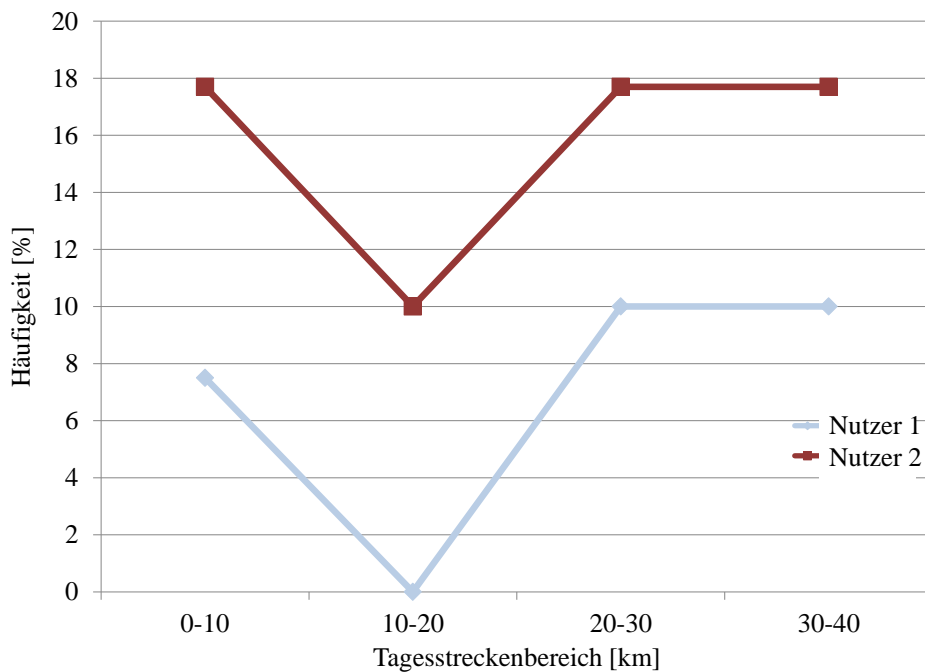


Abbildung 5-4: Ähnlichkeit von Betrachtungselementen

Der Fusionierungsalgorithmus bildet aus Elementen verschiedener Ähnlichkeit Gruppierungen mit ähnlichen Eigenschaftsausprägungen. Voraussetzung dafür ist, dass die einzelnen, zu clusternden Elemente in einer Ähnlichkeits- oder Distanzmatrix geordnet werden. Dazu ist es zwingend, die sogenannte Proximitätsmaße einzuführen, um eine konsistente Einheit bei der Distanz zu definieren. Dies reduziert die betrachteten Elemente auf ein standardisiertes Maß. Ein zusätzlicher Nutzen ist, dass durch die Standardisierung die Gefahr von Ausreißern im Cluster reduziert wird (ZÖLLER, 2010). Die Notwendigkeit der Standardisierung besteht nicht, wenn die für die Clusteranalyse relevanten Kriterien das gleiche Skalenniveau besitzen (BACKHAUS ET AL., 2011).

Als benutztes Proximitätsmaß zur Berechnung der Distanz wird die sogenannte „Quadierte Euklidische Distanz“ verwendet. Diese ist mit den gängigen Clusteralgorithmen kompatibel und ist ein Maß für die Affinität zweier Elemente (BACKHAUS ET AL., 2011, S. 411). Hierbei handelt es sich um ein metrisches Skalenniveau. Zusätzlich bestünde noch die Möglichkeit von nominalen oder binären Metriken. Die „Quadierte Euklidische Distanz“ setzt sich als Quadratwurzel der Summe der Quadrate der Objektpaare zusammen. Die Distanzen ergeben sich als Differenz der jeweiligen Objektpaare. Durch die Quadrierung können große Differenzen und somit Ausreißer identifiziert werden. Im Besonderen eignet sich die „Quadierte Euklidische Distanz“ für die Bewertung der Distanz zwischen zwei Objekten. Dies ist für die vorliegende Problemstellung der zentrale Punkt.

Es existieren eine Vielzahl von Fusionierungsalgorithmen zur Clusteranalyse. Unterschieden wird hauptsächlich zwischen hierarchischen und partitionierenden Verfahren (BACKHAUS ET AL., 2011, S. 418). Eine Clusteranalyse gemäß dem agglomerativ hierarchischen Verfahren ist für die vorliegende Problemstellung das geeignetste Verfahren. Aus den beiden ähnlichsten Elementen wird ein Cluster gebildet und im nächsten Schritt die Distanzmatrix neu berechnet. Dieser Schritt wird bis zur Erfassung aller zu untersuchenden Elemente durchgeführt. Damit können jegliche Elemente in ihrem Abstand zu anderen Elementen oder beliebig gebildeten Elementengruppen berechnet werden.

Für diese Distanzberechnung existieren verschiedene agglomerative Verfahren. Unterschiede der Verfahren liegen beispielsweise darin, wie die Distanzmaße neu gebildeter Cluster zu anderen Elementen umgesetzt wird. Es ist möglich, die Distanz zwischen dem Clusterschwerpunkt zu einem weiteren Element außerhalb des Clusters oder den geringst möglichen Abstand zwischen Cluster und einem weiterem Element zu verwenden. So kann analog Abbildung 5-5 Abstand A oder Abstand B als relevanter Abstand für die Distanzberechnung verwendet werden. Abhängig davon ergeben sich unterschiedliche Abstände und somit andere Ähnlichkeiten.

Im nächsten Schritt können Cluster gebildet werden. Zwei Kriterien stehen zur Auswahl. Eine Minde-

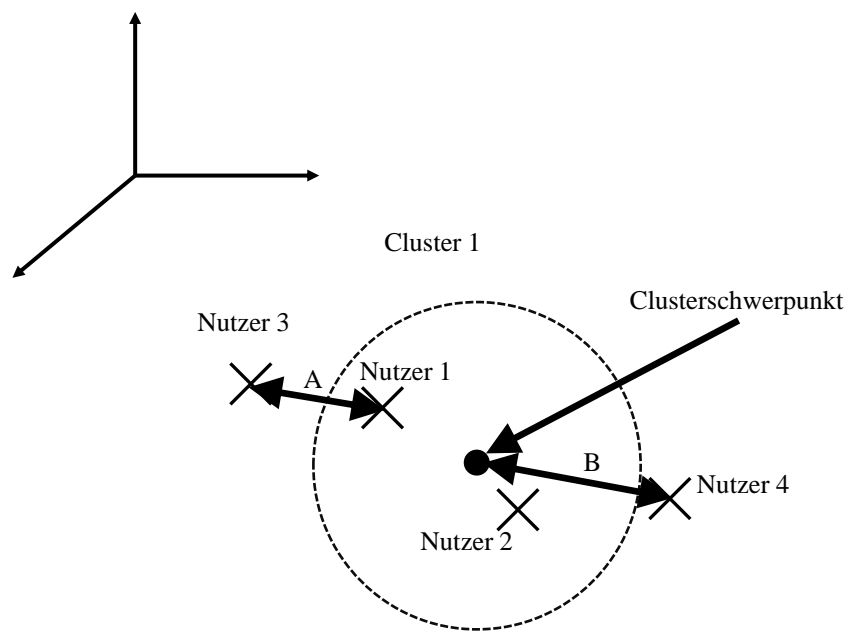


Abbildung 5-5: Unterschiede der Clusteralgorithmen

stanzahl von Elementen kann ebenso ein Cluster festlegen, wie ein Maß für die Ähnlichkeit von Elementen in einem Cluster.

Für die vorliegende Arbeit werden die Elemente nach zwei verschiedenen Kriterien geclustert. Würde die Clusteranalyse in einem Schritt erfolgen, so wäre eine Standardisierung zwingend notwendig. Für dieses Vorgehen sollen aber die untersuchten Kriterien getrennt voneinander untersucht werden. Der Grund dafür ist, dass jede Clusteranalyse für sich wertvolle Informationen liefert. So kann eine Clusteranalyse ausschließlich nach der Tagesstreckenverteilung für die Entwicklung von Anforderungen von batterieelektrischen Fahrzeugen verwendet werden (HASLBECK, 2012). Eine kombinierte Clusteranalyse beinhaltet zusätzlich jeweils Einflüsse des zweiten Kriteriums. Dieses Vorgehen vorausgesetzt, wäre eine

Standardisierung nur notwendig, um mögliche Ausreißer zu kontrollieren. Die Standardisierung wird für die vorliegende Clusteranalyse zur Vermeidung von Ausreißern angewendet.

Um die für diese Problemstellung vorliegenden Daten in Gruppen gleichen Verhaltens zu überführen, werden die zwei genannten Kriterien untersucht. Ergebnis der einzelnen Clusteranalysen ist ein sog. Dendrogramm wie Abbildung 5-6 zeigt. Das Dendrogramm veranschaulicht, wie ähnlich sich die untersuchten Elemente abhängig von dem Skalenniveau zueinander verhalten. Je größer das Maß der Ähnlichkeit, desto geringer die Ähnlichkeit der Elemente. Da es sich bei dem Skalenniveau um eine mathematische und nicht um eine systembezogene Größe handelt, kann daraus keine systematische Unterteilung der untersuchten Nutzer in Cluster erfolgen.

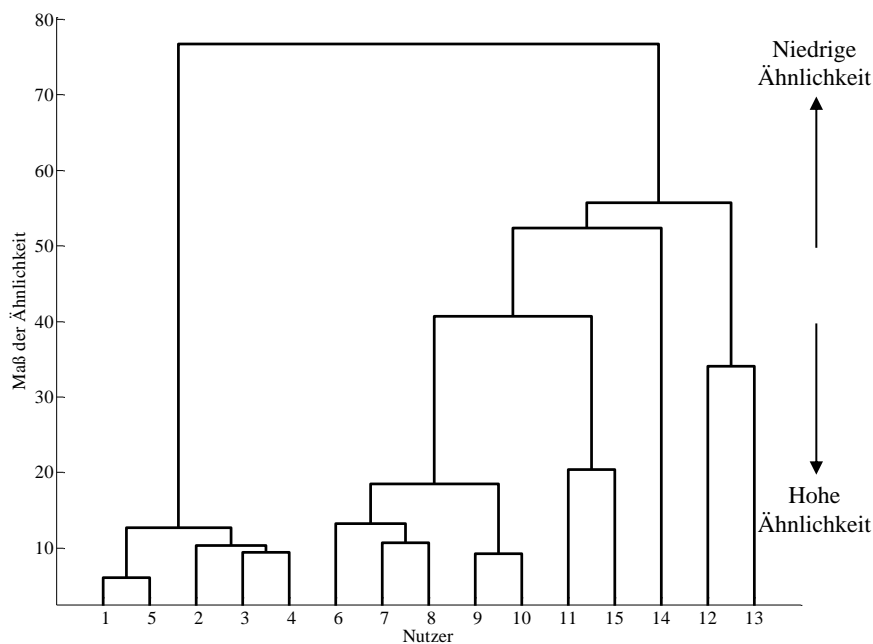


Abbildung 5-6: Beispielhafte Darstellung eines Dendrogramms

Ziel der Clusteranalyse ist es, verschiedene Nutzungsgruppen ähnlichen Verhaltens in den untersuchten Größen zu identifizieren. Daraus abgeleitet erfolgen Systemdimensionierungen, um diesen Clustern ein hohes Nutzungspotential zu ermöglichen. Auf Basis der Ähnlichkeit werden verschiedene Cluster gebildet. Liegen verschiedene Systemelemente innerhalb einer festgelegten Grenze für das Maß der Ähnlichkeit, so werden sie in einem Cluster zusammengefasst. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von Clustern, die nach ihren Ausprägungen geordnet werden. Werden im Anschluss aus diesen Clustern Anforderungen abgeleitet, die eine technische Systemauslegung festlegt, kann die Qualität der Clusterunterteilung entsprechen angepasst werden, um Auslegungen geringen Unterschiedes zu vermeiden. Zunächst soll das Maß der Ähnlichkeit maßgeblich für die Bildung von Clustern sein.

Die untersuchten Größen sind die Tagesstreckenverteilung, sowie das Verbrauchsperzentil abhängig von der Geschwindigkeit. Die Auflösung dieser Nutzungsgrößen liegt in 10 km bzw. 10 km/h Schritten vor. Das reduziert die Anzahl der Dimensionen in der Clusteranalyse, erhöht aber auch die Unschärfe der Eingangsdaten und somit die des Ergebnisses. Ein weiterer Vorteil der groben Rasterung besteht darin, einen Nutzer hypothetisch zu generieren, da die Anzahl der Stützstellen in dieser Auflösung gering ist.

Die Größen können unabhängig von Motorisierung oder Fahrzeuggröße analysiert werden. Dies bringt den großen Vorteil mit sich verschiedene Märkte, Fahrzeugklassen und Motorisierungen zu vergleichen. Es können in einem Cluster verschiedene Fahrzeuge und unterschiedliche Motorisierungen auftreten, jedoch ist das für die Analyse der Nutzungstypen zweitrangig. Dies gewinnt erst dann an Einfluss, wenn Anforderungen für eine technische Umsetzung erfolgen. Dabei hat beispielsweise die Fahrzeuggröße einen Einfluss auf die Dimensionierung und muss berücksichtigt werden.

### 5.2.2 Durchführung einer Clusteranalyse

Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, sind die wesentlichen Parameter im Nutzungsverhalten die folgenden:

- Verteilung der täglichen Fahrstrecke
- Verbrauchsanteile in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit
- Streckenanteile in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Diese Parameter liegen durch eine Auswertung der aus der Vermessung erhaltenen Nutzungsdaten in 10 km bzw. 10-km/h Intervallen vor. Die Datensätze der Nutzer nach Kapitel 5.1 werden nun nach dem beschriebenen Clusterverfahren analysiert. Hierfür wird eine zweistufige Clusteranalyse vorgenommen. In erster Stufe werden die vorhandenen Datensätze nach der Verbrauchsverteilung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit geclustert, in der zweiten Stufe werden die nach Verbrauch geordneten Nutzer nach der Tagesstreckenverteilung geclustert. Das Ziel ist es, homogene Cluster in der Tagesstrecken- und Verbrauchsverteilung zu erhalten. Die Streckenverteilung wird nicht für die Clusteranalyse berücksichtigt, da eine hohe Korrelation mit dem Kraftstoffverbrauch zu beobachten ist. Eine Berücksichtigung würde damit keine zusätzlichen Informationen darstellen.

Da die Nutzungsdaten anschließend für eine Auslegung von Plug-In Hybrid Systemen verwendet werden soll, wird für die Clusteranalyse die Übereinstimmung des Nutzungsverhaltens im Bereich bis 160 km/h und bis 150 Tageskilometer betrachtet. Grund hierfür ist, dass vor allem diese Bereiche für eine Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems wesentlich sind. In diesen Bereichen ist eine Identifikation verschiedener Nutzungstypen wichtig, da sowohl in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen als auch bei kurzen Tagesstrecken das Potential von PHEVs umgesetzt wird. Nach Kapitel 3.6 sind das die Bereiche, in denen im Schwerpunkt der Nutzen der Elektrifizierung liegt. Somit wird in den genannten Bereichen auch ein Hauptteil des Verbrauchspotentials gehoben.

Um die Nutzer passend einordnen zu können, wird nun eine Clusteranalyse nach der Verbrauchsverteilung über der Geschwindigkeit und eine Clusteranalyse nach der Tagesstreckenverteilung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-7 und 5-8 abgebildet.

Die Clusteranalyse des Verbrauchspersentils ergibt drei Cluster, von denen zwei Cluster eine relativ geringe Streuung aufweisen. Dies ist an dem Maß der Ähnlichkeit zu erkennen, das bei ungefähr 40 liegt. Die Nutzer 1-5 sowie Nutzer 10 bilden ein Cluster, Nutzer 6-9 bilden ein zweites Cluster, Nutzer 11-15 ein drittes Cluster mit großer Streuung. Analysiert man die Nutzungsverhalten hinter der Clusteranalyse, so zeichnet sich die Gruppe der Nutzer 1-5 durch einen hohen Verbrauchsanteil im niedrigen Geschwindigkeitsbereich aus, wohingegen Nutzer 11-15 einen hohen Anteil des Verbrauchs im hohen Geschwindigkeitsbereich generieren. Die Nutzer 6-9 liegen zwischen den genannten Gruppierungen.

Wird die Clusteranalyse der Tagesstreckenverteilung analysiert, so ergeben sich zwei Cluster geringer Streuung, sowie eine Gruppierung größerer Streuung. Dies ist wiederum am Maß der Ähnlichkeit abzu-

lesen. Die Nutzer 1-5 und 6-10 bilden je ein Cluster die Nutzer 11-15 bilden ein Cluster mit sehr großer Streuung. Der Grund der großen Streuung liegt darin begründet, dass diese Nutzer große Anteile im hohen Tagesstreckenbereich haben und hier eine große Abweichung, bedingt durch die hohe Kombination von Ausprägungen besitzen. Die Nutzer 1-5 korrelieren hoch im kurzen Tagesstreckenbereich, die Nutzer 6-10 im mittleren Streckenbereich. Festzustellen ist, dass die Ähnlichkeit der Nutzer im Tagesstreckenverhalten größer ist. Die hier ermittelten Gruppierungen haben ein geringes Ähnlichkeitsmaß, das einer geringen Streuung entspricht.

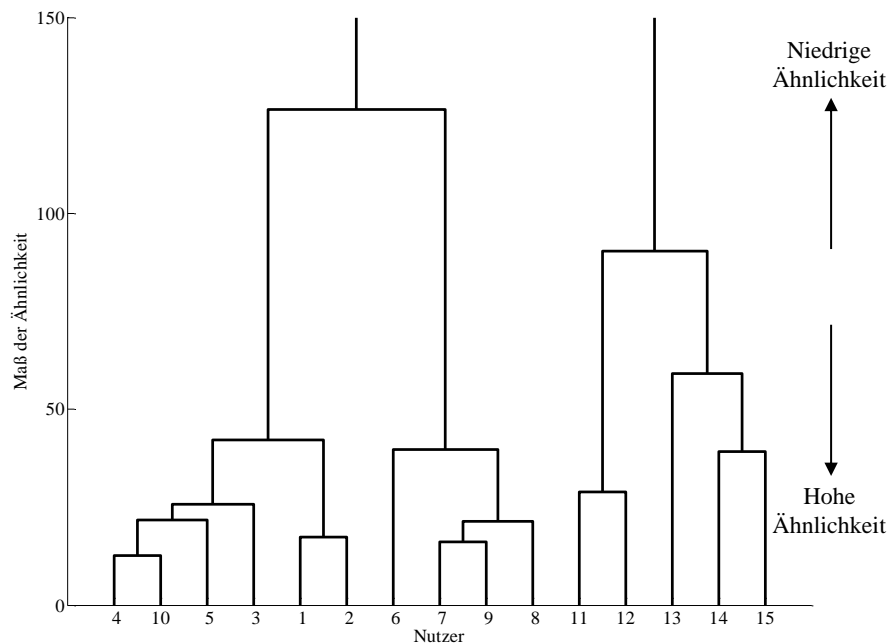


Abbildung 5-7: Clusteranalyse des Verbrauchsperzentils

Nun werden auf Basis der durchgeführten Clusteranalysen Cluster gebildet, für die bedarfsgerechte Auslegungen erfolgen sollen. Aus den 15 analysierten Nutzern werden drei Cluster gebildet. Das erste Cluster besteht aus den Nutzern 1-5. Grundlage der Bildung des Clusters ist das Ähnlichkeitsmaß. Dieses ist bei der Clusteranalyse der Tagesstreckenverteilung geringer als bei der Clusteranalyse des Verbrauchsperzentils. Daher ist die Tagesstreckenverteilung aufgrund der geringeren Streuung maßgebend für die Clusterbildung. Das gebildete Cluster 1 zeichnet sich durch einen hohen und homogenen Anteil von kurzen Tagesstrecken aus wie Abbildung 5-9 veranschaulicht. Zudem wird ein hoher Anteil des Kraftstoffverbrauchs in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen umgesetzt. Die Streuung innerhalb des Clusters ist dabei größer als die Streuung des Tagesstreckenverhaltens.

Das Cluster 2, dargestellt in Abbildung 5-10, weist in der Clusteranalyse der Tagesstreckenverteilung eine mit 19 etwas größere Streuung auf als Cluster 1. Bis 80 Tageskilometer liegen stabile Nutzungsanteile vor, der Verbrauch wird in geringfügig höheren Geschwindigkeitsbereichen umgesetzt als in Cluster 1. Es ist festzustellen, dass die beiden gebildeten Cluster sehr geringe Streuung im Tagesstreckenverhalten aufweisen, im Verbrauchsverhalten aber eine höhere Streuung zeigen.

Das dritte Cluster ist im Vergleich zu Cluster 1 und 2 sehr heterogen. Die Anteile von Tagesstrecken bis 80 km sind im Vergleich deutlich niedriger. Darüber gibt es Nutzungstage mit hohen Anteilen. Die Verbrauchsanteile abhängig von der Geschwindigkeit orientieren sich sehr homogen in Richtung der

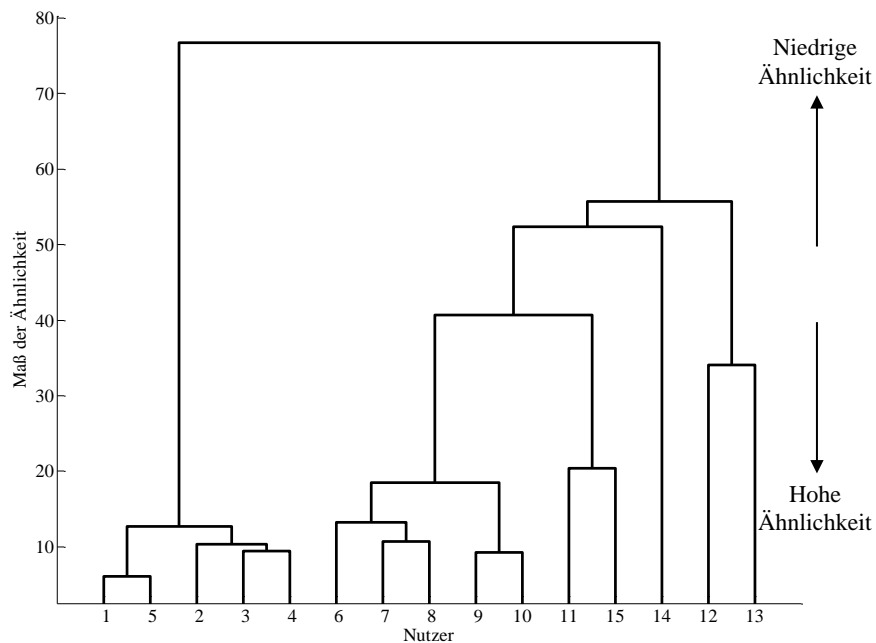


Abbildung 5-8: Clusteranalyse der Tagesstreckenverteilung

höheren Geschwindigkeiten, wobei oberhalb von 100 km/h eine größere Streuung vorliegt. Durch die Clusteranalyse werden deutliche Unterschiede im Nutzungsverhalten identifiziert und getrennt. Eine bedarfsgerechtere Auslegung des Systems ist grundsätzlich möglich. Durch die große Streuung ist der Zweck einer nutzungsgerechten Auslegung aber kritisch zu sehen. Tabelle 5-1 weist die unterschiedlichen durchschnittlichen Nutzungscharakteristika der gebildeten Cluster explizit aus.

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Anzahl der Nutzer	5	5	5
Durchschnittliche Tagesfahrstrecke	32 km	76 km	114 km
Durchschnittliche Geschwindigkeit	29 km/h	40 km/h	69 km/h
Anteil der Tagesstrecken bis 40 km	72%	41%	22%
Anteil der Tagesstrecken von 40 bis 80 km	19%	32%	11%
Anteil der Tagesstrecken über 80 km	9%	27%	67%
Anzahl Nutzer der Kompaktklasse	1	0	1
Anzahl Nutzer der Mittelklasse	3	2	3
Anzahl Nutzer der oberen Mittelklasse	1	3	1

Tabelle 5-1: Kennzahlen der gebildeten Cluster

Wie die Auswertung der durchschnittlichen Tagesstrecken bereits vermuten ließ, unterscheiden sich die drei Cluster in der durchschnittlichen Tagesreichweite, sowie in der durchschnittlichen Geschwindigkeit. Auch die zurückgelegte Strecke zeigt deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auf. Der Anteil der Tagesstrecken im Bereich bis 40 km bzw. bis 80 km ermöglicht eine gute Differenzierung der drei Cluster. Somit ist auch eine Einordnung der Cluster gemäß der vorgestellten Nutzungstypen möglich. Abbildung 5-12 zeigt eine Einordnung des Clusters 1 in den Bereich des städtischen Nutzers,

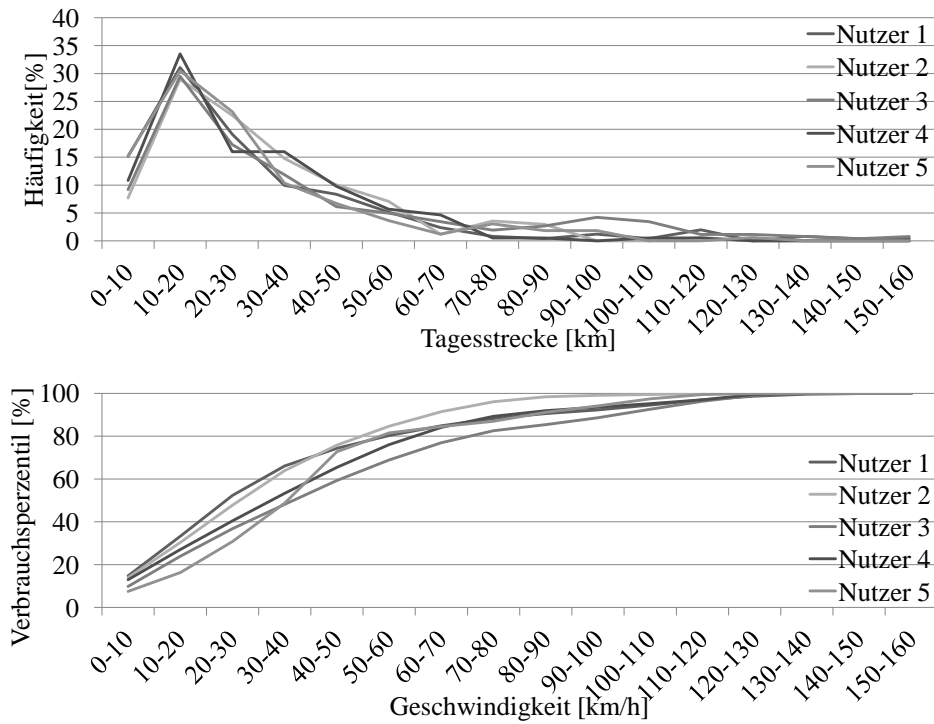


Abbildung 5-9: Tagesstreckenverteilung und Verbrauchsperzentil der Nutzer in Cluster 1

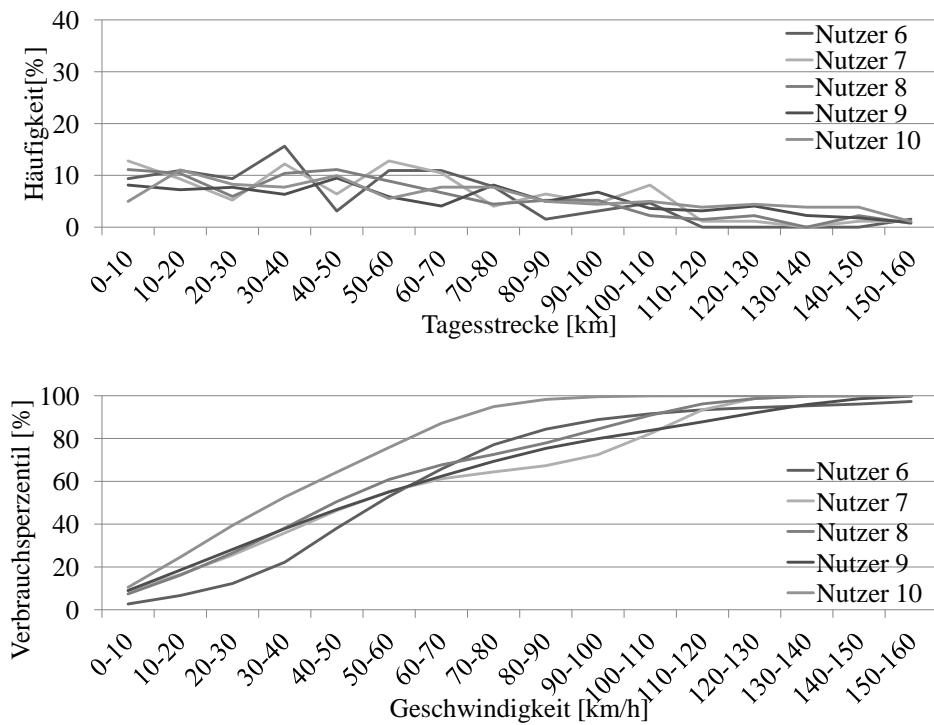


Abbildung 5-10: Tagesstreckenverteilung und Verbrauchsperzentil der Nutzer in Cluster 2

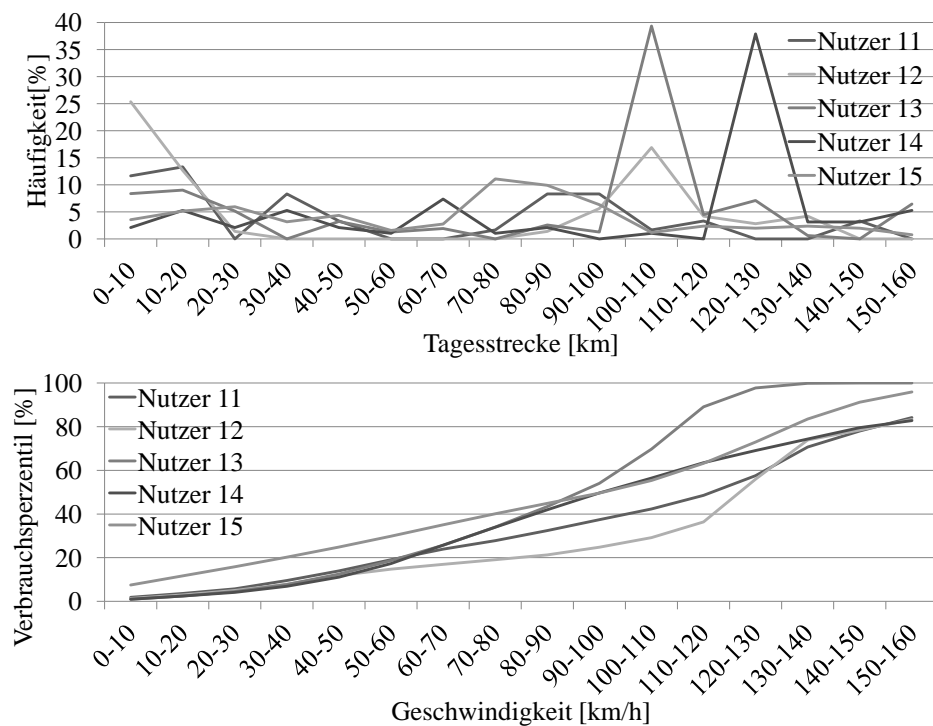


Abbildung 5-11: Tagesstreckenverteilung und Verbrauchssperzentil der Nutzer in Cluster 3

Cluster 2 ist durch den Schwerpunkt im mittleren Tagesstreckenbereich der Ausprägung eines Pendlers zuzuordnen. Cluster 3 wird als Langstreckenkunde klassifiziert, wobei es zu bedenken gilt, dass bei diesem Cluster die Streuung sehr groß, die Eignung für einen PHEV aber sehr klein ist. Für die vorliegende Arbeit wurde lediglich eine kleine Anzahl von Nutzern untersucht. Es ist jedoch auch möglich, alle 260 vermessenen Nutzer einem Nutzungstyp analog 5-12 zuzuordnen. Dies bestätigt das vorgeschlagene Vorgehen und die Strukturierung des Lösungsraums.

Die Betrachtung des Beschleunigungsbedarfs abhängig von der Geschwindigkeit für die gebildeten Cluster ist eine notwendige Information für die Konkretisierung des Leistungsbedarfs an das elektrische Antriebssystem. Dafür werden die Zeitanteile der Nutzung betrachtet und sog. Perzentilkurven für das Beschleunigungsverhalten gebildet. Diese ermöglichen es, einen Beschleunigungsbereich zu identifizieren, der in beispielsweise 80% der Zeitanteile unter einer Beschleunigungsanforderung liegt. Damit ist, fahrzeugunabhängig, eine erste Aussage zu Anforderungen an das Beschleunigungsvermögen möglich. Abbildung 5-13 zeigt die Auswertung für Cluster 1. Für eine Initialdimensionierung werden nicht alle Einzelnutzer eines Clusters berücksichtigt. Für diese Berechnung soll aus allen Nutzern eines Clusters ein mittlerer Nutzer gebildet werden. Da die Clusteranalyse eine geringe Streuung im Nutzungsverhalten ermöglicht, wird durch die Initialdimensionierung, basierend auf einem mittleren repräsentativen Nutzer je Cluster, keine wesentliche Information vernachlässigt. Die Handhabbarkeit der Daten ist somit deutlich einfacher, um eine Initialdimensionierung zu ermitteln. Wäre die Streuung hingegen größer, kann durch einen gebildeten Mittelwert eine bedeutende Information oder Ausprägung im Nutzungsverhalten unberücksichtigt bleiben. Ist die Streuung zu groß, kann durch eine Validierung des Nutzers mit der unvoreilhaftesten Verhaltensausprägung eine Initialdimensionierung validiert werden. Abbildung 5-14 zeigt für die drei gebildeten Cluster die mittleren, repräsentativen Nutzer. Wie die Analyse der Cluster zeigt, hat Cluster 3 einen signifikanten Anteil von Tagesstrecken größer 80 km als auch hohe Strecken- und Verbrauchsanteil im hohen Geschwindigkeitsbereich. Dies wird den Nutzen eines PHEV-Systems



schmäleren. Eine Berechnung des Nutzungspotentials erfolgt später. Auf Grundlage dieses Ergebnisses wird darüber entschieden, ob ein elektrisches Antriebssystem für diese Nutzung einen relevanten Mehrwert darstellt.

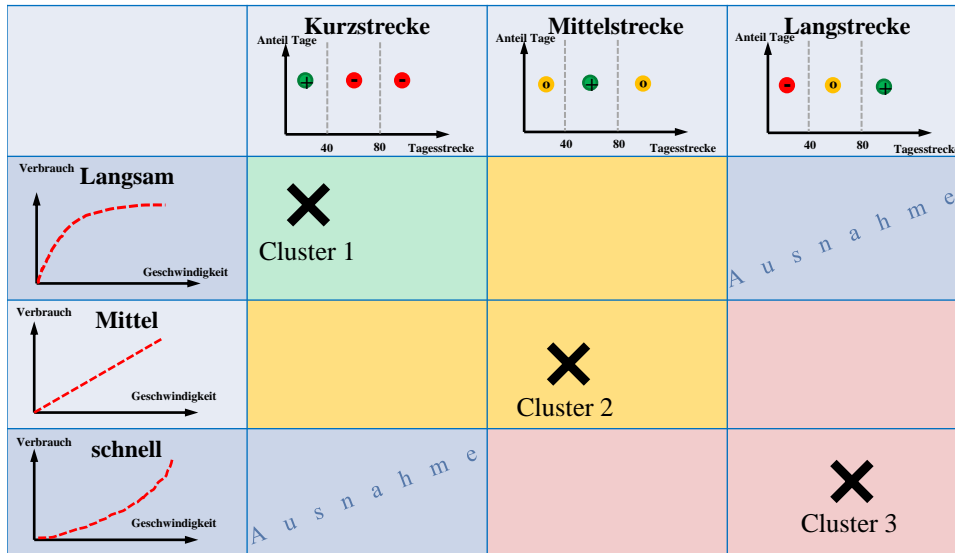


Abbildung 5-12: Einordnung der gebildeten Cluster in die Nutzungsmatrix



Abbildung 5-13: Beschleunigungsperzentile für Cluster 1

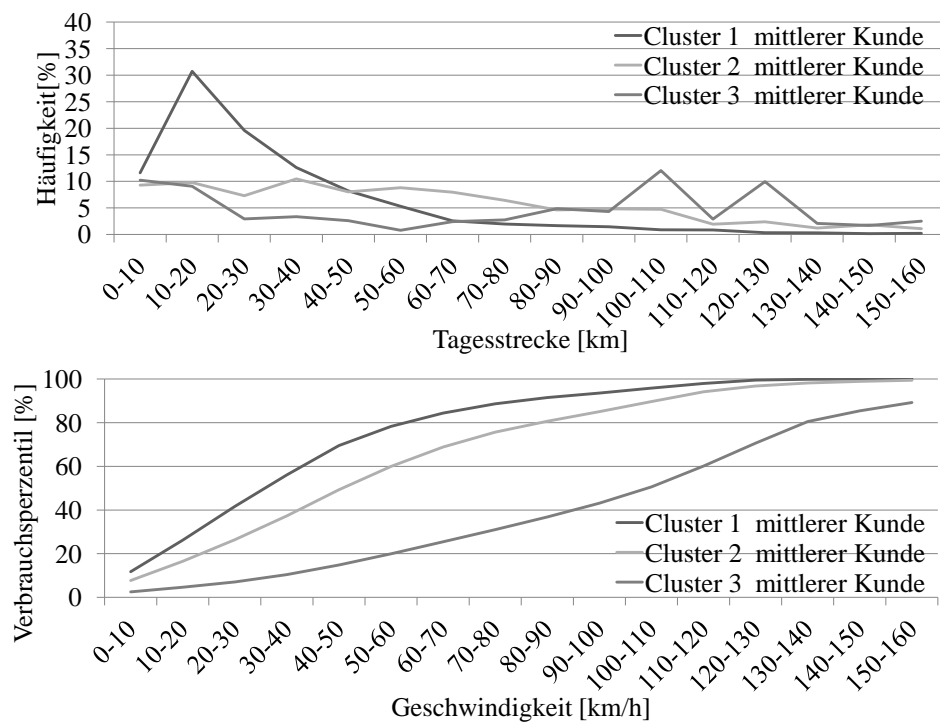


Abbildung 5-14: Bildung der mittleren Nutzer für die drei Cluster

### 5.3 Randbedingungen des gewählten Beispiels

In Vorbereitung auf diese Clusteranalyse haben Simulationen stattgefunden. Diese dienen dazu, in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse, des Nutzungstyps und der Geschwindigkeit den Energiebedarf pro Kilometer zu ermitteln. Mit Hilfe der durchgeführten Simulationen ist es möglich, eine Vielzahl von Nutzungstypen zu identifizieren. Für die folgende Initialauslegung kann auf eine Auswahl verschiedener Energiebedarfskurven zurückgegriffen werden. Die Simulation greift auf eine bestehende Topologie des Antriebsstrangs zurück. In diesem Fall wurde eine Topologie mit einer elektrischen Hinterachse gewählt. An der Vorderachse befindet sich ein mit einer Kupplung entkoppelbarer Verbrennungsmotor. Abbildung 5-15 zeigt den Energiebedarf in Abhängigkeit von verschiedenen Bedarfen für Klimatisierung für einen mittleren Nutzer. Für die Klimatisierung wird ein stationärer Bedarf für das in Tabelle 5-2 beschriebene Fahrzeug verwendet. Dieser unterscheidet sich je nach Fahrzeugklasse und Umgebungstemperatur und ist in Tabelle 5-2 abgebildet. Zudem zeigt Tabelle 5-2 den Leistungsbedarf abhängig vom gewähltem Verbrennungsmotor und weiterer Nebenverbraucher im Komfort-, Unterhaltungs- und Fahrerassistenzbereich. Abbildung 5-15 veranschaulicht, welche Auswirkungen unterschiedliche Klimatisierungsbedarfe auf den Energiebedarf pro Kilometer haben. Der variierende elektrische Energiebedarf für Fahrzeuge mit wechselnden klimatischen Bedingungen ist ein wesentlicher und relevanter Betrachtungsaspekt. Für den Betriebszustand elektrisches Fahren wird der Energiebedarf für Klimatisierung und Bordnetz vollständig aus dem batterieelektrischen Speicher entnommen. Dies hat unmittelbare Auswirkungen darauf, wie viel Strecke elektrisch gefahren werden kann. Für den Klimatisierungsbedarf wird zwischen stationärer und instationärer Klimatisierung unterschieden. Stationäre Klimatisierung beschreibt die Beharrungsklimatisierung mit der geforderten Vorkonditionierung auf eine gewünschte Temperatur. In diesem Fall würde die elektrische Energie in dem am Stromnetz angeschlossenen Energiespeicher über das Stromnetz zur Verfügung gestellt werden. In den anderen Fällen wird die Energie für die instationäre Klimatisierung

aus dem batterieelektrischen Speicher entnommen und reduziert somit die verfügbare Energie für das elektrische Fahren.

Für das Vorgehen in dieser Arbeit wird für die Klimatisierung der vorkonditionierte Zustand mit stationärer Klimatisierung angenommen. Unterschieden wird zwischen den Anforderungen für zwei verschiedene Temperaturen: Es werden  $-15^{\circ}\text{C}$  und  $18^{\circ}\text{C}$  und somit unterschiedliche Leistungsanforderungen für die Klimatisierung betrachtet. Die Temperatur  $-15^{\circ}\text{C}$  entspricht einem Zustand mit einer hohen notwendigen Leistung für Klimatisierung und bildet als Extremwert ein breites Nutzungsspektrum ab.

Um den Leistungsbedarf in einen geforderten Energiebedarf zu überführen, wird er durch die Fahrgeschwindigkeit skaliert. Der Energiebedarf pro Kilometer wird abhängig von einer Geschwindigkeit ermittelt. Nun ist es möglich diesem Energiebedarf den Leistungsbedarf hinzuzufügen. Daraus ergibt sich auf Basis eines Energiebedarfs ausschließlich für die Fahraufgabe ein Energiebedarf, der die Klimatisierung berücksichtigt, abhängig von verschiedenen Temperaturen. Dies wird im vorgestellten Beispiel in Abbildung 5-15 veranschaulicht.

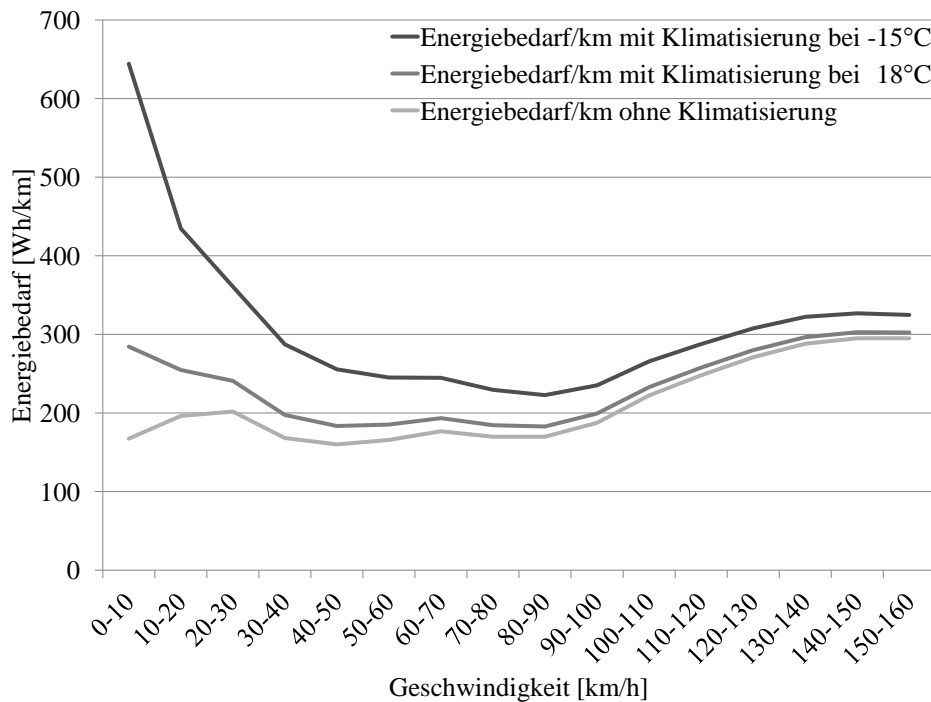


Abbildung 5-15: Energiebedarf pro Kilometer in Abhängigkeit von unterschiedlichen Leistungsanforderungen für die Klimatisierung

Merkmal	Ausprägung
Leistung Verbrennungsmotor	90 [kW]
Fahrzeugmasse (impliziert 200 kg Zusatzgewicht)	1690 [kg]
Luftwiderstandsbeiwert	0,26 [ ]
Stirnfläche	2,2 [ $m^2$ ]
Stationärer Leistungsbedarf für Klimatisierung bei 18°C	800 [W]
Stationärer Leistungsbedarf für Klimatisierung bei -15°C	4500 [W]
Leistungsbedarf elektrische Nebenverbraucher	800 [W]

Tabelle 5-2: Eckdaten des gewählten Fahrzeuges

## 5.4 Berechnung des Nutzungspotentials

Es folgt die Berechnung des Nutzungspotentials abhängig vom identifizierten Nutzungsverhalten auf Basis der erstellten GUI nach KÜPPER (2013). Im ersten Schritt wird das Nutzungspotential in Abhängigkeit von einer installierten elektrischen Reichweite bei einer verfügbaren elektrischen Fahrgeschwindigkeit nach NIES ET AL. (2012b) berechnet. Die Analyse wird für alle drei identifizierten Cluster analog Abbildung 5-16, 5-17 und 5-18 durchgeführt. Für eine verfügbare elektrische Reichweite bei einer elektrischen Geschwindigkeit ist die Höhe des Nutzungspotentials abgebildet. Die Unterschiede sind deutlich erkennbar. Vergleicht man beispielsweise das Nutzungspotential bei 30 km installierter elektrischer Reichweite mit einer elektrischen Geschwindigkeit von 60 km/h, so erhält man beginnend für Cluster 1 70 % Nutzungspotential, für Cluster 2 rund 50 %, für Cluster 3 lediglich knapp 20 %. Daran ist zu erkennen, dass die Eignung der einzelnen Nutzungsverhalten signifikant Auswirkung auf das Nutzungspotential hat. Aus diesem Grund soll Cluster 3 nicht für die weitere Auslegung betrachtet werden. Die Eignung des Nutzungsverhaltens ist im Vergleich zu Cluster 1 und 2 sehr gering und bedarf immenser Systemdimensionierung für ein hohes Nutzungspotential.

Für das weitere Vorgehen wird ausschließlich eine Auslegung in der mittleren Fahrzeugklasse mit dem beschriebenen Fahrzeug aus Tabelle 5-2 betrachtet.

Für die Untersuchung in der mittleren Fahrzeugklasse wird der Unterschied in der Auslegung zwischen Cluster 1 und Cluster 2 aufgezeigt.

Dazu werden zwei unterschiedliche Umgebungstemperaturen analysiert, analog Abbildung 5-15. Abbildung 5-19, 5-20, 5-21 und 5-22 zeigen für verschiedene Bedarfe der Klimatisierung das Nutzungspotential für Cluster 1 und 2 abhängig von einer verfügbaren Energie für elektrisches Fahren im CD-Modus. Die Skala am Rand beziffert die Höhe des Nutzungspotentials. Die Berücksichtigung einer niedrigen Umgebungstemperatur enthält einen angepassten Bedarf für die Klimatisierung. Eingeschränkte Systemfunktionalität, durch beispielsweise niedrige Temperaturen und daraus resultierende niedrige Geschwindigkeiten kann durch eine niedrigere elektrische Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Es ist möglich, Größenordnungen abzuschätzen, um die ein Nutzungspotential durch abweichende, nicht optimale Randbedingungen reduziert wird. Eine reduzierte elektrische Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt in Teilen das reduzierte Leistungsvermögen des elektrischen Antriebssystems durch die in Kapitel 3.4 beschriebenen Eigenschaften der Komponente des batterieelektrischen Speichers. Als Randbedingung wird ein Ladevorgang pro Nutzungstag angenommen.

Untersucht man in den vier Abbildungen die Auslegung 5000 Wh CD-Energiehub und 100 km/h elek-

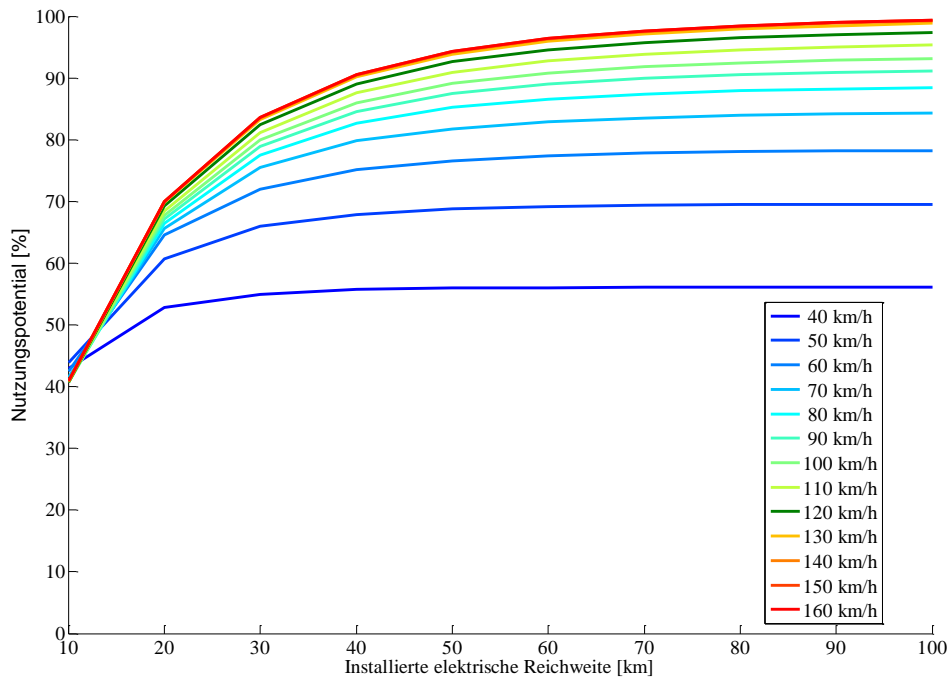


Abbildung 5-16: Nutzungspotential für Cluster 1 in Abhängigkeit von der installierten elektrischen Reichweite

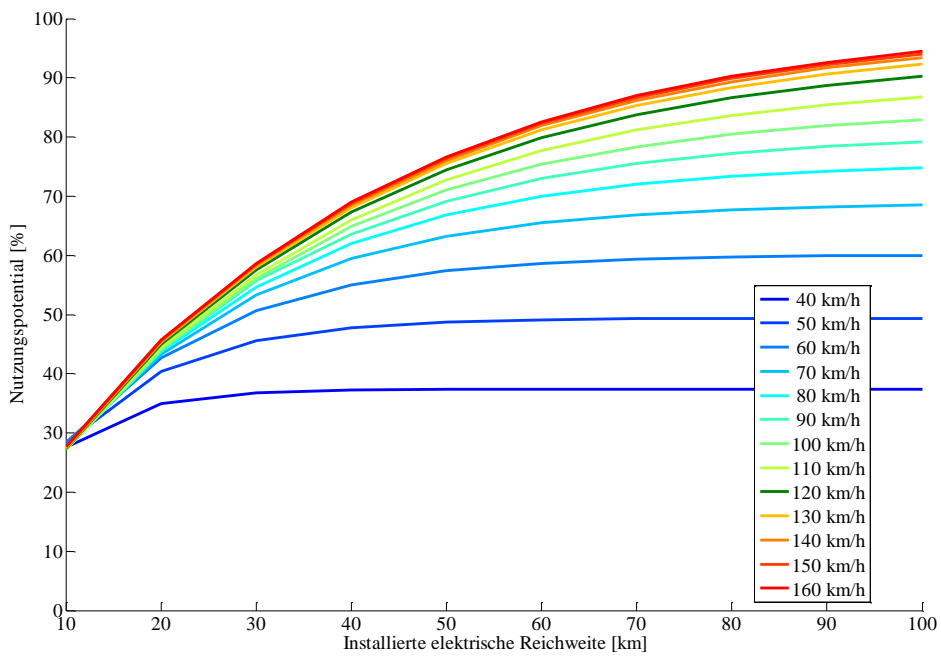


Abbildung 5-17: Nutzungspotential für Cluster 2 in Abhängigkeit von der installierten elektrischen Reichweite

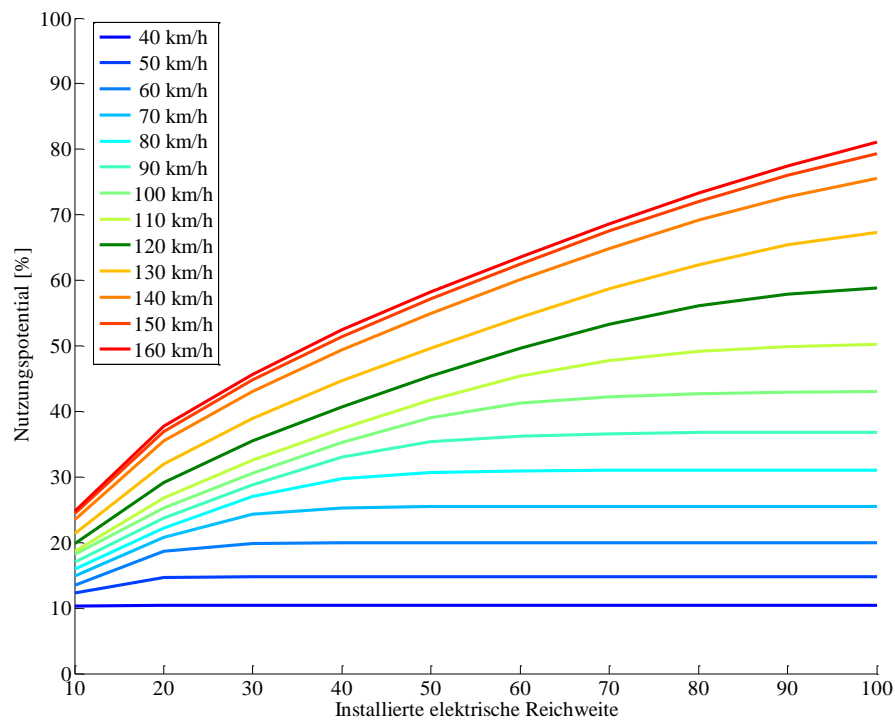


Abbildung 5-18: Nutzungspotential für Cluster 3 in Abhängigkeit von der installierten elektrischen Reichweite

trische Fahrgeschwindigkeit, so erzielen die Nutzer aus Cluster 1 bei 18 °C mit rund 75 % das höchste Nutzungspotential. Mit rund 40 % fällt das Nutzungspotential für dieses Cluster bei -15 °C stark ab. Der Grund liegt in den hohen Streckenanteilen mit niedriger Geschwindigkeit und dem somit großen Einfluss des Klimatisierungsbedarfs. Für das gebildete Cluster 2 fällt für die betrachtete Konfiguration das Systempotential von rund 45 % bei 18 °C zu rund 30 % bei -18 °C nicht so stark ab wie bei Cluster 1. Dies liegt an dem Strecken- und Geschwindigkeitsschwerpunkt bei höheren Geschwindigkeiten. Es ist zu beobachten, dass das Nutzungspotential für Cluster 2 deutlich geringer ist ausfällt als für Cluster 1 bei der gleichen Systemkonfiguration.

Neben dem Nutzungspotential, das den Anteil der substituierbaren Energie durch elektrisches Fahren im CD-Modus umfasst, wurden in Kapitel 4.5.1 zwei weitere Größen berechnet, die für die zwei untersuchten Cluster analysiert werden sollen. Das Systemnutzungspotential, als auch der elektrische Fahranteil bezogen auf die Strecke der elektrischen Geschwindigkeit sind ein Maß dafür, wie ein Nutzungsverhalten ein vorhandenes elektrisches System nutzt. Abbildung 5-23 zeigt den Anteil elektrischen Fahrens bezogen auf die jeweilige elektrische Geschwindigkeit, Abbildung 5-24 zeigt den Systemnutungsgrad, jeweils für die Cluster 1. Diese werden jeweils als ISO-Linien mit dem Nutzungspotential kombiniert abgebildet. Der Anteil des elektrischen Fahrens für einen betrachteten Geschwindigkeitsbereich steigt nicht mit dem gewählten Geschwindigkeitsbereich. Vielmehr ist zu beobachten, dass zu größeren Speichern bei niedriger gewählten elektrischen Geschwindigkeiten eine vollständigere Abdeckung dieses Geschwindigkeitsbereiches erfolgt. Doch nimmt bei großen verfügbaren Energieinhalten und hohen elektrischen Fahrgeschwindigkeiten das Nutzungspotential zu, so dass eine Kombination aus beidem verfolgt werden kann. Der Systemnutungsgrad hat für Cluster 1 das maximale Plateau im Bereich von 4500 Wh. Oberhalb von 60 km/h ergibt sich der maximale Wert zu 63,3 %. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich in Kombination mit dem Nutzungsverhalten die ideale Kombination aus verfügbarer elektrischer

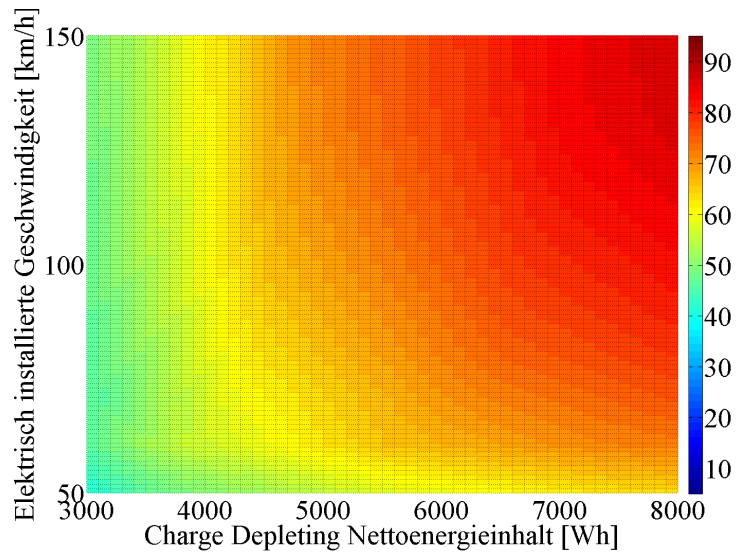


Abbildung 5-19: Nutzungspotential für Cluster 1 bei 18°C für ein Mittelklassefahrzeug

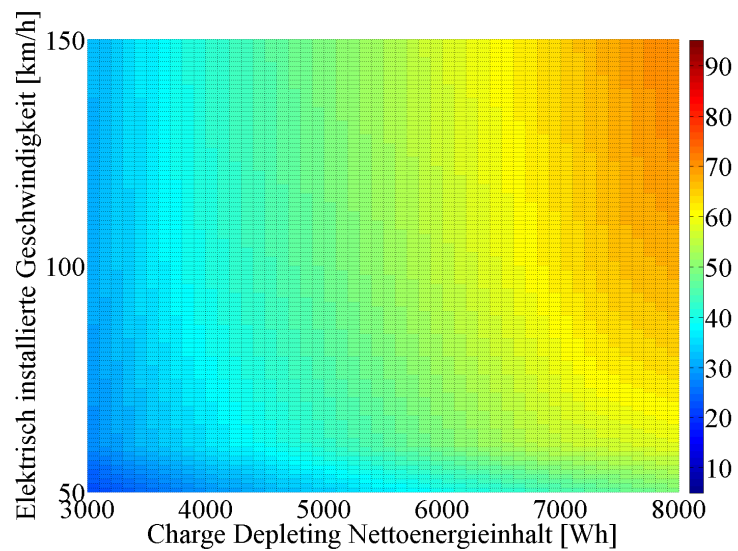


Abbildung 5-20: Nutzungspotential für Cluster 1 bei -15°C für ein Mittelklassefahrzeug

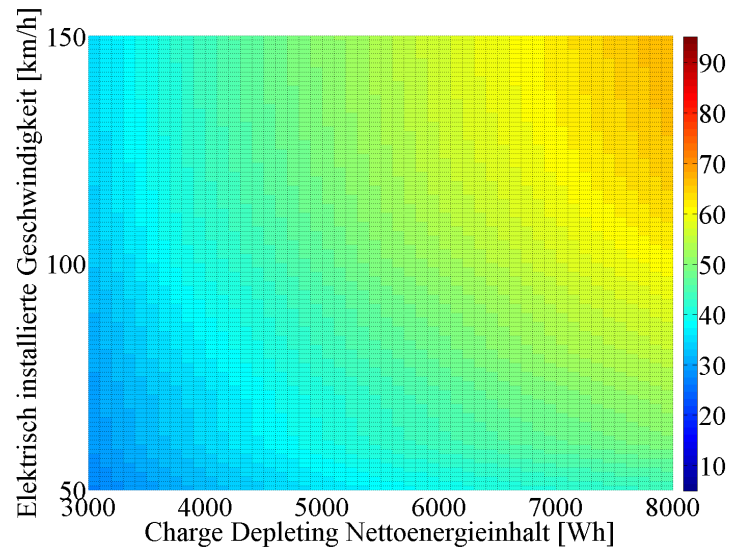


Abbildung 5-21: Nutzungspotential für Cluster 2 bei 18°C für ein Mittelklassefahrzeug

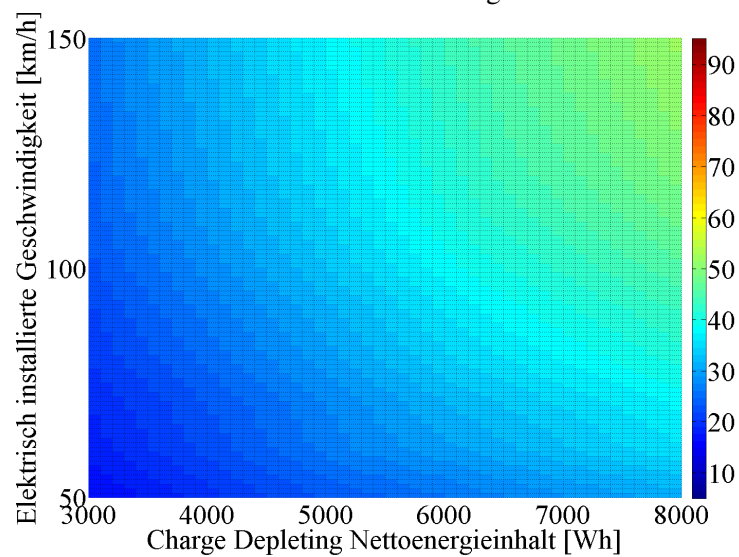


Abbildung 5-22: Nutzungspotential für Cluster 2 bei -15°C für ein Mittelklassefahrzeug



Energie und der möglich umzusetzenden Energie besteht. Ein höherer Wert ist wegen der Streuung im Nutzungsverhalten selbst nicht darstellbar.

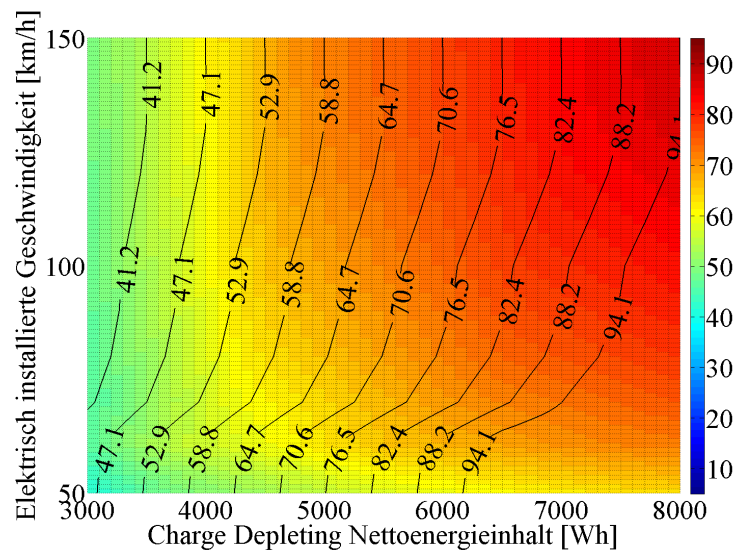


Abbildung 5-23: Nutzungspotential und der Anteil elektrisches Fahren für Cluster 1 bei 18°C

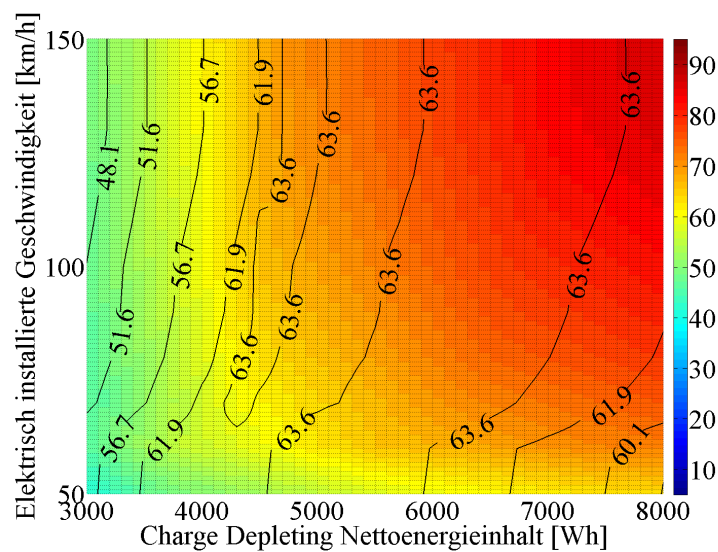


Abbildung 5-24: Nutzungspotential und der Systemnutzungsgrad für Cluster 1 bei 18°C

Auf Basis der getätigten Analysen soll nun für die zwei Cluster eine bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebssystems erfolgen. Ziel ist es, mit einer möglichst kleinen Systemdimensionierung ein hohes Nutzungspotential darzustellen und gleichzeitig in den relevanten Bereichen einen hohen elektrischen Fahranteil zu ermöglichen. Zudem soll das System dem Nutzer über den Systemnutzungsgrad angepasst sein.

## 5.5 Initialauslegung des elektrischen Antriebssystems

Die umfangreiche Analyse des Nutzungsverhaltens sowie die Berechnung des Nutzungspotentials dienen nun als Grundlage für einen Vorschlag der Initialdimensionierung des elektrischen Antriebssystems. Ziel der nutzungsgerechten Auslegung ist, dem Nutzer ein System zur Verfügung zu stellen, das ihm einen hohen Substitutionsgrad bietet, aber trotzdem möglichst klein dimensioniert ist, um mögliche Nachteile durch reduziertes Platzangebot oder hohe Anschaffungskosten klein zu halten. Daher soll eine Auslegung möglichst klein ausfallen. Als Maß und Kriterien für diese Auslegung dienen das Nutzungspotential, der Systemnutzungsgrad sowie der Anteil elektrischen Fahrens für einen festgelegten Geschwindigkeitsbereich.

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Initialdimensionierung werden folgende Bedingungen verwendet: Das Nutzungspotential soll unter normalen Randbedingungen bei einmal täglichem Laden bei 50% liegen. Der elektrische Fahranteil soll bei 60% für den relevanten Geschwindigkeitsbereich liegen. Dieser Wert motiviert sich aus dem Anspruch heraus, für den städtischen Bereich einen hohen elektrischen Fahranteil darzustellen. Zudem soll die Größe des Systemnutzungsgrades einen möglichst hohen Wert erreichen.

Für Cluster 1 ist der Systemnutzungsgrad im Bereich von 4500 Wh CD-Hub maximal. Wählt man eine elektrische Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h, so ist es möglich, rund 60 % der benötigten Energie bei regulären klimatischen Randbedingungen von 18°C elektrisch zu substituieren. Bis 100 km/h werden in dieser Konfiguration 55 % der Strecke zurückgelegt. Bei einer weiteren Erhöhung des CD-Speicherhubs und der elektrischen Geschwindigkeit stehen dem Aufwand nur geringe zusätzliche Nutzungspotentiale gegenüber. Daher scheint die Höhe des gewählten Energiehubs für diesen Nutzungstyp in Kombination

mit den gewählten Anforderungen an den elektrischen Fahranteil und das Nutzungspotential stimmig zu sein.

Für Cluster 2 ist die Wahl des Energiehubs deutlich höher. Um ein Nutzungspotential von 50 % zu erreichen, bedarf es hier rund 7000 Wh CD-Speicherhub und einem Geschwindigkeitsbereich bis 130 km/h. Der Systemnutzungsgrad liegt in Folge bei 50 %, das für diesen Nutzungstyp einem sehr hohen Wert entspricht. Der elektrische Fahranteil liegt bei 50 % bis 130 km/h, womit auch die geforderte Anforderung des elektrischen Fahranteils erfüllt ist.

Die Anforderungen an die geforderte Systemleistung lassen sich mit dem gewählten Fahrzeug, sowie den erzeugten a-v-Perzentilkurven ermitteln. Die für die zwei Cluster festgelegten Geschwindigkeitsbereiche bestimmen den relevanten Bereich der ermittelten a-v-Perzentilkurven. Daraus lässt sich nun die Leistung des elektrischen Antriebssystems ermitteln. Die hier geforderte Leistung ist nach Abbildung 3-8 die Peakleistung der elektrischen Maschine. Diese ist zeitlich nur begrenzt darstellbar. Die für die Auslegung entscheidende Perzentilkurve entspricht 99 % der erfassten Zeitanteile des Fahrprofils. Die Auswertungen zeigen, dass mit steigender Beschleunigung die Zeitanteile geringer werden. Daher wäre eine Auslegung auf Dauerleistung nicht zielführend. Die Dauerleistung ist gemäß HOFMANN (2010) im Bereich von 50 % der angesetzten Peakleistung. Die Peakleistung ist rund zehn Sekunden darstellbar. Für Cluster 1 ergibt sich für den gewählten Geschwindigkeitsbereich eine geforderte Leistung von rund 50 kW Peakleistung für den Geschwindigkeitsbereich bis 100 km/h, für die Nutzer aus Cluster 2 ergibt sich ein Leistungsbedarf von ca. 80 kW analog Abbildung 5-25. Wie zu erkennen ist, kann mit den 50 kW Leistung resultierend aus den Nutzerdaten der aktuelle gesetzliche Fahrzyklus durchfahren werden. Für den WLTP würde es einer Erhöhung der Leistung bedürfen, um eine rein elektrische Durchfahrt zu ermöglichen. Mit rund 60 kW Peakleistung sollte auch der WLTP rein elektrisch fahrbar sein.

Damit ergeben sich gemäß Tabelle 5-3 zwei folgende Anforderungen an die Initialdimensionierung aus energetischer Sicht. Nach BRAUN ET AL. (2010) wird für die Formulierung der Anforderung an den Speicherenergieinhalt ein nutzbarer Speicherhub (DoD, Depth of Discharge) von 80 % angenommen. Ein wichtiger Faktor ist bei dieser Auslegung die elektrische Geschwindigkeit. Dieser ist für die Anforderung an das Leistungsvermögen ein wichtiger Parameter, aber auch dafür, wie hoch der Energiebedarf pro Kilometer ausfällt und somit das Potential beeinflusst wird. Die Festlegung der Geschwindigkeit erfolgt aus den angeführten Zielen für Nutzungspotential und elektrischen Fahranteil. Nun ist es noch notwendig, das Nutzungsverhalten zu analysieren, um Anforderungen für die elektrische Leistung zu formulieren. Relevante Leistung für diese Betrachtung ist die geforderte Leistung an der elektrischen Maschine. Die vorgelagerte Wirkungsgradkette mit dem Achsgetriebe ist bereits berücksichtigt.

	Cluster 1	Cluster 2
Anforderung an elektrische Reichweite	20 km	30 km
Anforderung an elektrische Geschwindigkeit	100 km/h	130 km/h
Anforderung an elektrische Leistung (Nutzer)	50 kW	80 kW
Anforderung an elektrische Leistung (Zyklus)	60 kW	60 kW
Anforderung an Systemnutzungsgrad	maximal	maximal
Anforderung an elektrischen Fahranteil	60%	60%
Anforderung an CD-Speicherhub	4500 Wh	7000 Wh
Darstellbares Nutzungspotential	60 %	50%
Resultierender Bruttospeicherinhalt	6500 Wh	9600 Wh

Tabelle 5-3: Kennzahlen der gebildeten Cluster

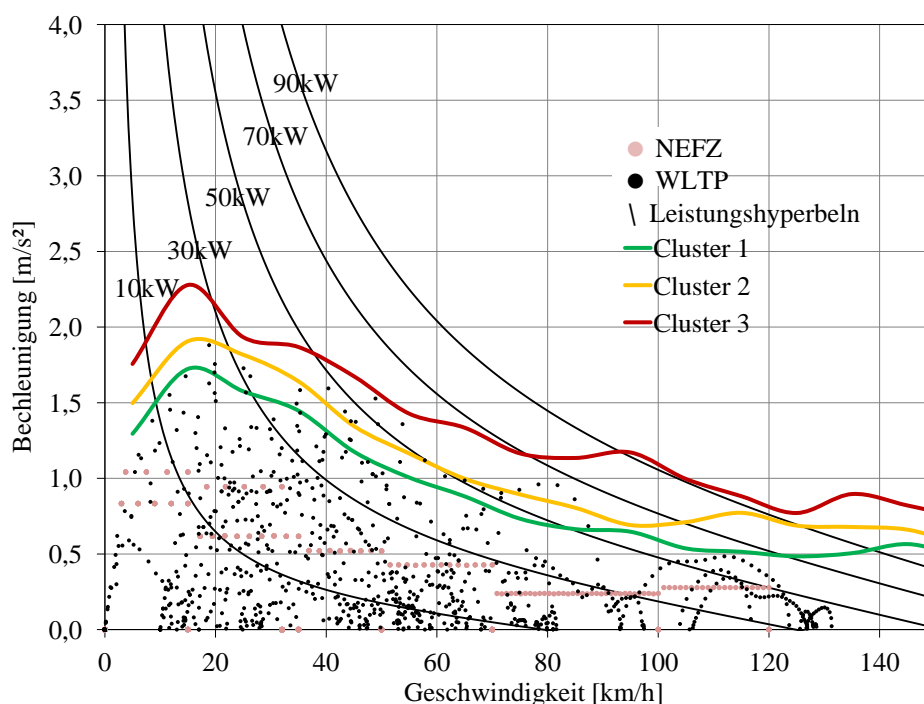


Abbildung 5-25: 99% a-v-Perzentil angepasst auf ein Mittelklassefahrzeug

## 5.6 Reflexion der Auslegung

Die nutzungsorientierte Auslegung erlaubt es ein elektrisches Antriebssystem für ein Nutzungsverhalten auszulegen, das so den Mehrwert des PHEV-Systems für den Nutzer anpasst und steigert.

Natürlich birgt eine solche spezifische Auslegung die Gefahr, dass bei einer Änderung des Nutzungsverhalten, z.B. durch Umzug oder Fahrzeugverkauf das installierte System nicht mehr in dem Umfang zur Geltung kommt, wie für das ursprünglich angedachte Nutzungsverhalten. Doch gibt es schon bei aktuellen Antrieben eine ähnliche Diskussion, wie sie bei Fahrzeugen mit Plug-In Hybrid Antrieben in Zukunft auch möglich ist. So gibt es zahlreiche Portale im Internet (z.B. [www.fuel-pilot.de](http://www.fuel-pilot.de)), die eine Vergleichsrechnung für die Kosten zwischen Dieselantrieb und Benzinantrieb anbieten. Es ist denkbar, dass Plug-In Hybride in ähnlichem Maße analysiert werden und somit die Nutzer einen Mehrwert, hier ausgedrückt als Kostenersparnis, ermitteln können.

Die bedarfsorientierte Auslegung setzt voraus, dass mit einer bestimmten Häufigkeit der batterieelektrische Speicher geladen wird. In der präsentierten Auslegung wird mit der Prämisse von einmal täglichem Laden ausgegangen. In der Umsetzung könnte das bedeuten, dass ein Laden am Arbeitsplatz oder beispielsweise in der heimischen Garage möglich ist. Trifft die Annahme des Ladeverhaltens nicht zu, so verändert sich abhängig vom Nutzungsverhalten das Nutzungspotential unterschiedlich stark. Dies kann in Folge den Mehrwert eines kleinen elektrischen Antriebssystems stark schmälern, aber ebenso bei häufigerem Laden stark verbessern.

Die in Kapitel 4.4 beschriebene Strukturierung des Lösungsraums in Abbildung 4-13 soll an dieser Stelle nochmals aufgegriffen werden. Die in diesem Kapitel durchgeführte Initialauslegung wurde beispielhaft an einem Fahrzeug der Mittelklasse beschrieben. Betrachtet man nun ein Fahrzeug der Oberklasse im Bereich eines städtischen Nutzers analog Cluster 1, so kann hierfür eine Anforderung für einen Leistungsbedarf nach dem gleichen Vorgehen wie in dem gezeigten Beispiel ermittelt werden. Die Anforderung

derung an eine elektrische Leistung beträgt 65 kW, um den gesetzlichen Fahrzyklus WLTP elektrisch fahren zu können, werden rund 70 kW gefordert. Diese Leistung liegt geringfügig unter der geforderten Leistung für die Auslegung auf einen Nutzungstyp analog Cluster 2 in der Mittelklasse mit 70 kW. Damit liegen für diese beiden Fälle sehr ähnliche Anforderungen vor.

Werden die Anforderungen an einen notwendigen CD-Speicherhub ermittelt, um das gleiche Nutzungspotential zu erzielen, wie der städtische Kunde mit einem Fahrzeug der Mittelklasse, so ergibt sich für die Speicherdimensionierung eine Anforderung von rund 7 kWh wie in Abbildung 5-26 veranschaulicht. Der Kennwert des Systemnutzungsgrades weist für die Konfiguration von 7000 Wh und 100 km/h elektrischem Fahren den Höchstwert von rund 63 % auf. Der elektrische Fahranteil weist, wie abgebildet, rund 60 % bei regulären Bedingungen auf. Damit können mit 7000 Wh die gleichen Anforderungen an die Ausprägungen elektrischer Funktionen erfüllt werden, wie für Cluster 1 mit 4500 Wh. Die Dimensionierung des batterieelektrischen Speichers ist gleich zur Dimensionierung des batterieelektrischen Speichers für einen Nutzer des Clusters 2 in der Mittelklasse. Es bestätigt sich die Annahme in diesem Anwendungsfall, Lösungen für verschiedene Nutzungstypen und Fahrzeugklassen kombinieren zu können. Damit besteht die Möglichkeit der Reduktion der Vielfalt der Varianten. Alle entwickelten Anforderungen an eine Initialdimensionierung sind nach RIED ET AL. (2013) seitens der Fahrzeuggeometrie in das Fahrzeug integrierbar und liegen sogar am unteren Ende der Skalierung.

Diese Auslegung wurde nun für ein mittleres Nutzungsverhalten der jeweiligen Cluster durchgeführt. Abhängig von der Streuung im Nutzungsverhalten besteht die Möglichkeit, dass das Nutzungspotential für einzelne Nutzer geringfügig abweicht. Auch weitere Parameter wie der Energiebedarf pro Kilometer können abweichen. Eine solche Varianz soll im folgenden Kapitel analysiert werden.

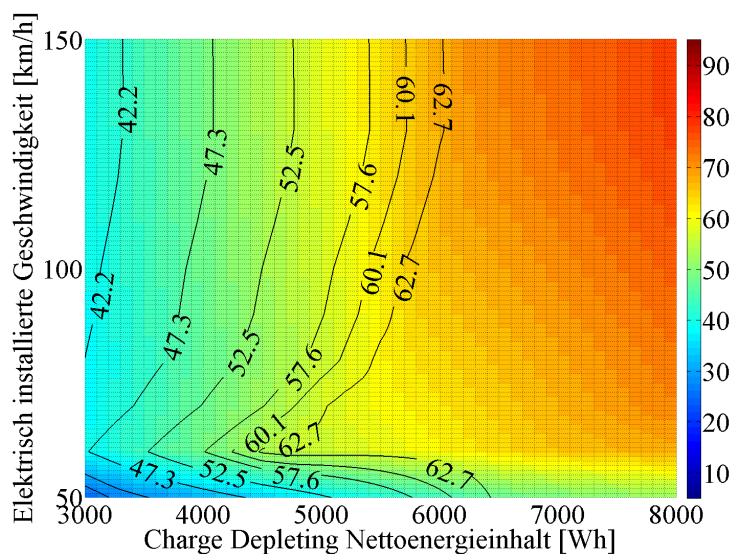


Abbildung 5-26: Systemnutzungsgrad und Nutzungspotential für Cluster 1 bei 18°C in der oberen Fahrzeugklasse

# 6 Validierung der vorgestellten Initialdimensionierung

Die Validierung des vorgestellten Vorgehens zur Initialdimensionierung eines elektrischen Antriebssystems für PHEVs stellt den Abschluss dar, nachdem in Kapitel 5 bereits eine beispielhafte Anwendung vorgestellt wurde. Die Validierung wird an dem präsentierten Beispiel durchgeführt. Die verwendeten Nutzungsdaten liegen in ihrer ursprünglichen Form als Geschwindigkeitsprofile vor und können somit die vorgestellte Methode zur Berechnung einer Initialdimensionierung mit Hilfe einer Simulation mit einem detaillierten Fahrzeugmodell auf Validität überprüfen. Umfang dieses Kapitels ist die Validierung der eingeführten Größe des Nutzungspotentials und die im folgenden Kapitel 6.3 vorgestellten Kategorien der Bewertung.

## 6.1 Zur Validierung verwendete Simulationsmodelle

Für die Validierung werden zwei Simulationsmodelle verwendet, die im Vergleich zu der vorgestellten Berechnung der Initialdimensionierung, die auf ausgewerteten Nutzungsdaten basiert, das ursprüngliche Geschwindigkeitsprofil der einzelnen Nutzungstage für die Ermittlung des Nutzungspotential und der zu ermittelnden Kraftstoffverbrauchswerte verwenden. Diese Simulationsmodelle sind durch eine exakte Beschreibung des Fahrzeugs sowie des Antriebsstrangs charakterisiert. Es ist eine vorgegebene Topologie des Antriebsstrangs mit ausgewählten Komponenten und Wirkungsgradkennfeldern hinterlegt, die eine realistische Abbildung eines realen Fahrzeugbetriebs ermöglichen. Dazu ist eine energetische Betriebsstrategie hinterlegt, um die unterschiedlichen Betriebsmodi CD und CS abzubilden und umzusetzen.

Der Antriebsstrang, der für die Berechnung der absoluten Kraftstoffverbrauchswerte modelliert wurde, entspricht den Anforderungen für Cluster 1 nach Tabelle 5-3 und den Fahrzeugdaten nach Tabelle 5-2 mit angepasstem Gewicht in Abhängigkeit von der gewählten Größe des Batteriespeichers. Die elektrische Leistung beträgt 60 kW, um das geforderte Beschleunigungsspektrum der Nutzung abdecken zu können und den gesetzlichen Fahrzyklus elektrisch durchfahren zu können. Für die Speicherdimensionierung wurde eine Größe von 6,5 kWh brutto gewählt, die den Anforderungen an das Nutzungspotential entspricht. Dieser Wert berücksichtigt einen SoC-Hub für den CS-Modus von 700 Wh sowie 4500 Wh CD-Speicherhub bei einem Entladegrad (DoD) nach BRAUN ET AL. (2010) von 80 %.

Dieses Modell dient zur Bewertung der beschriebenen Aspekte in Kapitel 6.3.

Für die Validierung des Nutzungspotentials wird ein separates Simulationsmodell verwendet, das die Berechnung des Nutzungspotentials analog Kapitel 4.5 bestmöglich abbildet. Das Simulationsergebnis soll eine Aussage dazu treffen, welche Energie in welchen Geschwindigkeitsbereichen umgesetzt wird und wie groß der Anteil der elektrisch substituierbaren Energie wäre, wenn ein elektrisches System mit verfügbarer Energie  $E$  im CD-Modus und einer darstellbaren elektrischen Geschwindigkeit  $v$  installiert wäre. Vorausgesetzt wird, dass die geforderten elektrischen Leistungen in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich abgedeckt werden können.

Dazu wird ein Simulationsmodell mit rein batterieelektrischem Antriebsstrang verwendet, analog Abbil-

Abbildung 6-1 links skizziert. Dieser treibt ausschließlich die hintere Fahrzeugachse an. Durch die Wahl einer Antriebsmaschine werden Einflüsse unterschiedlicher Wirkungsgrade von Verbrennungsmotor und Elektromaschine ausgeblendet. Es ist möglich, die vorliegenden Nutzungsdaten mit unterschiedlichen, hypothetischen Speicherdimensionierung zu simulieren. Das Ziel ist, abhängig von der installierten Speichergröße den Anteil substituierbarer Energie durch einen installierten elektrischen Energiespeicher auszuweisen. Als Ladehäufigkeit wird einmal tägliches Laden angenommen. Die nicht substituierbare Energie für die Fahraufgabe wird ebenso ausgewiesen. Dadurch ist die Validierung der Größe Nutzungspotential auf Einzeltagesbasis und damit in Summe möglich.

Die Berechnung des Nutzungspotentials nach Kapitel 4.5 ist eine rein energetische Betrachtung, die nicht dazu geeignet ist, absolute Kraftstoffverbrauchswerte zu bestimmen. Daher werden zwei Simulationsmodelle verwendet, um zum einen das Nutzungspotential zu validieren, aber trotzdem aus den daraus abgeleiteten Anforderungen konkrete Aussagen zur Höhe des Kraftstoffverbrauchs machen zu können. Abbildung 6-1 zeigt die beiden Simulationsmodelle in ihrer Topologie.

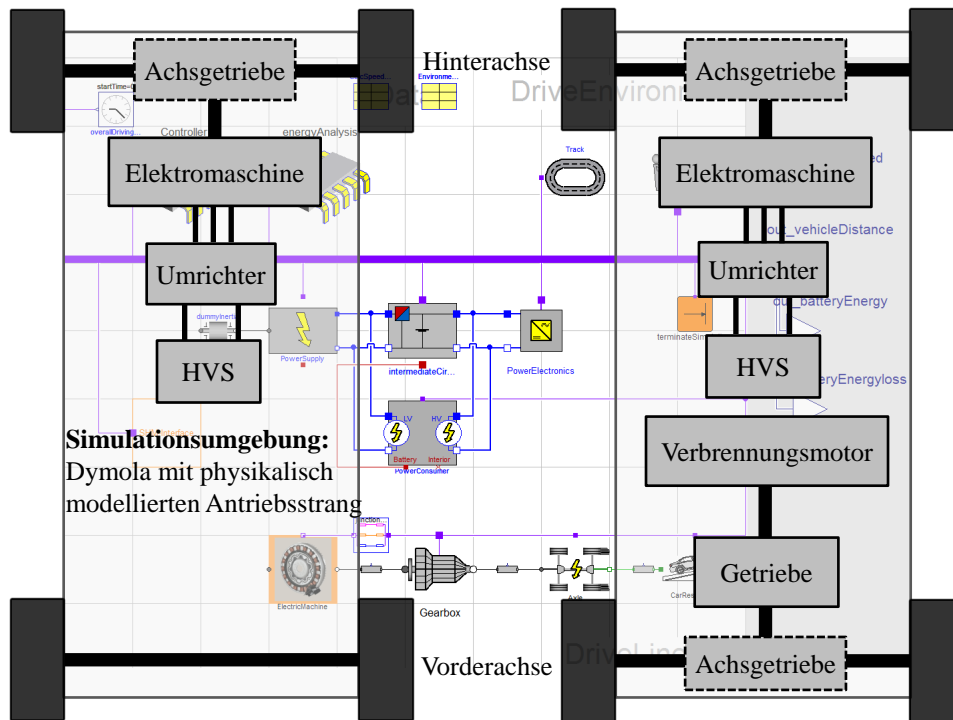


Abbildung 6-1: Antriebstopologien der verwendeten Simulationsmodelle

## 6.2 Validierung der Größe Nutzungspotential

Zur Berechnung des Nutzungspotentials wird eine reduzierte Form der aufgezeichneten Nutzungsdaten verwendet. Dadurch kann eine Abweichung entstehen, genauso wie durch Unschärfen im Berechnungsverfahren. Dieses kondensiert das Nutzungsverhalten auf einige wenige Größen, wodurch ein Verlust von Informationen nicht zu vermeiden ist. Diese Größen ermöglichen keine detaillierte Abbildung der einzelnen Nutzungstage in deren Ausprägung. Daher wird dieses Berechnungsverfahren, auf dem die Initialdimensionierung basiert, mit Hilfe dieser Gesamtfahrzeugsimulationen validiert. Ziel dieser Validierung ist es, zu ermitteln, wie viel Prozent des Energiebedarfs elektrisch mit einer gewählten Konfiguration aus Speichergröße und elektrischem Geschwindigkeitsbereich substituierbar ist. Keine andere

Aussage trifft das Nutzungspotential. Mit dem in Abbildung 6-1 links abgebildeten Antriebsstrang, kann die Berechnung sehr gut überprüft werden.

Dazu werden mit dem beschriebenen Gesamtfahrzeugmodell in der Simulation die Nutzungsdaten einzelner, vermessener Nutzer simuliert. Annahme für die Berechnung ist einmal tägliches Laden. Leistungsbedarfe für Klimatisierung werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Zweck der Simulation ist ausschließlich, die Richtigkeit des Berechnungsverfahrens für das Nutzungspotential aufzuzeigen. Das Gesamtfahrzeugmodell umfasst ein rein elektrisches Fahrzeug mit einer festgelegten Außenhaut und Fahrwiderständen.

In der Simulation werden die Energiebedarfe berechnet, die das Fahrzeug zur Bewältigung der Fahraufgabe benötigt (HASLBECK, 2012). Diese Energiebedarfe werden als Grundlage zur Berechnung des Nutzungspotentials in Kapitel 4.5 verwendet. Mit der großen Zahl von Nutzern konnte somit ein breites Spektrum von Ausprägungen identifiziert werden, die eine wichtige Rolle bei der Initialdimensionierung spielen.

Für verschiedene Speichergrößen und elektrische Fahrgeschwindigkeiten kann nun der Grad der Substitution durch verschiedene Systemkonfigurationen ermittelt. Dies ermöglicht einen Abgleich mit dem vorgestellten Berechnungsverfahren für das Nutzungspotential durchzuführen.

Um die Richtigkeit der Berechnung zu gewährleisten, muss die Energie, die zusätzlich zu der durch das elektrische Antriebssystem substituierbaren Energie benötigt wird, auf am Verbrennungsmotor verfügbare Energie normiert werden. Dazu wird die nicht elektrisch substituierbare Energie mit dem mittleren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs multipliziert und dadurch von dem elektrischen Energiespeicher auf die am Abtrieb notwendige Energie umgerechnet. Diese wird mit dem mittleren Wirkungsgrad des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs auf eine aus dem Kraftstoff notwendige Energie umgerechnet. Für den verbrennungsmotorischen Antriebsstrang wird mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 30% gerechnet. Dieser wurde aus der Simulation ermittelt. Für den elektrischen Antriebsstrang ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von rund 80% (KÜPPER, 2013).

Das Ergebnis aus der Simulation zahlreicher, untersuchter Nutzer hat ergeben, dass die Abweichung des Nutzungspotentials durch Berechnung, das die Höhe der elektrischen Energiesubstitution beschreibt, um nicht mehr als 4 bis 8 % von der Simulation abweicht. Die Höhe der Abweichung kann über zwei Hauptursachen begründet werden. Zum einen werden die Nutzungsdaten in 10 km/h bzw. 10 km-Schritten verwendet, zum anderen wird für alle Nutzungstage das gleiche Strecken- und Verbrauchsperzentil angenommen. Dies kann aber mit der Tagesstrecke abweichen und erzeugt somit Ungenauigkeiten in der Aussage. Für eine Verbrauchsaussage ist die Berechnung nicht geeignet, da hierfür keine relative Betrachtung ausreichend ist, sondern diskrete Werte ausgewiesen werden müssen. Diese hängen wiederum von der technischen Umsetzung ab, die zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt sind. Die absolute Verbrauchsberechnung erfolgt mit einer festgelegten Topologie des Antriebsstrangs. Diese wird im Folgenden ebenfalls simulativ berechnet.

Diese festgestellte Abweichung zwischen Simulation und Berechnung des Nutzungspotentials von 4 bis 8 % ermöglicht, das vorgestellte Verfahren mit der Bewertungsgröße des Nutzungspotentials für eine Initialdimensionierung zu verwenden. Doch sind Einflüsse, wie beispielsweise der Energiebedarfs pro Kilometer sehr sensitiv. Änderungen dieses Wertes sollten daher bewusst gewählt sein. Eine Änderung des Energiebedarfs pro Kilometer wird in Kapitel 6.3.3 in seinen Auswirkungen auf das Nutzungspotential untersucht.



## 6.3 Bewertung auf Basis der Initialdimensionierung

Mit der Initialdimensionierung ist es möglich, einen Vorschlag für die Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems abhängig vom Nutzungsverhalten zu treffen. Nun gilt es, diese Initialdimensionierung, die in eine Systemauslegung überführt wird, zu bewerten. Hier werden verschiedene Schwerpunkte betrachtet:

- Bewertung des Kraftstoffverbrauchs in Vergleich zu einem rein verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeug
- Bewertung der energetischen Nachhaltigkeit
- Bewertung der Verfügbarkeit von Hybridfunktionen bei variierenden Randbedingungen
- Bewertung in gesetzlichen Fahrzyklen und Flottenverbrauch

Für die Bewertung wird das in Abbildung 6-1 rechts abgebildete Simulationsmodell verwendet.

### 6.3.1 Bewertung Kraftstoffverbrauch zu konventionellem Fahrzeug

Der Kraftstoffverbrauch kann als typisches Differenzierungsmerkmal zwischen konventionellen und elektrifizierten Antrieben gesehen werden. Durch rein elektrische Fahrstrecken, sowie Funktionen wie Rekuperation kann die Energieeffizienz gesteigert und der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Der ermittelte Kraftstoffverbrauch umfasst die Reduktion, die durch elektrisches Fahren im CD-Modus ermöglicht wird. Dazu kann noch ein Potential addiert werden, das zusätzlich durch Hybridfunktionen, wie Rekuperation oder Boosten im CS-Modus anfällt. Auch dieses Potential ist nutzungsabhängig. Das Potential im CS-Modus wird für diese Arbeit nicht weiter betrachtet, da es auch je nach Nutzungsverhalten stark variiert. Im Fokus des weiteren Vorgehens steht das Kraftstoffpotential durch rein elektrisches Fahren im CD-Modus.

Für die Berechnung der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist es notwendig, die Nutzungsprofile mit je einem Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang und einem PHEV-Antriebsstrang zu simulieren. Voraussetzung dafür ist eine gewählte Antriebstopologie mit festgelegten Komponenten. Durch diese detaillierte Gesamtfahrzeugsimulation können Unschärfen des Nutzungspotentials, wie nicht festgelegte Komponenten in die Bewertung mit einfließen. Damit ist eine Bestimmung des absoluten Kraftstoffverbrauchs in Nutzerhand, als auch im Vergleich zu einem konventionellen Vergleichsfahrzeug möglich.

Der Kraftstoffverbrauch ist ein Maß, an dem die Energieaufwendungen und die Energieeffizienz bemessen werden können. Es werden einzelne Nutzungstage unter der Annahme von einmal täglichem Laden mit dem Fahrzeugmodell mit PHEV-Antriebsstrang simuliert und jeweils für die einzelnen Nutzungstage der Kraftstoffverbrauch sowie die elektrischen Energieverbräuche berechnet. Daraus ergibt sich in Kombination mit den zurückgelegten Strecken ein elektrischer Fahranteil und ein mittlerer Kraftstoffverbrauch. Wird der Kraftstoffverbrauch des konventionellen Vergleichsfahrzeugs ohne eine Form der Hybridisierung berechnet, kann auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs geschlossen werden.

Die in Kapitel 5 vorgestellten Nutzungscluster wurden mit folgendem Ergebnis simuliert:

Die Simulation der Nutzer in Cluster 1 hat eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 9,2 l/100km auf 3,8 l/100km zur Folge. Das entspricht einer Reduktion von 62 % von dem Fahrzeug mit dem konventionellen Antriebsstrang auf den PHEV. Im Vergleich zum Nutzungspotential ist die Abweichung in diesem Fall 2 %. Für Cluster 2 liegen die Verbrauchswerte bei 11,4 l/100km für den konventionellen Antriebsstrang und 4,5 l/100km für den PHEV. Dies entspricht einer Reduktion um 57 % und liegt somit

2 % unter dem Nutzungspotential (Abbildung 6-2).

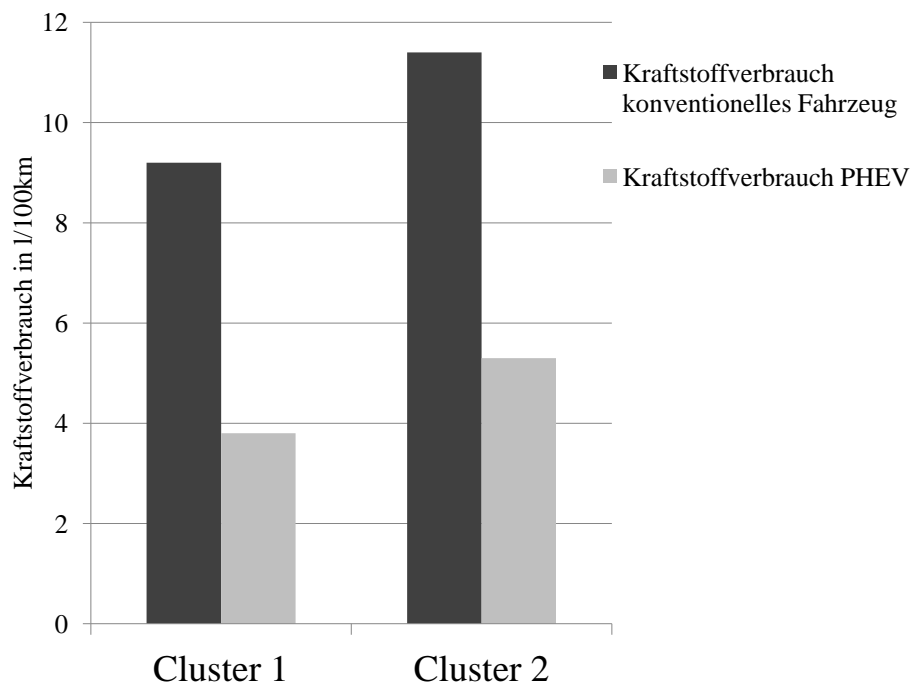


Abbildung 6-2: Kraftstoffverbrauch in der Nutzung in Abhängigkeit vom Cluster und der Wahl des Antriebsstrangs

### 6.3.2 Bewertung energetische Nachhaltigkeit

Die Bewertung der energetischen Nachhaltigkeit von PHEVs umfasst die Herstellung, das Recycling sowie den Betrieb eines Fahrzeugs. Ziel ist es, eine  $CO_2$ -Bilanz über den Betrieb hinaus zu erstellen und somit der Tatsache gerecht zu werden, dass PHEVs und konventionelle Fahrzeuge in der Herstellung und dem Recycling unterschiedlich  $CO_2$ -intensiv sind. Abhängig von den vorliegenden  $CO_2$ -Vorketten kann sowohl für den Kraftstoff als auch für den Strom ein  $CO_2$ -Äquivalent berechnet werden. Über den Verbrauch lässt sich die Summe des  $CO_2$ -Äquivalents ermittelt werden. Vorketten für den Strom sind marktabhängig zu berücksichtigen.

Die Überlegungen zu dieser Bewertung sind nicht neu. PRESTL & WAGNER (2012) beschreibt das  $CO_2$ -Äquivalent in Abhängigkeit von unterschiedlich verfügbaren Strommischen oder Fahrzeug-Designvarianten im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug. Demnach liegt die Chance der Elektromobilität sehr stark auch darin, durch einen  $CO_2$ -neutralen Strommix die  $CO_2$ -Bilanz zu verbessern. SHEN & HAN (2012) nennt gerade den Strommix als Herausforderung. Für Länder wie China mit einem hohen Anteil  $CO_2$ -intensiver Stromgewinnung ist die Weel-to-wheel Analyse für elektrische Fahrzeuge kritisch zu sehen. Der Vorteil des elektrischen Fahrens kann dabei verloren gehen und zu einem Nachteil werden.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz hat zum Ziel, durch eine optimierte elektrische Systemdimensionierung den Kraftstoffverbrauch mit einer hohen Systemausnutzung zu reduzieren. Zum einen kann dadurch mitunter ein kleineres, weil geeigneteres System Vorteile bringen, als auch ein optimierter Kraftstoffverbrauch das  $CO_2$ -Äquivalent reduzieren. Für die Nutzung kann zusätzlich ein spezifischer, dem Nutzungsverhalten zugrundeliegender Kraftstoffverbrauch angenommen werden. Dieser Kraftstoffverbrauch kann

mit Hilfe der Erfassung des Nutzungsprofil berechnet werden. Verbrauchsaussagen für die Nutzung auf Basis gesetzlicher Zyklen können so vermieden werden. Die Bewertung kann abhängig von der Laufleistung des Fahrzeugs durchgeführt werden. Abbildung 6-3 veranschaulicht, dass für unterschiedlich große Speicher für unterschiedliche Nutzungsverhalten nutzungsspezifische  $CO_2$ -Äquivalente ermittelt werden können.

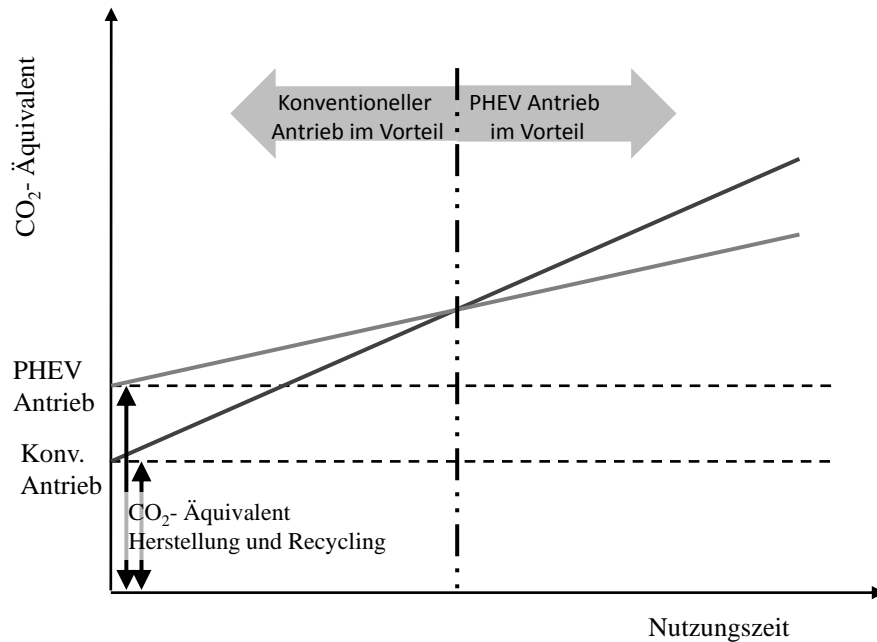


Abbildung 6-3: Prinzip der Bewertung der energetischen Nachhaltigkeit

Wird nun für das entwickelte Fahrzeug mit dem festgelegten Antriebsstrang ein  $CO_2$ -Äquivalent berechnet und im Vergleich das konventionelle Fahrzeug betrachtet, so ergibt sich durch die Laufleistung aus einer berechneten, durchschnittlichen Tagesreichweite ein Kurvenverlauf analog Abbildung 6-4. Dieser Abbildung liegt das Nutzungsverhalten von Cluster 1 samt der entwickelten Auslegung zu Grunde. Für 1 kWh elektrische Energie wurde mit 1,2 kg (WAGNER ET AL., 2007) ein  $CO_2$ -intensives  $CO_2$ -Äquivalent verwendet. Für den Energiebedarf pro Kilometer wurde ein durchschnittlicher Wert aus den Nutzungsdaten von rund 200 Wh verwendet. Ist die Differenz der jeweiligen Werte für das  $CO_2$ -Äquivalent größer als die Differenz für die Herstellung und das Recycling, ist die energetische Nachhaltigkeit für den PHEV bei dem betrachteten Nutzungsverhalten in Kombination mit der Systemkonfiguration gegeben. Eine genaue Berechnung des  $CO_2$ -Äquivalents der generierten Konzepte für die vorliegende Arbeit ist nicht möglich, da für die betrachtete Konzeptphase im Produktentwicklungsprozess die notwendigen Daten für eine Bestimmung des  $CO_2$ -Wertes für Herstellung und Recycling des Fahrzeugs noch nicht vorliegen. Somit kann nur eine Aussage des  $CO_2$ -Äquivalents für die Nutzungsphase gemacht werden. Abbildung 6-4 zeigt die Kurven des  $CO_2$ -Äquivalents für Cluster 1. Zu erkennen ist, dass der PHEV durch die Verbrauchsreduktion einen deutlich geringeren Wert in der Nutzung realisiert. Wäre nun der Bedarf für Herstellung und Recycling klein, kann bereits nach einer Nutzungszeit von wenigen Jahren eine positive  $CO_2$ -Bilanz ausgewiesen werden. Der Einfluss auf das  $CO_2$ -Äquivalent durch die elektrische Energie ist trotz des sehr unvorteilhaft gewählten  $CO_2$ -Wertes sehr gering. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Verfügbarkeit des elektrischen Antriebssystems keine durch die Alterung be-

dingten Einschränkungen erfährt. Mit Einschränkungen ergibt sich ein höherer Kraftstoffverbrauch und somit ein höheres  $CO_2$ -Äquivalent für den PHEV.

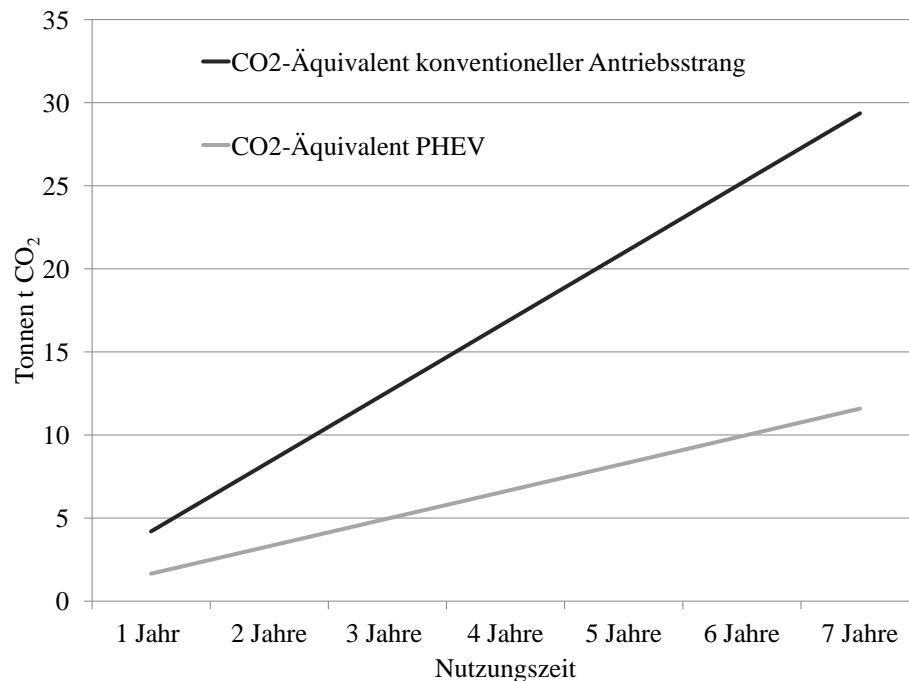


Abbildung 6-4: Vergleich des  $CO_2$ -Äquivalents in Abhängigkeit von der Wahl des Antriebsstrangs für Cluster 1

### 6.3.3 Bewertung Verfügbarkeit Hybridfunktionen bei variierenden Randbedingungen

Die Auswirkung variierender Randbedingungen hat einen erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit und somit auch das Nutzungspotential von PHEV- Antrieben. Folgende, variierende Randbedingungen sollen betrachtet werden:

- Ladeverhalten
- Nutzungstyp
- Einfluss der elektrischen Fahrgeschwindigkeit

Die Betrachtung eingeschränkter hybrider Funktionalitäten durch variierende Komponententemperatur wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Die Vielzahl zu berücksichtigender Parameter wie Abkühlverhalten abhängig vom Fahrzeugaufbau (z.B. Positionierung Batteriespeicher in Fahrzeuggeometrie), klimatischer Randbedingungen, Standzeiten oder detaillierte Komponenteneigenschaften sind für eine Initialdimensionierung samt anschließender Validierung und Bewertung nicht darstellbar und bedürfen einer detaillierten Betrachtung. Dies ist in der frühen Initialphase des PEPs noch nicht möglich. Genauso wird die Alterung der Komponenten des elektrischen Antriebsstrang nicht untersucht. Bewertungsbasis sind die Eigenschaften zu Beginn der Nutzung.

Das Ladeverhalten in der Nutzung hat einen entscheidenden Einfluss darauf, welches Potential ein entwickeltes System realisieren kann. Mit der Ladehäufigkeit hat der Nutzer den größten Stellhebel, den

Betriebsanteil seines elektrischen Systems und den elektrischen Fahranteil zu maximieren und somit das Nutzungspotential zu erhöhen. Ein zusätzlicher Ladevorgang pro für die Bewertung relevantem Zeitraum bedeutet, dass eine doppelt so große elektrische Energiemenge für den gleichen Zeitraum zur Verfügung stehen kann. Daraus folgt, dass wiederum abhängig von der Art der Nutzung durch das Ladeverhalten das Potential unterschiedlich stark beeinflusst werden kann. NIES ET AL. (2012b) veranschaulicht unterschiedliches Ladeverhalten und das zusätzliche Potential am Beispiel von zwei verschiedenen Nutzern. Die betrachteten Nutzer unterscheiden sich im wesentlichen in der Tagesstreckenverteilung. Nutzer 1 repräsentiert den Kurzstreckenfahrer, wohingegen Nutzer 2 den Schwerpunkt im mittleren Streckenbereich zwischen 30 und 80 km hat. Der elektrische Fahrbereich wird in diesem Beispiel bis 70 km/h festgelegt. NIES ET AL. (2012b) beschreibt unterschiedliches Ladeverhalten mit einem oder zwei täglichen Ladevorgängen. Zweimal Laden pro Tag bedeutet, dass die doppelte elektrische Energiemenge zur Verfügung steht. In realer Nutzung entspricht dies einem Ladevorgang vor der ersten Fahrt des Tages sowie unmittelbar nachdem der erste Speicherhub aufgebraucht ist. Dies ist eine idealisierte und vereinfachte Betrachtung. Doch ist es kaum möglich, die hohe Kombinatorik aus Nutzungsverhalten in Form von Anzahl der Fahrten, Länge der Fahrten, Energiebedarf der Fahrten, Abstelldauer oder auch verfügbarer Ladeinfrastruktur in all den Ausprägungen zu erfassen. Deswegen werden idealisierte Grenzwerte betrachtet.

In einer Studie mit batterieelektrischen Fahrzeugen wurde ebenfalls das Ladeverhalten untersucht (BMW, 2010). Durchschnittlich 2,8 Ladeereignissen pro Woche wurden in dieser Studie ermittelt. Das entspricht einer Ladehäufigkeit von annähernd einmal in zwei Tagen. TAKEUCHI ET AL. (2012) beschreibt die Ergebnisse einer Untersuchung mit ungefähr 260 PHEV Fahrzeugen in verschiedenen Märkten weltweit. Dabei liegt die tägliche Ladehäufigkeit bei 0,6 bis 0,9 bzw. 2,1 Ladevorgängen pro Tag. 2,1 Ladevorgänge pro Tag sind ein Ergebnis zusätzlich zur Verfügung gestellter Ladeinfrastruktur. Die zusätzliche Ladeinfrastruktur zeigt in diesem Fall deutliche Auswirkungen auf das Ladeverhalten der Nutzer.

Für PHEVs ist es essentiell, durch eine hohe Ladehäufigkeit das elektrische Antriebssystem zu nutzen. Lädt der Nutzer nicht, so wird er im Gegensatz zum batterieelektrischen Fahrzeug trotzdem keine Einschränkungen in der Mobilität erfahren und ein hybrides Fahrverhalten nutzen können. Im Gegensatz zum batterieelektrischen Fahrzeug lädt der Nutzer beim PHEV nicht, um grundsätzlich mobil zu sein, sondern um die Mobilität in einem bestimmten Umfang elektrisch darstellen zu können. Dies wirkt sich für den Nutzer in reduziertem Kraftstoffverbrauch aus, dem zentralen Mehrwert eines PHEVs. Betrachtete Randbedingungen für diese Arbeit sollen einmal und zweimal Laden täglich als Minimum bzw. Maximum sein. Diese Ausprägungen resultieren zum einen aus der zugrundeliegenden Studie von TAKEUCHI ET AL. (2012), die auch eine verbesserte Ladeinfrastruktur betrachtet, zum anderen auch aus der Studie von ECOTALITY (2012), wonach umfangreiche Vermessungen von PHEV-Fahrzeugen bei unterschiedlichen Randbedingungen der Ladeinfrastruktur durchgeführt wurden. Ergebnis war, dass das Ladeverhalten im Bereich von 1,1 bis 1,4 Ladevorgängen pro Tag liegt. Eine ausgebaute öffentliche Ladeinfrastruktur unterstützt in diesem Fall die Ladehäufigkeit.

Einem Zwischenbericht von BECKER & LEDWON (2010) zufolge wird beispielsweise für den deutschen Markt prognostiziert, dass zahlreiche Ladetechnologien für öffentliche sowie private Möglichkeiten der Batterieaufladung ab 2014 verfügbar sein werden. Die Durchdringung des Marktes wird nicht weiter detailliert. Der Schwerpunkt der Ladeinfrastruktur bilden dem Bericht zufolge Ladestationen in privaten Heimstationen und im Bereich der Arbeitsplätze. Dieses Szenario soll für die vorliegende Arbeit angenommen werden. Durch private Heimladestationen und Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz besteht die Möglichkeit ein bis zwei Mal pro Tag zu laden. Somit kann auch das installierte elektrische Antriebssystem angemessen genutzt und ein hohes Nutzungspotential dargestellt werden. Nach BECKER & LEDWON

(2010) hat die austauschbare Fahrzeugbatterie auf Grund von Standardisierungsproblemen unter den Herstellern kaum Möglichkeiten auf Umsetzung. Diese Lösung wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Die Vielfalt in der Variation für die vorliegende Arbeit wird auf die einfache Größe verfügbarer Energie als Vielfaches der installierten Speicherenergie reduziert. Diese Betrachtung umfasst eine Vielzahl von möglichen Nutzungssituationen und gibt Auskunft darüber, wie wertvoll es sein kann durch häufiges Laden an einem Nutzungstag mehr als die einfache Energiemenge eines Batteriespeichers zur Verfügung zu haben. Abbildung 6-5 zeigt die Sensitivitäten für die vorgeschlagenen Systeme für Cluster 1 und Cluster 2. Zu erkennen ist, dass Cluster 2 durch die höhere elektrische Geschwindigkeit von 130 km/h ein höheres Grenzpotential bei häufigerem Laden mit 95 % realisieren kann. In Cluster 1 kann mit einmaligem Laden eine Kraftstoffverbrauchssubstitution von 90 % erfolgen. Grund für den niedrigeren Wert ist die niedrigere elektrische Geschwindigkeit. Ergebnis ist, dass mit dem Ladeverhalten ein bedeutender Stellhebel zur Verfügung steht, um aus einem klein dimensionierten Speichersystem bedeutend mehr Substitution des Kraftstoffs zu ermöglichen. Andererseits reduziert weniger häufiges Ladeverhalten das Nutzungspotential ebenso deutlich.

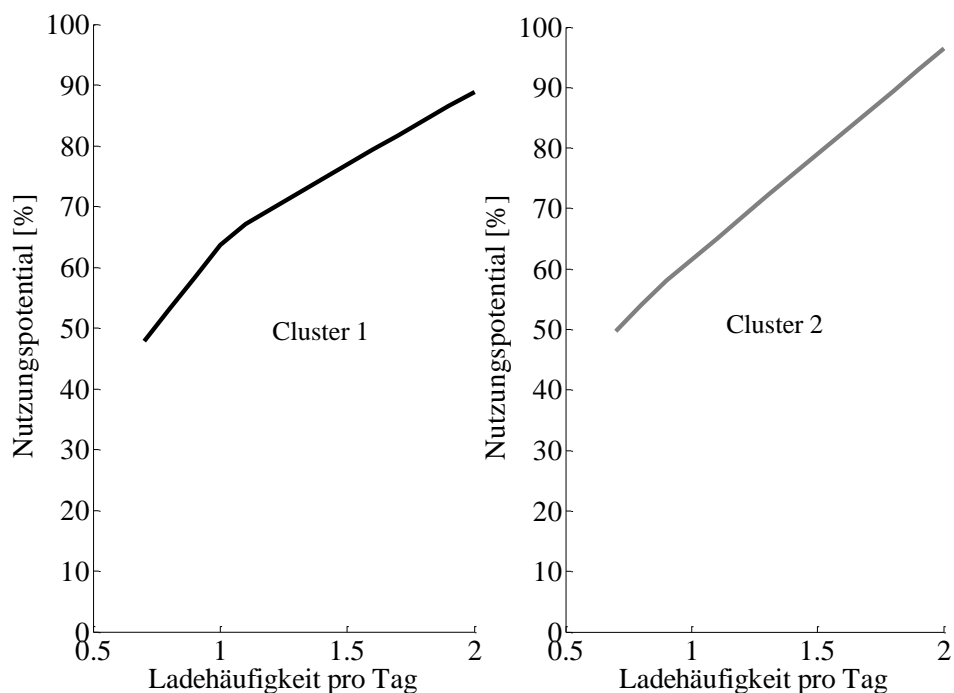


Abbildung 6-5: Einfluss des Ladeverhaltens auf das Nutzungspotential

Abbildung 6-6 zeigt, wie sich zwei Nutzer im Energiebedarf pro Kilometer im Bereich bis 70 km/h unterscheiden können. Eine Differenz von teilweise über 50 Wh für die Bewältigung von einem Kilometer wirken sich auch auf das Nutzungspotential aus. Wird dieser unterschiedliche Energiebedarf kombiniert mit der Ausprägung des Nutzungsverhalten aus Cluster 1 und der dazu gehörigen Systemkonfiguration untersucht, so ist ein Unterschied im Nutzungspotential zu beobachten. Abbildung 6-7 und 6-8 zeigen die unterschiedlichen Nutzungspotentiale von den zwei beschriebenen Nutzern. Vergleicht man das Nutzungspotential für die zwei Nutzer für die Systemkonfiguration für Cluster 1 so unterscheiden sich diese mit 59 % für den dynamischen Nutzer und 65 % Nutzungspotential um 6 %. Diese Differenz zeigt

deutlich, dass es auch wichtig ist, das Nutzungsverhalten genauer zu analysieren. Es ist aber sehr gut ersichtlich, wie sensitiv das Nutzungspotential reagiert, obwohl nur ein Unterschied in der Dynamik und damit der Energieintensität der Fahrweise vorliegt. Es ist eine Bestätigung für das Vorgehen, das Nutzungsverhalten zu analysieren und eine bedarfsgerechte Auslegung des Antriebsstrangs umzusetzen.

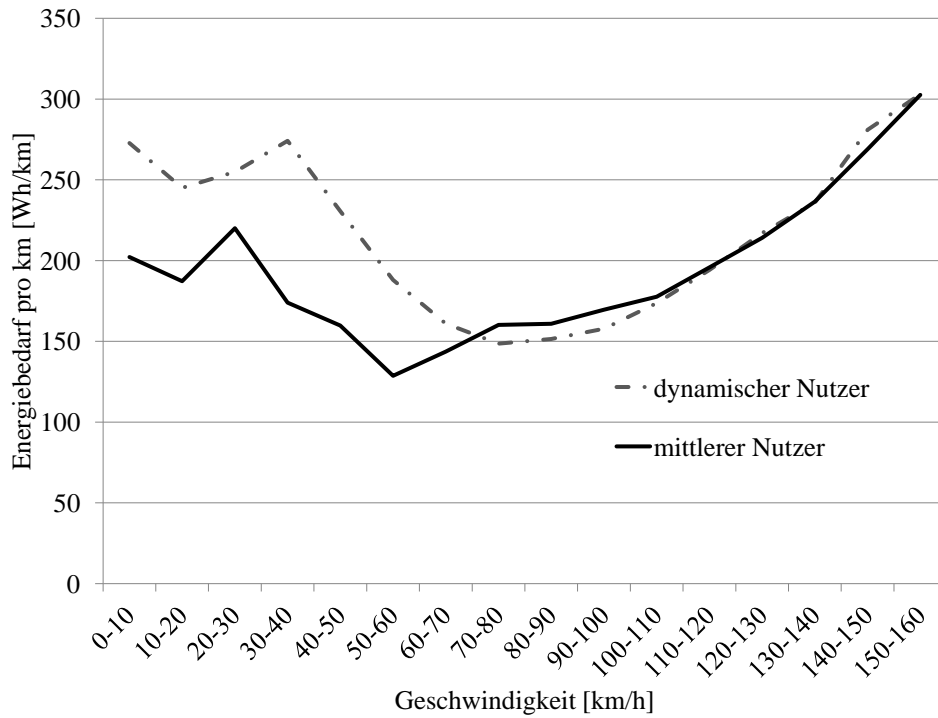


Abbildung 6-6: Energiebedarf pro Kilometer in Abhängigkeit vom Nutzungstyp

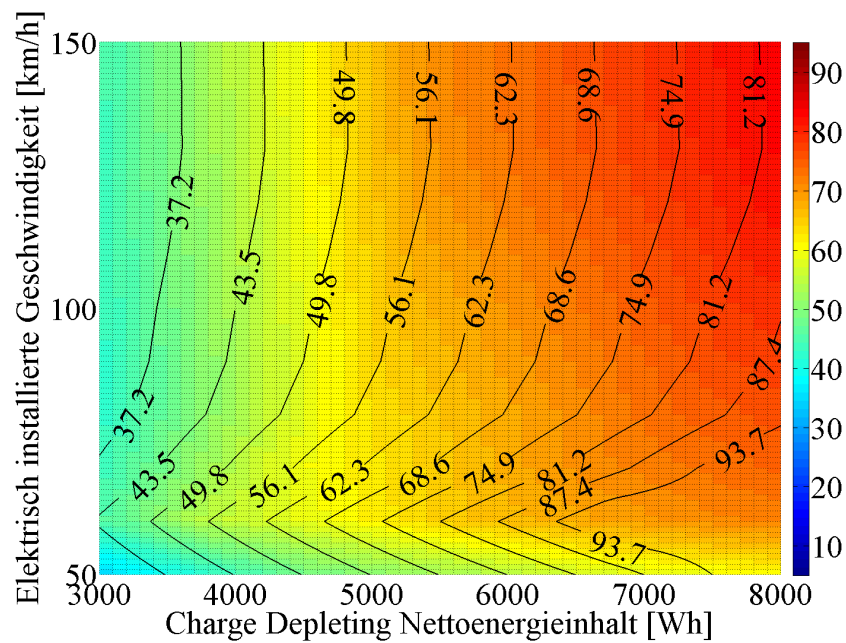


Abbildung 6-7: Nutzungspotential und Systemnutzungsgrad für einen sportlichen Nutzer

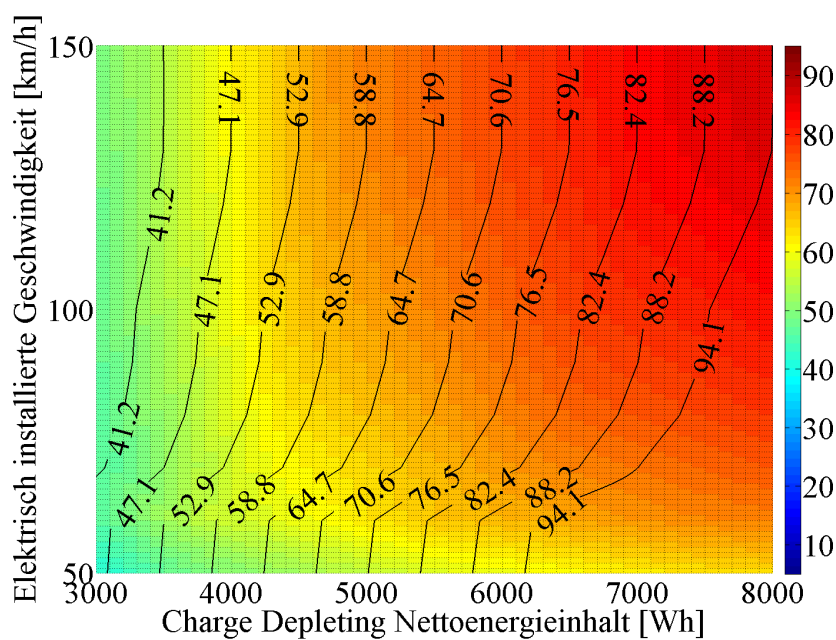


Abbildung 6-8: Nutzungspotential und Systemnutzungsgrad für einen durchschnittlichen Nutzer

Mit der Wahl der elektrischen Fahrgeschwindigkeit besteht die Möglichkeit, das Nutzungspotential zu optimieren. Das ausgeprägte elektrische Fahren ist der zentrale Mehrwert eines PHEVs. Über die Betriebsstrategie kann diese Funktion entscheidend ausgeprägt werden. Charakteristika sind das Beschleunigungsvermögen und der Geschwindigkeitsbereich elektrischen Fahrens. Der Umfang des elektrischen Geschwindigkeitsbereichs im CD-Modus hängt von zahlreichen Aspekten ab. Der elektrische Geschwindigkeitsbereich bestimmt, wie die verfügbare Speicherenergie verwendet wird. Dies ist wiederum stark



abhängig davon, wie das Antriebssystem genutzt wird. Das Nutzungsverhalten beschreibt sich über die Parameter Tagesstreckenverteilung sowie Verbrauchs- und Streckenverteilung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Der abgedeckte elektrische Geschwindigkeitsbereich hat Einfluss auf den streckengewichteten Energiebedarf pro Kilometer. Zu hohen Geschwindigkeiten steigt dieser im Allgemeinen an. Dies hängt hauptsächlich mit vorliegenden Fahrwiderständen zusammen, wird aber auch vom Nutzungsverhalten beeinflusst. Der Energiebedarf pro Kilometer ist bei hohen Geschwindigkeiten physikalisch bedingt höher. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten mit der gleichen verfügbaren Energie eine größere Reichweite erzielt werden kann. Daraus folgt wiederum, dass bei geeignetem Nutzungsverhalten zu hohe elektrische Fahrgeschwindigkeiten dazu führen können, dass das Nutzungspotential wieder sinkt. Das liegt daran, dass Strecken im niedrigen Geschwindigkeitsbereich verbrennungsmotorisch gefahren werden, da die elektrische Energie in Bereichen höherer Geschwindigkeit ausgegeben wurde. Dieser Fall ist in seiner Ausprägung von den Eigenschaften im Nutzungsverhalten, der elektrischen Fahrgeschwindigkeit, der Speicherdimensionierung sowie dem Energiebedarf pro Kilometer abhängig. Abbildung 6-9 illustriert, wie sich eine niedrige und hohe Geschwindigkeit auf das Nutzungspotential auswirken. Wie an der Farbabstufung erkennbar, kann bei gleicher Speichergröße für niedrigere Geschwindigkeiten ein höheres Nutzungspotential erreicht werden als für höhere Geschwindigkeiten. In diesem Beispiel gilt das für einen CD-Energiehub von 4000 bis 5000 Wh. In einem Bereich bis 70 km/h elektrischer Fahrgeschwindigkeit ist das Nutzungspotential höher als bei 80 km/h. Grund hierfür ist, dass die verfügbare elektrische Energie für hohe Fahrwiderstände verwendet und dadurch die elektrische Reichweite reduziert wird. Dies wirkt sich negativ auf das Nutzungspotential aus.

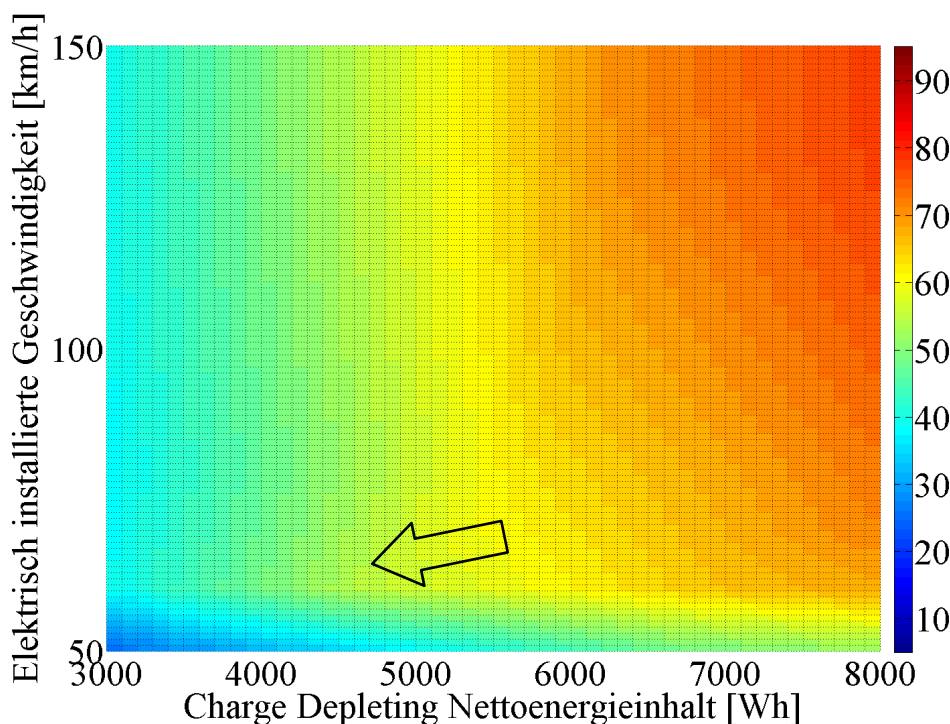


Abbildung 6-9: Einfluss der Wahl der elektrischen Geschwindigkeit auf das Nutzungspotential

Die Betriebsstrategie hat somit Einfluss auf die funktionale Ausprägung und Eigenschaften des Systems aber auch Bedeutung hinsichtlich einer verbrauchsoptimierten Nutzerkonfiguration. Denkbar ist, an dieser Stelle weiter ins Detail zu gehen und über eine Navigationskoppelung die elektrische Fahrgeschwindigkeit

schwindigkeit der Route und der Streckenlänge anzupassen (WILDE (2008, S. 52), STIEGELER (2008)).

### 6.3.4 Bewertung in gesetzlichen Fahrzyklen

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Analyse und Bewertung des Nutzungsverhaltens und eine bedarfsgerechte Auslegung. Dennoch sind bei der Dimensionierung gesetzliche Anforderungen nicht zu vernachlässigen. Für die Automobilhersteller ist es enorm wichtig, hier den gesetzlichen Vorgaben zu entsprechen, da sonst Strafzahlungen oder gar Zulassungsverbote drohen. Abhängig vom Markt gibt es ganz verschiedene Anforderungen und Wege Grenzwerte zu bestimmen. Für diese Arbeit soll beispielhaft der europäische Markt beleuchtet werden. Die hier vorgegebenen Grenzwerte für Flottenemissionen entsprechen sehr hohen Ansprüchen für die Automobilhersteller und eignen sich daher sehr gut um sie anhand der Elektrifizierung zu beschreiben. Für den europäischen Markt werden seit geraumer Zeit der sog. „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) als Grundlage für die Bestimmung von Kraftstoffverbrauch zugrunde gelegt. Diese synthetisch generierte Fahrprofil gemäß Abbildung 6-10 bildet drei verschiedene Phasen ab: Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt. Aktuell ist vorgesehen, den NEFZ durch einen anderen Fahrzyklus abzulösen. Dieser trägt die Bezeichnung WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure) und soll laut ADAC (2013) „möglichst viele Facetten des realen Fahrzeugeinsatzes abdecken“. Der WLTP besteht aus vier Teilen und ist von der Dauer mit 1800 Sekunden deutlich länger als der NEFZ mit 1180 Sekunden, wie Abbildung 6-10 ebenfalls veranschaulicht.

Geschwindigkeits- und Leistungsanforderungen bewegen sich, wie Abbildung 6-11 zeigt, auf einem ähnlichen Niveau. Für den WLTP stehen zum aktuellen Zeitpunkt für die Bewertung die genauen Randbedingungen als auch das verbindliche Startdatum noch nicht fest. Geplant ist laut (SCHÖPPE ET AL., 2012) der Start ab 2020. Für die vorliegende Arbeit soll daher die Bewertung anhand des NEFZs durchgeführt werden.

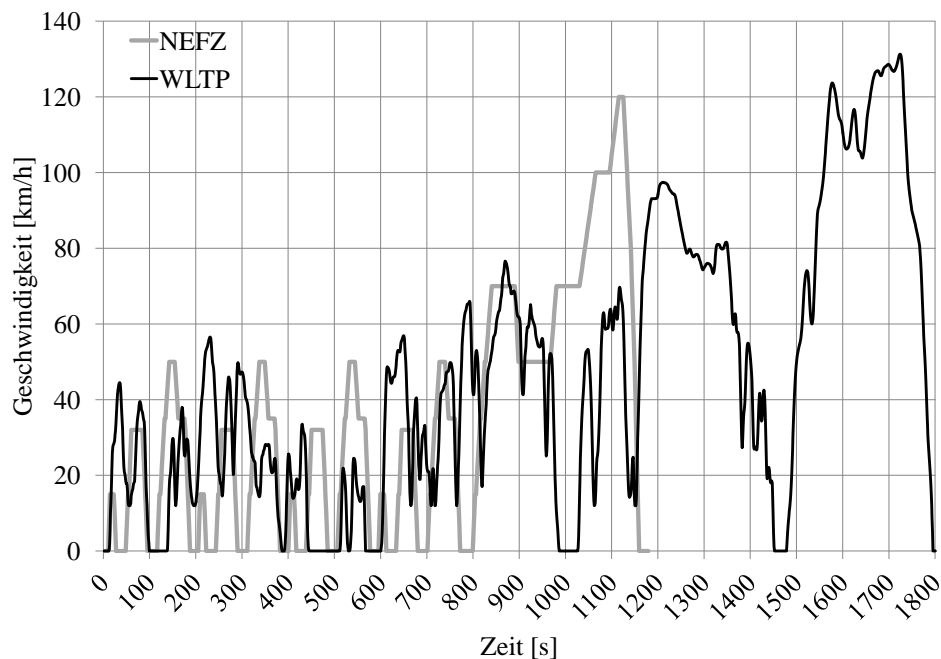


Abbildung 6-10: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ und des WLTP

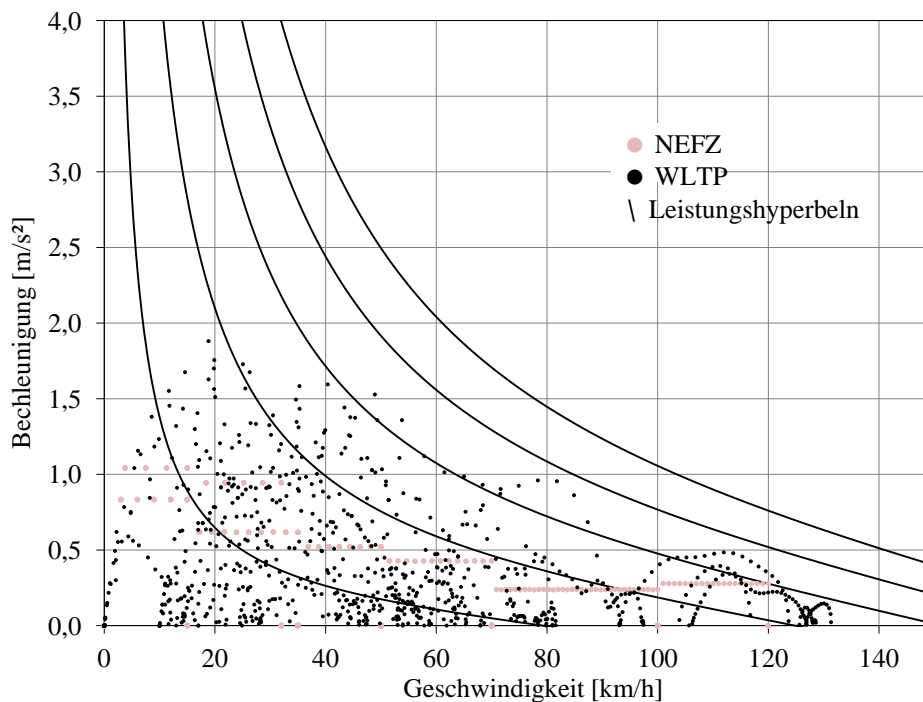


Abbildung 6-11: Vergleich der Anforderungen für elektrische Leistung zum Durchfahren der jeweiligen Fahrprofile

Die Ermittlung des Verbrauchs für PHEVs im NEFZ findet in zwei verschiedenen Testabschnitten statt. Diesem Ablauf liegt folgende Formel nach EU (2009) zu Grunde:

$$\text{Verbrauch} = \frac{eRW \cdot V(CD) - 25km \cdot V(CS)}{25km + eRW} \quad (6.1)$$

mit  $eRW$  ... elektrische Zyklusreichweite im NEFZ für den CD-Modus  
 $V(CD)$  ... Kraftstoffverbrauch im CD-Modus, für den Fall eines Durchfahrens ohne Leistungszustart gleich Null  
 $V(CS)$  ... Kraftstoffverbrauch im CS-Modus

Für die Berechnung müssen die Werte CD-Verbrauch, CS-Verbrauch sowie die elektrische Reichweite ermittelt werden. Diese Ermittlung soll im Folgenden kurz beschrieben werden.

- Elektrische Reichweite: Die elektrische Reichweite wird beginnend mit vollem Speicher im CD-Modus geprüft. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten: Kann der Fahrzyklus ohne Leistungszustart des Verbrennungsmotors durchfahren werden, so wird die Reichweite als elektrische Reichweite gewertet, zu der der Verbrennungsmotor auf Grund niedrigen SoCs anspringt. Dies entspricht dem Übergang zum CS-Modus. Ein Leistungszustart liegt vor, wenn das elektrische Antriebssystem dem Fahrprofil aus Mangel an verfügbarer Leistung nicht mehr folgen kann. Kann der Zyklus aus Systemgründen ohne Leistungszustart nicht durchfahren werden, so werden die elektrischen Teilstrecken aufaddiert bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Zustart durch einen zu niedrigen SoC anspringt. Je nach Größe des elektrischen Energiespeichers kann der Fahrzyklus dabei auch mehrmals durchfahren werden.
- CD-Verbrauch: Der CD-Verbrauch ist auf Null zu setzen, wenn das Fahrprofil ohne Leistungszustart

start durchfahrbar ist. Ist das nicht der Fall, so wird der Kraftstoffverbrauch der verbrennungsmotorischen Phasen auf die verbrennungsmotorisch zurückgelegte Strecke bezogen berechnet.

- Der CS-Kraftstoffverbrauch wird startend für die Phase berechnet, in der der elektrische Energiespeicher in den CS-Betrieb übergeht. Der Fahrzyklus wird dann in Folge einmal durchfahren und der resultierende durchschnittliche Kraftstoffverbrauch wird für die Berechnung analog Formel 6.1 ermittelt.

Die in der Formel 6.1 enthaltenen 25 km Reichweite werden seitens EU (2009) als die Strecke zwischen zwei Ladevorgängen bezeichnet.

Die vorliegende Bewertung umfasst zwei unterschiedliche Ausprägungen, die wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des Verbrauchswertes im Fahrzyklus haben:

- Komplettes elektrisches Durchfahren des Fahrprofils möglich
- Durchfahren des Fahrprofils ist nur mit Zustart des Verbrennungsmotors möglich

Durch verschiedene Fahrmodi ist es möglich, dem Nutzer verschiedene Ausprägungen elektrischen Fahrens zur Verfügung zu stellen. Diese ermöglichen, unterschiedliche elektrische Fahrgeschwindigkeiten einzustellen und somit für gesetzliche Zyklen relevante Unterschiede in der Einstufung zu erzielen. Dadurch kann der Geschwindigkeitsbereich elektrischen Fahrens für einen Modus erhöht werden, um den Zyklus elektrisch durchfahren zu können. Der Vorteil des elektrischen Durchfahrens des Fahrprofils ist deutlich. Der Verbrauch im CD-Modus wird mit Null bewertet. Dies hat einen positiven Einfluss auf den gesamten Zyklusverbrauch und steigert den Beitrag eines PHEVs zur Reduktion des Flottenverbrauchs. Dies ist notwendig, da gemäß EU (2009) Fahrzeuge unter 50 g  $CO_2$  /km für den Flottenverbrauch ab 2016 nur noch einfach gewichtet werden. Daher ist ein guter Verbrauchswert im gesetzlichen Zyklus umso wichtiger, um mit elektrifizierten Fahrzeugen einen größeren Einfluss auf die Reduktion des Flottenverbrauchs haben. Ein weiterer Einflussparameter ist die Stückzahl, die beispielsweise PHEVs einen größeren Einfluss verschafft um den Flottenwert zu reduzieren.

Der Flottenverbrauch berechnet sich analog der Stückzahlen der Einzelfahrzeuge in der Flotte. Kann durch ein hohes Maß bedarfsgerechter Systemauslegung der Nutzen und somit die Attraktivität des Fahrzeugs gesteigert werden, so ist die Möglichkeit erhöhter Stückzahlen und eines positiven Einflusses auf den Flottenwert möglich.

Für die zwei entworfenen Dimensionierungen des Antriebsstrangs für Cluster 1 und Cluster 2 ergeben sich folgende Kraftstoffverbrauchswerte im gesetzlichen Fahrzyklus: Das Hybridpotential ergibt sich zu 6 % Verbrauchreduktion zum konventionellen Fahrzeug. Dieser sehr geringe Wert liegt darin begründet, dass für den gewählten PHEV ein Benzinmotor mit vier Zylindern gewählt wurde. Dieser ist im Vergleich zu den vorgestellten Hybriden in Kapitel 3.5 ein kleiner Verbrennungsmotor. Gemäß WEISS ET AL. (2012) reduziert sich das Hybridpotential zu kleiner gewählten Verbrennungsmotoren. Grund dafür ist, dass kleinere Motoren in dem gesetzlichen Fahrzyklus bei höherer Last und somit besseren Wirkungsgraden betrieben werden können. Dadurch reduziert sich das Potential im Hybridbetrieb. Mit den zwei gewählten CD-Speicherhöhen aus Tabelle 5-3 sind 36 km bzw. 55 km elektrische Reichweite im NEFZ möglich, bevor der Verbrennungsmotor zustartet. Daraus ergibt sich eine Reduktion des Verbrauchs nach Gleichung 6.1 um 62% und 70%. Mit einem Kraftstoffverbrauch von 5,9 l/100km des Basisfahrzeugs mit Verbrennungsmotor ergibt sich somit ein Zyklusverbrauch von 2,4 l/100km bzw. 1,77 l/100km. Dies entspricht einem  $CO_2$ -Wert von 56 g/km bzw. 41 g/km bei 2,32 kg  $CO_2$ /l Benzin. Abbildung 6-12 zeigt den Verlauf der Reduktion des Verbrauchs über der Skalierung des batterieelektrischen Speichers. Da die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs im Fahrzyklus sehr aufwendig ist, wurde für die vorliegende

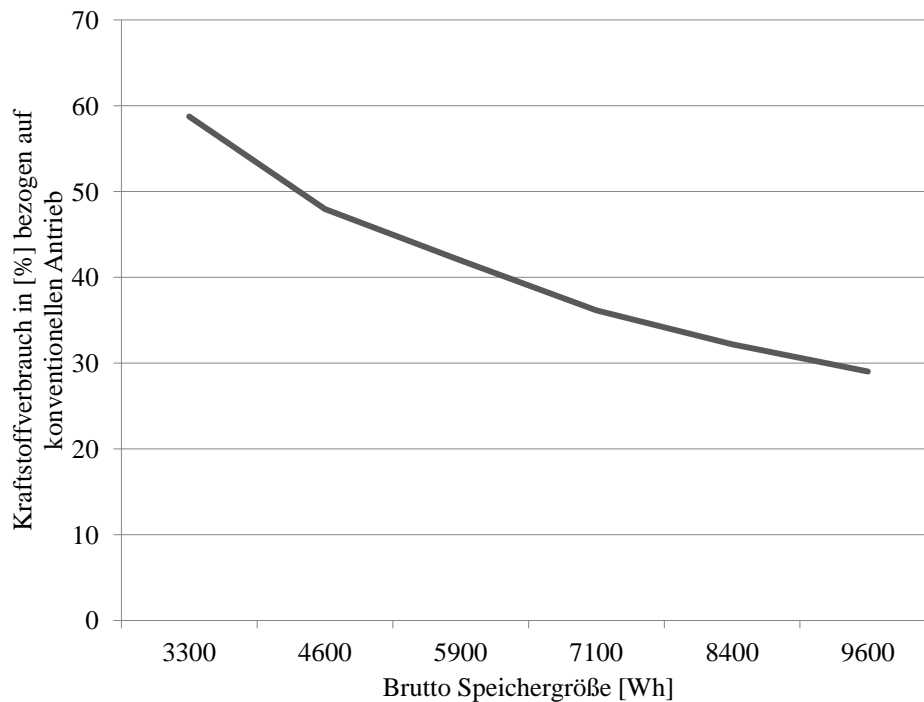


Abbildung 6-12: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ in Abhängigkeit von der Dimensionierung des batterieelektrischen Speichers

Arbeit, eine Abschätzkarte erstellt. Damit ist es möglich, Änderungen am Fahrzeug, wie Fahrwiderstände oder auch Änderungen im Bordnetzbedarf qualitativ zu beziffern. Änderungen, beispielsweise in der Speicherdimensionierung, bewirken eine Änderung der Fahrzeugmasse und somit der Fahrwiderstände. Um die daraus resultierenden Verbrauchsänderungen abzuschätzen, kann diese Abschätzkarte verwendet werden. Außerdem ist es möglich, mehrere Parameter gleichzeitig zu ändern. Die Auswirkungen sind abhängig von dem referenzierten Fahrzyklus, aber auch abhängig von der betrachteten Fahrzeugklasse. Erstellt wurde diese Abschätzkarte mit Hilfe einer Regressionsfunktion. Zunächst wird ein ausgewählter Wertebereich der Variation festgelegt. In Folge werden Stützstellen festgelegt und hierfür Werte ermittelt. In diesem Fall werden mit Simulationen Werte für den Kraftstoffverbrauch in verschiedenen Fahrzyklen ermittelt. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wird zwischen den Stützstellen auf verschiedene Arten interpoliert, Polynome verschiedener Ordnungen werden dafür benutzt. Final wurde die Qualität der Interpolation mit Hilfe von Validierungssimulationen sichergestellt (WOLFGRAMM, 2012).

### 6.3.5 Zusammenfassung und Reflexion

Die Bewertung von PHEVs beinhaltet viele mögliche Kategorien und unterschiedliche Kombinationen von Ausprägungen, die eng zusammenhängen. Der Kraftstoffverbrauch in gesetzlichen Referenzzyklen kann ein wichtiges Kaufargument für Kunden sein, ist aber auch wichtig, um den Anforderungen aus politischen Gesetzgebungen zu entsprechen. Der Kraftstoffverbrauch in der Nutzung wirkt sich auf die Nachhaltigkeit eines Antriebskonzepts aus. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist die Frage, wie groß das  $CO_2$ -Äquivalent ist. Zudem ist ein niedriger Kraftstoffverbrauch nach DRAEGER (2010) Treiber nachhaltiger Mobilität und ein absoluter Kundenwunsch bei elektrifizierten Fahrzeugen. Der Bewertungsumfang in dieser Arbeit hat zum Ziel, mögliche variierende Randbedingungen zu erfassen, um die Bannbreite des energetischen Systemnutzens und somit des Kraftstoffverbrauchs für einen bedarfsgerecht ausge-

legten PHEV darzustellen. Dies basiert auf entwickelten Anforderungen aus einem Nutzungsverhalten. Voraussetzung dafür ist, dass bei den Nutzern das Bewusstsein geschaffen wird, wie sich ein Mobilitätsverhalten auf das Nutzungspotential bei PHEVs auswirkt, so dass der passende Antriebsstrang zu einem geeigneten Mobilitätsverhalten ausgewählt wird. Andernfalls hat eine solche Bewertung nur geringen Mehrwert.

Es existieren zahlreiche Foren im Internet, in denen sich Nutzer von Hybriden austauschen. So ermöglicht ROSACK (2013) den Vergleich verschiedenster Nutzer, die in Besitz eines Chevrolet Volt sind. Mittels einer Software auf dem Smartphone können wesentliche Daten der Nutzung und Fahrzeugdaten erfasst werden. So lassen sich die Anteile elektrischer Reichweite und Kraftstoffverbräuche im CD-Modus oder CS-Modus vergleichen. Hier ist ein reger Informationsaustausch und Wettbewerb festzustellen, den die Nutzer untereinander betreiben. Der Chevrolet Volt ist ein batterieelektrisches Fahrzeug mit der Möglichkeit der Verlängerung der Reichweite. Die elektrische Reichweite wird mit 40 bis 80 km angegeben, die Gesamtreichweite mit mehr als 500 km. Er verfügt über 111 kW elektrische Leistung und 63 kW verbrennungsmotorische Leistung (CHEVROLET, 2013).

## 6.4 Reflexion

Der Ansatz der bedarfsgerechten Auslegung des elektrischen Antriebssystems für PHEVs hat einer Vielzahl von Anforderungen zu entsprechen. Diese liegen darin, dass zum einen im Nutzungsverhalten eine hohe Variationsmöglichkeit von Parametern besteht, aber auch andere Anforderungen, wie beispielsweise Temperatureinschränkungen oder Ladeverhalten, die das Nutzungspotential stark beeinflussen können. Dennoch zeigt sich genau darin, dass der Ansatz der bedarfsgerechten Auslegung einen Mehrwert hat und notwendig ist. Doch stellt sich die Frage, welche Bedeutung der Robustheit einer Auslegung gegeben werden kann. Ändert sich das Nutzungsverhalten oder erhöht sich der Energiebedarf durch verändertes Fahrverhalten oder die durch Witterung bedingten Einflüsse, so reagiert das Nutzungspotential wenig robust. Für die Formulierung der Anforderungen müssen solche Einflüsse berücksichtigt werden, aber auch mit den Aspekten aus betriebswirtschaftlicher Sicht oder Anforderungen aus dem Fahrzeugpackage abgewogen werden und abhängig vom Fahrzeug Lösungen gefunden werden. Werden aber allein die Unterschiede von 2,5 kWh netto, das 3,1 kWh brutto entspricht, für die beiden Auslegungen von Cluster 1 und 2 betrachtet, so ist allein aus betriebswirtschaftlicher Sicht, sowohl für Fahrzeughersteller als auch für den Kunden eine bedarfsgerechte Auslegung deutlich attraktiver.

Die Ladehäufigkeit stellt neben dem Tagesstreckenverhalten und dem Kraftstoffverbrauch den wichtigsten Einfluss dar, den Systemwert zu vergrößern. Eine adäquate Ladeinfrastruktur kann wesentlichen Einfluss auf die Systemdimensionierung nehmen, da dadurch beispielsweise einzelne Fahrstrecken für die Systemauslegung bedeutsam werden und nicht Tagesfahrstrecken.

Mit einer individualisierten Betriebsstrategie besteht die Möglichkeit, ein dimensioniertes System für einen individuellen Bedarf zu gestalten. Dieses ist im PEP der Systemdimensionierung nachgelagert und kann in unterschiedlichen Betriebsmodi und Einstellungsmöglichkeiten umgesetzt werden. Die Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten ist immens. Daher ist es vordringlich, den Überblick zu wahren um keinerlei Anforderungen, beispielsweise durch die zahlreichen unterschiedlichen Gesetzgebungen zu übersehen. Zieht man dies alles in Betracht, ergeben sich hieraus erhebliche Chancen für eine Betriebsstrategie, bei der die elektrischen Antriebskomponenten so auf den Nutzer abgestimmt sind, dass im Betrieb durch optimierte Wirkungsgrade die Energieeffizienz maximiert werden kann.



# 7 Zusammenfassung

Dieses Kapitel bildet den Abschluss der vorliegenden Dissertation. Inhalt dieses Kapitels ist, die bearbeitete Aufgabenstellung, das Vorgehen und die Ergebnisse zusammenzufassen.

## 7.1 Bearbeitete Aufgabenstellung

Die Automobilindustrie steht vor der Herausforderung, die  $CO_2$ -Emissionen stark reduzieren zu müssen. Hierfür ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ein vielversprechender Ansatz. Plug-In Hybride (PHEV) ermöglichen einen ausgeprägten elektrischen Betrieb und bieten zusätzlich die Möglichkeit größere Distanzen ohne Einschränkungen mit dem Verbrennungsmotor zu absolvieren. Dies ist aktuell mit elektrischen Fahrzeugen nicht ohne Einschränkungen möglich und außerdem auch sehr teuer. Bei der Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems für PHEVs ist es bedeutend, das Nutzungsverhalten für die Entwicklung von Anforderungen zu berücksichtigen. Dies liegt daran, dass die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sehr stark mit sich änderndem Nutzungsverhalten variieren kann.

Ziel der Arbeit ist daher, einen systematischen Ansatz zur Analyse des Nutzungsverhaltens und einer folgenden Initialdimensionierung des elektrischen Antriebssystems zu entwickeln. Aktuell liegt für diese Dimensionierung kein systematischer Ansatz vor, der die Dimensionierung und das Nutzungsverhalten zusammenführt.

## 7.2 Vorgehen

Das Vorgehen zur Initialdimensionierung des elektrischen Antriebssystems lässt sich in mehrere Schritte unterteilen:

- Stand der Forschung (Kapitel 2): Dieses Kapitel umfasst die Erfassung und Beschreibung des methodischen Rahmens, der die Grundlage für das gezeigte Beispiel bildet. Inhalte sind Eigenschaftsmerkmale von Anforderungen, sowie Möglichkeiten der Systemabstraktion.
- Stand der Technik (Kapitel 3): Der Stand der Technik beschreibt wesentliche Merkmale, Bestandteile, Funktionen und Eigenschaften von PHEVs. Dazu wird ein Überblick über aktuelle Hybride und PHEVs gegeben. Vervollständigt wird das Kapitel durch eine Analyse durchgeführter Untersuchungen zwischen Nutzungsverhalten und dem Mehrwert durch PHEVs.
- Analyse von System und Nutzer (Kapitel 4.2, 4.4, 5.2): Dieser Schritt umfasst, Anforderungen aus einem Nutzungsverhalten abzuleiten, die für die Systemskalierung notwendig sind. Hierfür wird ein Nutzungsprofil eingeführt, in dem das Nutzungsverhalten für eine Initialauslegung entsprechend beschrieben wird.

Um aus einer großen Anzahl vermessener Nutzer, Verhalten gleicher Ausprägung zu identifizieren, wird eine Möglichkeit der Clusterbildung vorgestellt. Die verschiedenen Nutzungsgruppen werden dann entsprechend ihrer Eigenschaften in Verhalten und Fahrzeugsegment einer entsprechenden Nutzungsausprägung zugeordnet.

Für das PHEV-System werden die Zusammenhänge zur eingeführten Größe des Nutzungsprofils und -verhaltens hergestellt.



- **Systemskalierung und Auslegung (Kapitel 4.5):** Die Systemskalierung beruht auf der Nutzungsanalyse und hat zum Ziel, Aussagen für das Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite oder einer elektrisch installierten Energie im CD-Modus zu treffen. Für eine Aussage abhängig von einem elektrischen Energieinhalt werden fahrzeugspezifische Parameter, sowie den Nutzer detaillierter beschreibende Eigenschaften hinzugenommen. Mit dieser Initialauslegung kann in Folge eine Komponentenauslegung erfolgen.
- **Beispielhafte Analyse und Initialdimensionierung eines elektrischen Antriebssystems (Kapitel 5):** Aus einer Vielzahl von Nutzern werden sich ähnelnde Nutzungsverhalten identifiziert und in Clustern zusammengefasst. Auf Grundlage der Ausprägung des Nutzungsverhaltens hinsichtlich energetischer und leistungsrelevanter Aspekte wird ein Vorschlag zur Initialdimensionierung des elektrischen Antriebssystems getroffen. Grundlage dafür ist ein Fahrzeug der Mittelklasse, an dem das Vorgehen exemplarisch durchgeführt wird.
- **Validierung der Größe des Nutzungspotentials und Bewertung der Systemauslegung (Kapitel 6.2 und 6.3):** Im ersten Schritt wird die entwickelte Größe des Nutzungspotentials validiert, in dem mit einem Simulationsmodell die Aussage der Substitutionshöhe des Energiebedarfs validiert wird. Ziel des PHEVs ist es, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Bis zu diesem Zeitpunkt im Vorgehen wurde nur das Potential für den Nutzer evaluiert. Nun sollen auch gesetzliche Zyklen für die entwickelte Auslegung untersucht werden. Dazu kommt, dass nicht nur die  $CO_2$ -Emissionen im Betrieb, sondern ebenfalls in der Herstellung und dem Recycling von Bedeutung sind. Eine weitere Analyse ist der Vergleich im Kraftstoffverbrauch mit einem konventionellen Fahrzeug.

## 7.3 Ergebnisse, Reflexion und Ausblick

### 7.3.1 Möglichkeiten und Entwicklungsfelder des Vorgehens

Für die Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems von PHEVs kann der Mehrwert des Systems durch die Berücksichtigung von Nutzungsdaten für die Anforderungsentwicklung stark verbessert werden. Das Ziel dieses Vorgehens ist, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, geeignete Nutzer für PHEVs zu identifizieren, das Nutzungsverhalten zu analysieren und die passende technische Lösung dafür zu dimensionieren. Der Mehrwert eines PHEVs wird über eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs begründet. ILIE (2013) zufolge ist die Integration von unmittelbaren Zielen und Anforderungen, die für das Produkt aus Kundensicht gestellt werden, wesentlich, als auch deren adäquate Erhebung und Verarbeitung. Zwar konkurrieren diese Anforderungen durchaus mit Anforderungen anderer Bereiche, doch ist der Kundennutzen ein wesentlicher Faktor für den Erfolg eines Produktes. ROBERTSON & ROBERTSON (1999) beschreibt die nützlichsten Produkte als die, bei denen die Entwickler den Mehrwert des Produkts verstanden haben, um es für die Nutzer in einen entsprechenden Mehrwert umzusetzen. Das gezeigte Vorgehen zeigt in seinen Ergebnissen die Notwendigkeit einer bedarfsgerechten Auslegung. Es konnten verschiedene Dimensionen aufgezeigt werden, in denen sich Nutzer unterscheiden und zugleich ein Einfluss auf die Systemdimensionierung besteht.

An diesem Punkt stellt sich die zentrale Frage, für welche Ausprägungen im Nutzungsverhalten eine bedarfsgerechte Auslegung in Betracht gezogen werden sollte und welche Ausprägungen mit einer Dimensionierung abgedeckt werden können. Die entwickelte Matrix nach Abbildung 4-13 zeigt zwei identifizierte Hauptparameter im Nutzungsverhalten auf. Diese spannen einen Lösungsraum für elektrische

Energie und Leistung auf, der hinsichtlich weiterer Nutzungsparameter differenziert werden kann und sollte. Eine zu hohe Variantenvielfalt ist für Automobilhersteller aufgrund der Leistbarkeit nicht realisierbar. Daher müssen an dieser Stelle robuste Lösungen verwendet werden, die der bedarfsgerechten Dimensionierung nicht voll entsprechen, dafür aber eine größere Streuung im Nutzungsverhalten ermöglichen, ohne zu viel Verbrauchsreduktion einzubüßen. Das bedeutet, dass Nutzungsparameter für die Auslegung in Betracht gezogen werden müssen, für weitere Variationen wie Dynamik im Verhalten oder Witterungseinfluss eine Anforderung entwickelt und formuliert werden sollte, um auch unter diesen Randbedingungen einen bestimmten Systemnutzen zur Verfügung zu haben.

Die getroffenen Auslegungen für gebildete Nutzungscluster erweisen sich als sehr robust für die dem Cluster zugehörigen Nutzer. Grund ist die Wahl der geringsten Streuung als Kriterium für die Clusterbildung. Eine Abweichung der Randbedingungen, wie Klimatisierung oder dem Ladeverhalten kann den Mehrwert des Systems jedoch stark beeinflussen. Nach welchen Kriterien die Systemauslegung erfolgt bleibt hier dem Anwender dieses Vorgehens vorbehalten. Eine umfassendere Entscheidung für eine Dimensionierung hängt zudem auch an beispielsweise betriebswirtschaftlichen Anforderungen.

Die bedarfsgerechte Auslegung zur Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems kann für PHEVs detaillierter weiterentwickelt werden. Eine bedarfsgerechte Komponentenentwicklung zur Verbesserung der Energieeffizienz der einzelnen Komponenten und in Kombination im Antriebsstrang ist der nächste wichtige Schritt. Durch die Analyse der im Betrieb häufig genutzten Betriebspunkte kann hier eine Optimierung stattfinden. Das schließt ebenso eine dem Nutzungsverhalten entsprechende Topologie zur Verbesserung der Energieeffizienz ein. Die Wahl zwischen parallelem oder seriellen Antrieb als auch die Koppelung der Komponenten sind in diesem Fall Variationsparameter. Diese genannten Forschungs- und Entwicklungsfelder vervollständigen die bedarfsgerechte Auslegung.

### 7.3.2 Akademische Relevanz

Die akademische Relevanz der Arbeit kann in zwei wesentlichen Punkten zusammengefasst werden:

Die aufgeführten Kriterien, welche die Qualität von Anforderungen beschreiben, können in diesem Beispiel nicht dafür verwendet werden, um bedarfsgerechte Anforderungen zu formulieren. Die Erfüllung der Kriterien hängt nicht zwingend davon ab, ob die Anforderungen dem Zweck der bedarfsgerechten Auslegung gerecht werden. Eine Systematik war in diesem Beispiel hierfür nicht zu erkennen. Vielmehr dienen sie als Richtlinie und Orientierung einer umfassenden Betrachtung.

Die Systemabstraktion liefert hingegen einen großen Mehrwert in der Anwendung des durchgeführten Beispiels. Durch adaptive Wahl der Abstraktion in Kombination mit vorgegebenen Arten der Modellierung war es möglich, von einem Nutzungsverhalten Anforderungen für eine Initialdimensionierung zu generieren. Mit Hilfe einer entwickelten Bewertungsgröße, dem Nutzungspotential, war es möglich, über verschiedene Systemmodelle mehr und mehr Informationen aus dem Nutzungsverhalten in die Anforderungserstellung mit einzupflegen. Dadurch konnten gezielt Informationen ein- und ausgeblendet werden und bewusst die Detailtiefe variiert werden, sofern dies notwendig war. Zudem wurde auf Basis der Systemmodellierung ein Berechnungsverfahren ermittelt, dass in großer Genauigkeit und kurzer Zeit Aussage darüber treffen kann, wie groß der Nutzen eines gewählten Systems wäre. Dadurch konnten zeitintensive Iterationen durch aufwändige Simulationen deutlich verkürzt werden.

Zusammengefasst kann mit der Systemabstraktion der Zusammenhang zwischen einem technischen System und der Nutzung dieses Systems stark vereinfacht werden und dadurch eine Entwicklung und Formulierung von Anforderungen an das System deutlich vereinfacht werden.

### 7.3.3 Mehrwert für die Entwicklung und Nutzung elektrifizierter Antriebsstränge

Was bedeuten die Ergebnisse für die zukünftige Auslegung von elektrischen Antriebssträngen von Plug-In Hybriden? Der Aspekt der nutzungsgerechten Auslegung muss eine zentrale Rolle im RE spielen, um den Nutzern einen Systemmehrwert darzustellen. Doch sind in der nutzungsgerechten Auslegung viele Teilaspekte zu beachten. Neben offensichtlichen Merkmalen, wie dem Tagesstrecken- und Kraftstoffverbrauchsverhalten beeinflussen zudem Nutzungseigenschaften wie Dynamik, Systemalterung, Witterung während der Nutzung oder die Ladehäufigkeit ganz erheblich die Höhe der Verbrauchsreduktion.

Die Ladehäufigkeit hat von den letzteren genannten Größen den wohl größten Einfluss, der zudem am stärksten beeinflussbar ist. Die Dimensionierung eines elektrischen Antriebssystems und deren Nutzen hängt in hohem Maße von der zugrundeliegenden Ladehäufigkeit ab. Dieses hängt sowohl am Nutzungsverhalten und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten, als auch an der zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur. Aus dem von TAKEUCHI ET AL. (2012) vorgestellten Datensatz geht eine starke Korrelation der Ladeinfrastruktur zur Ladehäufigkeit hervor. In Toyota Stadt wurde durch eine verbesserte Ladeinfrastruktur das Ladeverhalten im Vergleich zu den anderen untersuchten Orten signifikant erhöht. Das heißt wiederum, dass bei Nutzern das Bewusstsein geschaffen werden muss, eine existierende Ladeinfrastruktur intensiv zu nutzen, um von einem PHEV bestmöglich zu profitieren. Andererseits ist eine Verbesserung der Ladeinfrastruktur, beispielsweise in weiten Teilen Europas notwendig, um PHEVs eine entsprechende Berechtigung zu verschaffen.

## 8 Literaturverzeichnis

ADAC 2013

ADAC: EcoTest- Test- und Bewertungskriterien- 19.03.2013, <[http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/ADAC%20EcoTest%20Methodik%20184KB\\_118924.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/ADAC%20EcoTest%20Methodik%20184KB_118924.pdf)>, 2013.

BACKHAUS ET AL. 2011

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Lehrbuch, 13th edition, Berlin: Springer 2011. ISBN: 9783642164903.

BALAZS ET AL. 2012

Balazs, A.; Nijs, M.; Pischinger, S.: Optimierte Auslegung von Hybridantriebssträngen unter realen Fahrbedingungen. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 06/2012 (2012), S. 534– 541.

BALZERT ET AL. 2009

Balzert, H.; Koschke, R.; Lämmel, U.; Balzert, H.; Liggesmeyer, P.; Quante, J.: Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering. Lehrbuch der Software-Technik, Spektrum Akademischer Verlag 2009. ISBN: 9783827417053.

BECKER & LEDWON 2010

Becker, S.; Ledwon, M.: Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 3, Lade-Infrastruktur und Netzintegration. Tech. Rep., Nationale Plattform Elektromobilität, 2010.

BERENBACH 2009

Berenbach, B.: Software & systems requirements engineering. New York [u.a.], McGraw-Hill 2009.

BERKOVICH 2012

Berkovich, M.: A requirements data model for product service systems. In: Veröffentlichung. 2012.

ÜBLER 2012

Übler, J.: Strom-Kreise. Auto Motor Sport 16 (2012), S. 58–60.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London 2009. ISBN: 9781848825871.

BLESSING 2013

Blessing, U.: Elektrofahrzeuge- 19.03.2013, <<http://www.hybrid-autos.info/Elektro-Fahrzeuge>>, 2013.

BLOCH 2012

Bloch, A.: Nichts ist unmöglich- Dauertest Toyota Hybrid. Auto Motor Sport 1 (2012), S. 140–141.

BMW 2010

BMW: Ergebnisse MINI E Berlin powered by Vattenfall 1.0. Tech. Rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010.

**BOEHM 1979**

Boehm, B. W.: Guidelines for verifying and validating software requirements and design specifications. In: Proceedings of the European Conference on Applied Information Technology (Euro IFIP '79). 1979.

**BRAESS 2012**

Braess, U. S.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik Anforderungen, Zielkonflikte Produktentstehungsprozess Antriebe. Vieweg+Teubner Verlag 2012. ISBN: 978-3-8348-8298-1.

**BRAUN ET AL. 2010**

Braun, W.; Schiemann, M.; Birke, P.: Batterien für Elektromobilität gestern - heute - morgen. Tech. Rep., Wolfgang Braun, 2010.

**BROY ET AL. 2012**

Broy, M.; Fuhrmann; Huemer, S. J.; Webers, K.: Anforderungsbasierter Funktionsentwurf im automobilen Entwicklungsprozess. ATZelektronik, Springer Automotive Media 06/2012 (2012), S. 472–478.

**CHEVROLET 2013**

Chevrolet: Technische Daten Chevrolet Volt -19.03.2013, <<https://www.chevrolet.de/modelle/volt/>>, 2013.

**DAVIS ET AL. 1993**

Davis, A.; Overmyer, S.; Jordan, K.; Caruso, J.; Dandashi, F.; Dinh, A.; Kincaid, G.; Ledebor, G.; Reynolds, P.; Sitaram, P.; Ta, A.; Theofanos, M.: Identifying and measuring quality in a software requirements specification. In: Proceedings of the First International Software Metrics Symposium. 1993.

**DELEKER 2012**

Deleker, J.: Geladene Gesellschaft. Auto Motor Sport 09 (2012), S. 18–23.

**DEUTCH 2010**

Deutch, J.: MIT Energy Initiative Symposium on the Electrification of the Transportation System. Tech. Rep., MIT Energy Initiative, 2010.

**DIESS 2013**

Diess, H.: BMW gestaltet die Zukunft der Mobilität. Heute. In: 34. Internationales Wiener Motoren-symposium. Wien 2013.

**DRAEGER 2010**

Draeger, K.: Fahrzeugentwicklung im Wandel neuer Mobilitätsansprüche. In: 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen 2010.

**DUESMANN 2012**

Duesmann, M.: Future Powertrain Solutions for BMW Characteristic Driving Dynamics. In: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. 2012.

**ECOTALITY 2012**

ECotality: The EV Project -04.04.2013, <<http://theevproject.com/downloads/documents/Q4%202012%20EVP%20Report.pdf>>, 2012.

---

**EHRENSPIEL 2009**

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung 4. Aufl. Berlin: Hanser 2009. ISBN: 9783446420137.

**EICHHORN 2012**

Eichhorn, U.: Mobility for the Future. In: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

**VON ESSEN & DIEZEMANN 2013**

von Essen, C.; Diezemann, M.: Diesel-Plug-In-Hybridantrieb- 26.04.2013. Tech. Rep., IAV Automotive Engineering, Berlin, 2013.

**EU 2009**

EU: REGULATION (EC) No 443/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Tech. Rep., EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, European Union, 2009.

**FIALA 2012**

Fiala, E.: Effektive Hybridstrategien. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 02/2012 (2012), S. 148–153.

**FRICKE & SCHULZ 2005**

Fricke, E.; Schulz, A. P.: Design for changeability (dfc): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. Systems Engineering 8 (2005) 4, S. no–no. ISSN: 1520-6858.

**GORBEA 2011**

Gorbea, C.: Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis In a Age of Architectural Competition. Ph.D. thesis, Technische Universität München, 2011.

**GULDE 2010**

Gulde, D.: Der clevere Elektriker. Auto Motor Sport 24 (2010), S. 30–31.

**HASLBECK 2012**

Haslbeck, M.: Reichweiten- und Fahrleistungsanforderungsanalyse aus Kundensicht für ein Elektrofahrzeug und methodisches Vorgehen zur Erstdimensionierung des elektrischen Antriebsstrangs. Master's thesis, Hochschule Regensburg, 2012. Unveröffentlichte Masterarbeit.

**HOFMANN 2010**

Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge. Wien, New York: Springer 2010. ISBN: 9783211891902.

**IEEE 1990**

IEEE: IEEE 610.12-1990 IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology, 1990.

**ILIE 2013**

Ilie, D.: Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement in der Fahrzeugentwicklung. Ph.D. thesis, Technische Universität München, 2013.

**JUNG 2006**

Jung, C.: Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung. Ph.D. thesis, Technischen Universität München, 2006.

**KASPER 2012**

Kasper, S.: 5. Elektrische Fahrtriebe Topologien Und Wirkungsgrad. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 10/2012 (2012), S. 802–807.

## KLAISS 2010

Klaiß, T.: Kundenanalysen – Der Schlüssel für innovative und kundenorientierte Produktentwicklung. In: ATZ/MTZ-Konferenz - Energie. 2010.

## KLÜTING ET AL. 2012

Klüting, M.; Billig, C.; Graf, H.: ActiveHybrid – The New Full-Hybrid Powertrains of BMW in the 3, 5 and 7Series. In: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

## KÜPPER 2013

Küpper, G.: Energetische Gestaltung von Plug-In Hybridfahrzeugen im Zielkonflikt von Zyklus- und Kundenpotential. Master's thesis, RWTH Aachen, 2013.

## VAN LAMSWEERDE 2000

van Lamsweerde, A.: Requirements Engineering in the Year 00: A Research Perspective. In: Proc. 22nd International Conference on Software Engineering. 2000.

## VAN LAMSWEERDE 2001

van Lamsweerde, A.: Goal-oriented requirements engineering: A guided tour. In: 5th IEEE International Symposium on Requirements Engineering. 2001.

## VAN LAMSWEERDE 2004

van Lamsweerde, A.: Goal-Oriented Requirements Engineering: A Roundtrip from Research to Practice. In: 12th IEEE International Requirements Engineering Conference. 2004.

## VAN LAMSWEERDE &amp; LETIER 1998

van Lamsweerde, A.; Letier, E.: Handling Obstacles in Goal-Oriented Requirements Engineering. In: IEEE Transactions on Software Engineering, Special Issue on Exception Handling, 2000. 1998.

## LIENKAMP 2012

Lienkamp, M.: Elektromobilität - Hype oder Revolution? München: Springer Vieweg 2012.

## LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 3642014224.

## MALTZAN 2012

Maltzan, J.: Elektroautos im Winter. Auto Bild 7 (2012), S. 56–57.

## MATTHIES 2010

Matthies, G.: Zum E-Auto gibt es keine Alternative. In: Bain Studie. München: Bain & Company 2010.

## VON MAYDELL 2012

von Maydell, M.: Nordische Kombination. Auto Motor Sport 11 (2012), S. 136–137.

## McKINSEY 2012

McKinsey: Lithium-Ionen-Akkus bringen Bewegung in den Automobilmarkt -19.04.2013, <<http://www.ingenieur.de/Themen/Elektromobilitaet/Lithium-Ionen-Akkus-bringen-Bewegung-in-Automobilmarkt>>, 2012.

## NAUNIN 2006

Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen. Kontakt und Studium, Expert-Verlag GmbH 2006. ISBN: 9783816926252.

## NIES ET AL. 2012a

Nies, B.; Kell, T.; Kropf, P.; Lindemann, U.: Design of Plug-In Hybrid power trains with help of simulation data records. In: International Stuttgarter Symposium. 2012a.

## NIES ET AL. 2012b

Nies, B.; Kell, T.; Wilde, A.; Lindemann, U.: Capability of Plug-In Hybrid (PHEV) system to reduce the consumption depending on the type of use. In: 21th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012b.

## NIES ET AL. 2013

Nies, B.; Orawski, R.; Lindemann, U.: Customer focused requirement engineering and system design for plug-in hybrid vehicles (phev). In: International Conference on Engineering Design, ICED 2013. Seoul, Südkorea 2013. Aachen 2013.

## NUSEIBEH &amp; ESTERBROOK 2000

Nuseibeh, B.; Esterbrook, S.: Requirements Engineering: A Roadmap. In: A. C. W. Finkelstein (ed) "The Future of Software Engineering ", 22nd International Conference on Software Engineering, ICSE'00, IEEE Computer Society Press. 2000.

## PARTSCH 2010

Partsch, H.: Requirements-Engineering systematisch: Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Springer 2010. ISBN: 9783642053573.

## PESARAN &amp; LABORATORY 2009

Pesaran, A. A.; Laboratory, N. R. E.: Battery requirements for plug-in hybrid electric vehicles—analysis and rationale. National Renewable Energy Laboratory 2009.

## POHL &amp; RUPP 2011

Pohl, K.; Rupp, C.: Requirements Engineering Fundamentals: A Study Guide for the Certified Professional for Requirements Engineering Exam - Foundation Level - IREB compliant. Rocky Nook 2011. ISBN: 9781457111921.

## PONN &amp; LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. VDI-Buch, Springer 2011. ISBN: 9783642205798.

## PRESTL &amp; WAGNER 2012

Prestl, W.; Wagner, V.: Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 07-08/2012 (2012), S. 570–574.

## RÖDER ET AL. 2012

Röder, H.; Franke, S.; Müller, C.; Przybylski, D.: Ein Kriterienkatalog zur bewertung von anforderungsspezifikationen. In: Veröffentlichung. Universität Stuttgart 2012.



## REIF ET AL. 2012

Reif, K.; Noreikat, K.-E.; Borgeest, K.: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Vieweg+Teubner Verlag 2012. ISBN: 3834807222.

## RESCH 2013

Resch, S.: TÜV SÜD E-Car Cycle (TSECC) -29.03.2013, <<http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1319642914529222560169/tsecc-ecartec-kongress-2011-web.pdf>>, 2013.

## RICHARDSON ET AL. 2012

Richardson, M.; Liggins, M., S. and Hancock; Putt, G.: Range\_e - A Luxury Plug-In Hybrid Demonstration Vehicle. In: 21th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

## RIED ET AL. 2013

Ried, M.; Jung, M.; Weigl, E.; Schramm, D.: Lösungsraumanalyse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hinsichtlich Verbrauchspotential und Speicherintegration. In: Braunschweig. 2013.

## ROBERTSON &amp; ROBERTSON 1999

Robertson, S.; Robertson, J.: Mastering the requirements process. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1999. ISBN: 0-201-36046-2.

## ROSACK 2013

Rosack, M.: [www.voltstats.net](http://www.voltstats.net)- Volt Stats! Tracking real world usage of Chevy Volts in the wild - 30.03.2013, <<http://www.voltstats.net/>>, 2013.

## RUDE 1998

Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren: Habilitationsschrift. Berichte aus dem Maschinenbau, Shaker 1998. ISBN: 9783826539855.

## RUPP 2007

Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management: professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis. Berlin: Hanser 2007. ISBN: 9783446405097.

## SAMMER ET AL. 2008

Sammer, G.; Meth, D.; Gruber, C. J.: Elektromobilität – Die Sicht der Nutzer. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Springer-Verlag 11/2008 (2008), S. 393–400.

## SCHLOTT 2012

Schlott, S.: Lückenhaftes Ladenetz. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 01I2012 (2012), S. 28–34.

## SCHMIDT-SANDTE &amp; HAMMER 2012

Schmidt-Sandte, T.; Hammer, J.: Auf Der Suche Nach Dem Optimalen Antriebsstrang. MTZ - Motor-technische Zeitschrift 73 (2012), S. 542–548. ISSN: 0024-8525.

## SCHÖPPE ET AL. 2012

Schöppe, D.; Zhang, H.; Kapphan, F.; Schmidt, C.: Designing the Future with "Clean Power Analysis and Strategic Solution Concepts on a Powertrain System Level. In: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

## SCHRIEBER 2011

Schrieber, H.: Welche Prius ist der wahre Priumus? Auto Bild 23 (2011), S. 62–66.

## SHEN &amp; HAN 2012

Shen, W.; Han, W.: Well-to-Wheel Analyses for Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Electric Vehicles Using Various Thermal Power Generation Technologies in China. In: SAE-China and FISITA (eds.), Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Lecture Notes in Electrical Engineering 191. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.

## SHINICHI ET AL. 2013

Shinichi, M.; Hiroaki, T.; Kenji, I.: Development of Plug-in Hybrid System for Midsize Car. In: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 191, S. 387–399. Springer Berlin Heidelberg 2013. ISBN: 978-3-642-33776-5.

## SOMMERVILLE &amp; SAWYER 1997

Sommerville, I.; Sawyer, P.: Requirements engineering: a good practice guide. John Wiley & Sons 1997. ISBN: 9780471974444.

## STIEGELER 2008

Stiegeler, M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge. Ph.D. thesis, Universität Ulm, 2008.

## TAKEUCHI ET AL. 2012

Takeuchi, H.; Kamichi, K.; Itagaki, K.: Development of the Toyota Plug-in Hybrid System for Mass-Production. In: 21th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

## TRIPP 1993

Tripp, L.: IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications. Tech. Rep., Software Engineering Standards Committee, 1993.

## TSCHÖKE 2012

Tschöke, H.: Informationsreihe MTZ Wissen Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs Teil 1: Hybridantriebe - Definition, Lösungsvarianten Teil 4: Elektrische Maschinen Für Elektro- Und Hybridfahrzeuge Teil 7: Batterietechnik – Grundlagen und Übersicht Teil 8: Batterietechnik – Lithium-Ionen-Batterien. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 05/2012 (2012), S. 413–419.

## (UN/ECE) 2012

(UN/ECE), U.: Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE). Europäischen Union, 2012. [Http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html](http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html).

## VDI2221 1996

VDI2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Tech. Rep., VDI, Düsseldorf, 1996.

## WAGNER ET AL. 2007

Wagner, H.-J.; Koch, M.; Burkhardt, J.; Große Böckmann, T.; Feck, N.; Kruse, P.: Co2-emissionen der stromerzeugung 03.05.2013, <[http://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/geu\\_dateien/FB4-Internetseiten/CO2-Emissionen%20der%20Stromerzeugung\\_01.pdf](http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/geu_dateien/FB4-Internetseiten/CO2-Emissionen%20der%20Stromerzeugung_01.pdf)>, 2007.

**WALLENTOWITZ ET AL. 1999**

Wallentowitz, H.; Biermann, J.; Bady, R.; Renner, C.: Strukturvarianten von Hybridantrieben. In Hybridantriebe. Tech. Rep., VDI Verlag, Garching, 1999.

**WALLENTOWITZ ET AL. 2009**

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. ATZ-MTZ-Fachbuch, Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 9783834808479.

**WALLENTOWITZ ET AL. 2010**

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Schlüsseltechnologien für Elektrofahrzeuge und deren Dimensionierung. In: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges, S. 71–114. Vieweg+Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0847-9.

**WEISS 2005**

Weiß, J.: Das Lexikon. Hamburg: Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG 2005. ISBN: 3411175605.

**WEISS ET AL. 2012**

Weiss, M.; Ruhl, T.; Enderle, C.; Keller, U.; Nietfeld, F.; Mohrdieck, C.: The E-Class Diesel Hybrid by Mercedes-Benz. In: 21th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2012.

**WIEGERS 2005**

Wieggers, K. E.: Software-Requirements. Unterschleißheim: Microsoft Press Deutschland 2005. ISBN: 3860635948.

**WILDE 2008**

Wilde, A.: Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Ph.D. thesis, Technische Universität München, 2008.

**WOLFGRAMM 2012**

Wolfgramm, P.: Nutzungsanalyse und Potentialbewertung von Plug-In Hybridfahrzeugen. Master's thesis, Technische Universität München, 2012.

**ZETSCHKE 2012**

Zetsche, D.: Innovation als Wachstumsmotor: Perspektiven der Automobilindustrie. In: 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen: Daimler AG, Stuttgart 2012.

**ZÖLLER 2010**

Zöllner, D.: Abbilden des menschlichen Regelverhaltens in der Fahrermodellierung. Master's thesis, Hochschule München Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, 2010.

# 9 Anhang

Beschreibung der GUI:

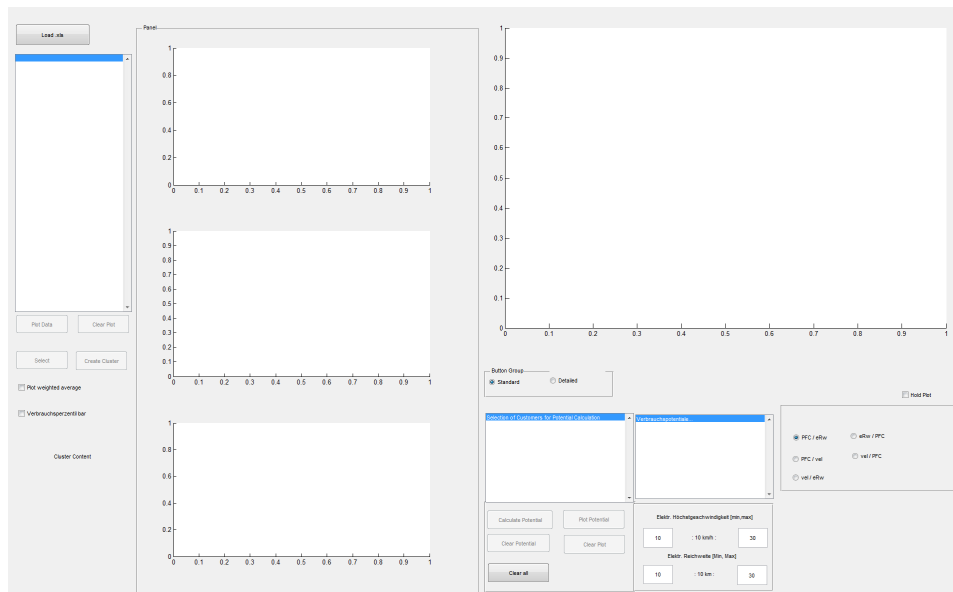


Abbildung 9-1: Gesamtansicht der GUI

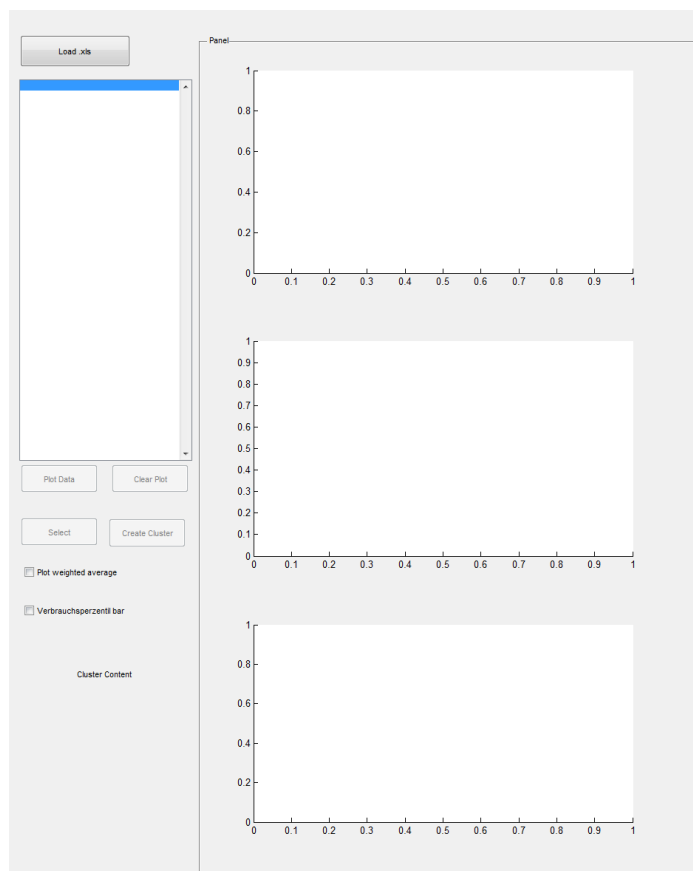


Abbildung 9-2: Eingabeteil Nutzungsverhalten

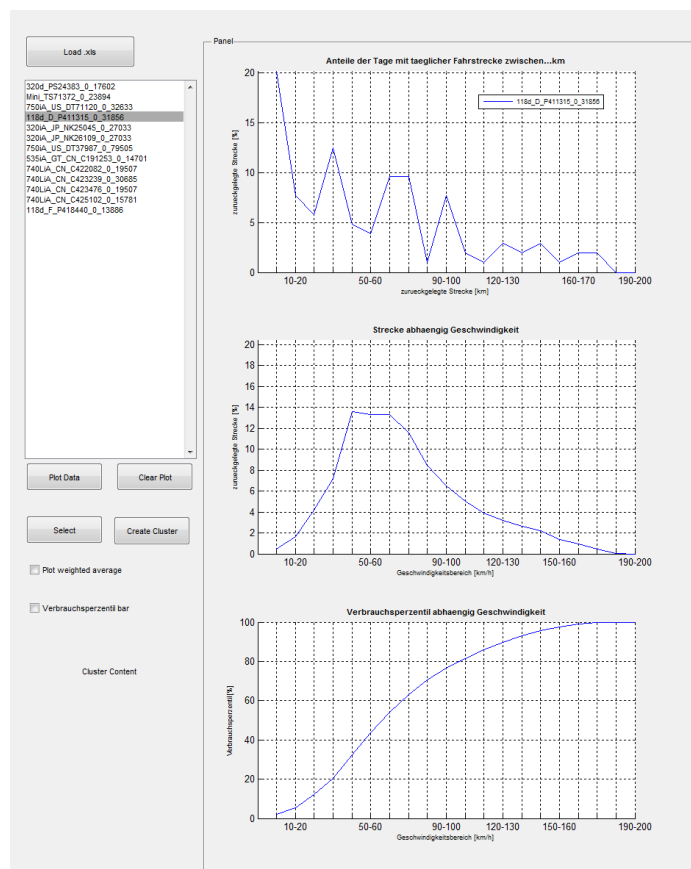


Abbildung 9-3: Beispielhaftes Nutzungsverhalten

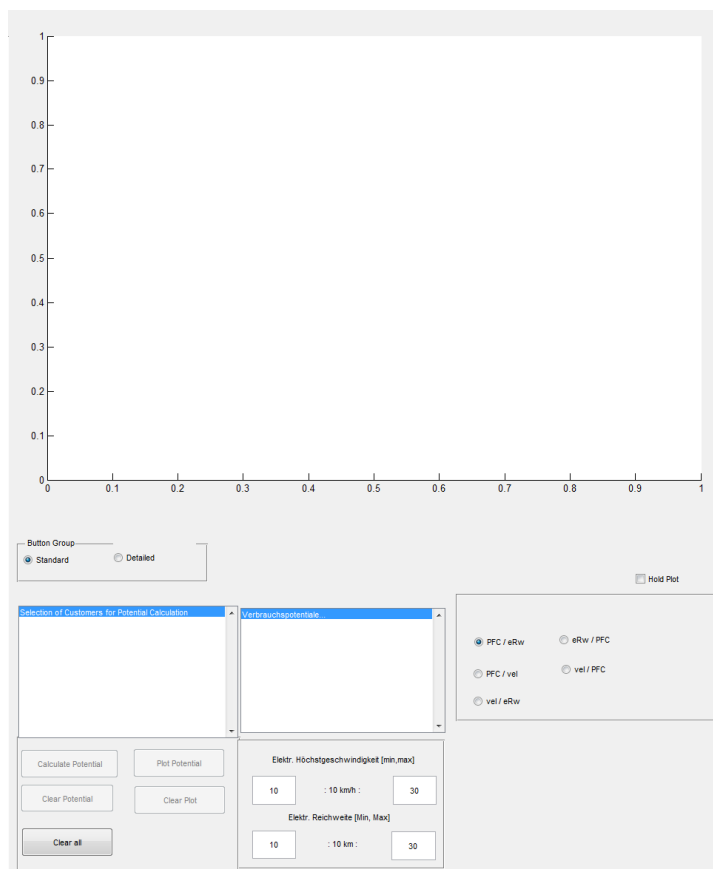


Abbildung 9-4: Eingabemaske für Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite

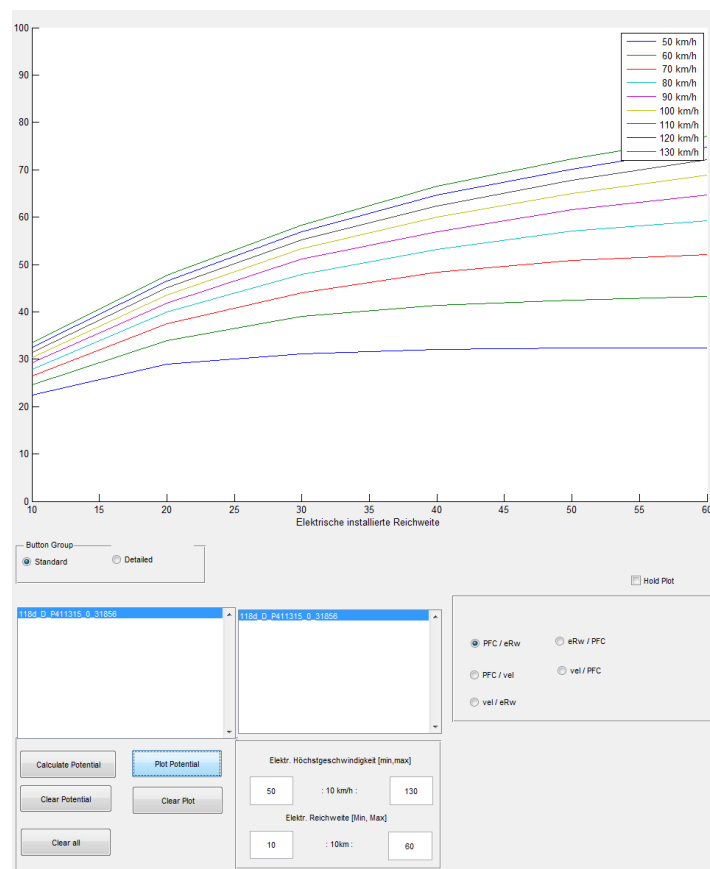


Abbildung 9-5: Eingabemaske für Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Reichweite mit einem beispielhaftem Ergebnis



The interface consists of a large plot area at the top with x and y axes ranging from 0 to 1. Below the plot is a control panel with the following elements:

- Button Group:** Radio buttons for **Standard** and **Detailed** (selected).
- Selection of Customers for Potential Calculation:** A dropdown menu.
- PFC detail:** A dropdown menu.
- Fahrttyp Energiebedarf pro km:** A dropdown menu.
- Bordnetzbedarf (Antriebsstrang/Ausstattung):** A dropdown menu.
- Leistungsbedarf Klimatisierung:** A dropdown menu.
- Calculate Potential:** A button.
- Plot Potential:** A button.
- Clear Potential:** A button.
- Clear Plot:** A button.
- Clear all:** A button.
- Plot Contour:** A button.
- Elektr. Höchstgeschwindigkeit (min,max):** Input fields with values 10 and 30.
- Batterie Energieinhalt (Min, Max):** Input fields with values 2500 and 5000.
- Radio buttons for calculation method:**
  - PFC / kWh
  - PFC / vel
  - customer PFC/kWh
  - customer PFC/vel
  - Energy utilisation ratio
  - Charging Frequency
- Enter Value:** Two buttons labeled "Enter..."

Abbildung 9-6: Eingabemaske für Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Energie

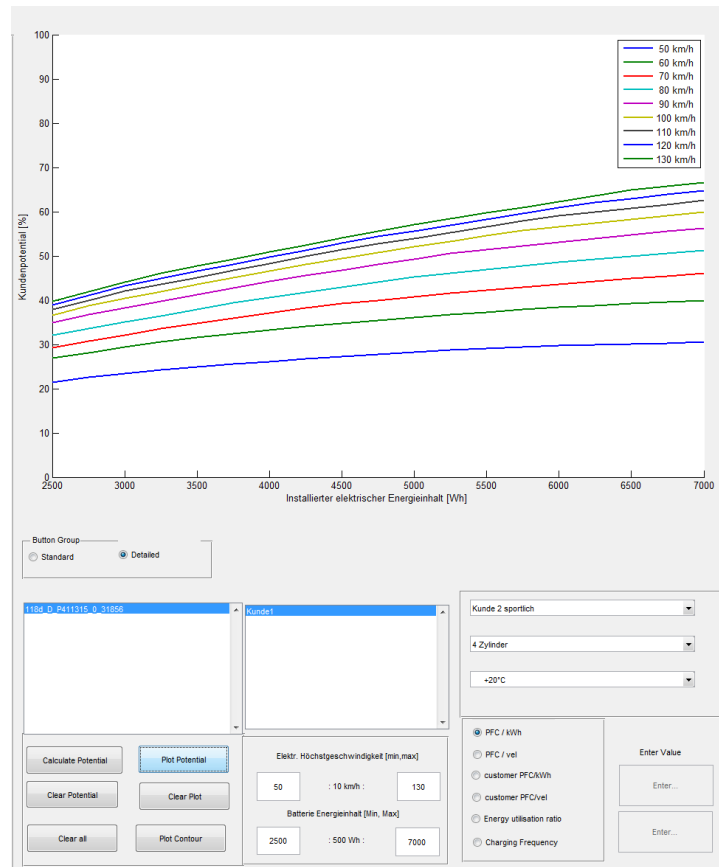


Abbildung 9-7: Eingabemaske für Nutzungspotential abhängig von einer installierten elektrischen Energie mit einem beispielhaftem Ergebnis

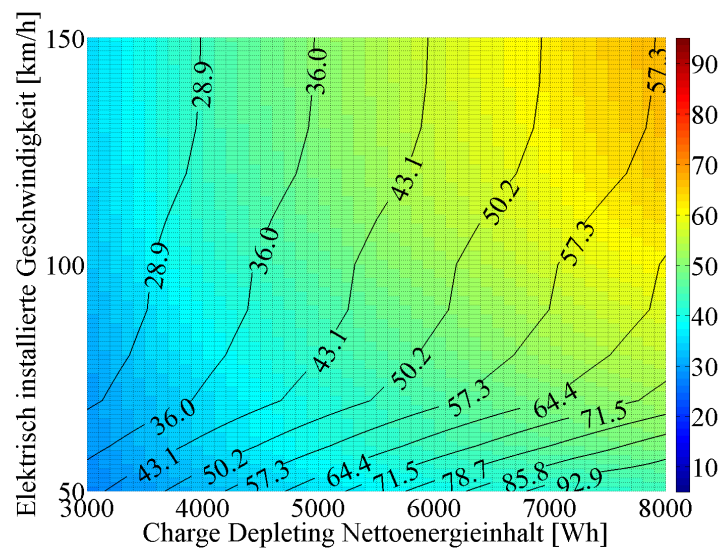


Abbildung 9-8: Nutzungspotential und der Anteil elektrisches Fahren für Cluster 2 bei 18 Grad

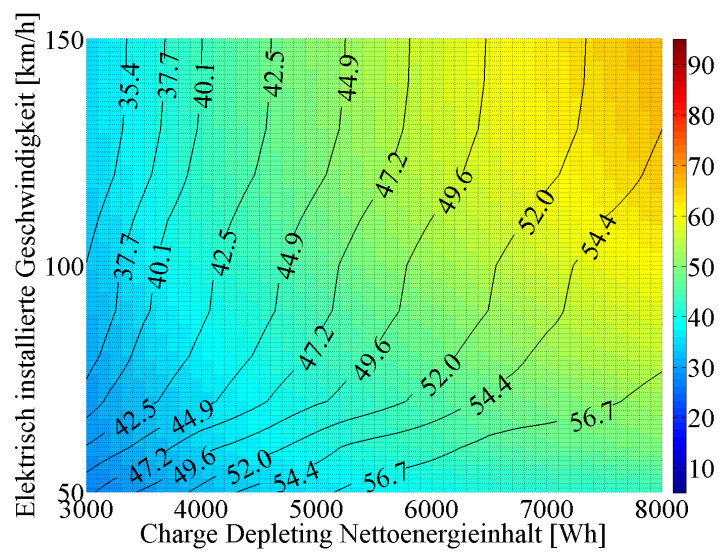


Abbildung 9-9: Nutzungspotential und der Systemnutzungsgrad für Cluster 2 bei 18 Grad