

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Péter Megyesi

Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten



Scientific
Publishing

Péter Megyesi

**Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile
in die ökologische und ökonomische Bewertung
von Fahrzeugkonzepten**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 63**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten

von
Péter Megyesi

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2017
Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-0808-3
DOI 10.5445/KSP/1000083924

Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist gegenwärtig großen Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und –betrieb benötigter Rohstoffe, Digitalisierung, globaler Wettbewerb, gesellschaftlicher Wandel und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsvermeidung, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Sicherheit, Benutzerfreundlichkeit, gemeinsamer Nutzbarkeit und angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Mensch-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt. Die Emissionen von Kraftfahrzeugen sind seit langem Gegenstand politischer Maßnahmen und wurden in der Vergangenheit durch wiederholt abgesenkte Grenzwerte adressiert. Die durch technische Weiterentwicklungen erzielten Emissionsreduktionen gerieten seit einigen Jahren in die Diskussion, da die mit den, zur Überprüfung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen gesetzlich festgelegten Prüfverfahren gewonnenen Messergebnissen der reale Betrieb im Verkehr nicht treffend abgebildet wurde. Dies wirkt sich weiterhin unmittelbar auf die Kosten aus und erzeugte bei den Nutzern erhebliche Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden Betriebskosten.

Hier setzt die Arbeit von Herrn Megyesi an, in der er eine Methode zur realitätsnahen Ermittlung des Bedarfs von Kraftstoff und elektrischer Energie sowie der Gesamtkosten für Plug-in-Hybridfahrzeuge erarbeitet. Die Methode legt reale Mobilitäts- und Fahrprofile zugrunde und wertet sie statistisch aus.

Sie erlaubt, in ihrer Anwendung Energiebedarf und Kosten für bestimmte Nutzungsszenarien und Fahrstile zu bestimmen und berücksichtigt dabei Gewohnheiten bezüglich der Nutzung der Nebenverbraucher, insbesondere der Fahrzeugklimatisierung, sowie Umgebungsbedingungen, die vor allem durch die jahreszeitliche und regionsspezifische Witterung gegeben sind. Damit ermöglicht die Methodik die nutzergruppenspezifische ökologische und ökonomische Bewertung neuer Fahrzeugkonzepte und ist so ein wertvolles Werkzeug in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses.

Frank Gauterin

Karlsruhe, 15. November 2017

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Kooperation des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. rer. nat. Frank Gauterin, für das entgegengebrachte Vertrauen, den stets impulsreichen Austausch und für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Doppelbauer möchte ich für die Übernahme des Korreferats und Herrn Professor Dr.-Ing Kai Furmans für die Übernahme des Promotionsvorsitzes danken. Herrn Dr.-Ing Martin Gießler danke ich ebenfalls für die Anregungen als Forschungsgruppenleiter.

Weiterhin möchte ich mich ganz herzlich bei der Abteilung für Energiemanagement der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG bedanken. Herrn Dr.-Ing. Matthias Lederer danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Dr.-Ing. Martin Roth danke ich ebenfalls für das entgegengebrachte Vertrauen, die vielen Freiheitsgrade, die Unterstützung der Projekte und die konstruktiven Rücksprachen. Bei Herrn André Klick, Herrn Oliver Poschmann und Herrn Dr.-Ing. Marco Fleckner möchte ich mich bedanken, dass Sie mich und die betreuten Studenten an ihren Erfahrungen an Hybridfahrzeugen und deren Modellierung teilhaben ließen. Herrn Dr.-Ing. Marc Albrecht und insbesondere Herrn Dr.-Ing Andreas Warkentin möchte ich ebenfalls für den fachlichen Austausch bedanken.

Den betreuten StundenInnen, Katrin Kickartz, Andreas Geser, Sergiy Makhotin und Axel Gemander, möchte ich für die spannende Zusammenarbeit und ihren wichtigen Beitrag bedanken.

Herrn Dr. Dietrich Bruhn danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung der Überblicks-Ökobilanzen. Herrn Holger Lang danke ich für die Möglichkeit, auf anonymisierte Fahrzeugdatenaufzeichnungen zuzugreifen und für die Einführung in die Auswertungswerkzeuge.

Herrn Bastian Freese möchte ich für die gemeinsame Veröffentlichung danken. Herrn Dr.-Ing. Alexander Basler möchte ich ebenfalls für die Zusammenarbeit an der gemeinsamen Veröffentlichung sowie die guten Ratschläge in Bezug auf Co-Simulation danken.

Zum Abschluss möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Meinen Eltern danke ich u.a. dafür, dass sie es mir ermöglicht haben, mein Abitur an einer Schule zu absolvieren, die den Weg für ein Studium in Deutschland geebnet hat (Ungarisch: “Nektek is ugyan csak egy mondat jut, de Nektek köszönhetek szinte mindent!”). Meiner Frau Nicole danke ich für ihre Unterstützung und ihre Geduld.

Rutesheim,
November 2017

Péter Megyesi

***Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile
in die ökologische und ökonomische
Bewertung von Fahrzeugkonzepten***

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Péter Megyesi

Tag der mündlichen Prüfung: 15.11.2017
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

Kurzfassung

Für eine kunden- und nutzungsspezifische Fahrzeugauslegung in den frühen Entwicklungsphasen stellt sich die Frage, wie das Nutzungsverhalten einer Kundenzielgruppe in Ökobilanzen und Gesamtbetriebskostenberechnungen berücksichtigt werden kann. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge sind dabei neben der Fahrweise des Kunden auch weitere Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch und elektrischen Energiebedarf, wie beispielsweise die Innenraumklimatisierung, von Bedeutung. Aktuell werden für die erwähnten ökologischen und ökonomischen Betrachtungen überwiegend Kraftstoffverbrauchs- bzw. Emissionswerte basierend auf gesetzlichen Fahrzyklen verwendet.

Die vorliegende Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, um aus Fahrzeugdatenaufzeichnungen zum Nutzungsverhalten der Kunden Anforderungen an Fahrzeugkonzepte abzuleiten. Der Schwerpunkt liegt in der Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen, die der anschließenden rechnergestützten Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des elektrischen Energiebedarfs am Beispiel von zwei Fahrzeugkonzepten dienen. Hierzu wird auf die Wechselwirkungen zwischen Kraftstoffverbrauch, Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumgebung eingegangen und Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen untersucht. Auf dieser Grundlage wird eine Methode ausgearbeitet, die neben Fahrprofilen auch die Randbedingungen von Fahrten zur Einbeziehung von instationären Vorgängen wie die Innenraumklimatisierung berücksichtigt. Schließlich wird die Einbindung der über die realen Nutzerprofile ermittelten Kraftstoffverbrauchswerte in die Erstellung von Ökobilanzen und Gesamtkostenberechnungen zur Bewertung von Fahrzeugkonzepten erörtert.

Method for Integrating Real Usage Behaviour into the Ecological and Economical Assessment of Vehicle Concepts

Abstract

For a customer- and usage-specific vehicle design at an early stage of development the question arises how to incorporate the customer behaviour of a customer target group in life cycle assessments and total cost of ownership calculations. Apart from the driving behaviour further influencing factors on the fuel consumption and electrical energy demand such as the cabin air conditioning are relevant for plug-in hybrid electric vehicles. Currently, fuel consumption and emission values used in such economical and ecological assessments are predominantly based on legally stipulated driving cycles.

The thesis at hand shows possibilities to derive requirements from customers' usage behaviour based on recorded vehicle data. The focus lies on the derivation of mobility and driving profiles for a computer aided calculation of the fuel and energy demand – exemplarily for two vehicle concepts. Therefore, the interrelationship among fuel consumption, driver, vehicle and vehicle ambiance is discussed and approaches in order to derive mobility and driving profiles are analysed. On this basis a method is developed which takes into account the driving behaviour and also ambient conditions of trips in order to account for transient processes such as air conditioning. Finally, the calculated fuel consumption based on real usage profiles is integrated into the creation of life cycle assessments and total cost of ownership calculations in order to evaluate vehicle concepts.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Rahmenbedingungen der Arbeit	3
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2. Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Fahrzeugkonzept und Fahrzeugkonzeption.....	7
2.2 Fahrzeugantrieb.....	10
2.2.1 Gliederung nach Fahrzeugantrieben	10
2.2.2 Kategorisierung von Hybridfahrzeugen.....	12
2.2.3 Hybridfunktionen.....	13
2.2.4 Nebenverbraucher.....	15
2.3 Einflussfaktoren auf den Energiebedarf.....	16
2.3.1 Energiebedarf Antrieb.....	16
2.3.2 Energiebedarf aufgrund Innenraumklimatisierung	18
2.3.3 Wechselwirkung Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung	21
2.4 Untersuchungen zu realen Nutzerprofilen	29
2.4.1 Untersuchung zu Mobilitätsprofilen	29
2.4.2 Untersuchungen zu Fahrprofilen.....	33
2.4.3 Datenerhebung.....	39
2.5 Ökobilanzen für Fahrzeugkonzepte	40
2.6 Kostenbewertung für Fahrzeugkonzepte.....	44
2.7 Abgrenzung zu anderen Arbeiten	46
3. Methode zur Verwendung realer Nutzerprofile bei der Fahrzeugkonzeption.....	51
3.1 Einführung in die Methode	51
3.2 Datenerhebung	55
3.2.1 Erforderliche Messgrößen.....	55

3.2.2	Stichprobenauswahl für die Datenerhebung	59
3.2.3	Art der Datenerhebung.....	60
3.2.4	Datenverarbeitung.....	61
3.3	Vorauswahl von Fahrzeugkonzeptvarianten	63
3.4	Bewertung von Methoden zur Herleitung von Fahr- und Mobilitätsprofilen	71
3.4.1	Methoden zur Herleitung von Fahrprofilen	71
3.4.2	Methoden zur Herleitung von Mobilitätsprofilen und Randbedingungen	73
3.4.3	Methode zur Herleitung von repräsentativen Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofilkombinationen	75
3.5	Clusteranalyse zur Klassifizierung von täglichen Mobilitäts- und Fahrprofilen	80
3.5.1	Definition der Clustervariablen.....	81
3.5.2	Auswahl der Ähnlichkeitsmaße	84
3.5.3	Clusterverfahren	86
3.5.4	Bestimmung der Clusterzahl.....	89
3.5.5	Stabilitätsprüfung.....	92
3.5.6	Auswahl der Tagesverläufe und inhaltliche Interpretierbarkeit	95
3.6	Modellierung der Fahrzeugkonzepte.....	102
3.6.1	Fahrzeugantrieb – Längsdynamiksimulation	104
3.6.2	Innenraumklimatisierung	110
4.	Analyse der Fahrzeugkonzepte.....	115
4.1	Untersuchung des Energiebedarfs in ausgewählten Szenarien	115
4.2	Ökologische Bewertung.....	123
4.3	Ökonomische Bewertung.....	135
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
A	Verzeichnisse	153
A.1	Abkürzungen.....	153
A.2	Formelzeichen.....	155
A.3	Abbildungsverzeichnis.....	162

A.4 Tabellenverzeichnis	170
A.5 Literaturverzeichnis	171
B Clusteranalyse	189
C Fahrzeugmodellierung.....	193
D Anpassung – Fahrleistung.....	195
E Ergebnisse.....	197

1. Einleitung

Das Bestreben der Automobilindustrie möglichst umweltfreundliche Fahrzeuge zu entwickeln, kann neben anderen Indikatoren am Kraftstoffverbrauch und somit an den durchschnittlichen lokalen Kohlenstoffdioxidemissionen der neu zugelassenen Fahrzeuge abgelesen werden (vgl. Abb. 1).

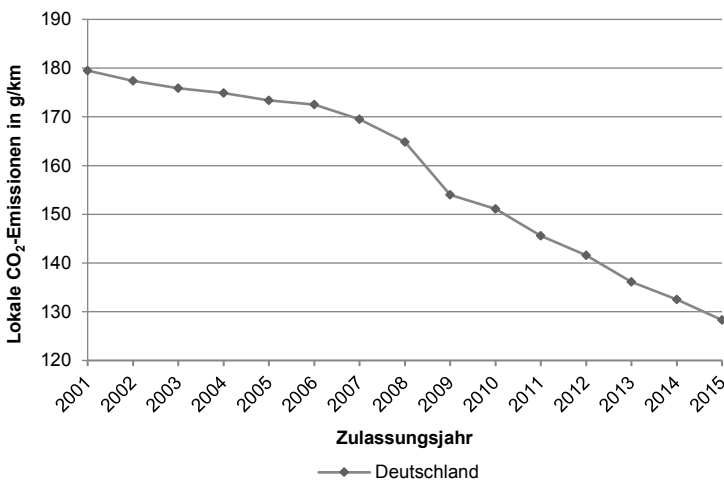


Abb. 1: Entwicklung der durchschnittlichen Zertifizierungswerte lokaler Kohlenstoffdioxidemissionen neu zugelassener Pkw in Deutschland (Daten:[44])

Die Motivation der Fahrzeughersteller für dieses Bestreben kann auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden. Dazu gehören beispielsweise die Verschärfung der Gesetzgebung in den unterschiedlichen Absatzmärkten (vgl. [105]) oder das steigende Umweltbewusstsein der Kunden und der Hersteller und das damit verbundene Erscheinungsbild vor der Öffentlichkeit. Abhängig von der Gesetzgebung drohen bei Überschreitung der festgelegten Emissionsgrenzen

Strafsteuern¹ oder Verkaufsverbote², die sich unmittelbar auf die Rendite und die Absatzzahlen des Herstellers negativ auswirken können.

Laut einer Studie von ARAL über Kaufentscheidungen steht unter den Gründen, die in erster Linie zu einer Kaufentscheidung beitragen, das Kriterium „Verbrauch / Wirtschaftlichkeit“ an zweiter Stelle hinter „Preis-Leistungs-Verhältnis“ zusammen mit „Design“ und „Komfort“ (vgl. [9]). Die „Umweltverträglichkeit“ steht nach der erwähnten Studie an der 13. Stelle. Das heißt, auch potenzielle Kunden berücksichtigen den Kraftstoff- und elektrischen Energieverbrauch, die Emissionen eines Fahrzeugs und vor allem deren finanziellen Folgen, wenn sie die Wahl für den Antrieb ihres zukünftigen Fahrzeugs treffen.

Bei der Wahl des Fahrzeugantriebs können sie auf verschiedene Informationsquellen zurückgreifen. Neben Herstellerangaben zu Verbrauchswerten, die nach gesetzlichen Vorgaben zu ermitteln sind, existieren für Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeuge auch Angaben zu den elektrischen Reichweiten, die der Hersteller als kundennah einschätzt. Weiterhin hat der Kunde auch die Möglichkeit, über Foren und Portale Erfahrungen zu Verbrauchswerten zu sammeln oder sich über die mit dem Fahrzeug verbundenen Betriebskosten zu informieren (vgl. [2, 12, 58]).

Zudem bieten Fahrzeughersteller u. a. die Volkswagen AG und die Daimler AG Broschüren über die Ökobilanz³ der angebotenen Fahrzeugmodelle an (vgl. [100, 153]).

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Bewertung von Fahrzeugkonzepten⁴ bezüglich ihrer Verbrauchs- und Emissionswerte erfolgt in den frühen Produktentwicklungsphasen. Sie wird u. a. von Fahrzeuglängsdynamiksimulationen gestützt, die für gesetzliche Fahrzyklen, aber auch für sogenannte „kundennahe“ Fahrzyklen, durchgeführt werden.

¹ z. B. in der EU, vgl. [45]

² z. B. in den USA, vgl. [50]

³ Die *Ökobilanz* liefert Auskunft über die ökologische Auswirkung eines Produktes über dessen gesamten Lebensweg hinweg (vgl. [32] und Abschnitt 2.5).

⁴ Im Rahmen dieser Arbeit beschreibt ein *Fahrzeugkonzept* eine Lösungsvariante bezüglich der Auslegung des Antriebsstrangs und weiterer verbrauchsrelevanter Funktionen (Siehe Abschnitt 2.1).

Ökobilanzen und Kostenvergleiche beruhen in der Regel in der Nutzungsphase des Lebenszyklus auf dem Kraftstoffverbrauchswert bzw. auf dem elektrischen Energiebedarf, der nach gesetzlichen Fahrzyklen ermittelt worden ist (vgl. [100]). Die gesetzlichen Fahrzyklen, aber auch bekannte „kundennahe“ Fahrzyklen bzw. die darauf basierenden Verbrauchswerte, dienen vor allem der Vergleichbarkeit verschiedener Fahrzeuge. Diese Zyklen können jedoch nicht das Nutzerprofil eines jeden Autofahrers abbilden. Der Kraftstoffverbrauch bzw. der elektrische Energiebedarf hängt aber vom Nutzerprofil der Fahrer in Wechselwirkung mit anderen Faktoren in Bezug auf Fahrzeug- und Fahrzeugumgebungseigenschaften ab. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge ergeben sich dabei auch Auswirkungen auf den Anteil der rein elektrischen Fahrten und somit auf die Höhe des Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs.

Um ein kundenorientiertes Produkt anzubieten, sollte das Nutzerprofil der Kundenzielgruppe berücksichtigt werden. Es stellt sich dabei die Frage, auf welche Weise Erkenntnisse über die Nutzerprofile von Kunden bereits verkaufter Fahrzeuge verwendet werden können, um Konzepte nachfolgender Fahrzeugmodelle zu bewerten.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus dieser Fragestellung. Sie besteht darin, eine Methode zu entwickeln, die reale Nutzerprofile aus Fahrzeugdatenaufzeichnungen verwendet, um untersuchte Fahrzeugkonzepte bezüglich ihrer Verbrauchswerte, ihrer Ökobilanz und ihrer Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) aus Sicht des Kunden in der frühen Produktentwicklungsphase vergleichen und bewerten zu können. Die Methode dient als Ergänzung zu bisherigen Bewertungskriterien.

1.2 Rahmenbedingungen der Arbeit

Die Erprobungsdaten und Werkzeuge, die die Auswertungen für die vorliegende Arbeit ermöglicht haben, wurden von der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG bereitgestellt. Die Planung und Durchführung der Datenerhebung waren somit nicht Bestandteil der Arbeit.

Die Datenaufzeichnungen beziehen sich auf konventionelle⁵ Fahrzeuge mit Automatikgetriebe und Start-Stopp-Automatik. Für die Untersuchung metho-

⁵ Die Verbrennungskraftmaschine ist der einzige Energiewandler für den Traktions-Antrieb.

discher Ansätze haben sich die Daten der für die Auswertungen herangezogenen 34 Fahrzeuge mit einer Gesamtleistung von fast 900.000 km als geeignet erwiesen. Da die Stichprobe an Fahrern nicht als repräsentativ für die gesamte Kundenzielgruppe erachtet wurde, müssen die Auswertungsergebnisse auch entsprechend interpretiert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen und auf den Stand der Forschung eingegangen. Am Ende des Kapitels wird eine Abgrenzung zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten vorgenommen.

In Kapitel 3 wird das methodische Vorgehen zur Unterstützung der Konzeptbewertung mithilfe realer Nutzerprofile vorgestellt. Dabei wird auf Möglichkeiten eingegangen, um auslegungsrelevante Erkenntnisse mittels vereinfachter Fahrzeugmodelle zu gewinnen, sodass eine Vorauswahl von Fahrzeugkonzeptvarianten getroffen werden kann. Weiterhin werden methodische Ansätze aus der Literatur zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen⁶ untersucht. Im Anschluss wird eine Methode basierend auf der Klassifikation von täglichen Mobilitäts- und Fahrprofilen mittels Clusteranalyse erarbeitet, die als relevant befundene Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch bzw. auf den elektrischen Energiebedarf berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt auf der Herleitung der Mobilitäts- und Fahrprofile sowie auf den damit verbundenen Anforderungen an die Simulationsmodelle. Als Beispiel werden ein konventionelles Fahrzeug und ein Plug-In-Hybridfahrzeugkonzept aufgeführt.

Mit den in Kapitel 3 hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofilen werden in Kapitel 4 die energetischen Auswirkungen der ausgewählten Fahrzeugkonzepte in verschiedenen Szenarien vorgestellt. Anschließend folgt die Betrachtung der Ökobilanzierung und Gesamtbetriebskostenrechnung in der frühen Entwicklungsphase unter Einbindung der aus den realen Nutzerprofilen hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofilen. Dabei werden die Ergebnisse der Gesamtbetriebskostenberechnung für die ausgewählten Fahrzeugkonzepte aufgeführt.

In Kapitel 5 erfolgt eine Zusammenfassung des vorgeschlagenen methodischen Vorgehens.

⁶ Der Begriff „Mobilitätsprofil“ beschreibt in dieser Arbeit, zu welchem Zeitpunkt, für welche Dauer und über welche Distanz der Fahrer sein Fahrzeug bewegt. Der Begriff „Fahrprofil“ beschreibt die Fahrweise im Sinne des Geschwindigkeitsprofils (vgl. 2.4).

<p><i>Kapitel 1 - Einleitung</i></p>
<p><i>Kapitel 2 – Grundlagen und Stand der Forschung</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Grundlagen• Stand der Forschung• Abgrenzung zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten
<p><i>Kapitel 3 – Methode zur Verwendung realer Nutzerprofile in der Fahrzeugkonzeption</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Einführung in die Methode• Datenerhebung• Vorauswahl von Fahrzeugkonzeptvarianten• Methodische Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen• Clusteranalyse zur Klassifizierung von täglichen Mobilitäts- und Fahrprofilen• Modellierung der Fahrzeugkonzepte
<p><i>Kapitel 4 – Analyse der Fahrzeugkonzepte</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Untersuchung des Energiebedarfs in ausgewählten Szenarien• Ökologische Bewertung• Ökonomische Bewertung
<p><i>Kapitel 5 – Zusammenfassung und Ausblick</i></p>

Abb. 2: Gliederung der Arbeit

2. Grundlagen und Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf die Begriffe *Fahrzeugkonzept* und *Fahrzeugkonzeption* eingegangen, um die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zeitlich in den Entwicklungsprozess einordnen zu können. Um Anforderungen an die Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen für energetische Auswertungen abzuleiten, wird im Anschluss die Wechselwirkung von Einflussfaktoren bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Energiebedarfs betrachtet. Anschließend wird auf Literatur zu Mobilitäts- und Fahrprofilen sowie auf Literatur zu Ökobilanzen und Gesamtbetriebskostenberechnungen von Fahrzeugen eingegangen. Schließlich wird eine Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bestehenden Arbeiten vorgenommen und die Zielsetzung anhand der Erkenntnisse präzisiert.

2.1 Fahrzeugkonzept und Fahrzeugkonzeption

BRAESS ET AL. [22] beschreiben ein *Fahrzeugkonzept* als einen hinsichtlich der grundsätzlichen Realisierbarkeit abgesicherten Entwurf einer Produktidee. Der Entwurf beinhaltet die wesentlichen Fahrzeugeigenschaften, die Parameter, die diese Eigenschaften beeinflussen sowie Hauptmodule und Komponenten (vgl. [22]). Der Schwerpunkt der Gestaltung des Fahrzeugkonzepts, der *Fahrzeugkonzeption*, liegt auf der Aufbauausprägung und der Fahrzeuggrundform, dem Maßkonzept (Anzahl Sitzplätze, Raum für Insassen, usw.) sowie auf dem Antriebskonzept (vgl. [22]). Dabei werden unterschiedliche Anforderungen u. a. aus sicherheitstechnischen, gesetzlichen und kundenrelevanten Gesichtspunkten berücksichtigt (vgl. [22]), siehe Abb. 3.

Im Hinblick auf den Entwicklungsprozess des Fahrzeugs als mechatronisches System, kann die Fahrzeugkonzeption nach VDI 2206 [149] dem linken Ast des V-Modells zugeordnet werden (vgl. Abb. 4).

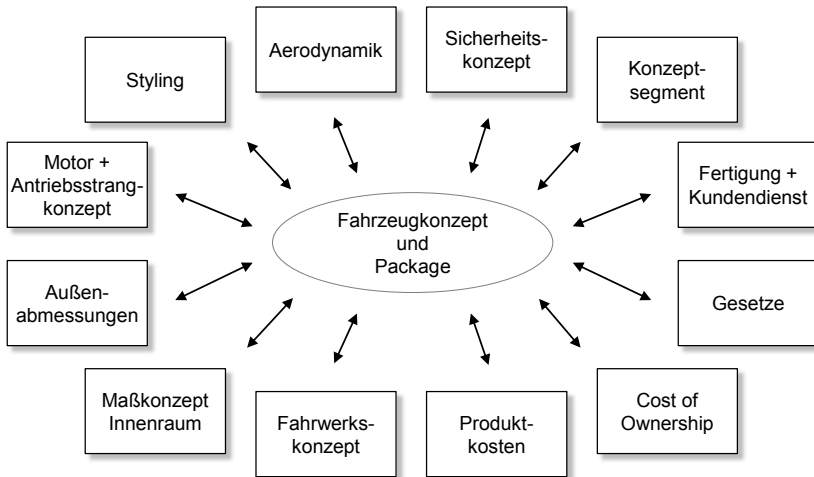


Abb. 3: Beispiel für zu berücksichtigende Anforderungen bei Fahrzeugkonzeption und Package; Darstellung nach BRAESS ET AL. (vgl. [22])

Unter *Systementwurf* wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept verstanden, das „die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen eines zukünftigen Produktes beschreibt.“ [149]. Der *domänenspezifische Entwurf* entspricht der Konkretisierung des Lösungskonzepts und erfolgt in den einzelnen Domänen (vgl. [149]). Im Rahmen der *Systemintegration* werden die domänenspezifischen Ergebnisse zu einem Gesamtsystem zusammengefügt und deren Zusammenwirken untersucht (vgl. [149]). Im Zuge der Eigenschaftsabsicherung werden die spezifizierten Lösungskonzepte und Anforderungen zur Überprüfung des Entwicklungsfortschritts verwendet (vgl. [149]). Begleitet werden die Phasen von der Modellbildung und -analyse, um die Systemeigenschaften zu untersuchen (vgl. [149]).

Im Sinne der VDI 2206 kann das Ziel der vorliegenden Arbeit (vgl. 1.2) bezüglich der Ableitung von Anforderungen an Systemkomponenten mithilfe von realen Nutzerprofilen als Unterstützung der Erstellung des domänenspezifischen Entwurfs verstanden werden. Bezüglich der Bewertung von Fahrzeugkonzepten mittels Nutzerprofilen und Simulationen dient die Arbeit als Unterstützung der Erstellung des Systementwurfs sowie der Modellbildung und -analyse.

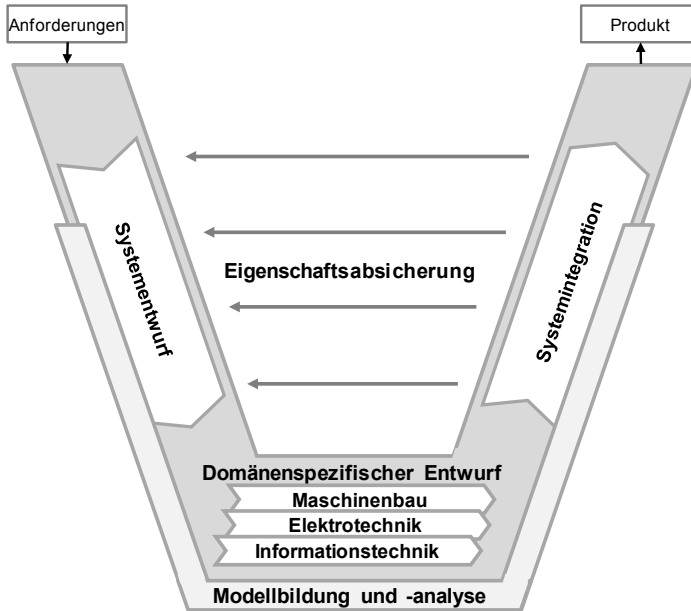


Abb. 4: V-Modell nach VDI 2206 [149]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass die Kunden sich zuerst für eine Karosserieform und eine Fahrzeugklasse entscheiden und sich erst anschließend mit der Auswahl des Fahrzeugantriebs auseinandersetzen, um die Aspekte Verbrauch, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen. Somit werden im Untersuchungsrahmen dieser Arbeit beispielhaft Fahrzeuge derselben Karosserieform und derselben Fahrzeugklasse hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs miteinander verglichen. Der Kraftstoffverbrauch und (sofern zutreffend) der elektrische Energiebedarf des Fahrzeugs für den Antrieb wird wiederum von den zu überwindenden Fahrwiderständen, von der Effizienz der einzelnen Komponenten (vgl. [22]) sowie von der Betriebsstrategie (vgl. [60]) der einzelnen Energiewandler beeinflusst. Zudem muss neben dem Antrieb auch die Energieversorgung anderer vom Kunden genutzter Fahrzeugfunktionen (Nebenverbraucher) gewährleistet werden. Die technische Umsetzung dieser Fahrzeugfunktionen kann sich aufgrund des Antriebkonzepts unterscheiden. Werden

Karosserie und Aerodynamikkennwerte für die untersuchten Fahrzeugkonzepte gleich angesetzt, dann kann die Fahrzeugkonzeption bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Energiebedarfs auf die Auslegung des Antriebs und der Nebenverbraucher eingegrenzt werden. Somit umfasst der Begriff „Fahrzeugkonzept“ im Rahmen dieser Arbeit nicht einen in Bezug auf *alle* Anforderungen (vgl. Abb. 3.) abgesicherten Entwurf eines Fahrzeugs (siehe oben), sondern eine Lösungsvariante (Systementwurf), die die Auslegung des Antriebsstrangs (Fahrzeugantrieb) und weiterer verbrauchsrelevanter Funktionen (Nebenverbraucher) beschreibt.

2.2 Fahrzeugantrieb

Um Fahrzeugkonzepte bezüglich deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch bzw. den Energiebedarf oder bezüglich Fahrleistungsdisziplinen untersuchen zu können, muss der Fahrzeugantrieb möglichst genau beschrieben und modelliert werden können. Entsprechend der Wahl, Dimensionierung, Anordnung und Betriebsstrategie der ausgewählten Antriebskomponenten variiert der Energiebedarf der Fahrzeugkonzepte bei gleicher Fahrweise und bei gleichen Rand- und Anfangsbedingungen.

Im Folgenden werden einige aus der Literatur bekannte Kategorisierungen für Fahrzeugantriebe kurz aufgeführt, um die im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft betrachteten Fahrzeugkonzepte beschreiben zu können.

2.2.1 Gliederung nach Fahrzeugantrieben

Tab. 1 zeigt die Klassifizierung der Fahrzeugantriebe nach REIF ET AL. [122]. Sie erfolgt anhand der verwendeten Energiequelle und des Grads der Elektrifizierung. Mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad nimmt auch das Potenzial zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der lokalen Emissionen zu.

HOFMANN¹⁰ [72] beziffert die Kraftstoffverbrauchseinsparungen mit 5-10 % für Micro-Hybridfahrzeuge, mit 10-20 % für Mild-Hybridfahrzeuge und mit mehr als 20 % für Voll-Hybrid-Fahrzeuge jeweils gegenüber einem konventionellen Fahrzeug ohne Start-Stopp. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge wird das Kraftstoffeinsparpotenzial nach HOFMANN¹⁴ [71] mit 50 % im NEFZ angegeben.

Klasse	Bezeichnung	Primäre Energiequelle	Beschreibung
A	Ottomotor	Ottokraftstoffe	Standardverbrennungsmotor nach dem Ottokreisprozess
B	Dieselmotor	Diesekraftstoffe	Standardverbrennungsmotor nach dem Dieselkreisprozess
C	Start-Stopp-System	Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe	Starter geeignet für Start-Stopp-Betrieb
D	Mikro-Hybrid	Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe	Bordnetzspannung bis 42 V ⁷ , eine elektrische Maschine zum Starten und als Generator, regeneratives Bremsen, Lastpunktverschiebung, Boosten
E	Mild-Hybrid	Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe	Wie Mikro-Hybrid, jedoch Bordnetzspannung über 100 V, elektrisches Fahren bei geringer Geschwindigkeit
F	Voll-Hybrid	Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe	Wie Mild-Hybrid, jedoch Bordnetzspannung von mehreren hundert Volt, elektrisches Fahren bis ca. 50 km/h
G	Plug-in-Hybrid	Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe, Elektrizität aus dem Netz	Wie Voll-Hybrid, mit Batterielademöglichkeit am Netz und großer Batterie
H	Range-Extender mit Verbrennungsmotor	Elektrizität aus dem Netz, Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe	Zumeist Batteriebetrieb, Verbrennungsmotor und Generator verlängern die Reichweite
I	Range-Extender mit Brennstoffzelle	Elektrizität aus dem Netz, Wasserstoff	Zumeist Batteriebetrieb, Brennstoffzelle verlängert die Reichweite
J	Elektrofahrzeug	Elektrizität aus dem Netz	Ausschließlich Batteriebetrieb
K	Brennstoffzellenfahrzeug	Wasserstoff	Brennstoffzelle und kleine Batterie

Tab. 1: Klassifizierung von Fahrzeugantrieben nach [122]

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit werden beispielhaft ein Plug-In-Hybridfahrzeug und ein Fahrzeug mit Start-Stopp-Automatik herangezogen. Im Folgenden wird für letzteres aufgrund der weiten Marktpenetration von der Start-Stopp-Automatik die Bezeichnung *konventionelles Fahrzeug* verwendet. Das Plug-In-Hybridfahrzeug wurde gewählt, da neben dem hohen Kraftstoffeinsparpotenzial auch ein hoher Einfluss auf dieses Einsparpotenzial aufgrund des Nutzerverhaltens vermutet wird. Das konventionelle Fahrzeug dient als Vergleichsbasis für die ökonomischen und ökologischen Betrachtungen. Aufgrund dieser Auswahl wird auf die Kategorisierung von Hybridfahrzeugen eingegangen. Auf mögliche Klassifizierungen von Elektrofahrzeugen,

⁷ [71] nennt 48 V als Abgrenzung der Spannungslage zwischen Mikro- und Mild-Hybrid.

Range-Extender-Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die bereits erwähnte Literatur verwiesen (vgl. [22, 122, 137]).

2.2.2 Kategorisierung von Hybridfahrzeugen

Hybridantriebe können je nach der Anordnung der Energiewandler in weitere Kategorien unterteilt werden.

Serielle Hybridantriebe

Serielle Hybridantriebe können mit dem Verbrennungsmotor über einen Generator chemische Energie in mechanische und anschließend in elektrische umwandeln. Die erzeugte elektrische Energie wird von einer oder mehreren elektrischen Maschinen (abweichend vom Generator) in mechanische Energie zum Vortrieb umgewandelt. Es besteht kein direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad (vgl. [60, 72]).

Parallelhybride

Beim Parallelhybriden ist ein direkter, mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor oder vom Elektromotor unabhängig voneinander bis zum Rad möglich (vgl. [60, 72]). Es ist aber auch eine Überlagerung der abgegebenen Leistungen beider Maschinen möglich (vgl. [60]) in Form von

- *Momentenaddition:*
Verbrennungsmotor und Elektromotor sind auf derselben Welle oder auf zwei miteinander mechanisch verbundenen Wellen (vgl. [60]).
- *Zugkraftaddition:*
Verbrennungsmotor und Elektromotor treiben jeweils unterschiedliche Antriebsachsen an (vgl. [60]).
- *Drehzahladdition:*
Verbrennungsmotor und Elektromotor sind mittels Planetengetriebe miteinander verbunden (vgl. [60]).

Parallelhybride können auch nach dem Einbauort der elektrischen Maschine unterschieden werden. Dieser beeinflusst u. a. die Einstufung nach der Überlagerung der abgegebenen Leistung. Hierzu wird die „Px“-Bezeichnungsweise

verwendet. Dabei steht „P“ für „parallel“ und der Platzhalter x für den Einbauort der elektrischen Maschine (vgl. [122]), siehe Tab. 2. Es sind auch Kombinationen der in Tab. 2 aufgelisteten Anordnungen möglich.

Bezeichnung	Merkmale
P1	Elektrische Maschine am Verbrennungsmotor: kein rein elektrisches Fahren, geringfügiges regeneratives Bremsen möglich
P2	Elektrische Maschine (abkoppelbar) zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe: rein elektrisches Fahren möglich, regeneratives Bremsen möglich
P3	Elektrische Maschine am oder hinter dem Getriebe: rein elektrisches Fahren möglich, regeneratives Bremsen möglich
P4	Elektrische Maschine an der zweiten Achse: rein elektrisches Fahren möglich, regeneratives Bremsen möglich

Tab. 2: Gliederung von Parallelhybridantrieben nach [122]

Leistungsverzweigte Hybridantriebe

Beim leistungsverzweigten Hybridantrieb wird die vom Verbrennungsmotor abgegebene mechanische Leistung zum Teil als mechanische Leistung an die Antriebsräder weitergeleitet. Zum Teil wird sie über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt, zwischengespeichert oder direkt von einer anderen elektrischen Maschine in mechanische Energie zum Vortrieb umgewandelt (vgl. [18, 60, 72]).

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Plug-In-Hybrid-Fahrzeug ist ein P2-Hybrid.

2.2.3 Hybridfunktionen

Aufgrund der mindestens zwei Energiewandler und Energiespeichersysteme in einem Hybridfahrzeug ergeben sich im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug neue Freiheitsgrade bezüglich der Betriebsstrategie des Antriebs. Bezüglich der Optimierungsmöglichkeiten sei an dieser Stelle beispielsweise auf FLECKNER [60] verwiesen. Im Folgenden werden die Hybridfunktionen kurz erläutert, auf die die Betriebsstrategie zurückgreift.

- *Rekuperation*

Abhängig von u. a. dem Streckenverlauf und dem Fahrerwunsch kann ein Teil der potenziellen und kinetischen Energie des Fahrzeugs über die elektrische(n) Maschine(n) im Generatorbetrieb ohne zusätzlichen Verbrennungsmotorlauf im – in der Regel elektrochemischen – Energiespeicher gespeichert werden (vgl. [60]). Wenn es die Antriebstopologie erlaubt, dann wird dabei der Verbrennungsmotor abgekoppelt, um kein Schleppmoment zu erzeugen.
- *Segeln*

Beim Segeln wird der Verbrennungsmotor während der Fahrt abgekoppelt und ausgeschaltet. Das Segeln kann beim Vollhybridfahrzeug als Teilmenge der Rekuperation mit geringem Rekuperationsmoment z. B. zur Versorgung der Nebenverbraucher angesehen werden oder nach HOFMANN10 [72] als Sonderfall des elektrischen Fahrens.
- *Lastpunktverschiebung*

Die Bezeichnung bezieht sich auf die Verschiebung des Verbrennungsmotorlastpunkts in Abhängigkeit des gestellten Moments der angekoppelten elektrischen Maschine und kann je nach Randbedingung zum Betrieb in günstigeren Wirkungsgradbereichen genutzt werden (vgl. [60]). Die Lastpunktverschiebung ist neben der Rekuperation die zweite Möglichkeit, den Energiespeicher während der Fahrt zu laden.
- *Boost*

Als Boosten wird der Zustand bezeichnet, wenn beim Beschleunigen die elektrische Maschine den Verbrennungsmotor unterstützt (vgl. [72]). In der Regel erfolgt dies bei hohen Fahrerwunschkomenten.
- *Start-Stopp*

Der Verbrennungsmotor wird im Fahrzeugstillstand bzw. unterhalb einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle ausgeschaltet. Die Energie zur Versorgung der elektrischen Nebenverbraucher wird dem elektrischen Speicher entnommen (vgl. [72]).
- *Rein elektrisches Fahren*

Der Verbrennungsmotor wird ausgeschaltet. Die Energie zur Überwindung der Fahrwiderstände und Versorgung der elektrischen Nebenverbraucher wird dem elektrischen Speicher entnommen.

Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen kann einer der Energiespeicher extern elektrisch geladen werden (vgl. [128]). Dabei wird die Phase, in der die extern aufgeladene Batterie während des elektrischen Fahrens entladen wird, als „Charge-Depleting-Mode“ bezeichnet. Die Phase, in der der Ladungserhalt der Traktionsbatterie über den Verbrennungsmotor ermöglicht wird, wird als „Charge-Sustaining-Mode“ bezeichnet (vgl. [51, 129]). Inwieweit rein elektrisch gefahren werden kann, hängt u. a. von der Höhe des elektrischen Energiebedarfs und der verfügbaren Batteriekapazität ab.

2.2.4 Nebenverbraucher

Beim konventionellen Fahrzeug werden Nebenaggregate wie Getriebeölpumpe und Bremskraftverstärker überwiegend über den Verbrennungsmotor angetrieben. Für eine Abschaltung des Verbrennungsmotors im Fahrbetrieb muss die Funktion dieser Aggregate auch weiterhin gewährleistet werden. Dies erfolgt bei einem Voll- und Plug-In-Hybridfahrzeug über eine elektrische Getriebeölpumpe und über einen elektrischen Bremskraftverstärker bzw. über eine elektrisch angetriebene Vakuumpumpe für den Bremskraftverstärker (vgl. [63]). Die Lenkhilfeunterstützung kann elektro-hydraulisch oder elektromechanisch ausgeführt werden. Weitere Fahrwerkssysteme wie zum Beispiel die Wankstabilisierung müssen bei Voll- und Plug-In-Hybridfahrzeugen ebenfalls elektrisch angetrieben werden können. Zur Kühlung der Innenraumluft kann bei einem Voll-Hybrid- oder Plug-In-Hybridfahrzeug ein elektrischer Klimakompressor eingesetzt werden. Für die Heizfunktion, auch in Verbindung mit dem Reheat-Betrieb (vgl. 2.3.2), entfällt bei den erwähnten Fahrzeugantrieben die Abwärme des Verbrennungsmotors als Wärmequelle während rein elektrischer Fahrten. Insbesondere bei Plug-In-Hybridfahrzeugen mit einer höheren rein elektrischen Reichweite können andere Wärmequellen wie beispielsweise PTC-Elemente (Positive Temperature Coefficient) oder eine Wärmepumpe eingesetzt werden, um Komfortanforderungen zu erfüllen (vgl. [63]).

Schlussfolgerung im Hinblick auf die vorliegende Arbeit:

Für die Herleitung von Anforderungen an ein neues Fahrzeugkonzept mittels aufgezeichneter Nutzerprofile eines abweichenden Fahrzeugkonzepts müssen die Unterschiede in der Antriebstopologie, Betriebsstrategie und der Versorgung der Nebenverbraucher berücksichtigt werden.

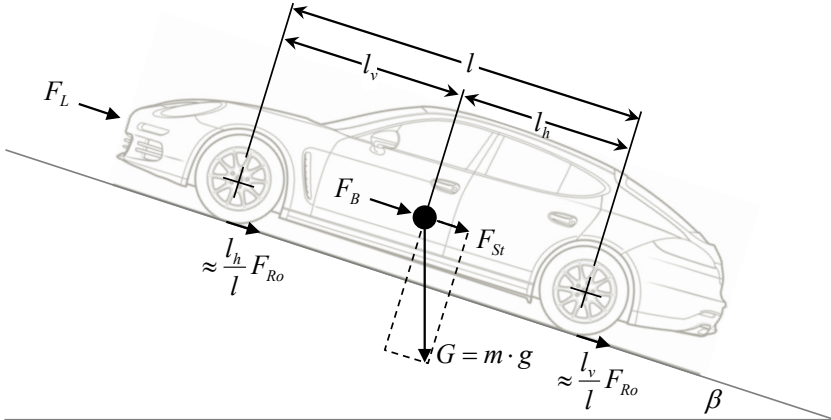
2.3 Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Im Folgenden wird auf die Zusammensetzung des Energiebedarfs im Fahrzeugbetrieb und auf Einflussfaktoren auf den Energiebedarf eingegangen. Diese werden in Kapitel 3 bei der Ausarbeitung der Methode wieder aufgegriffen und berücksichtigt.

2.3.1 Energiebedarf Antrieb

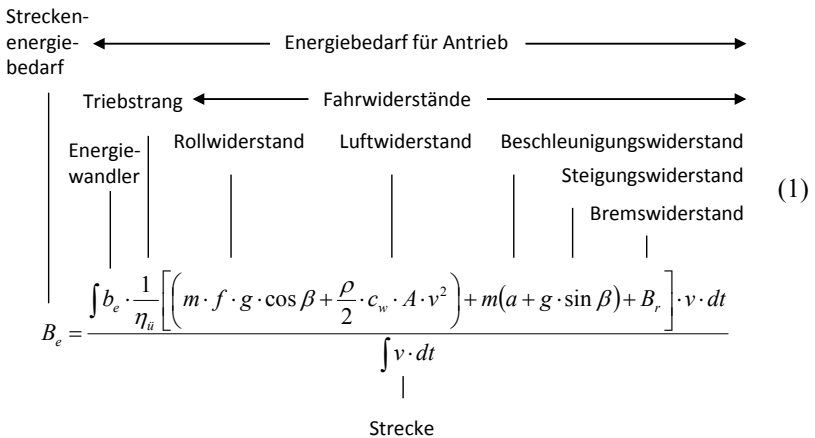
Abb. 5 stellt die Fahrwiderstände dar, die auf ein Fahrzeug wirken. Die einzelnen Fahrwiderstände werden in Gleichung (1) zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb eines konventionellen Fahrzeugs aufgeführt (vgl. [22]). Beim Vergleich mehrerer Fahrzeugkonzepte bei gleicher Karosserie-, Fahrwerk- und Reifenkonfiguration kann der gleiche Luftwiderstandsbeiwert c_w , die gleiche Stirnfläche A und der gleiche Rollwiderstandsbeiwert f für die unterschiedlichen Konzepte angesetzt werden, sofern eventuelle Unterschiede in der Fahrzeugmasse oder in der Achslastverteilung keine Unterschiede in der Bereifung erfordern. Ein Unterschied in der Fahrzeugmasse wirkt sich jedoch in erster Linie auf den Roll-, den Beschleunigungs- und den Steigungswiderstand aus. Die unterschiedlichen Fahrzeugmassen der untersuchten Fahrzeugkonzepte werden in den Verbrauchssimulationen (vgl. 3.6.1 und 4.1) berücksichtigt.

Weiterhin können, wie in 2.2 aufgeführt, je nach Antriebskonzept mehrere Energiewandler und Energiespeichersysteme eingesetzt werden. Für ein Plug-In-Hybridfahrzeug ist Gleichung (1) nicht mehr ausreichend. Die Antriebsstrangkonfiguration und die Betriebsstrategie beeinflussen die Wirkungsgradkette η_0 , den spezifischen Verbrauch b_e und die Form, in der der Energiebedarf zur Verfügung gestellt werden muss. So muss zum Beispiel im Falle einer Lastpunkthanhebung (vgl. 2.2) berücksichtigt werden, dass ein Teil der Energie vom Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie verwendet wird, um den Verbrennungsmotor in Betriebspunkten mit besserem Wirkungsgrad zu betreiben. Das Beispiel soll lediglich den Einfluss der Topologie auf die Wirkungsgradketten betonen. Für eine nähere Beschreibung zur Simulation der Verbrauchswerte im Rahmen dieser Arbeit siehe 3.6.1.



F_L	Luftwiderstand	F_{Ro}	Rollwiderstand	F_B	Beschleunigungswiderstand
F_{St}	Steigungswiderstand	G	Gewichtskraft	m	Fahrzeugmasse
g	Erdbeschleunigung	l	Radstand	l_v	Abstand zwischen Schwerpunkt und Vorderachse
l_h	Abstand zwischen Schwerpunkt und Hinterachse				

Abb. 5: Fahrwiderstände



Auf die einzelnen Einflussgrößen des Antriebsenergiebedarfs im Zusammenhang des Wechselwirkungsnetzes Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung wird in Abschnitt 2.3.3 eingegangen.

2.3.2 Energiebedarf aufgrund Innenraumklimatisierung

Das Behaglichkeitsempfinden eines Menschen in einem Pkw wird von mehreren Größen, u. a. der Lufttemperatur, der Luftgeschwindigkeit und der Luftfeuchte beeinflusst (vgl. [75]). Beispielsweise ist die als angenehm empfundene mittlere Innenraumtemperatur in einem Pkw abhängig von der Umgebungstemperatur (vgl. [75]). Abb. 6 zeigt diese Abhängigkeit für den Verlauf der arithmetisch gemittelten Kopf- und Fußraumtemperatur. Die hohe Innenraumtemperatur ist im Winter auf die kalten Scheiben und auf eine Wohlfühltemperatur im Fußraum zurückzuführen, die ca. 5 bis 12 K wärmer sein muss als die Temperatur in Kopfhöhe (vgl. [66]). Im Sommer ist die vergleichsweise hohe Behaglichkeitstemperatur auf die leichte Bekleidung der Insassen zurückzuführen (vgl. [66]).

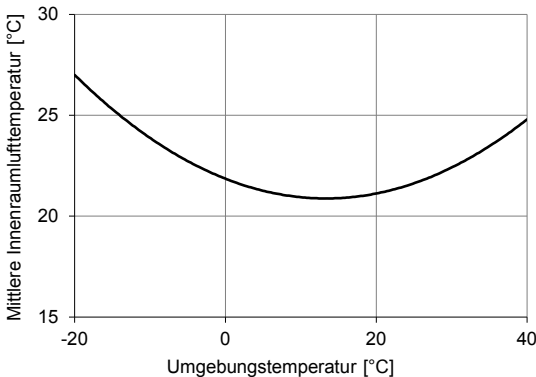


Abb. 6: Als behaglich empfundene Innenraumtemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (vgl. [75])

Auch die Sonneneinstrahlung beeinflusst das Wärmeempfinden. Bei einer Sonneneinstrahlung von 300 W/m^2 auf Oberkörper und Oberschenkel muss für dasselbe thermische Empfinden die Umgebungstemperatur um ca. 4 K gesenkt werden (vgl. [63, 66]).

Die Luftfeuchte wird ab ca. 12 g bis 13 g Wasser pro kg trockener Luft als schwül empfunden. Dieser Wert sollte deshalb nicht überschritten werden. Im Winter ist eine geringe relative Luftfeuchte anzustreben, um beschlagene Scheiben zu vermeiden. Weiterhin wird oberhalb einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$

eine relative Luftfeuchte über 65 % vermieden, um das Wachstum von Mikroorganismen wie beispielsweise Schimmel zu verhindern (vgl. [66]).

Um die Wohlbefindlichkeit zu modellieren und zu bewerten existieren verschiedene Ansätze (vgl. beispielsweise [57]). Damit dem Behaglichkeitsempfinden entsprochen wird, muss die Luft im Innenraum bezüglich Temperatur und Luftfeuchte konditioniert werden. Die erforderliche Heiz- und Kälteleistung ergibt sich aus den Wärmeübertragungsmechanismen (vgl. [17, 66, 90]). Dabei sind die Sonneneinstrahlung, die Luftfeuchte und die Außentemperatur (vgl. [66, 90]), die geometrischen Eigenschaften und Materialeigenschaften (vgl. Tab. 2) der involvierten Bauteile sowie die Realisierung der Klimaanlage inklusive Regelung von Bedeutung (vgl. [17, 66, 90]).

Bezüglich des Energiebedarfs zur Innenraumklimatisierung kann zwischen Kühlen, Heizen und dem Reheat-Betrieb unterschieden werden.

Kühlen

Abb. 7 zeigt das Anlagenschema eines Kaltdampf-Kompressionskälte-Kreislaufs. Das Wirkprinzip kann nach GROSSMANN [66] wie folgt beschrieben werden: Im Zustand 1 wird vom Verdichter (Kompressor) der überhitzte Kältemitteldampf angesaugt und isentrop auf den Zustand 2 verdichtet ($1 \rightarrow 2$). Im Kondensator wird dem Kältemittel isobar Wärme entzogen ($2 \rightarrow 3$) und anschließend wird das Kältemittel bei konstanter Enthalpie in einem Drosselorgan (Expansionsventil) entspannt ($3 \rightarrow 4$). Im Verdampfer wird dem Kältemittel von der in den Fahrgastraum strömenden Luft Wärme zugeführt ($4 \rightarrow 1$). Die Luft wird dabei abgekühlt und dadurch entfeuchtet.

Für den Energiebedarf, der vom Energiespeicher des Fahrzeugs bereitgestellt werden muss, ist das Verdichten des überhitzten Kältemitteldampfes relevant ($1 \rightarrow 2$, vgl. [66]). In konventionellen Fahrzeugen wird der hierfür benötigte Klimakompressor von der Verbrennungskraftmaschine angetrieben. Wie in Absatz 2.2.4 erwähnt wird der Klimakompressor in Fahrzeugen, die rein elektrische Fahrphasen ermöglichen, elektrisch betrieben, um auch in diesen Phasen die Luft abkühlen zu können.

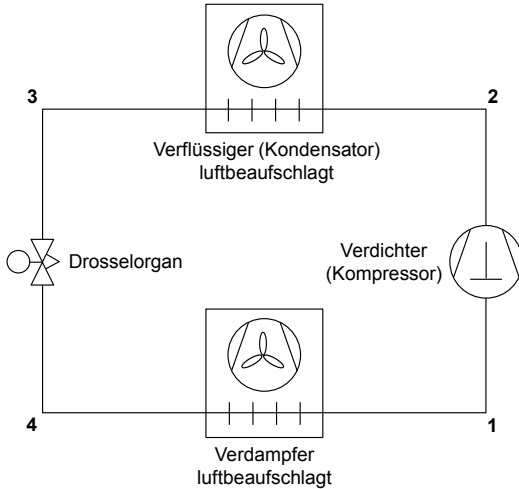


Abb. 7: Kaltampf-Kompressionskälte-Kreislauf [66]

Heizen und Reheat-Betrieb

Um die in die Fahrzeugkabine einströmende Luft aufzuwärmen, wird üblicherweise ein Heizungswärmetauscher verwendet. Durch diesen fließt ein Kühlmittel, das in konventionellen Fahrzeugen überwiegend über die Abwärme der Verbrennungskraftmaschine, die nicht in Form von Abgas abgeführt wird, erwärmt wird (vgl. [63]).

Wie in 2.2.4 erwähnt, entfällt in Elektrofahrzeugen der Wärmeeintrag durch die Verbrennungskraftmaschine und wird stattdessen über ein PTC-Element oder eine Wärmepumpe ermöglicht, um möglichst lange elektrische Fahrten ohne Komforteinschränkungen zu ermöglichen (vgl. [63, 122]).

Die Erwärmung der Luft am Wärmetauscher kann nicht nur bei niedrigen Außentemperaturen erforderlich sein. Das Abkühlen der Luft über den Kältemittelkreislauf kann auch zum Entfeuchten der Luft notwendig sein, um je nach Randbedingungen beschlagene Scheiben zu vermeiden oder das Wohlbefinden der Insassen zu erhalten oder zu steigern (vgl. [63]). Die Luft wird dann nach Vorbeiströmen am Verdampfer am Heizungswärmetauscher erwärmt. Das Abkühlen und das anschließende Wiedererwärmen der Luft werden als Reheat-Betrieb bezeichnet.

Der Einfluss der Innenraumklimatisierung auf die elektrische Reichweite von Plug-In-Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen ist hoch (vgl. [62, 63]). Basierend auf einer Simulation nach dem Geschwindigkeitsprofil des NEFZ beträgt die Minderung der elektrischen Reichweite eines Plug-In-Hybridfahrzeugs aufgrund der Innenraumklimatisierung bis zu 40 % (vgl. [63]). Deshalb wird neben dem Energiebedarf für den Antrieb insbesondere auf die Innenraumklimatisierung in Verbindung mit der Herleitung von Nutzerprofilen (3.4) und der Erstellung der Modelle für Verbrauchssimulationen (3.6.2) in dieser Arbeit eingegangen.

2.3.3 Wechselwirkung Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung

Um in Abschnitt 3.4 die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode abzuleiten, wird der Energiebedarf im Kontext der Einflussfaktoren Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumgebung untersucht. Tab. 3 zeigt die Zuordnung der Einflussfaktoren zu den Größen, über die sie sich auf den Energiebedarf auswirken. Dabei wurde eine möglichst gleichmäßige Vertiefung des Detaillierungsgrades angestrebt (vgl. Gleichung (1)). Eine detailliertere Aufschlüsselung möglicher Einflussfaktoren auf den Rollwiderstand oder den Luftwiderstand (vgl. [103]) wurde somit nicht als sinnvoll erachtet.

Fahrwiderstände

Die Fahrzeugauslegung beeinflusst über die Fahrzeugmasse⁸ $m(\text{Fahrzeug})$, den Rollwiderstandsbeiwert f der Reifen sowie über die Achslastverteilung den Rollwiderstand. Die Achslastverteilung kann über den Radstand l sowie den Abstand der Vorder- bzw. der Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt l_v und l_h beschrieben werden. Die Fahrzeugumgebung beeinflusst den Rollwiderstand überwiegend über den Fahrbahnsteigungswinkel β der Fahrbahn und den Fahrbahnbelag. Letzterer wirkt sich ebenfalls auf den Rollwiderstandsbeiwert f aus. Der Fahrereinfluss ergibt sich über die zusätzliche Masse $m(\text{Beladung})$, die sich aus der Masse der beförderten Insassen und des

⁸ Leergewicht nach DIN-70020 [29]

beförderten Gepäcks zusammensetzt⁹. Je nach Detaillierungsgrad der Fahrzeugmodellierung kann die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes berücksichtigt werden. In diesem Fall beeinflusst der Fahrer den Rollwiderstandsbeiwert auch über seine Fahrweise, also über die gewählte Fahrzeuggeschwindigkeit v .

Das Fahrzeug beeinflusst über dessen Stirnfläche A und dessen Luftwiderstandsbeiwert c_w den Luftwiderstand. Die Fahrzeugumgebung wirkt sich über die Luftdichte auf den Luftwiderstand aus. Der Fahrer hat erneut einen erheblichen Einfluss über seine Fahrweise, also über die gewählte Fahrzeuggeschwindigkeit v . Denn die Geschwindigkeit geht quadratisch in den Luftwiderstand (Kraft) ein.

Der Steigungswiderstand wird analog zum Rollwiderstand über die Fahrzeugmasse $m(\text{Fahrzeug})$ und die Masse der Insassen und des Gepäcks $m(\text{Beladung})$ sowie über die Fahrbahnsteigungswinkel β selbst beeinflusst.

Der Beschleunigungswiderstand hängt bezüglich der Fahrzeugeigenschaften von der translatorischen Trägheit und von den rotatorischen Trägheiten ab. Die translatorische Trägheit wird über die Summe aus der Fahrzeugmasse $m(\text{Fahrzeug})$ und der Beladung $m(\text{Beladung})$ bestimmt. Die rotatorischen Trägheiten – beispielsweise vom Rad oder von den Zahnradern – sind abhängig von den Trägheitsmomenten J_x der rotierenden Komponenten und deren Drehzahl, bestimmt über die Übersetzungen i_x bzw. der zugehörigen Radien r_x (vgl. [103]). Der Fahrereinfluss des Beschleunigungswiderstands ergibt sich einerseits aus der Masse der beförderten Insassen und des Gepäcks $m(\text{Beladung})$ sowie aus der Fahrweise über die gewählte Fahrzeuglängsbeschleunigung $a_{\text{längs}}$.

Die Fahrweise des Fahrers wird wiederum auch von dem Fahrzeug und von der Fahrzeugumgebung, zum Beispiel über Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Verkehrsaufkommen, sowie auch über die verfügbare Leistung des Fahrzeugs beeinflusst. Unter der Prämisse, dass der Fahrer auch sein zukünftiges Fahrzeug analog zum aktuellen bewegt, werden die umgebungsbedingten Einflüsse auf die Fahrweise für diese Arbeit nicht weiter aufgeschlüsselt bzw. nicht in die Methode integriert.

⁹ vgl. EWG 92/21 [55]: Neben der Fahrzeugmasse nach DIN 70020 wird zusätzlich 68 kg für den Fahrzeugführer und 7 kg für Gepäck angenommen.

Ursache für den Energiebedarf	Einfluss des Fahrers	Einfluss durch Fahrzeug	Einfluss durch Fahrzeugumgebung
Rollwiderstand	m (Beladung)	$m(\text{Fahrzeug}), f, l, l_v, l_h$	β, g, f
Luftwiderstand	v (Fahrweise)	c_w, A	ρ
Steigungswiderstand	m (Beladung)	$m(\text{Fahrzeug})$	β
Beschleunigungswiderstand	m (Beladung), $a_{\text{längs}}$ (Fahrweise)	$m(\text{Fahrzeug}), J_x, l_x, r_x$	
Triebstrangverluste und Verluste der Energiewandler und der Energiespeichersysteme	Betriebspunkt indirekt über Fahrerwunschwunschmoment $\Delta t_{\text{Fahrt}}, \Delta t_{\text{Abstellzeit}}$	η_i (Betriebspunkt, T_i)	T
Fahrwerksfunktionen	$v, a_{\text{längs}}, a_{\text{quer}}$	Abhängig von der Funktion	β, f
Licht- und Sicht	Einstellungen	Abhängig von der Funktion	Lichtverhältnisse, Witterungsbedingungen
Komfortfunktionen / Unterhaltungselektronik	Einstellungen	Abhängig von der Funktion	Abhängig von der Funktion
Innenraumklimatisierung	$v, \Delta t_{\text{Fahrt}}, \Delta t_{\text{Abstellzeit}}, T_{\text{Einstellung}}, \text{Lüfterstufe}$	Bauteilgeometrie, Klimaregelung $a_i, \tau_i, m_{cp,i}, \epsilon_i, T_{\text{Innen}}, \varphi_{\text{Innen}}, T_i$	$T, \varphi, E_{\text{Solar}}$
Anteil der rein elektrisch zurückgelegten Strecken	Aufgelistete Einflussgrößen und das Ladeverhalten	Aufgelistete Einflussgrößen, $P_{\text{Grenze,Antrieb}}, W_{\text{Grenze,Speicher}}$ und Betriebsstrategie	Aufgelistete Einflussgrößen und Ladeinfrastruktur

Tab. 3: Einfluss des Fahrers, des Fahrzeugs und der Fahrzeugumgebung auf den Energiebedarf

Abb. 8 zeigt die Auswirkung der Beschleunigung und der Geschwindigkeit auf die Fahrwiderstände gemäß Gleichung (1) am Beispiel eines Mittelklassewagens. Diese hohe Sensitivität der Fahrwiderstände bezüglich der Fahrweise wurde bereits in vielen Studien untersucht. In Abschnitt 2.4.2 wird auf ausgewählte Arbeiten eingegangen, die die Fahrweise in Form von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofilen untersucht haben.

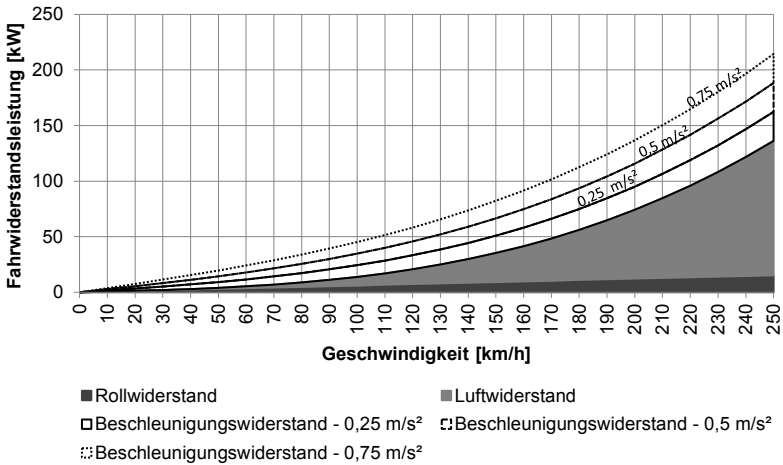
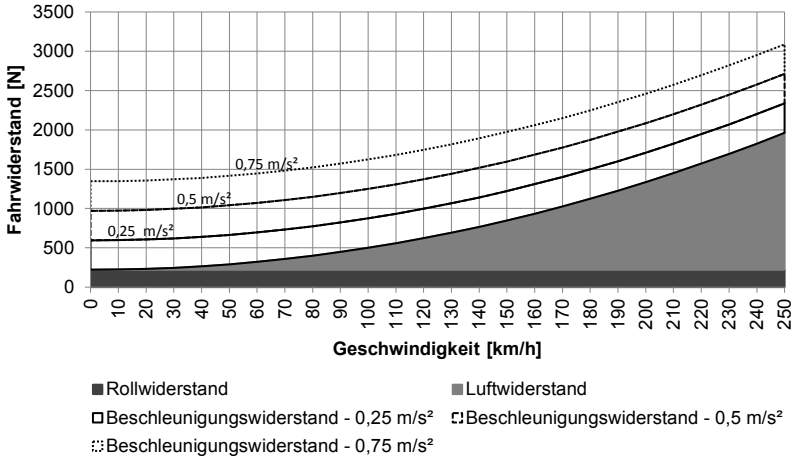


Abb. 8: Beispiel für die Größenordnung und Verhältnisse der Fahrwiderstände für ein Mittelklassefahrzeug ($m = 1500 \text{ kg}$, $f = 0,011$, $A = 2 \text{ m}^2$, $c_w = 0,3$)

Triebstrangverluste

Der Wirkungsgrad einzelner Triebstrangkomponenten ist abhängig von den Betriebspunkten (Drehzahl und Drehmoment) und der Temperatur der Komponenten. Die Betriebspunkte sind wiederum von der Auslegung und über die Fahrwiderstände indirekt von der Fahrweise und von Umgebungsbedingungen abhängig.

Beispielsweise ist der Wirkungsgrad des Getriebes laut FISCHER ET AL. [59] neben den Grundverlusten abhängig von dem zu übertragenden Drehmoment, der Drehzahl bzw. der Geschwindigkeit, der Temperatur und der Betriebsdauer. Die Temperaturabhängigkeit der Verluste ergibt sich über die Viskosität der Schmierstoffe (vgl. [59]). Die Getriebeöltemperatur wird während der Fahrt von den Verlusten (vgl. [131]) und dem Kühlkreislauf und während den Abstellzeiten von der Abstelldauer und den Umgebungsbedingungen beeinflusst.

Verluste der Energiewandler und der Energiespeichersysteme

Für die Ermittlung des Energiebedarfs von *Tank bis zum Rad*¹⁰ müssen zusätzlich zu den Fahrwiderständen und Triebstrangverlusten auch die Verluste der Energiewandler und der Speichersysteme berücksichtigt werden.

Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors wird meistens in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des Motordrehmoments bzw. des effektiven Mitteldrucks angegeben (vgl. [22, 67, 72]). Auch die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch (vgl. [22, 72]). Bei tiefen Bauteiltemperaturen wird ein Teil des eingespritzten Kraftstoffes an den Brennraumwänden gespeichert und kann nicht an der Verbrennung teilnehmen (vgl. [22]). Um trotzdem ein zündfähiges Gemisch zu erhalten, wird eine Übermenge an Kraftstoff eingespritzt (Kaltstartanreicherung) (vgl. [22]).

Der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine ist ebenfalls abhängig von der erforderlichen Drehzahl- und dem erforderlichen Drehmoment sowie von der Bauteiltemperatur. Der Wirkungsgrad sowie die entnehmbare Leistung einer Traktionsbatterie zeigen Abhängigkeiten bezüglich des Ladezustandes,

¹⁰ Engl. „Tank-to-Wheel“; Der Begriff steht für den Energiebedarf und die Treibhausgas-Emissionen bei Nutzung des Fahrzeugs (vgl. [22]). Der Energiebedarf und die Treibhausgas-Emissionen für den Kraftstoffpfad von der Quelle bis zur Zapfsäule [bzw. Ladesäule] werden mit dem Begriff „Well-to-Tank“ bezeichnet, während die Kombination beider Betrachtungen als „Well-to-Wheel“ bezeichnet wird (vgl. [22]).

der Zelltemperatur und des Entlade- bzw. des Ladestromes (vgl. [91]). Da die Betriebspunkte dieser Komponenten von der Auslegung und der Fahrweise abhängen, beeinflusst der Fahrer über seine Fahrweise auch die Höhe der Verluste. Die Komponententemperaturen zu Beginn der Fahrt hängen von den Umgebungsbedingungen und der Dauer der Abstellzeiten und somit auch vom Mobilitätsverhalten des Fahrers ab.

Nebenverbraucher inklusive Innenraumklimatisierung

Neben der Hauptfunktion des Fahrzeugs, das Befördern von Personen und Gepäck, existieren weitere Fahrzeugfunktionen wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, die ebenfalls mit einem Energiebedarf einhergehen.

Der Energiebedarf für aktive Fahrwerksfunktionen wie zum Beispiel für ABS- oder ESP-Regelungen kann kurzzeitig hoch sein. Über die Nutzungsphase des Fahrzeugs hinweg können diese jedoch vernachlässigt werden. Der Einfluss von Fahrwerksfunktionen wie beispielsweise von der Lenkkraftunterstützung, von Licht- und Sichtfunktionen oder von der Unterhaltungselektronik ist dagegen schon höher. Auch der Energiebedarf dieser Funktionen ist abhängig vom Wechselwirkungsnetz Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung (vgl. Tab. 3).

In Absatz 2.3.2 wurde bereits der hohe Einfluss der Innenraumklimatisierung auf den Energiebedarf erwähnt, sowie auf die Einflussgrößen bezüglich Bauteileigenschaften und Umgebung eingegangen. Der Verlauf der Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte sind u. a. abhängig von der Tageszeit und somit auch davon, wann der Fahrer sein Fahrzeug fährt oder im Freien abstellt. Die Wärmeeinträge aufgrund der Sonneneinstrahlung und der Lufttemperatur der Umgebung beeinflussen die Wärmeeinträge in die Komponenten und in Kombination mit der Abstelldauer die Randbedingungen wie Innenraum- und Komponententemperaturen zu Beginn der Fahrt. Diese sind relevant, da die Wärmeeinträge dieser Komponenten zu einem erhöhten Kühl- oder Heizbedarf führen können (vgl. [62]). Die stationäre Phase, in der der Einfluss dieser Wärmeeinträge sich noch ändert, kann in Abhängigkeit der Fahrdauer bei gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit zu einem unterschiedlichen streckenbezogenen Energiebedarf führen. Somit ist auch die Fahrdauer von Bedeutung (vgl. [1, 17, 62]). Für den streckenbezogenen Energiebedarf ist auch die Durchschnittsgeschwindigkeit von Bedeutung.

Abb. 9 zeigt diesen Einfluss beispielhaft. Für konventionelle Fahrzeuge existieren Umrechnungsfaktoren auf den streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch (vgl. [125]). Voraussetzung hierfür ist die Angabe des Leistungsbedarfs an der Kurbelwelle. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge kann die Umrechnung aufgrund der unterschiedlichen Energiewandler und der unterschiedlichen Energieherkunft (Kraftstoff versus Elektrizität) nicht angewandt werden.

Die Entwicklung der Komponententemperaturen hängt einerseits von den Umgebungsbedingungen wie der Sonneneinstrahlung und der Außentemperatur ab. Andererseits ergeben sich in Zusammenhang mit den Bestandteilen des Mobilitätsprofils wie Abstellzeit und Uhrzeit der Abstellzeit die Anfangsbedingungen bezüglich dieser Temperaturen für die nächste Fahrt (vgl. [17]).

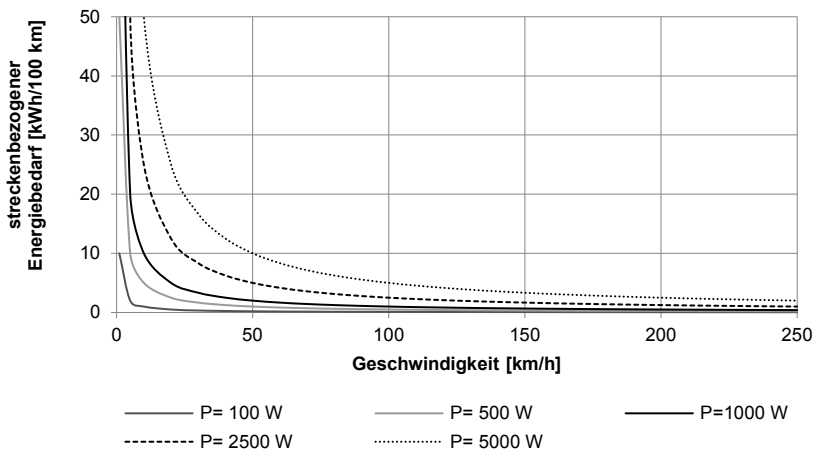


Abb. 9: Einfluss der Nebenverbraucher (inkl. Verluste) auf den streckenbezogenen Energiebedarf in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

Anteil der rein elektrisch zurückgelegten Strecken

Bei Fahrzeugantrieben mit zwei oder mehreren Energiequellen ist die Wahl der Energiewandler für die ökologische Verträglichkeit und die Kosten für den Betrieb nicht indifferent. Die rein elektrisch zurückgelegte Strecke hängt für das Beispiel eines Plug-In-Hybridfahrzeugs von mehreren Faktoren ab.

Die installierte elektrische Antriebsleistung (abhängig vom Elektromotor und Traktionsbatterie) sind maßgebend dafür, ob bei der gewählten Fahrweise

(Fahrerwunschmoment und Geschwindigkeit) und dem vorliegenden Streckenprofil (Steigung, Kurvenkrümmung) die zusätzliche Leistung des Verbrennungsmotors notwendig ist.

Das Mobilitätsverhalten beeinflusst über die Uhrzeit und Dauer der Abstellzeiten in Wechselwirkung mit den Lademöglichkeiten (Ladeinfrastruktur) das Ladeverhalten. Dies wiederum bestimmt den Batterieladezustand zu Beginn der Fahrt.

Die Batteriekapazität bestimmt in Abhängigkeit des Ladeverhaltens, des Energiebedarfs (in Abhängigkeit aller aufgelisteten Einflussfaktoren, vgl. Tab. 3), der installierten elektrischen Leistung und der Betriebsstrategie, wieviel elektrische Energie zur Überwindung der Fahrwiderstände entnommen werden kann und somit die rein elektrisch zurückgelegte Strecke.

Schlussfolgerung für die vorliegende Arbeit

- Wesentliche Einflussfaktoren des Fahrers auf den Energiebedarf während der Fahrt sind dessen Fahrweise (Geschwindigkeitsprofil), Mobilitätsprofil (Uhrzeit und Dauer der Fahrt, zurückgelegte Strecke), die zusätzlich von ihm beförderte Beladung (beförderte Insassen und Gepäck) und die eingeschalteten Nebenverbraucher.
- Das Mobilitätsprofil (Uhrzeit und Dauer der Abstellzeiten) beeinflusst die Anfangsbedingungen der jeweiligen Fahrten.
- Wesentliche Einflussfaktoren der Fahrzeugumgebung sind die Straßeneigenschaften (Steigung, Reibwert) sowie die Außentemperatur, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchte.
- Zudem beeinflusst das Mobilitätsprofil des Fahrers aufgrund des Ladeverhaltens den rein elektrischen Fahrtanteil bei Plug-In-Hybridfahrzeugen.

Bevor die Möglichkeit zur Einbeziehung realer Nutzerdaten unter Berücksichtigung der aufgeführten Einflussfaktoren in die Konzeptbewertung in Kapitel 3 diskutiert wird, wird im nächsten Absatz auf bestehende Untersuchungen von Mobilitäts- und Fahrprofilen eingegangen.

2.4 Untersuchungen zu realen Nutzerprofilen

Es existieren bereits wissenschaftliche Arbeiten, die unter verschiedenen Aspekten reale Nutzerprofile untersuchen. Im Folgenden werden Studien aufgeführt, die sich mit dem Mobilitätsprofil und mit dem Fahrprofil von Personen auseinandersetzen. Dabei wird u. a. auf die Zielsetzung der Arbeiten, die eingesetzten Methoden, auf die Datenerhebung und schließlich auf die Relevanz dieser Studien für die vorliegende Arbeit eingegangen.

2.4.1 Untersuchung zu Mobilitätsprofilen

Datenerhebungen zu Mobilität von Personen

Die Studien „Mobilität in Deutschland (MiD)“ [24, 80] und „Deutsches Mobilitätspanel (MOP)“ [27, 154] beschreiben das Mobilitätsverhalten von Personen in deutschen Haushalten. MiD [24, 80] enthält Auswertungen auf Haushalts-, Personen-, Wege-, Fahrzeug- und Reiseebene. Hervorzuheben sind für die Betrachtungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Häufigkeitsklassierungen zu Startzeit (Uhrzeit) der Fahrten, Weglänge, Wegdauer und zurückgelegte Kilometer am Tag. Das Ziel der Studie MOP [27, 154] besteht in der Erstellung einer Datenbasis für Verkehrsplanungen durch „Messen“ der Mobilität von Menschen in Deutschland. Die für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wesentlichen Auswertungen halten zurückgelegte Strecken und Auswertungen aus sogenannten Tankbüchern zwecks Dokumentation des Kraftstoffverbrauchs fest.

Die Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)“ [159] dient ebenfalls als Grundlage für die Verkehrsplanung. Im Gegensatz zu den anderen zwei Studien liegt der Schwerpunkt auf dem Wirtschaftsverkehr.

Die Studie „Mobilität im Personenverkehr in Europa“ [94] (wird im Folgenden mit „MIP“ abgekürzt) vergleicht die Mobilität von Personen in verschiedenen Ländern. Sie liefert statistische Auswertungen zu gefahrenen Strecken am Tag, Fahrtdauer am Tag und eine Aufteilung der Streckenanteile nach Fahrtzwecken (vgl. [94]).

PINKOFSKY [118] wertet Daten von Dauerzählstellen aus, um die Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien gefahrener Minuten zur Typisierung von Straßenabschnitten zu verwenden. Die Klassifizierung erfolgt mittels Clusteranalyse.

Außerhalb des deutschsprachigen Raums ist die US-Mobilitätsstudie „National-Household Transportation Survey“ (kurz NHTS, vgl. [107]) zu erwähnen. Auf die Verwendung dieser oder ähnlicher Mobilitätsstudien zur Fahrzeugauslegung wird im Folgenden eingegangen.

Anwendung von Mobilitätsstudien

Ermittlung von Reichweitenanforderungen

FRANKE ET AL. [61] behandeln das Thema Reichweitenanforderung (für Elektrofahrzeuge) und Einflussfaktoren, die sich auf diese auswirken. Neben dem Vergleich zu täglichen Fahrtstrecken basierend auf oben aufgelisteten Studien wird im Rahmen von [61] auch eine Datenerhebung mit Elektrofahrzeugen durchgeführt. Erkenntnisse zu Reichweitenanforderungen sind vor allem für die Auslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebe von Bedeutung, da aufgrund der niedrigen Energiedichten und hoher Kosten von heutigen (2014) Batteriezellen eine Überdimensionierung zum deutlichen Mehrgewicht und zur Erhöhung der Herstellungskosten führen kann.

Berechnung vom Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Eine bedeutende Auswertung von Mobilitätsprofilen im Hinblick auf die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs bzw. im Hinblick auf die Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs für Plug-In-Hybridfahrzeuge stellt der SAE-Bericht J2841[129] dar. Dieser setzt sich mit der Gewichtung des Charge-Depleting-Verbrauchs und des Charge-Sustaining-Verbrauchs auseinander (vgl. 2.2 und 2.3.3) und bezieht Daten zu täglich gefahrenen Streckenlängen aus dem National-Household Transportation Survey (NHTS, [107]). Dabei wird die rein elektrische Reichweite R_{CD} eines Fahrzeugs mit vollgeladenem extern aufladbarem Energiespeicher als gegeben angesehen (z. B. nach J1711 [128]). Aus dem Ladeszenario, bei dem das Fahrzeug über Nacht geladen wird, wird die rein elektrische Reichweite R_{CD} den einzelnen Tagesstrecken d_k der Menge aller Tagesstrecken S (aus NHTS) gegenübergestellt. Der sogenannte Utility-Factor $UF(R_{CD})$ wird nach Gleichung (2) gebildet und dient zur erwähnten Gewichtung zwischen dem Charge-Depleting- und dem Charge-Sustaining-Verbrauch (vgl. [129]).

$$UF(R_{CD}) = \frac{\sum_{d_k \in S} \min(d_k, R_{CD})}{\sum_{d_k \in S} d_k} \quad (2)$$

Weiterhin wurde in [129] der Zusammenhang zwischen Streckenlänge und Durchschnittsgeschwindigkeit untersucht. Mit unterschiedlichen Ansätzen werden die Streckenlängen entweder den Stadt- oder den Autobahnfahrten zugeordnet. Somit können in einem nächsten Schritt unterschiedliche Utility-Factors für Stadt- und Autobahnfahrten definiert werden (vgl. [129]).

PLÖTZ ET AL. [119] greifen auf Mobilitätsprofile aus einer Datenerhebung von REM2030 [124] zurück. Diese gibt neben Streckenlängen auch Uhrzeiten und Dauer der Fahrten an. Diese Daten wurden in der Studie benutzt, um die elektrischen Fahrtanteile zu bestimmen.

Bestimmung von Rand- und Anfangsbedingungen von Fahrten

Die Studie nach STRUPP ET AL. [139] greift auf Mobilitätsstudien zurück, die eine Aussage über im Durchschnitt gefahrene Minuten zu unterschiedlichen Uhrzeiten treffen. Die Studien werden mit Klimadaten kombiniert, die Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur in Abhängigkeit von Region, Monat und Uhrzeit beinhalten. Über diese Kombination des Mobilitätsprofils mit Klimadaten kann eine Aussage über die gefahrene Dauer zu unterschiedlichen Umgebungsbedingungen getroffen werden.

MEGYESI ET AL. [99] untersuchen den Einfluss des Mobilitätsprofils und der Umgebungsbedingungen auf das Kraftstoffesparpotenzial von konventionellen Fahrzeugantrieben mit einem Solardach, das zur Unterstützung des Bordnetzes verwendet wird. Im Zuge dieser Untersuchung ist der Ladezustand der (12V-) Batterie zu Beginn der Fahrten und Abstellzeiten relevant. Ähnlich zu STRUPP ET AL. [139] erfolgt die Zuordnung der Umgebungsbedingungen zu einer Uhrzeit in Abhängigkeit der Region und des Monats, um die Sonneneinstrahlung sowie die Temperatur zu ermitteln. Der Batterieladezustand kann somit über die Uhrzeit der Fahrten, die zugehörigen Umgebungsbedingungen, die Fahrdauer und die benötigte elektrische Leistung (entsprechend über die Uhrzeit der Abstellzeiten und der Abstelldauer) während der Fahrt bestimmt werden. Um ein Mobilitätsprofil mit Uhrzeit der Fahrten, Fahrdauer, Uhrzeit der Abstellzeiten, Abstelldauer und die Geschwindigkeit während der Fahrt zu

erzeugen, wurde eine Abwandlung der Inversmethode herangezogen. Es wurden nach der Wahrscheinlichkeit gewichtete Ziehungen von Fahrdauern und Abstellzeiten durchgeführt (Inversmethode; vgl. [127]). Dabei wurde die Verteilung der gefahrenen Minuten über die Uhrzeit insofern berücksichtigt, dass ein Ergebnis aus einer Ziehung verworfen wurde, wenn es dieser Verteilung widersprach.

Im Rahmen von BASLER ET AL. [17] wurde zwecks Berechnung des Energiebedarfs zur Klimatisierung von Elektrofahrzeugen ein Teilergebnis der Betrachtungen der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Dabei wurden Tagesverläufe anhand der Uhrzeiten, Dauer und Streckenlänge der täglichen Fahrten klassifiziert.

Tab. 4 fasst die aufgeführten Quellen im Hinblick auf ihre Ziele, die eingesetzten Methoden sowie den Bezug für die vorliegende Arbeit zusammen.

Quelle	Ziel	Methode	Relevanz für die vorliegende Arbeit
MID [24, 80]	Mobilitätsverhalten beschreiben	Populationsbeschreibende Statistik Statistische Kenngrößen, (relative) Häufigkeitsverteilungen	Vergleich der untersuchten Population (siehe Bsp. Kap. 3.2.3)
MOP [27, 154]			
KID [159]			
MIP [94]			
FRANKE ET AL. [61]	Anforderung an die Reichweite	Hypothesenprüfende Statistik	
PINKOFSKY [118]	Verkehrsplanung	Clusteranalyse zur Beschreibung des Verkehrsaufkommens abhängig von der Uhrzeit	→ Herleitung von Mobilitätsprofilen
SAE-Bericht J2841 [129]	Emissionen, Kraftstoffverbrauch	Häufigkeitsverteilung von täglichen Streckenlängen zur Gewichtung von rein elektrisch zurückgelegten Strecken und hybrid. zurückgelegten Strecken	
STRUPP ET AL. [139]	Nutzung Klimaanlage	Fahrdauer zu unterschiedlichen Umgebungsbedingungen basierend auf MID-Daten und Klimadaten	

Quelle	Ziel	Methode	Relevanz für die vorliegende Arbeit
PLÖTZ ET AL. [119]	Emissionsberechnung, el. Reichweite	Original Erhebungsdaten als Grundlage für die Simulation	→ Herleitung von Mobilitätsprofilen
MEGYESI ET AL. [99]	Emissionsberechnung	Abwandlung der Inversmethode zur Bestimmung der Anfangs- und Randbedingungen von Fahrten.	
BASLER ET AL. [17]	Energiebedarf für Innenraumklimatisierung	Clusteranalyse zur Klassifizierung der täglichen Fahrten	

Tab. 4: Untersuchung von Mobilitätsprofilen; Ziele, Methoden und Relevanz für die vorliegende Arbeit

2.4.2 Untersuchungen zu Fahrprofilen

Auf den Zusammenhang zwischen Fahrweise und Kraftstoffverbrauch wurde in Absatz 2.3.3 eingegangen. Ein wesentlicher Bestandteil der Fahrweise ist das vom Fahrer gewünschte Beschleunigungsverhalten, welches er unter Berücksichtigung der Randbedingungen wie beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen über das Fahrpedal und gegebenenfalls über Ganganwahl regeln kann. Bezüglich der Längsdynamik eines Fahrzeugs ergibt sich aus dem Wunsch-Beschleunigungsverhalten des Fahrers und dem maximalen Beschleunigungsvermögen ein Geschwindigkeitsprofil. Im Folgenden werden daher die Geschwindigkeitsprofile der Fahrten eines Fahrers zur Beschreibung seiner Fahrweise verwendet.

Es zählt zum Stand der Technik, dass für die Zulassung eines Fahrzeugs ein Geschwindigkeitsprofil unter vorgegebenen Randbedingungen auf einem Rollenprüfstand nachgefahren werden muss [39, 47, 48, 51]). Diese Geschwindigkeitsprofile sind teils synthetisch (vgl. NEFZ, [56]) und teils aus realen Fahrten entnommen und nach unterschiedlichen Kriterien modifiziert (z. B. Artemis-Zyklus, vgl. [6] oder WLTC im Rahmen der WLTP, vgl. [40, 146]). Das Bestreben, ein Geschwindigkeitsprofil repräsentativ für die Geschwindigkeitsprofile einer ausgewählten Gruppe von Fahrern herzuleiten, wird mit unterschiedlichen Ansätzen verfolgt.

Ein Ansatz besteht in der Klassifizierung von Fahrten oder von Geschwindigkeitssequenzen einzelner Fahrten mittels Clusteranalyse [6, 8, 53]. Weiterhin existieren unterschiedliche Arbeiten [95, 106, 123, 145, 164]¹¹, die im Wesentlichen auf stochastische Ansätze wie Markov-Ketten aufbauen. Im Fokus der aufgeführten Arbeiten ist jeweils ein Fahrzyklus oder eine Auswahl an Zyklen, die für Emissionsmessungen benutzt werden können. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass die Zyklen auf einem Rollenprüfstand abgebildet werden können. Diese Anforderung kann insbesondere einen Einfluss auf die Dauer des hergeleiteten Zyklus haben. ANDRÉ [6] schreibt bezüglich der Wahl der Zykluslänge von einem Kompromiss aus Kosten und Qualität.

EGHTESSAD [46] beschreibt zwei Ansätze zur Herleitung von Fahrprofilen. Der erste Ansatz besteht aus der Auswahl von Geschwindigkeitsverläufen (zwischen zwei Stillstandsphasen) aus Messdaten. Der ausgewählte Streckenabschnitt soll bezüglich des streckenbezogenen Gesamt-Energiebedarfs („Energiebilanz“), des Energiebedarfs für den Beschleunigungswiderstand und des Energiebedarfs für den Luftwiderstand jeweils in der Zugphase den Originalmessdaten entsprechen. Weiterhin darf die Dauer der Geschwindigkeitsverläufe eine gewählte Vorgabe nicht überschreiten. Die ausgewählten Geschwindigkeitsverläufe werden anhand gewichteter Kennparameter bewertet und in eine Rangordnung gestellt. Der zweite Ansatz nach EGHTESSAD besteht in der Erstellung von synthetischen Geschwindigkeitsverläufen. Dabei sollen die Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphasen, Konstantfahrphasen und Stillstandsphasen gemäß verschiedener statistischer Kennwerte oder Verteilungen die Originalmessdaten widerspiegeln (vgl. [46]).

Tab. 5 fasst die aufgeführten Quellen im Hinblick auf ihre Ziele, die eingesetzten Methoden sowie den Bezug für die vorliegende Arbeit zusammen.

Im Rahmen der Bewertung der methodischen Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen in 3.4 wird der Einsatz von Markov-Ketten und Clusteranalyseverfahren bewertet. Im Folgenden soll kurz auf die Verfahren und deren Verwendung zur Herleitung von Fahrprofilen an Beispielen aus der Literatur eingegangen werden.

¹¹ REISER ET AL. [123] und MÜLLER-KOSE [106] erwähnen nicht explizit den Begriff „Markov-Kette“. Das Vorgehen der Geschwindigkeitsprofilgenerierung entspricht jedoch im Wesentlichen denselben Überlegungen.

Quelle	Ziel	Methode	Relevanz für die vorliegende Arbeit
ANDRÉ ET AL. [6, 8]	Herleitung von Geschwindigkeitsprofilen zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen	Clusteranalyse zur Klassifizierung von Geschwindigkeitssequenzen	→ Bewertung von methodischen Ansätzen zur Herleitung von Fahrzyklen
ERDMANN [53]			
MÜLLER-KOSE [106]			
TORP ET AL. [145]		Basierend auf Markov-Ketten	
REISER ET AL. [123]			
XIAO ET AL. [164]			
LEE ET AL. [95]			
EGHTESSAD [46]	Untersuchung von Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge	<ol style="list-style-type: none"> 1. Auswahl von Geschwindigkeitsverläufen gemäß Energiebilanz 2. Synthetische Geschwindigkeitsverläufe basierend auf statistischen Kennwerten und Verteilungen 	

Tab. 5: Untersuchung von Fahrprofilen; Ziele, Methoden und Relevanz für die vorliegende Arbeit

Markov-Kette

WALDMANN&STOCKER [156] beschreiben Markov-Ketten als einen zeit-diskreten stochastischen Prozess $(X_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$ mit abzählbarem Zustandsraum I , wenn für alle Zeitpunkte $n \in \mathbb{N}_0$ und alle Zustände $i_0, \dots, i_{n-1}, i_n, i_{n+1} \in I$ die folgende Eigenschaft gilt:

$$\begin{aligned}
 P(X_{n+1} = i_{n+1} \mid X_0 = i_0, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}, X_n = i_n) \\
 = P(X_{n+1} = i_{n+1} \mid X_n = i_n)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Diese Eigenschaft wird als Markov-Eigenschaft bezeichnet und beschreibt die Gedächtnislosigkeit des Prozesses (vgl. [156]). Liegen demzufolge die Werte i_0, \dots, i_n der Zufallsvariablen X_0, \dots, X_n vor, so hängt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Zufallsvariable X_{n+1} den Wert i_{n+1} annimmt, nur von i_n und nicht von i_0, \dots, i_{n-1} ab (vgl. [156]).

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$, mit der nach dem Zustand i_n der Zustand i_{n+1} angenommen wird, heißt Übergangswahrscheinlichkeit des Prozesses (vgl. [156]). Sind die Übergangswahrscheinlichkeiten unabhängig vom Zeitpunkt n des Übergangs, so wird von einer homogenen Markov-Kette, andernfalls von einer inhomogenen Markov-Kette gesprochen (vgl. [156]).

Für die Anwendung zur Erstellung von Geschwindigkeitsprofilen werden die Geschwindigkeits- und Beschleunigungszeitschriebe aus der Datenerhebung in äquidistante Zeitschritte unterteilt. Der Zustand zu jedem Zeitschritt n wird einer Geschwindigkeits- und Beschleunigungsklasse zugeordnet (vgl. Matrix in Abb. 10). Zu jeder dieser Geschwindigkeits- und Beschleunigungsklassen gehört jeweils eine Sub-Matrix, die den Zustandsübergang zum nächsten Zeitschritt $n + 1$ klassifiziert. Im Falle von TORP [145] wird der Zustandsübergang über die Änderung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung (vgl. Abb. 10) beschrieben. Nachdem jeder Zeitschritt einer Klasse zugeordnet wurde, können die Matrizen als relative Häufigkeitsverteilungen dargestellt werden. Die befüllten Sub-Matrizen ergeben für die Generierung der Geschwindigkeitsprofile die Übergangswahrscheinlichkeiten.

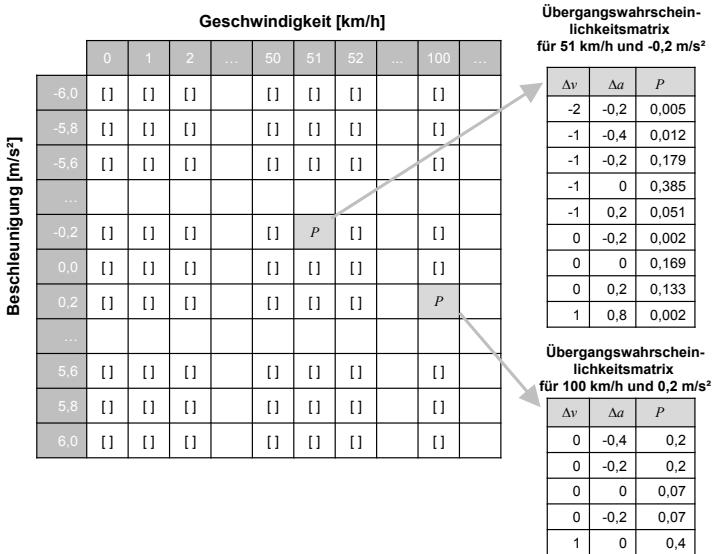


Abb. 10: Beispiel für Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen nach [145]

Die Generierung der Geschwindigkeitsprofile erfolgt schrittweise. In jedem Zeitschritt, dem eine Geschwindigkeit und eine Beschleunigung zugeordnet werden kann, wird gemäß den Übergangswahrscheinlichkeiten per Zufall auch ein Übergang zugeordnet. Dieser Übergang ergibt die Geschwindigkeit und die Beschleunigung im nächsten Zeitschritt des Geschwindigkeitsprofils und die Position in der Beschleunigungs-Geschwindigkeitsmatrix, zu der die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix für die nächste zufällige Wahl eines Übergangs gehört (vgl. [123, 145]). Abb. 11 zeigt das Ablaufdiagramm für die Generierung eines Geschwindigkeitsprofils mittels Markov-Ketten nach TORP [145]. Als Abbruchkriterium des Prozesses werden eine Zielfahrtdauer und eine Endgeschwindigkeit gewählt (vgl. [145]).

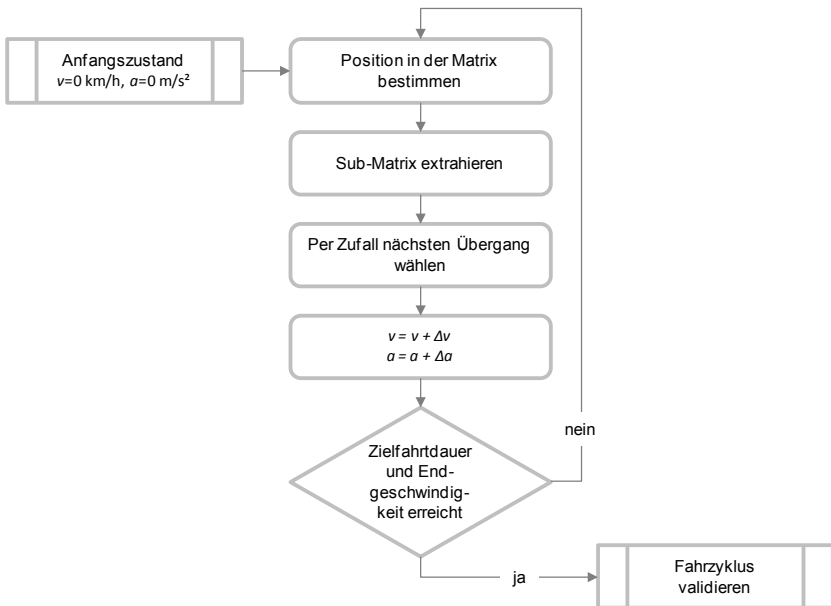


Abb. 11: Ablaufdiagramm der Zyklererstellung nach [145]

Clusteranalyse

ANDRÉ ET AL. [8] und ERDMANN [53] unterteilen die untersuchten Geschwindigkeitsprofile in definierte Sequenzen und ordnen die einzelnen Sequenzen mittels Clusteranalyse Gruppen zu. Im Rahmen der Clusteranalyse werden Objekte über einen festen Satz an Merkmalen beschrieben und nach Maßgabe ihrer Ähnlichkeit in Gruppen (Clustern) eingeteilt (vgl. [21]). Dabei sollen die Cluster einerseits intern homogen sein. Das heißt, innerhalb eines Clusters sollen die Objekte möglichst ähnlich sein. Die verschiedenen Cluster sollen andererseits jedoch gut separierbar sein (vgl. [21]). Das heißt, die Objekte verschiedener Cluster sollten möglichst unterschiedlich sein (vgl. [21]).

Da bei der Clusteranalyse lediglich die Merkmale definiert werden, mit denen ein Objekt beschrieben wird, jedoch die Merkmalsausprägungen der Gruppen zu Beginn des Clusterprozesses nicht bekannt sind, wird die Clusteranalyse auch als nichtüberwachte Klassifikation („unsupervised classification“) bezeichnet (vgl. [15]).

Bezüglich der Anwendung der Methode definieren ANDRÉ ET AL. [8] ein Objekt als eine Geschwindigkeitssequenz zwischen zwei Fahrzeugstillstandsphasen. ERDMANN [53] unterteilt die aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofile in zeitlich äquidistante Geschwindigkeitssequenzen. In der Bestimmung der Klassifikationsvariablen, Wahl der Ähnlichkeitsmetriken und des eigentlichen Clusteranalyseverfahrens unterscheiden sich ANDRÉ ET AL. [8] und ERDMANN [53] erneut. Bei der Verwendung der Clusterergebnisse sind beide Ansätze jedoch ähnlich. Beide verwenden Sequenzen aus den resultierenden Clustern, um ein Geschwindigkeitsprofil zusammenzustellen. Das Verhältnis von der Anzahl der verwendeten Sequenzen aus einem Cluster zu der Anzahl aller verwendeten Sequenzen entspricht nach ERDMANN dem Verhältnis der Anzahl aller Sequenzen desselben Clusters zu der Anzahl aller Sequenzen (vgl. [53]). Für die Zusammenstellung des Geschwindigkeitsprofils nach ERDMANN [53] wird weiterhin berücksichtigt, dass die Sequenzen unterschiedliche Anfangs- und Endgeschwindigkeiten haben. Die verwendeten Sequenzen werden somit in eine Reihenfolge gestellt, die einen stetigen Geschwindigkeitsverlauf ermöglicht.

ANDRÉ [8] klassifiziert im Zuge der Erstellung der ARTEMIS-Zyklen auch nach „Fahrten“¹². Drei Cluster „Stadt“, „Überland“ und „Autobahn“ werden

¹² Originalbezeichnung: „trip“

weiterverfolgt. Innerhalb der Fahrten wird auch die Reihenfolge der ebenfalls nach einem Clusteranalyseverfahren bestimmten Geschwindigkeitssequenzen berücksichtigt (vgl. [6]). ANDRÉ unterscheidet bei der Erstellung von Geschwindigkeitsprofilen in [7] ebenfalls nach der Antriebsleistung der Fahrzeuge, deren Daten aufgezeichnet worden sind.

2.4.3 Datenerhebung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte auf die Daten einer bereits durchgeführten Datenerhebung zurückgegriffen werden. Für die in Kapitel 3 diskutierte Methode sind jedoch auch die Art der Datenerhebung und die Stichprobenwahl relevant.

Art der Datenerhebung für Mobilitätsstudien

Die Studien MID und MOP beruhen auf Daten, die mittels Befragungen erfasst worden sind (vgl. [24, 154]). Unterschieden werden kann dabei zwischen Paper and pencil interview (PAPI), computer assisted telephone interview (CATI), computer assisted web interview (CAWI) (vgl. [24]) sowie zwischen postalischen Befragungen.

Art der Datenerhebung für Studien zu Fahrprofilen

Für die Aufzeichnung von Geschwindigkeitsprofilen werden Fahrzeuge mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Die Datenerhebung kann sich dahingehend unterscheiden, ob die Geschwindigkeitsprofile des mit Messtechnik ausgestatteten Fahrzeugs (on-board-measurement technique) oder von anderen „verfolgten“ Verkehrsteilnehmern (chase car technique) erfasst werden (vgl. [77]). Letztere Variante erfolgt, indem mit Messtechnik ausgestattete Fahrzeuge die Geschwindigkeitsprofile ausgewählter vorausfahrender Fahrzeuge über die eigene Geschwindigkeit und den Abstand zum Vorausfahrenden ermitteln (vgl. [77, 112]).

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit in der Datenerhebung besteht in Bezug auf die Fahrtstrecke. KONZ ET AL. [90] beschreiben eine Methode, bei der Probanden nach objektiven Kriterien in unterschiedliche Gruppen bezüglich ihres Fahrstils eingeteilt werden. Anschließend fahren die Probanden auf

definierten „repräsentativen Fahrtstrecken“ unter Variation der Fahrzeugbelastung. Andere Studien wie z. B. von ANDRÉ ET AL. [8] sehen keine Fahrstreckenvorgabe für die Probanden vor.

Weiterhin sind gleichzeitige Datenerhebungen zu Mobilitäts- und Fahrprofilen mittels Smartphone-Informationen (Lokalisierung, Beschleunigungsdaten) und Fahrzeugsensoren möglich (vgl. [117]).

Stichprobenwahl zur Untersuchung realer Nutzerprofile

Die im Hinblick auf die Stichprobenwahl einfachste Herangehensweise stellt die Erfassung aktueller Daten von allen Fahrzeugen bzw. Fahrern der Kundenzielgruppe dar (Vollerhebung). Dieses Vorgehen wird aktuell von einem Fahrzeughersteller praktiziert, der Fahrzeugdaten (von Kunden) aufzeichnet und u. a. für Entwicklungszwecke verwendet (vgl. [141]).

Wenn dieses Vorgehen zum Beispiel aufgrund der Kosten nicht möglich ist, dann besteht die Möglichkeit eine Stichprobenauswahl vorzunehmen (Stichprobenerhebung) (vgl. [20]). REISER ET AL. [123] und ERDMANN [53] verwenden eine mehrfach geschichtete Stichprobe. REISER ET AL. [123] verwenden die Merkmale „Alter“, „Geschlecht“, „Anteil Firmenwagen“ und „Fahrstil“. Bezüglich des Fahrstils wurde eine separate Studie durchgeführt, um dieses Merkmal mit unterschiedlichen Fragestellungen über Befragungen weiter zu beschreiben und mittels Clusteranalyse verschiedene Ausprägungen für dieses Merkmal zu finden (vgl. [123]). ERDMANN [53] listet die Merkmale „Geschlecht“, „Alter“, „Fahrzeugtyp“, „persönliche Betriebs- und Fahrweise“, „Art der Nutzung (privat oder geschäftlich)“, „Fahrerfahrung“, „jährliche Gesamtfahrstrecke“, „Topografieanteile der Fahrten (Stadt, Land, Autobahn, Off-Road)“ auf. Auch für Risikoeinstufungen von Kfz-Versicherungen werden „Alter“, „Geschlecht“, „Fahrzeugtyp“, „jährliche Gesamtfahrstrecke“ und „Fahrerfahrung (Datum des Führerscheinerwerbs)“ als Einstufungsmerkmale verwendet.

2.5 Ökobilanzen für Fahrzeugkonzepte

Neben dem Energiebedarf in Form von Kraftstoffen oder Elektrizität und den lokalen CO₂-Emissionen von dem „Tank bis zum Rad“ („Tank-to-Wheel“)

werden Fahrzeuge zunehmend nach weiteren Kriterien bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit bewertet. Dabei kommt die Ökobilanz nach ISO14040 [32] und 14044 [31] in der Automobilindustrie vermehrt zum Einsatz.

„Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion [...] bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“)“ [32].

Die VW AG und Daimler AG fertigen für ihre Fahrzeuge Ökobilanzen an und veröffentlichen auch Ergebnisse in Form von Online-Prospekten (VW AG: „Umweltprädikat“; Daimler AG: „Umweltzertifikat“, vgl. [100, 153]). Auch für die Bewertung von Fahrzeugen in der Konzeptphase werden Aussagen der Ökobilanz als Bewertungskriterien herangezogen (vgl. [38, 89]).

Oft werden auch „nur“ Umweltauswirkungen bezogen auf die Nutzungsphase betrachtet wie z. B. Emissionen von der Energiequelle bis zum Rad („Well-to-Wheel“). Für den europäischen Raum bietet hierfür das Joint Research Centre umfassende Daten an (vgl. [42, 43]). Der Schwerpunkt liegt dabei auf den unterschiedlichen Pfaden der Kraftstoffherstellung, von der Energiequelle bis zum Tank („Well-to-Tank“). Für die USA bietet das Argonne National Laboratory umfassende Quellen und Berechnungswerkzeuge („Greet“) an (vgl. [10]).

Im Hinblick auf den Vergleich von Fahrzeugkonzepten, für die ein stark unterschiedlicher Herstellungsaufwand vermutet wird, ist die Betrachtung des ganzen Lebenswegs sinnvoll. Für Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeuge gewinnt die Herstellungsphase aufgrund der energieintensiven Herstellung der Traktionsbatterie, der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik an Bedeutung.

Die Kernfrage dabei ist, ob und wie schnell der erhöhte Herstellungsaufwand aufgrund des effizienteren Antriebs in der Nutzungsphase ausgeglichen werden kann. Solche vergleichenden Aussagen werden in letzter Zeit vermehrt für Plug-In-Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge hergeleitet (vgl. [86, 115, 133]).

Wie in 2.3.3 beschrieben ist der Energiebedarf und somit auch die Nutzungsphase vom Fahrer und von der Fahrzeugumgebung abhängig. Bezüglich der Fahrweise werden zwecks Vergleichbarkeit meistens gesetzliche Regelungen für die Längsdynamiksimulationen herangezogen (vgl. [143]). Diese

entsprechen bezüglich Fahrweise und Randbedingungen nicht zwingend der Käuferzielgruppe. KARABASOGLU&MICHALEK [86] greifen auf gesetzliche Fahrzyklen sowie auf Fahrzyklen aus anderen Studien zurück. Auch das Mobilitätsprofil fließt nach [86], wie in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, über eine Tagesstreckenverteilung der NHTS [107] für die USA in die Berechnungen ein, um die Charge-Depleting und Charge-Sustaining-Phasen gewichten zu können. Somit wird eine mögliche Spannweite an CO₂-Austoß über den Fahrzeugschleppweg ausgewiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Einbindung der Mobilitäts- und Fahrprofile in die Erstellung von Ökobilanzen in den frühen Entwicklungsphasen (vgl. Kapitel 4) untersucht. Als Vorbereitung dafür werden einige Grundlagen und Begriffe zur Erstellung einer Ökobilanz aufgeführt. Eine Ökobilanz-Studie besteht nach ISO 14040 [32] aus vier Phasen (vgl. Abb. 12). Der *Untersuchungsrahmen* beinhaltet die Systemgrenzen und den Detaillierungsgrad abhängig von der Anwendung der Studie (vgl. [32]).

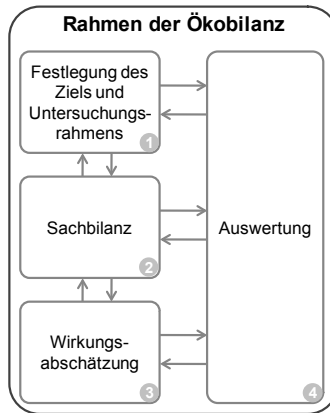


Abb. 12: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040 (vgl. [32])

Die *Sachbilanz* ist die Bestandsaufnahme von Inputdaten und Outputdaten des untersuchten Systems (vgl. [32]). Auf der Input-Seite werden aus der Umwelt Ressourcen wie Energie, Rohstoffe usw. bezogen (vgl. [32, 98]). Auf der Outputseite verlassen Abwasser, Abluft, feste Abfälle, andere Emissionen und

nutzbare Produkte das System (vgl. [32, 98]). Das Ziel der *Wirkungsabschätzung* ist es, die Sachbilanzergebnisse eines Produktsystems und deren Umweltrelevanz besser zu verstehen (vgl. [32]). Für die Wirkungsabschätzung existieren verschiedene Umweltkategorien. In Bezug auf das Automobil führen KRINKE ET AL. [92] folgende Kategorien auf:

- *Treibhausgaspotenzial*
Das Treibhausgaspotenzial beschreibt den kumulierten Strahlungsantrieb¹³ zwischen der Gegenwart und einem gewählten Zeithorizont verursacht von einem zur Gegenwart emittierten Gas je Masseneinheit (vgl. [73]). Der Index wird auf den kumulierten Strahlungsantrieb eines Referenzgases bezogen (vgl. [73]). Als Referenzsubstanz verwendet IPCC95 [73] Kohlenstoffdioxid (daher auch die gängige Bezeichnung „CO₂-Äquivalente). Mit ± 35 % Abweichung, laut IPCC95 [73], dient der Wert für Vergleichszwecke.
- *Versauerungspotenzial*
Das Versauerungspotenzial bezeichnet die Absenkung des pH-Wertes von beispielsweise Böden oder Gewässern (vgl. [92]). Als Referenzsubstanz wird Schwefeldioxid verwendet (vgl. [88]).
- *Sommersmog(bildungs)potenzial bzw. Photochemisches Oxidantenpotenzial*
Das Sommersmog(bildungs)potenzial beschreibt die Bildung vom bodennahem Ozon (vgl. [92]). Als Referenzsubstanz wird Ethen verwendet (vgl. [88]).
- *Überdüngungspotenzial bzw. Eutrophierungspotenzial*
Das Überdüngungspotenzial beschreibt eine Nährstoffzufuhr im überhöhten Maß, das einerseits zu einer unerwünschten Verschiebung der Artenzusammensetzung und andererseits zu einer Sauerstoffmangelsituation in Gewässern führen kann (vgl. [88]). Als Referenzsubstanz wird Phosphat verwendet (vgl. [88]).
- Es bestehen auch weitere Umweltkategorien. EBERLE [38] führt ebenfalls in Bezug auf Automobile zusätzlich den *kumulierten Energieaufwand* nach VDI 4600 [151], den *Ressourcenabbau*, das *stratosphärisches*

¹³ „Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für den Einfluss, den ein Faktor auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erde-Atmosphäre hat, und ist ein Index für die Bedeutung eines Faktors als potentieller Mechanismus einer Klimaänderung.“ [135]

Ozonabbaupotenzial und das *Toxizitätspotenzial* auf. TESSUM ET AL. [142] führen in Bezug auf Elektrofahrzeuge die Luftqualität, den Einfluss auf die Gesundheit und sogenannte „social costs“ zur Bezifferung von Schäden auf.

Die Phase der *Auswertung* beinhaltet die Verwendung der Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung, um in Bezug auf das festgelegte Ziel des Untersuchungsrahmens Schlussfolgerungen zu ziehen oder Empfehlungen auszusprechen (vgl. [32]).

2.6 Kostenbewertung für Fahrzeugkonzepte

Für den Kostenvergleich von Fahrzeugkonzepten im Kundenbetrieb werden in der Fachliteratur auch Fahrzeugkonzepte nach dem Prinzip der Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten) verglichen (vgl. [3, 52, 111, 119, 121, 132]). ALISCH ET AL. [4] beschreiben den Total Cost of Ownership als die Summe aller für die Anschaffung eines Vermögensgegenstandes, seine Nutzung und ggf. Entsorgung anfallenden Kosten.

Bezüglich des Vergleichs von Fahrzeugkonzepten können diese aus Sicht des Kunden in Fixkosten und variable Kosten unterteilt werden.

Fixkosten

Die Fixkosten setzen sich hauptsächlich aus dem Verkaufspreis des Fahrzeugs, Registrations- bzw. Zulassungsgebühren und eventuelle Importkosten zusammen. SHARMA ET AL. [132] ermitteln die Anschaffungskosten als Produkt aus den Produktkosten und einem angenommenen Faktor für den Preisaufschlag. Eine Position in den Herstellungskosten ist der *Glider*, der die Summe aller Bauteile darstellt, die in allen Konzepten identisch sind (vgl. [52]). Der Glider ist zwar für die Gesamtbetriebskosten eines Fahrzeugs relevant, wird aber in einigen Quellen vernachlässigt, da die Kosten des Gliders für alle der verglichenen Konzepte anfallen.

Die Hauptkostentreiber der Herstellungskosten sind in Bezug auf den Vergleich von konventionellen Fahrzeugen mit Plug-In-Hybrid oder Elektrofahrzeugen die Traktionsbatterie, die elektrische(n) Maschine(n) und die Leistungselektronik. EMPRI und SHARMA ET AL. [52, 132] berücksichtigen auch die Kosten des Verbrennungsmotors und des Getriebes.

Die Berechnungsmodelle beruhen oft auf einem inkrementellen Ansatz [3, 52, 110, 121, 132, 143, 157]. Das heißt, die Batteriekosten werden nicht absolut, sondern bezogen auf eine kWh-Nennkapazität angegeben und die Kosten für die elektrische Maschine und Leistungselektronik werden bezogen auf eine Nennleistung von einem kW angegeben.

Dabei schwankt insbesondere der Preis der Traktionsbatterie von Quelle zu Quelle erheblich. Nach DINGER ET AL. [34] beispielsweise belaufen sich die Kosten für 1 kWh Batteriekapazität (Pack) auf 990 USD bis 1220 USD (ca. 740 bis 920 EUR) im Jahr 2009. Die Prognosen für 2015 aus dem Jahre 2013 schwanken von 270 USD/kWh bis 440 USD/kWh (ca. 200 bis 330 EUR/kWh) (vgl. [111]). 2016 schätzten Wolfram&Lutsey [160], dass die Kosten bei den Marktführern sich im Jahre 2015 auf ca. 250 EUR/kWh belaufen haben und zwischen 2020 und 2025 im Bereich 130-180 EUR/kWh liegen werden (vgl. [160]).

SHARMA ET AL. [132] geben für 2010 die Kosten für 1 kW-Nennleistung eines Elektromotors mit 21,7 AUD (ca. 14,8 EUR) an. REDELBACH ET AL. [121] gehen 2010 von ca. 32 EUR/kW aus, wobei die Kosten stückzahlabhängig angegeben werden. Dabei ist anzumerken, dass weder bezüglich der Zellchemie der Traktionsbatterie noch bezüglich der Ausführungsart der elektrischen Maschine unterschieden wird.

In Anbetracht der Kosten für die Traktionsbatterie und für den Elektromotor kann von höheren Anschaffungskosten im Falle eines Plug-In-Hybridfahrzeugs im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug ausgegangen werden. Diese Kostenunterschiede können durch unterschiedliche Import- oder Zulassungsgebühren bzw. Ermäßigungen (staatliche Förderungen) vermindert oder ausgeglichen werden.

Variable Kosten

Für den Fahrzeugbetrieb relevante variable Kosten setzen sich aus dem Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch, den Kraftfahrzeugsteuern, der Versicherung und Wartung zusammen. Während die Wartungskosten oft modelliert werden (vgl. [3, 52]), werden die Unterschiede in den Versicherungskosten aufgrund der geringen Erfahrungswerte mit Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen und der vielen Parameter, die neben dem Fahrzeugtyp die Kosten beeinflussen, auch manchmal vernachlässigt (vgl. [54]).

Die Unterschiede in den variablen Kosten zwischen einem Plug-In-Hybrid und einem konventionellen Fahrzeug werden hauptsächlich von den Kostenunterschieden im Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch beeinflusst. Wird ein Plug-In-Hybridfahrzeug überwiegend elektrisch betrieben, dann ergeben sich einerseits Vorteile aufgrund des effizienteren Antriebs und ggf. aufgrund niedrigerer Elektrizitätspreise.

Wie in 2.3 erwähnt wird der Energieverbrauch vom Fahrer und von der Fahrzeugumgebung beeinflusst. AL-ALAWI ET AL. [3] und NEUBAUER ET AL. [110] verwenden für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs die Geschwindigkeitsprofile gesetzlicher Zyklen und Tagesstreckeninformationen für den Utility-Factor zur Gewichtung zwischen den Streckenanteilen des rein elektrischen Betriebs (im Charge-Depleting-Mode) und des hybridischen Betriebs (im Charge-Sustaining-Mode). NEUBAUER ET AL. [110] und REDELBACH ET AL. [121] berücksichtigen auch einen konstanten Leistungswert für die Nebenverbraucher. In [86, 110, 111] wird auch ein Modell zur Betrachtung der Batteriedegradation nach PETERSON [116] eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Auswirkung der untersuchten realen Nutzerprofile auf die Gesamtbetriebskosten in 4.3 untersucht.

2.7 Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Kosten und Umwelt

Es existieren bereits mehrere wissenschaftliche Arbeiten, die Fahrzeugkonzepte mit unterschiedlichen Fahrzeugantrieben oder Antriebstopologien aus ökologischen oder ökonomischen Gesichtspunkten vergleichen.

Abb. 13 veranschaulicht den Vertiefungsgrad verschiedener Arbeiten in dem Kontext „Umweltverträglichkeit und Kosten“. Die Darstellung führt nicht alle Arbeiten auf, die ihren Schwerpunkt auf die Ermittlung vom Kraftstoffverbrauch und lokalen Emissionen setzen. STANDLEY ET AL. [138] und NIES ET AL. [113] werden hier u. a. aufgeführt, da sie bei der Berechnung der lokalen Emissionen erstens auf Plug-In-Hybridfahrzeuge eingehen und zweitens auf reale Nutzerdaten einer ausgewählten Zielgruppe zurückgreifen. GONDER& SIMPSON [64] und NEUBAUER ET AL. [111] gehen neben lokalen Emissionen bzw. dem Kraftstoffverbrauch der untersuchten Fahrzeugkonzepte auch auf die

Auswirkungen auf die Kosten in der Nutzungsphase ein. KARABASOGLU & MICHALEK [86] und WALDOWSKI ET AL. [157] vergleichen bei den untersuchten Fahrzeugkonzepten die Kosten während der Nutzungsphase und berücksichtigen auch die Batterieherstellungskosten. KARABASOGLU & MICHALEK [86] vergleichen auch die Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase und bei der Herstellung der Traktionsbatterie. Hervorzuheben sind EBERLE [38] und KOLKE [89] aufgrund der Erstellung vollständiger Ökobilanzen. Die vorliegende Arbeit zeigt keine vollständigen Ökobilanzergebnisse, vielmehr geht es um die Einbeziehung von Nutzerprofilen einer Kundenzielgruppe in die Ökobilanzierung in der frühen Entwicklungsphase. Hingegen werden, wie in Abb. 14 dargestellt, die Einflussmöglichkeiten bezüglich Fahrweise und Mobilitätsprofil näher betrachtet.

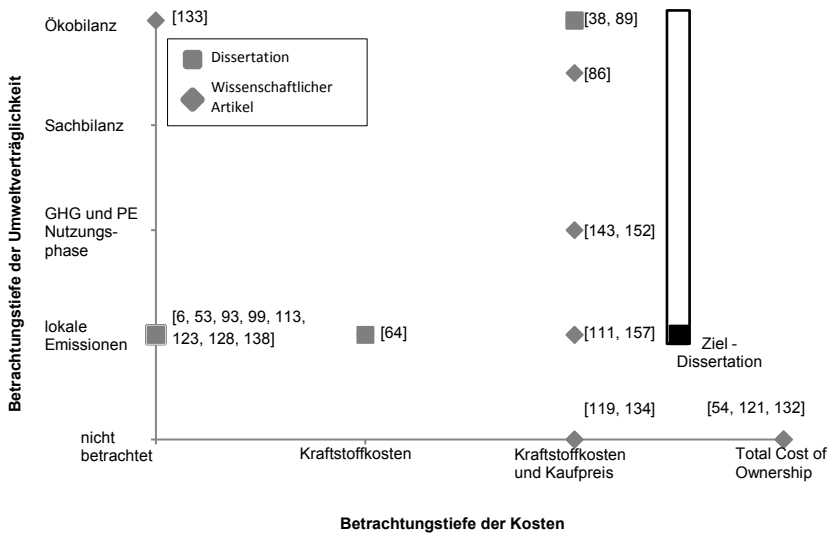


Abb. 13: Wissenschaftliche Arbeiten zur Bewertung von Fahrzeugkonzepten aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Fahr- und Mobilitätsprofilen;

□ = methodisch betrachtet; ■ = auch Beispielergebnisse gezeigt

Mobilitätsverhalten und Fahrweise

Zusätzlich zu den in Abb. 13 dargestellten wissenschaftlichen Arbeiten werden in Abb. 14 auch Literaturquellen aufgeführt [6, 16, 53, 77, 83, 85, 99, 119, 123], deren Schwerpunkt nicht eine ökonomische oder ökologische Bewertung von Fahrzeugkonzepten ist. Diese Arbeiten gehen jedoch auf das Nutzungsverhalten von Fahrern zwecks Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs, lokaler Emissionen oder des Ausmaßes ausgewählter Kraftstoffparmaßnahmen ein (vgl. Absatz 2.4.1 und 2.4.2).

Es sind auch weitere wissenschaftliche Arbeiten bekannt, die bei der Auslegung einzelner Systeme wie beispielsweise Getriebe [106] oder Fahrwerkskomponenten [81, 82] Einsatzfälle durch Variierung der Einflussparameter im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung berücksichtigen. Diese Arbeiten werden in Abb. 14 nicht aufgeführt, da der Fokus dieser Arbeiten nicht auf der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der lokalen Emissionen liegt und das Mobilitätsprofil für die Betrachtungen zweitrangig gewesen ist.

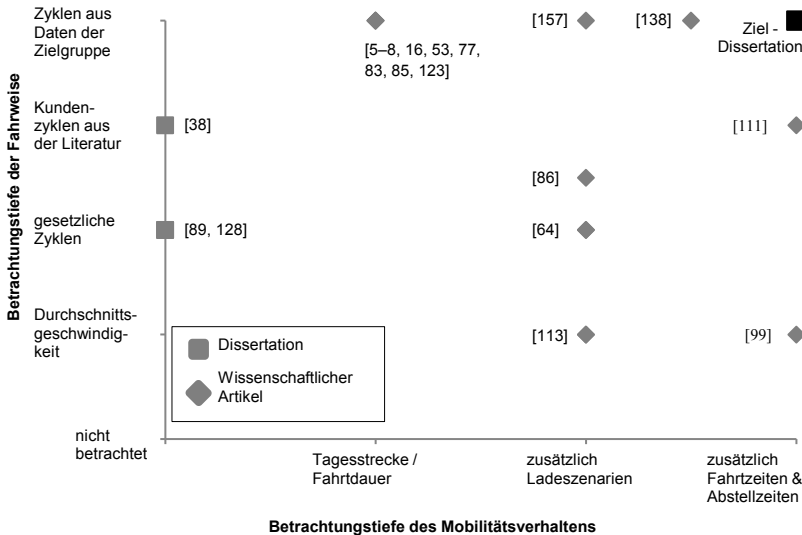


Abb. 14: Wissenschaftliche Arbeiten zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen bezüglich Fahrweise und Mobilitätsverhalten;

□ = methodisch betrachtet; ■ = auch Beispielergebnisse gezeigt

Umgebungseinfluss und Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen wirken sich auf den Wirkungsgrad einzelner Komponenten aus (vgl. 2.3.3), aber insbesondere auf den Energiebedarf zur Klimatisierung bei Fahrzeugantrieben mit rein elektrischen Fahrphasen (vgl. Absatz 2.2 und 2.3). In diesem Zusammenhang sind KONZ ET AL. [90] und BASLER ET AL. [17] zu erwähnen, die im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung den Energiebedarf zur Innenraumklimatisierung ermitteln. Dabei wurden in BASLER ET AL. [17] Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit zur Herleitung von Mobilitätsprofilen veröffentlicht.

Untersuchungsfeld der vorliegenden Arbeit

Aus dem Vergleich der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und den aufgeführten wissenschaftlichen Arbeiten ist erkennbar, dass ein simulationsgestützter Vergleich des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs verschiedener Fahrzeugkonzepte und der daraus abgeleiteten ökologischen und ökonomischen Vergleiche keinen Mehrwert gegenüber dem heutigen Stand der Forschung bietet, sofern dieser rein auf gesetzlichen Zyklen beruht oder „kundennahe“ Fahrzyklen aus der Literatur verwendet.

Wie in Absatz 2.3 dargestellt kann der Fahrer aufgrund seiner Fahrweise und seines Mobilitätsprofils einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch bzw. auf den Energiebedarf ausüben. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen steigt dieser Einfluss im Zusammenhang mit der Innenraumklimatisierung in den rein elektrischen Fahrphasen. Es erweist sich somit als sinnvoll diesen Einfluss weiter zu untersuchen. Dabei können die Erkenntnisse für die Fahrzeugauslegung aus den erhobenen Daten zum Nutzerverhalten umso interessanter sein, je mehr die Stichprobe der Fahrer der Gesamtpopulation der Fahrzeug-Zielgruppe entspricht.

Die Differenzierung dieser Arbeit von den anderen der in Abb. 14 aufgeführten Arbeiten, die die Fahrweise und das Mobilitätsverhalten einer ausgewählten Population untersuchen, ist nicht nur durch die unterschiedliche Population gegeben. Vielmehr werden eine ausgeprägte Betrachtungstiefe des Mobilitätsprofils und somit neue methodische Ansätze und Erkenntnisse angestrebt. Eine ausgeprägte Betrachtungstiefe des Mobilitätsprofils erscheint aufgrund dessen Einflusses auf den Energiebedarf als sinnvoll.

Nach der Auflistung der Grundlagen, dem Stand der Forschung und der Abgrenzung zu anderen Arbeiten können die Zielsetzung, die Anforderungen an die Methode und der Schwerpunkt wie folgt präzisiert werden:

- Es soll eine Methode zur Unterstützung der Bewertung von Fahrzeugkonzepten (vgl. 2.1), also Systementwürfen bezüglich des Fahrzeugantriebs und relevanter Nebenverbraucher, basierend auf realen Nutzerprofilen einer Kundenzielgruppe erarbeitet werden.
- Die Methode soll dabei bestehende Bewertungsmethoden nicht ersetzen sondern diese bezüglich Erkenntnisse zur Auslegung, zur Ökobilanz und den Gesamtbetriebskosten der untersuchten Fahrzeugkonzepte ergänzen.
- Für die Herleitung der Anforderungen an ein Fahrzeugkonzept aus den Datenaufzeichnungen von instrumentierten Fahrzeugen müssen die Unterschiede in der Antriebstopologie und Betriebsstrategie zwischen den instrumentierten Fahrzeugen und dem zu bewertenden Fahrzeugkonzept berücksichtigt werden (vgl. 2.2).
- Für die Ermittlung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase wird der Schwerpunkt auf den Einfluss der Nutzungsphase, auf den Antriebsenergiebedarf und auf die Innenraumklimatisierung gelegt (vgl.2.3)
- Aus den Fahrzeugdatenaufzeichnungen der Nutzerprofile sollen die Informationen bezüglich der Fahrweise des Kunden (Geschwindigkeitsprofil) und dessen Mobilitätsprofil (Uhrzeit und Dauer der Fahrten und Abstellzeiten, zurückgelegte Strecken) im Hinblick auf deren Einfluss auf die Fahrwiderstände und den Anfangs- und Randbedingungen der Fahrten berücksichtigt werden.

3. Methode zur Verwendung realer Nutzerprofile bei der Fahrzeugkonzeption

3.1 Einführung in die Methode

Im Folgenden soll das Vorgehen in dieser Arbeit zur Verwendung von realen Nutzerprofilen für die Bewertung von Fahrzeugkonzepten¹⁴ vorgestellt werden. Voraussetzung für die Bewertungsmethode ist, dass die zu bewertenden Fahrzeugkonzepte bezüglich Antriebskonfiguration, Betriebsstrategie und verbrauchsrelevanter Nebenverbraucher bereits definiert sind, wobei Erkenntnisse aus der Methode zur Anpassung der zu verfolgenden Fahrzeugkonzepte bzw. zur Reduzierung der Anzahl der zu verfolgenden Fahrzeugkonzepte führen können.

Um Kraftstoffverbrauchswerte bzw. den Energiebedarf zu berechnen, wird das zu untersuchende Fahrzeugkonzept als Simulationsmodell dargestellt. Das Ergebnis der Berechnungen ist abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellierung bezüglich der relevanten Komponenten und deren Betriebsstrategie.

Wird das Nutzerverhalten beispielsweise in Form von Geschwindigkeitsprofilen in Abhängigkeit der Zeit über einen längeren Zeitraum erfasst und als Eingangsinformation für eine Simulation verwendet, dann ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Simulationsaufwand, Detaillierungsgrad des Fahrzeugmodells (Simulationsmodell) und Detaillierungsgrad des Nutzerverhaltens. Ohne den Simulationsaufwand zu erhöhen, können das Fahrzeugmodell und das Nutzerverhalten nicht beliebig detailliert abgebildet werden (Abb. 15). Dabei beinhaltet der Simulationsaufwand nicht nur die benötigte Rechenzeit, die im Zuge technischer Entwicklungen abnehmen kann, sondern auch den Aufwand zur Validierung bzw. zur Plausibilisierung der Ergebnisse.

Um diesem Zielkonflikt entgegenzuwirken, werden zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz besteht in der Reduktion des Detaillierungsgrades der Simulationsmodelle. Das heißt, die Fahrzeugkonzepte werden vereinfacht abgebildet,

¹⁴ vgl. Begriffseingrenzung nach 2.1

um die Rechenschritte je Simulationsschrittweite zu reduzieren. Dieser Ansatz schränkt auch die Anzahl potenzieller Fehler im Zuge Modellierung aufgrund der geringeren Modellkomplexität ein. Der zweite Ansatz besteht in der Eingrenzung des Umfangs der zu simulierenden Nutzungsprofile. Dieser Schritt geht mit der Reduzierung des Detaillierungsgrades bezüglich des Mobilitätsprofils und der Fahrweise einher. Beide Ansätze werden im Rahmen der Methode aufgegriffen und beeinflussen somit das Vorgehen.

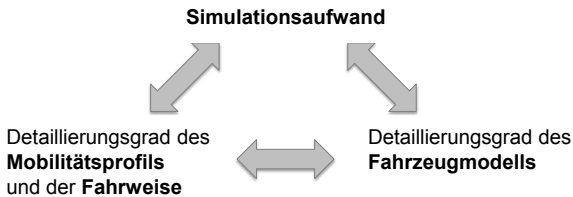


Abb. 15: Zielkonflikt zwischen Simulationsaufwand, Detaillierungsgrad des Mobilitätsprofils und der Fahrweise und Detaillierungsgrad des Fahrzeugmodells

Das Vorgehen zur Verwendung realer Nutzerprofile, um Fahrzeugkonzepte bezüglich ihrer Verbrauchswerte, ihrer Ökobilanz und ihrer Gesamtbetriebskosten zu vergleichen, wird in Abb. 16 dargestellt und im Folgenden kurz beschrieben.

Stufe 1: Datenerhebung

Die erste Stufe des Vorgehens besteht in der Datenerhebung. Es werden die zu erfassenden Messgrößen festgelegt. Weiterhin wird auf die Auswahl der zu untersuchenden Stichprobe eingegangen.

Stufe 2-1: Vorauswahl von Konzeptvarianten

In der zweiten Stufe können mittels einfacher statistischer Auswertungen der erfassten Nutzerprofile erste Anforderungen an das Fahrzeugkonzept hergeleitet werden. Weiterhin kann die Auslegung von Fahrzeugkonzepten über vereinfachte Fahrzeugmodelle – zwecks Reduzierung des Simulationsaufwands – unterstützt werden (vgl. 3.3). Die Anzahl der zu verfolgenden Fahrzeugkonzepte kann bereits in diesem Schritt reduziert werden. Dies dient ebenfalls zur Reduzierung des nachfolgenden Simulationsaufwandes und generell zur Reduzierung des Lösungsraums.

Stufe 2-2: Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen für simulationsgestützte Analysen

Um detailliertere simulationsgestützte Analysen zum Energiebedarf zu ermöglichen, werden tägliche Mobilitäts- und Fahrprofile mittels Klassifizierung hergeleitet. Dieser Schritt dient der Reduzierung der Rechenzeit und des Aufwands zur Validierung bzw. zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse. Auf die Untersuchung der methodischen Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen wird in 3.4 eingegangen.

Stufe 2-3: Klimadaten

Wie in 2.3.2 dargestellt kann der Energiebedarf zur Innenraumklimatisierung die elektrische Reichweite von Plug-In-Hybridfahrzeuge stark beeinflussen. Aus diesem Grund werden Klimadaten zur Berücksichtigung der umgebungsbedingten Einflussfaktoren benötigt. Auf die Klimadaten wird im Zuge der Analyse der Fahrzeugkonzepte eingegangen.

Stufe 3: Anpassung der Simulationsumgebung

Um den Energiebedarf für ein Fahrzeug in der Nutzungsphase zu simulieren, werden ein Längsdynamiksimulationsmodell und ein Innenraumklimatisierungsmodell aufgebaut und miteinander gekoppelt (vgl. 3.6). Bei der Modellierung der zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte können bereits Ergebnisse aus der Vorauswahl der Konzeptvarianten berücksichtigt werden. Neben der mathematischen Beschreibung der Fahrzeugmodelle wird die Simulationsumgebung auch angepasst, um die hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile sowie Klimadaten als Anfangs- bzw. Randbedingungen verarbeiten zu können (vgl. 4.1).

Stufe 4: Analyse der Fahrzeugkonzepte

Mit Hilfe der hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile und der angepassten Simulationsumgebung werden Verbrauchswerte sowie die Werte für den elektrischen Energiebedarf in unterschiedlichen Szenarien betrachtet.

Es wird der Einsatz der Ökobilanzierung in der frühen Entwicklungsphase untersucht. Weiterhin wird auf die Gesamtbetriebskosten aus der Sicht der Kunden eingegangen.

Die ermittelten Verbrauchswerte und Werte für den elektrischen Energiebedarf eines Fahrzeugkonzepts dienen dabei als Eingangswerte für die Betrachtung der Auswirkung der Fahrzeugkonzepte und der hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile auf die Ökobilanz und Gesamtbetriebskosten (vgl. Kapitel 4).

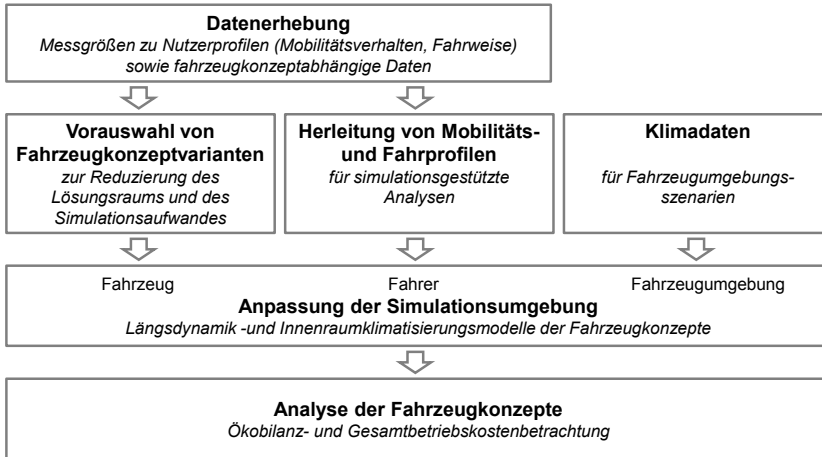


Abb. 16: Methode zur Einbeziehung realer Nutzerprofile in die Bewertung von Fahrzeugkonzepten bezüglich ihrer Ökobilanz und Gesamtbetriebskosten

Annahmen

Für die Verwendung von Nutzerprofilen eines bestehenden Fahrzeugmodells, um Aussagen zum Energiebedarf neuer Fahrzeugkonzepte zu treffen, wurden folgende Annahmen getroffen.

- Der Kunde entscheidet sich zuerst für eine Fahrzeugklasse und trifft anschließend die Wahl für den Fahrzeugantrieb (vgl. 2.1). Somit können Fahrzeuge derselben Fahrzeugklasse miteinander verglichen werden.
- Die Mobilitätsprofile der Kunden derselben Fahrzeugklasse ändern sich nicht gravierend mit der Zeit.
Beispiel: Der Kunde ändert nicht seinen Tagesablauf oder die gewählten Strecken (z. B. bedingt durch das Verkehrsaufkommen), wenn er das Nachfolgemodell seines aktuellen Fahrzeugs kauft.
- Die Fahrweise ändert sich nicht erheblich, solange das zukünftige Fahrzeug eines Kunden sich nicht erheblich im Leistungsgewicht ändert.

Im Folgenden werden die vorgestellten Stufen der Methode näher beschrieben.

3.2 Datenerhebung

Um Erkenntnisse aus realen Nutzerprofilen für die Auslegung und energetische Bewertung von Fahrzeugkonzepten zu gewinnen, müssen im ersten Schritt die erforderlichen Messgrößen bzw. die zu erfassenden Daten der Erhebung hergeleitet werden. Diese werden im Folgenden erläutert. Anschließend wird auf die Auswahl der Zielgruppe bzw. Zielfahrzeuge und die Art der Datenerhebung eingegangen. Schließlich wird die Datenverarbeitung im Zuge der durchgeführten Untersuchung vorgestellt.

3.2.1 Erforderliche Messgrößen

Die erforderlichen Messgrößen werden im Folgenden in zwei Kategorien unterteilt: antriebspezifische Größen und antriebsunabhängige Größen.

Antriebspezifische Messgrößen

Entspricht das zu bewertende Fahrzeugkonzept bezüglich Antriebsstopologie und Nebenverbraucher den mit Messtechnik ausgestatteten Fahrzeugen der Datenerhebung, dann ist die Aufzeichnung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher sinnvoll. Eine Voraussetzung hierfür ist, dass die Fahrzeugsignale und eventuelle zusätzliche Messtechnik dies ermöglichen. Der aufgezeichnete Energiebedarf kann dann mittels zusätzlicher Signale zu Fahrzeugeinstellungen und Umgebungsbedingungen zugeordnet und somit im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung ausgewertet werden.

Tab. 6 zeigt eine kurze Übersicht der fahrzeugspezifischen Messgrößen zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher.

Im Rahmen der Untersuchung dieser Arbeit wurde der Energiebedarf für den Antrieb der untersuchten Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb über die errechnete Leistung aus den CAN-Signalen zum Drehmoment und zur Drehzahl an der Kurbelwelle bestimmt. Während die Drehzahl auf Sensorwerten basiert, wird das Drehmoment an der Kurbelwelle mittels Rechenmodellen¹⁵

¹⁵ Die Steuergeräte-internen Rechenmodelle sind nicht offengelegt.

bestimmt. Diese Werte können die Güte der Auswertung beeinflussen (vgl. 3.3).

Die elektrischen Nebenverbraucher wurden in den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Aufzeichnungen nicht einzeln erfasst. Der 12-Volt-Bordnetzverbrauch konnte jedoch mit Hilfe eines Bordnetzsimulationsmodells aus den vorliegenden CAN-Größen zum Generatorstrom und zur Generatorspannung sowie zum Batteriestrom und zur Batteriespannung berechnet werden.

Einflussgrößen		Messgrößen
Fahrzeug	Betriebspunkte der Komponenten	Drehzahl und Drehmoment des Verbrennungsmotors und der Traktionsmaschine, Drehzahl und Drehmoment des Klimakompressors, Strom und Spannung der Hochvolt-Batterie, Leistungselektronik, DC-DC-Wandler, Strom und Spannung der Bordnetzverbraucher
	Ladezustand des Energiespeichers	Ladezustand der Hochvolt-Batterie
	Temperaturen	Innenraumtemperatur Bauteiltemperaturen

kursiv = Größe konnte über andere Messgrößen bestimmt werden
grau = Größe konnte nicht bestimmt werden, ggf. bedingt durch das Antriebskonzept

Tab. 6: Antriebspezifische Messgrößen zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher sowie Größen zur Beschreibung der Komponentenzustände

Der Energiebedarf zur Klimatisierung – im Falle des konventionellen Fahrzeugs zur Kühlung bzw. zur Entfeuchtung der Luft im Fahrzeuginnenraum (vgl. 2.3.2) – wurde aus den CAN-Signalen zur *Klimakompressorlast (Drehmoment)* und *Drehzahl* berechnet. Auch hier ist das Drehmoment ein errechneter Wert.

Um aufgezeichnete antriebspezifische Größen für die Bewertung von Fahrzeugkonzepten mit anderen Fahrzeugantrieben zu verwenden, bedarf es eines Rechenmodells, das die Überleitung zwischen den unterschiedlichen

Antriebstopologien und der daraus resultierenden Unterschiede in der Wirkungsgradkette beschreibt. Eine solche Überleitung wird in Absatz 3.3 am Beispiel der Verwendung von antriebspezifischen Größen von Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb zur Vorauswahl von Konzeptvarianten beschrieben.

Mithilfe von aufgezeichneten Daten, die unabhängig von der Antriebstopologie des Fahrzeugs sind, kann die Erstellung eines Rechenmodells zur Überleitung erspart werden.

Antriebsunabhängige Größen

In Absatz 2.3.3 wurde der Zusammenhang zwischen Energiebedarf und dem Einfluss des Fahrers, des Fahrzeugs und der Fahrzeugumgebung auf einer definierten Detaillierungsebene dargestellt. Der Einfluss des Mobilitätsprofils und der Fahrweise sowie der Umgebungsbedingungen auf den Energiebedarf wurde beschrieben. Tab. 7 fasst die abgeleiteten fahrzeugantriebsunabhängigen Größen für die Aufzeichnung von Fahrzeugdaten einer ausgewählten Fahrerzielgruppe zusammen.

Das Mobilitätsprofil wird anhand der Dokumentation von Fahrtbeginn (Datum und Uhrzeit) und Fahrtende (Datum und Uhrzeit) der einzelnen Fahrten erfasst. Diese Größen sind gleichzeitig das Ende und der Beginn der jeweiligen Abstellzeiten. Weiterhin lässt sich die Fahrdauer aus diesen Größen ermitteln.

Die Fahrweise wird anhand des Geschwindigkeitsprofils sowie der Längs- und Querschleunigung erfasst. Aus dem Geschwindigkeitsprofil einer Fahrt können u. a. weitere Kenngrößen für eine Fahrt ermittelt werden wie beispielsweise die Streckenlänge.

Im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung können GPS-Daten, Höhenprofile (oder Steigungen), Kurvenkrümmungen oder Geschwindigkeitsbegrenzungen auch zu zusätzlichen Erkenntnissen führen. Im Rahmen dieser Arbeit standen diese Signale nicht zur Verfügung. Über den Unterschied in der Längsbeschleunigung zwischen den Werten des Längsbeschleunigungssensors und der Ableitung aus der Geschwindigkeit kann der Beschleunigungsanteil berechnet werden, der sich aufgrund der Steigung ergibt (vgl. [120]). Die Berechnung eines Höhenprofils über diese Annäherung wird als nicht hinreichend genau erachtet.

Einflussgrößen		Messgrößen
Fahrer	Mobilitätsprofil	Uhrzeit der Fahrt Uhrzeit der Abstellzeiten <i>Fahrtdauer</i> <i>Dauer der Abstellzeit</i> Uhrzeit von Ladevorgängen (Traktionsbatterie) Dauer von Ladevorgängen (Traktionsbatterie)
	Fahrweise	Geschwindigkeit Längsbeschleunigung Querbeschleunigung
	Fahrzeug-Einstellungen	Einstellungen von 12-V-elektrischen Verbrauchern Einstellungen der Klimaanlage Einstellungen, die die Betriebsstrategie des Antriebs verändern (Fahrmodi) Einstellungen, die die Fahrwiderstände verändern können (Schiebedach, Fenster)
	Sonstiger Fahrereinfluss	Zusätzliche Beladung
Fahrzeug-umgebung	Strecke	<i>Höhen – bzw. Steigungsprofil</i> <i>Kurvenkrümmung</i>
	Luft	Lufttemperatur Luftdichte Luftfeuchte
	Sonne	Sonneneinstrahlung

kursiv=Größe konnte über andere Messgrößen bestimmt werden

grau = Größe konnte nicht bestimmt werden, ggf. bedingt durch das Antriebskonzept

Tab. 7: Fahrzeugantriebsunabhängige Messgrößen zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher sowie Größen zur Beschreibung der Umgebungszustände

Es bietet sich an, sofern es die Datenerhebung ohne erheblichen Zusatzaufwand zulässt, weitere Signale mit aufzuzeichnen, für die eine Verwendung vorstellbar ist, auch wenn noch keine konkrete Auswertung geplant ist.

Die Unterteilung in fahrzeugantriebspezifische- und fahrzeugantriebsunabhängige Größen dient der Strukturierung. Auswertungen aus der Kombination dieser Größen – wie auch später gezeigt – können durchaus sinnvoll sein.

3.2.2 Stichprobenauswahl für die Datenerhebung

Nach der Zusammenstellung der zu erfassenden relevanten Messgrößen für die Bestimmung des Energiebedarfs eines Fahrzeugkonzeptes unter Berücksichtigung des Mobilitätsprofils, der Fahrweise und den Umgebungsbedingungen muss festgelegt werden, welche Fahrzeuge für die Datenerhebung ausgewählt werden sollen. Die erhobenen Daten dienen zur Analyse der Nutzerprofile für die Fahrzeugkonzeptbewertung einer ausgewählten Kundenzielgruppe. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kundenzielgruppe anhand der Fahrzeugklasse festgelegt (vgl. 2.1 und 3.1).

Auswahlkriterien

Ist eine Vollerhebung z. B. technisch oder aufgrund Kosten nicht möglich, dann können die in 2.4.3 aufgeführten Merkmale für Stichprobenbildung aus Studien zu Mobilitäts- und Fahrprofilen herangezogen werden. Anhand der in 2.3.3 beschriebenen Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch können die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch für folgende Merkmale aus 2.4.3 belegt werden: „Fahrstil“ bzw. „persönliche Betriebs- und Fahrweise“, „jährliche Gesamtfahrtstrecke“ und „Topografieanteile der Fahrten“. Damit lässt sich eine Eingrenzung auf diese Merkmale zur Schichtung der Stichprobe begründen.

Die Stichprobenauswahl in der vorliegenden Arbeit wurde gemäß der jährlichen Gesamtfahrtstrecke vorgenommen. Die Stichprobenauswahl für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fahrzeugdatenaufzeichnungen war nicht Bestandteil dieser Arbeit (vgl. 1.2). Sie kann jedoch die Auswertungen der Fahrzeugdatenaufzeichnung und die Schlussfolgerungen beeinflussen.

Auswirkungen der Stichprobenwahl auf die Durchführung der Auswertungen

Da die Wunschanzahl der Fahrer je Merkmalsschicht im Falle einer (mehrfach) geschichteten Stichprobe von der Anzahl der tatsächlich an einer Datenerhebung teilnehmenden Fahrer abweichen kann, müssen Auswertungen zu Häufigkeitsverteilungen untersuchter Ereignisse entsprechend dieser Abweichung korrigiert werden, um Verzerrungen der Aussagen zu vermeiden (vgl. [159]).

Die Stichprobe an Probanden der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Datenerhebung repräsentiert nicht die Kundenzielgruppe der untersuchten Fahrzeugklasse. Sie besteht überwiegend aus Dienstfahrzeugfahrern der gleichen Berufsgruppe in der Region Süddeutschland.

Für die vorliegende Arbeit wird die Stichprobe insofern als repräsentativ angenommen, dass keine Gewichtungen der Auswertungsergebnisse bezüglich möglicher Schichtungsmerkmale vorgenommen werden.

Erhebungszeitraum

Je nach Studie werden die Daten pro Proband für einen Stichtag oder für den gleichen vor der Erhebung festgelegten Zeitraum gesammelt (vgl. [24, 154]).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit hängt der Erhebungszeitraum von der Dauer der Fahrzeugnutzung ab. Um eine Verzerrung der Auswertungen aufgrund unterschiedlicher Zeiträume der verschiedenen Fahrer zu vermeiden, werden die Ergebnisse für die einzelnen Fahrzeuge anhand derer Erhebungszeiträume jeweils auf ein Jahr normiert.

3.2.3 Art der Datenerhebung

Für die Durchführung der Datenerhebung bestehen mehrere Möglichkeiten. Für Datenerhebungen zu Mobilitätsprofilen werden überwiegend Befragungen durchgeführt, während Fahrprofile über Fahrzeugdatenaufzeichnungen erfasst werden (vgl. Absatz 2.4.3). Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl die Mobilitäts- als auch die Fahrprofile anhand der in Absatz 3.2.1 beschriebenen erforderlichen Messgrößen mittels Fahrzeugdatenaufzeichnungen erfasst. Im Gegensatz zu Befragungen können mittels Fahrzeugdatenaufzeichnungen beispielsweise Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile quantitativ erfasst werden. Weiterhin sind im Gegensatz zu Befragungen die Aussagen zu Mobilitätsprofilen unabhängig von subjektiven Wahrnehmungen oder von dem Grad bzw. Regelmäßigkeit der Befüllung von Fragebogen. Auf den möglichen Einsatz von Befragungen als Erweiterung der Datenerhebung mittels Fahrzeugdatenaufzeichnungen wird im Ausblick eingegangen.

3.2.4 Datenverarbeitung

Im Folgenden wird die Datenverarbeitung im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschrieben (vgl. Abb. 17).

Rohdatenaufzeichnung

Die Aufzeichnung der Fahrzeugdaten erfolgte über CAN-Datenlogger (Typ G.i.N. GL 1000). Die Geräte zeichnen überwiegend Signale vom Antriebs-CAN auf, insgesamt ca. 480. Die Aufzeichnungen wurden jeweils mit dem Einschalten der Zündung (Klemme 15) begonnen und mit Ausschalten der Zündung beendet. Die aufgezeichneten Daten wurden mittels einer SD-Karte gesichert. Die Daten wurden in regelmäßigen Zeitabständen von der SD-Karte auf einen Rechner bzw. auf den Servern der Messtechnikabteilung hochgeladen.

Datenkonvertierung

Die aufgezeichneten Rohdaten wurden auf den Servern der Messtechnikabteilung in ein anderes Format konvertiert und können via Datum und fahrzeugspezifischen Daten zur Auswertung abgerufen werden.

Entwurf der Auswertelogik

Der Entwurf der Auswertelogik ist mehrschichtig aufgebaut. Die oberste Kategorisierungsebene der Daten ist das *Fahrzeug*. Das heißt die Auswertungsalgorithmen werden für jedes Fahrzeug einzeln durchgeführt und die Ergebnisse können bei Bedarf gesondert nach Fahrzeug bzw. nach Fahrer (anonymisiert) betrachtet werden.

Die Auswertung der Daten eines Fahrzeugs wird über eine Konfigurationsdatei definiert, die die einzelnen Auswertungsalgorithmen aufruft. Als erstes werden die Daten vorbereitet, indem Größen bei Bedarf aus mehreren Signalen berechnet werden (Pre-Processing). Bei Bedarf werden dabei die Datenwerte auch gefiltert oder geglättet (gleitender Mittelwert gebildet). Die Berechnung der fehlenden Größen erfolgt durch Zugriff auf vordefinierte Funktionen in C oder in IDL oder über kompilierte und in die Auswertung eingebundene *Simulink*-Modelle.

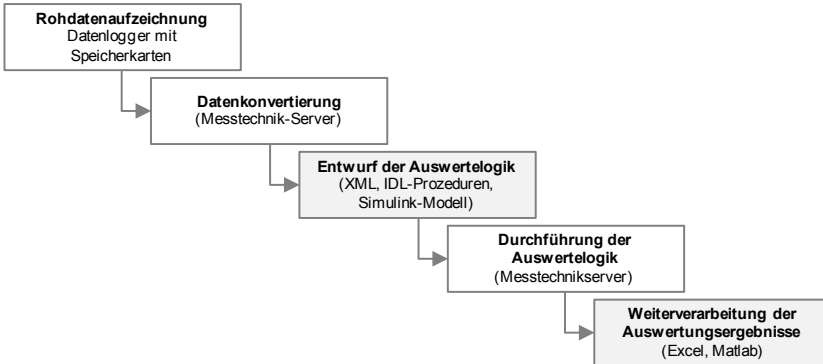


Abb. 17: Datenverarbeitung;
grau hinterlegt= im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Algorithmen

Weiterhin werden Messungen, denen keine zurückgelegten Strecken zugeordnet werden können oder die nur wenige Sekunden dauern, eliminiert, damit bei den späteren Auswertungen das Merkmal „Anzahl der Fahrten“ dem Mobilitätsprofil des Fahrers entspricht.

Die Konfiguration ruft auch Algorithmen auf, deren Ergebnis keine Zeitreihe sondern definierte statistische Auswertungen (einzelne Werte oder Häufigkeitsverteilungen) sind, die für die jeweilige Fahrt zurückgelegt werden.

Weiterhin wird die Verarbeitung der Auswertungen einzelner Fahrten oder Zeitschriebe zu zusammengefassten Auswertungen aller Fahrten des jeweiligen Fahrzeugs ermöglicht. So kann beispielsweise die Häufigkeitsverteilung der zurückgelegten Strecken am Tag über definierte Streckenklassen für ein Fahrzeug erstellt werden.

Durchführung der Auswertelogik

Die Auswertung wird aus Effizienzgründen auf den Servern der Messtechnik-Abteilung durchgeführt. Die Ergebnisse können in Form der definierten XML-Dateien (für die Ergebnisse auf Ebene der Fahrten) und in *Excel*-Dateien (für die Ergebnisse auf Ebene des Fahrzeugs) abgerufen werden.

Weiterverarbeitung der Auswerteergebnisse

Die Ergebnisdateien liegen für die einzelnen Fahrzeuge vor und werden weiterverarbeitet, sodass für die gesamte untersuchte Stichprobe die gewünschten Aussagen zusammengestellt und dargestellt werden können. So kann beispielsweise die Häufigkeitsverteilung der zurückgelegten Strecken am Tag über definierte Streckenklassen für alle Fahrzeuge der Stichprobe dargestellt werden. Die Weiterverarbeitung dieser Ergebnisse für die jeweiligen Fahrzeuge erfolgt in *Excel* und *Matlab*.

3.3 Vorauswahl von Fahrzeugkonzeptvarianten

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie mittels der aufgezeichneten Fahrzeugdaten eines bestehenden Fahrzeugmodells Anforderungen an ein davon abweichendes Fahrzeugkonzept derselben Fahrzeugklasse abgeleitet werden können. Die Untersuchungen dienen als mögliche ergänzende Betrachtungen zusätzlich zu heutigen Ansätzen zur Untersuchung von Fahrzeugkonzepten (vgl. auf 2.1).

Als Beispiel wird ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeugkonzept untersucht. Das Ziel in diesem Abschnitt ist es, einerseits Anforderungen an das Fahrzeugkonzept und Systemkomponenten aus den Datenaufzeichnungen abzuleiten und andererseits Fahrzeugkonzeptvarianten im Kontext der erfassten Nutzerprofile zu bewerten bzw. auszuschließen. Dabei werden in diesem Absatz die untersuchten Fahrzeugkonzepte vereinfacht abgebildet, um dem im Absatz 3.1 erwähnten Konflikt bezüglich des Simulationsaufwandes zu begegnen.

Zuerst werden Auswertungen der Kundendaten erstellt, die unabhängig von der genauen Fahrzeugtopologie erste Schlussfolgerungen für die Auslegung ermöglichen. Nach Festlegung des zu untersuchenden Antriebskonzepts können Anforderungen an einzelne Komponenten abgeleitet werden. In Zusammenhang mit Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist insbesondere die erforderliche elektrische Reichweite aufgrund der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen niedrigen Energiedichte von elektrischen Energiespeichern relevant. In Bezug auf die Reichweitenanforderung ist es naheliegend, die gefahrenen Streckenlängen zu untersuchen. Dabei bestimmt das Ladeszenario den Anfangs- und Endpunkt der relevanten Streckenlängen. Wird beispielsweise angenommen, dass der Kunde jeden Abend sein Fahrzeug zum Laden der Traktionsbatterie über Nacht anschließt und dass die Batterie über Nacht auch

vollständig aufgeladen werden kann, dann entsprechen die täglich zurückgelegten Strecken der erforderlichen Reichweite des Fahrzeugs. In Bezug auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs können diese Anforderungen Ausschlusskriterien bei der Kaufentscheidung sein. Bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen kann die erforderliche Reichweite den Anteil der rein elektrisch und der hybridisch zurückgelegten Strecke und somit auch die Ökobilanz des Fahrzeugs beeinflussen. Abb. 18 zeigt die täglich zurückgelegten Strecken im Rahmen der Datenerhebung. Als Vergleich werden im Diagramm die Studienergebnisse aus MiD2008 [23] und Eurostat [94] dargestellt. Die durchschnittliche Tagesstrecke in diesen Studien fällt geringer aus, als die Werte der vorliegenden Datenerhebung. An ca. 50 % der gefahrenen Tage werden nach der vorliegenden Datenerhebung weniger als 50 km am Tag zurückgelegt. In Umkehrschluss bedeutet das, dass ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug mindestens 50 km elektrische Reichweite aufweisen müsste, damit die Fahrer der untersuchten Zielgruppe die Hälfte ihrer täglichen Strecken rein elektrisch zurücklegen können.

Um aus dieser allgemeinen Anforderung an die Reichweite Anforderungen an einzelne Systemkomponenten (vgl. domänenspezifischer Entwurf nach VDI 2206) abzuleiten, muss das zu untersuchende Fahrzeugkonzept bezüglich der Antriebstopologie, Wirkungsgradkette und Betriebsstrategie beschrieben werden. In Kenntnis der neuen Antriebstopologie und der Topologie des Fahrzeugs, dessen Daten aufgezeichnet worden sind, kann eine vereinfachte Überleitung der benötigten Leistung der relevanten Verbraucher erfolgen. Abb. 19 skizziert eine vereinfachte Überleitung der Leistungsanforderungen von einem konventionellen Fahrzeug auf ein Plug-In-Hybridfahrzeug. Wie in 2.2 erwähnt, wird im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug mit P2-Anordnung untersucht. Für das konventionelle Fahrzeug sind die Motordrehzahl und das Kupplungsdrehmoment sowie das Drehmoment und die Drehzahl des Klimakompressors aus den Datenaufzeichnungen bekannt und über nachträgliche Berechnungen (anhand aufgezeichneter Daten) auch der Bordnetzverbrauch. Aus diesen Größen können die Antriebsleistung, die Leistung für den Klimaverbrauch und die Leistung für das 12V-Bordnetz berechnet werden. Um die Leistungs- und Kapazitätsanforderung an die Traktionsbatterie des Plug-In-Hybridfahrzeugkonzepts zu ermitteln, kann die erforderliche Leistung an der Batterie jeweils als eine Funktion der zuvor berechneten Leistungsverläufe aus dem konventionellen Fahrzeug und der relevanten Wirkungsgradkettenunterschiede berechnet werden.

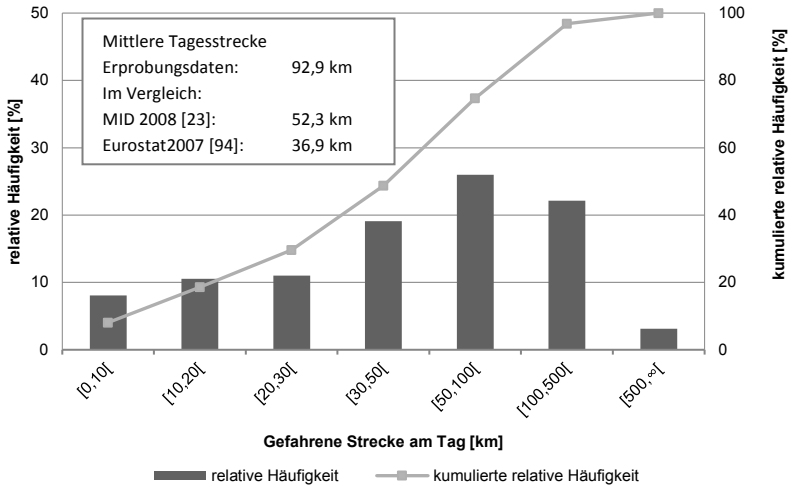


Abb. 18: Relative Häufigkeitsverteilung der zurückgelegten Strecken am Tag aus der Datenerhebung

Die aufgezeichneten Drehmomentwerte des Klimakompressors wurden als zu ungenau erachtet, sodass in dem untersuchten Fall keine Leistungsanforderung der Klimaanlage basierend auf den aufgezeichneten Daten ausgewiesen werden kann. Die Antriebsleistung wurde als Produkt aus dem Kupplungsdrehmoment und der Motordrehzahl bestimmt. Aus dem Integral dieser Leistung kann der Energiebedarf für den Antrieb bestimmt werden. Auf den 12V-Bordnetzverbrauch wird in 3.6 eingegangen.

Abb. 20 zeigt die relative Häufigkeitsverteilung des täglichen Energiebedarfs für den Antrieb. Dabei wurden nur Zugphasen¹⁶ berücksichtigt. An über 60 % der gefahrenen Tage werden für den Antrieb mehr als 15 kWh Energie am Getriebeeingang des zu untersuchenden Konzeptes benötigt. An mehr als 70 % der gefahrenen Tage werden mehr als 10 kWh Energie für den Antrieb benötigt.

¹⁶ Die Zugphase bezeichnet die Phase, in der ein positives Antriebsmoment gestellt wird.

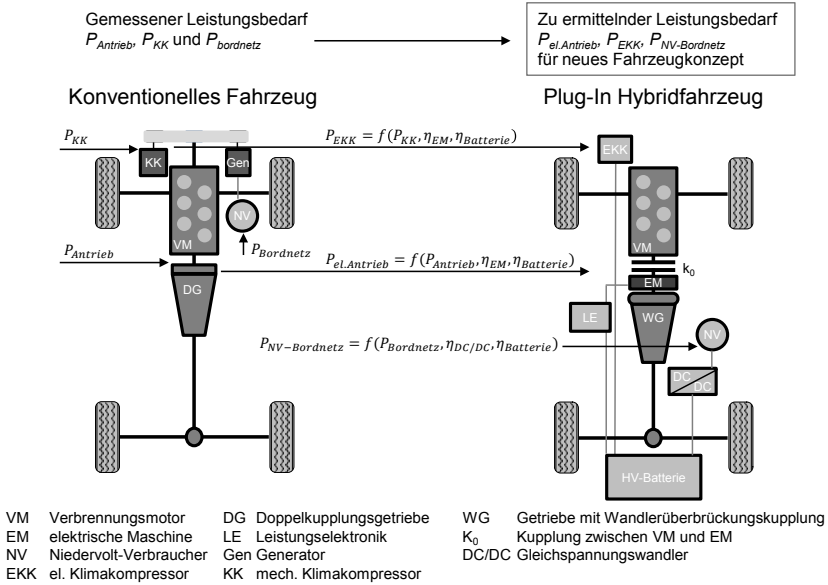


Abb. 19: Vereinfachte Überleitung des Leistungsbedarfs für Antriebs-, Klimatisierung und Bordnetzfunktionen von einem konventionellen Fahrzeug auf ein P2-Hybrid zur Betrachtung von rein elektrischen Fahrten

Wäre eines der Ziele der Fahrzeugauslegung, die elektrische Reichweite zu erhöhen, dann würden die Werte erstmal zur groben Orientierung dienen. Sie sind für eine Anforderung an die Kapazität des elektrischen Energiespeichers noch nicht ausreichend. Im Vergleich zu Abb. 19 wird hier der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine und der Batterie noch vernachlässigt. Um das Rekuperationspotenzial zu berücksichtigen muss auch eine erste Dimensionierung der elektrischen Maschine erfolgen. Diese kann im Hinblick auf die elektrische Reichweite ebenfalls dimensionierend werden, wenn ihre Leistung nicht zur Überwindung der Fahrwiderstände und der Verluste ausreicht.

Werden unter dem gleichen Ladeszenario (Fahrzeug über Nacht geladen) verschiedene Batteriekapazitäten (nutzbar) und Leistungsgrenzen der Batterie und der elektrischen Maschine betrachtet sowie die Wirkungsgrade berücksichtigt, dann kann für ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug ermittelt werden, wie viele der gefahrenen Tage mit dem erfassten Nutzerprofil rein elektrisch hätte zurückgelegt werden können.

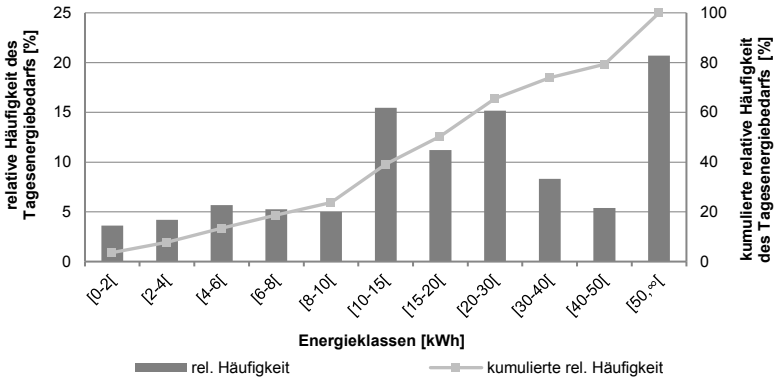


Abb. 20: Tagesenergiebedarf für Antrieb aus den Fahrzeugaufzeichnungen ohne Berücksichtigung des Rekuperationspotenzials

Abb. 21 zeigt das Ergebnis einer solchen Betrachtung für eine Auswahl an Batteriekapazitäten und Leistungsgrenzen der Batterie und der elektrischen Maschine. Am Beispiel der elektrischen Maschine mit der maximalen Leistung von 60 kW wird ersichtlich, dass die Erhöhung der Batteriekapazität die Anzahl an Tage, die mit der Antriebskonfiguration elektrisch zurückgelegt werden können, nicht erhöht. Erwartungsgemäß kann mit der Kombination 15 kWh-Batteriekapazität (nutzbar) und 100 kW installierte elektrische Leistung der höchste Anteil an rein elektrisch gefahrenen Tagen bei dem erfassten Nutzungsprofil und betrachteten Kombinationen zurückgelegt werden.

Die Kombination von 100 kW installierter elektrischer Leistung und 10 kWh-Batteriekapazität (nutzbar) führt zum annähernd selben Anteil an rein elektrisch gefahrenen Tagen wie die Kombination von 80 kW installierter elektrischer Leistung und 15 kWh-Batteriekapazität (nutzbar). Je nach Kosten der Komponenten kann eine Erhöhung der installierten elektrischen Leistung sinnvoller sein als die Investition in die Batteriekapazität.

Mit entsprechendem Ausbau der Ladeinfrastruktur wie zum Beispiel mit Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz stellt sich die Frage, ob die Fahrzeuge auch in Zukunft den hohen Reichweitenanforderungen aus Abb. 18 gerecht werden müssen bzw. ob aufgrund einer entsprechenden Ladeinfrastruktur eine Erhöhung der elektrisch zurückgelegten Streckenanteile erreicht werden kann.

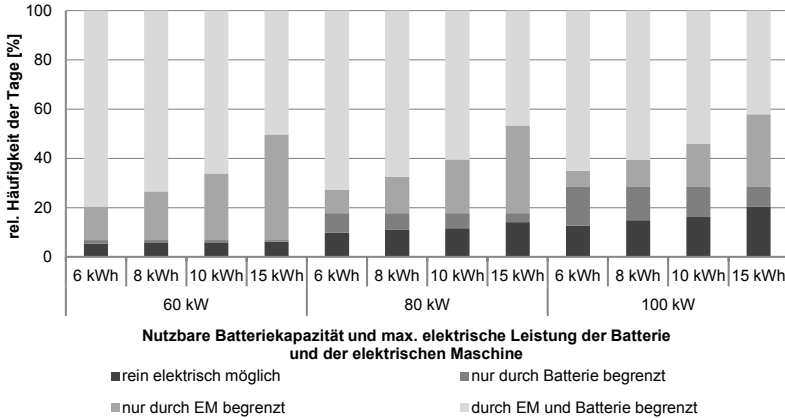


Abb. 21: Potenzial für rein elektrisch gefahrenen Tage in Abhängigkeit der Batteriekapazität (nutzbar) und der Leistung der elektrischen Maschine (EM) und der aufgezeichneten fahrzeugspezifischen Größen

Um diesen Überlegungen entgegenzukommen, werden zwei weitere Ladeszenarien angenommen. Da aus den Datenaufzeichnungen keine Informationen zur Ladeinfrastruktur vorliegen, werden die Szenarien basierend auf der Dauer der Abstellzeiten aufgestellt. Es wird dabei angenommen, dass der Fahrer nicht nach jeder Fahrt bereit ist, sein Fahrzeug zum Laden anzuschließen. Erst wenn er das Fahrzeug länger als eine sinnvolle Mindestladedauer abstellt, wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug geladen werden kann. Das heißt, alle aufeinanderfolgende Fahrten werden bezüglich des benötigten Energiebedarfs zu einer Tour (vgl. Abb. 22) zusammengefasst, sofern die Dauer der Fahrtunterbrechung kürzer ausfällt, als die Mindestladedauer gemäß dem betrachteten Ladeszenario.

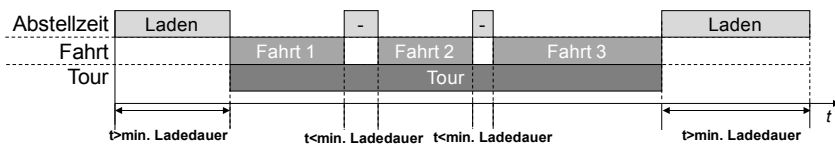


Abb. 22: Abstellzeitabhängige Ladeszenarienbetrachtung. Die Fahrten zwischen zwei Ladevorgängen werden zusammengefasst (Tour).

Szenario 1: Die Batterie eines Plug-In-Hybrid-Fahrzeugs kann innerhalb von 2,5 Stunden geladen werden und der Fahrer schließt sein Fahrzeug zum Laden an, sobald er das Fahrzeug länger als 2,5 Stunden abstellt¹⁷ (vgl. auch [87]).

Szenario 2 („Schnellladeszenario“): Die Batterie eines Plug-In-Hybrid-Fahrzeugs kann innerhalb einer Stunde geladen werden und der Fahrer schließt sein Fahrzeug zum Laden an, sobald er das Fahrzeug länger als eine Stunde abstellt (vgl. auch [87]).

Unter Berücksichtigung dieser Ladeszenarien werden die Anteile der rein elektrisch zurückgelegten Tagesstrecken erneut ausgewertet. Wie in Abb. 23 dargestellt, können die rein elektrisch zurückgelegten Strecken in den betrachteten Ladeszenarien verdoppelt bzw. annähernd verdreifacht werden im Vergleich zum Basisszenario, das das Laden nur über Nacht annimmt.

In den bisher angeführten Betrachtungen wurden zwar einige Aspekte der Topologieüberleitung (Vergleich Abb. 19) betrachtet, die Nebenverbraucher und der Einfluss der Umgebungsbedingungen wurden jedoch vernachlässigt.

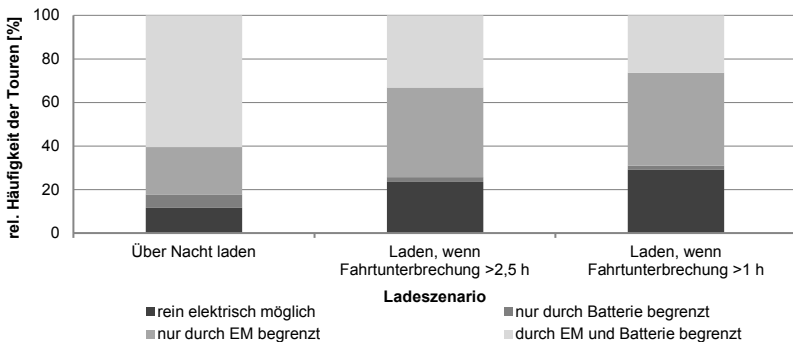


Abb. 23: Potenzial für rein elektrisch gefahrenen Tage in Abhängigkeit der Ladeszenarien bei 10 kWh Batteriekapazität (nutzbar), 100 kW Leistung der elektrischen Maschine (EM) und der aufgeführten fahrzeugspezifischen Größen

¹⁷ Die 2,5 Stunden Ladezeit sind eine Annahme aus Kundensicht. Ob die Ladezeit ausreicht, um die Batterie in der Zeit vollständig aufzuladen, hängt zusätzlich von mehreren Randbedingungen wie bspw. der nutzbaren Batteriekapazität, den Ladeverlusten oder dem Ladestadium zu Beginn des Ladevorgangs ab. Bei einem Ladewirkungsgrad von 90 % kann die entladene Batterie mit 8 kWh nutzbarer Batteriekapazität bei 3,6 kW Ladeleistung ca. in dieser Zeit (2,5 Stunden) aufgeladen werden.

Mit den bisherigen Beispielen können grobe Aussagen zu den Anforderungen getätigt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob das Fahrzeug hinreichend genau modelliert wurde. Denn wie zu Beginn dieses Abschnittes erwähnt, wurde das Fahrzeugmodell vereinfacht (vgl. Wechselwirkungen in Abschnitt 2.3.3), um den Konflikt bezüglich Simulationsaufwand zu meiden. Folglich wurden die Wirkungsgrade und die Leistungsfähigkeit der elektrischer Maschine und der Traktionsbatterie nicht nach Betriebspunkt, Bauteiltemperatur und beim letzteren nicht nach Ladezustand unterschieden und es wurde auch keine Betriebsstrategie für den Verbrennungsmotor, für die elektrische Maschine hinterlegt und kein Getriebebeschaltprogramm festgelegt.

Eine Detaillierung des Fahrzeugmodells führt einerseits zu einer erhöhten Rechenzeit und gleichzeitig steigt die Anzahl der möglichen Fehlerquellen in der Modellierung. Letztere führen bei der vorliegenden Datenmenge zu einem unüberschaubaren Plausibilisierungsaufwand, sofern alle Mobilitätsprofile und Fahrprofile aus der Datenerhebung als Eingangswerte für die Simulationen verwendet werden würden. Um diesen Punkten entgegenzuwirken, werden im nächsten Abschnitt Ansätze untersucht, um die erfassten Nutzerprofile zu „komprimieren“ und somit bei möglichst geringer Rechenzeit und mit hinreichend genauen Simulationsmodellen den Kraftstoffverbrauch des zu untersuchenden Fahrzeugkonzeptes im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Fahrzeugumgebung berechnen zu können.

Schlussfolgerung:

- Mittels vereinfachter Fahrzeugmodelle und den aufgezeichneten fahrzeugspezifischen Größen zum Energiebedarf für Antrieb und Nebenverbraucher können erste Aussagen bezüglich der Auslegung einzelner Komponenten wie die Traktionsbatterie und die elektrische Maschine (am Beispiel des hier untersuchten Plug-In Hybridkonzeptes) für die untersuchte Stichprobe hergeleitet werden.
- Die Aussagekraft der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit und Genauigkeit der aufgezeichneten fahrzeugspezifischen Größen und dem Grad der Vereinfachung des Fahrzeugmodells ab (vgl. Wechselwirkungen in Abschnitt 2.3.3).

3.4 Bewertung von Methoden zur Herleitung von Fahr- und Mobilitätsprofilen

In diesem Abschnitt werden Ansätze untersucht, um Mobilitäts- und Fahrprofile aus der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Datenerhebung abzuleiten. Das Ziel ist im Vergleich zu den erfassten Daten eine kleinere Menge an Nutzerprofilen für die anschließende Simulation zu bestimmen, um die Simulationszeit und den Plausibilisierungsaufwand überschaubar zu halten.

Die herzuleitenden Nutzerprofile müssen in einem Format vorliegen, in dem sie als Eingangsdaten zur Berechnung des Energiebedarfs mittels eines Fahrzeugsimulationsmodells geeignet sind.

Für die Nutzerprofile ergibt sich aus dieser Anforderung und aus den Betrachtungen zu den Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumgebung in Abschnitt 2.3.3, dass für das zu entwickelnde Simulationsmodell

- die Fahrprofile der Fahrer als zeitabhängige (bzw. streckenabhängige) Geschwindigkeitsprofile vorliegen müssen;
- die Mobilitätsprofile der Fahrer die Fahrtdauer und Fahrtstrecke vorgeben müssen;
- die Randbedingungen zu Beginn der einzelnen Fahrten (Bauteiltemperaturen, Ladezustand der Batterie) hergeleitet werden müssen;
- die Umgebungsbedingungen für die einzelnen Fahrten hergeleitet werden müssen;

Diese Kriterien werden bei der folgenden Untersuchung der methodischen Ansätze zur Herleitung von Fahrprofilen und Mobilitätsprofilen aus 2.4.1 und 2.4.2 aufgegriffen.

3.4.1 Methoden zur Herleitung von Fahrprofilen

In Abschnitt 2.4.2 wurden methodische Ansätze zur Herleitung von Fahrprofilen nach Stand der Forschung identifiziert (vgl. Tab. 5). Inwiefern die Ansätze geeignet sind, der untersuchten Stichprobe entsprechende Verbrauchswerte herzuleiten, wird im Folgenden erörtert.

Synthetische Fahrprofile

Bewertung – Markov-Ketten

Das Ziel eines mittels Markov-Ketten generierten Geschwindigkeitsprofils ist es, bezüglich der Geschwindigkeits-Beschleunigungsverteilung den erfassten Geschwindigkeitsprofilen der untersuchten Stichprobe zu entsprechen. Die geschwindigkeits- und beschleunigungsabhängigen Fahrwiderstände werden somit von den generierten Geschwindigkeitsprofilen ebenfalls entsprechend den Stichprobendaten wiedergegeben. Da es sich um homogene Markov-Ketten handelt – das heißt die Übergangswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt n ist unabhängig von n – ist nicht zwingend gewährleistet, dass das generierte Profil bezüglich des Zeitpunktes und der Reihenfolge der Stoppphasen, Stadt- oder Überlandanteilen die untersuchte Stichprobe abbildet. Der Zeitpunkt und die Reihenfolge dieser Phasen kann jedoch den Verlauf der Bauteiltemperaturen und somit beispielsweise die aktiven Motorstoppphasen des konventionellen Fahrzeugs im Fahrzeugstillstand (vgl. Start-Stopp-Vetos nach [70]), den Wirkungsgrad von Antriebskomponenten oder den Anteil der elektrisch gefahrenen Strecken bei einem Plug-In-Hybrid-Fahrzeug beeinflussen.

Weiterhin ist bei diesem Ansatz zu beachten, dass die Fahrzeuge, deren Datenaufzeichnungen verwendet werden, über eine ähnliche Antriebsleistung bzw. ein ähnliches Leistungsgewicht verfügen sollten wie die untersuchten Fahrzeugkonzepte. Denn stärker motorisierte Fahrzeuge können sportlicher, also mit höheren Beschleunigungen und Verzögerungen und gegebenenfalls bei höheren Geschwindigkeiten bewegt werden, was wiederum zu einem höheren Kraftstoffverbrauch oder elektrischen Energiebedarf führen kann.

Bewertung – Synthetische Geschwindigkeitsverläufe basierend auf statistischen Kennwerten und Verteilungen nach EGHTESSAD [46]

Wie bei den auf Markov-Ketten beruhenden Methoden wird ein synthetisches Geschwindigkeitsprofil anhand statistischer Kennwerten und Verteilungen zum Geschwindigkeitsprofil erzeugt. Dabei wird auch die Haltedauer- und häufigkeit berücksichtigt (vgl. [46]). Die Bewertung dieses Ansatzes entspricht der oben aufgeführten Bewertung der Markov-Ketten.

Reale Fahrprofile

Bewertung – Clusteranalyse

Im Vergleich zu den auf Markov-Ketten basierenden Methoden zur Generierung von Geschwindigkeitsprofilen werden in den auf der Clusteranalyse beruhenden Methoden real gefahrene Geschwindigkeitssequenzen aus der untersuchten Stichprobe verwendet. Es ist hingegen nach diesem Ansatz nicht zwingend gegeben, dass das resultierende Geschwindigkeitsprofil bezüglich dessen Geschwindigkeits-Beschleunigungsverteilung der untersuchten Stichprobe entspricht. Ein entsprechender Vergleich mit den ausgewählten Geschwindigkeitssequenzen und der untersuchten Stichproben muss bei Bedarf gesondert durchgeführt werden. Auch hier ist der Einfluss der Antriebsleistung der Fahrzeuge zu berücksichtigen, deren Daten aufgezeichnet worden sind.

Bewertung – Auswahl von Geschwindigkeitsverläufen gemäß Energiebilanz nach EGHTESSAD

Analog zu den auf Clusteranalyse basierenden Methoden werden bei diesem Vorgehen nach EGHTESSAD [46] ebenfalls real gefahrene Geschwindigkeitssequenzen ausgewählt. Bezüglich des durchschnittlichen streckenbezogenen Antriebsenergiebedarfs zur Überwindung der Fahrwiderstände in den Zugphasen entspricht das ausgewählte Geschwindigkeitsprofil der untersuchten Stichprobe. Das resultierende Geschwindigkeitsprofil bezüglich dessen Geschwindigkeits-Beschleunigungsverteilung muss dafür jedoch nicht zwingend der untersuchten Stichprobe entsprechen. Da die (gewichteten) Kennwerte zur Erstellung der Rangfolge der Geschwindigkeitssequenzen nicht bekannt sind, kann dieser Ansatz nicht detaillierter bewertet werden. Auch bei diesem Vorgehen ist der Einfluss der Antriebsleistung der Fahrzeuge zu berücksichtigen, deren Daten aufgezeichnet worden sind.

3.4.2 Methoden zur Herleitung von Mobilitätsprofilen und Randbedingungen

In 2.4.1 wurden Methoden zur Herleitung von Mobilitätsprofilen nach dem Stand der Forschung identifiziert. Im Folgenden wird erörtert, inwiefern diese Ansätze für die Zielsetzung dieser Arbeit geeignet sind.

Stochastische Ansätze ohne vollständige Mobilitätsprofile

Mobilitätsstatistiken in Verbindung mit Wetterstatistiken

Der Ansatz nach STRUPP ET AL. [139] ermöglicht eine Aussage über den relativen Zeitanteil von Fahrten (gefahrte Minuten) zu gegebenen Umgebungsbedingungen (Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte), in dem Statistiken zu gefahrenen Minuten in Abhängigkeit der Uhrzeit mit Statistiken zu Umgebungsbedingungen in Abhängigkeit der Uhrzeit, Region und Monat gekoppelt werden. Der Ansatz eignet sich für die Herleitung von Randbedingungen, sofern instationäre Vorgänge wie beispielsweise Abkühlen oder Aufheizen des Innenraums vernachlässigbar sind, da eine Aussage zu den Anfangsbedingungen einer Fahrt wie beispielsweise Bauteiltemperaturen oder Innenraumtemperatur mit diesem Ansatz nicht hergeleitet werden kann. Die Methode eignet sich weiterhin auch nicht, um Streckenlänge oder Fahrdauer von Fahrten abzuleiten.

Statistiken zu Streckenlängen

Der Ansatz von SAE J2841 [129] berücksichtigt die Wahrscheinlichkeitsdichte täglich gefahrener Streckenlängen für den Utility Factor (vgl. 2.4.1) für Plug-In-Hybridfahrzeuge zur Ermittlung des Charge-Depleting Anteils der zurückgelegten Strecken. Der Ansatz berücksichtigt das Mobilitätsprofil bezüglich Fahrtstrecke und erlaubt eine Kombination mit verschiedenen Fahrzyklen (vgl. SAE J1711 [128]). Der Ansatz eignet sich nicht, um Mobilitätsprofile unter Berücksichtigung von Anfangs- und Umgebungsbedingungen herzuleiten.

Markov-Ketten im Zusammenhang mit Mobilitätsprofilen

Eine Weiterentwicklung des Ansatzes nach MEGYESI ET AL. [99] im Hinblick auf Reduzierung der zu simulierenden Mobilitätsprofile wurde für die Zielsetzung dieser Arbeit basierend auf Markov-Ketten untersucht. Dabei wurden als Matrizen für Übergangswahrscheinlichkeiten relative Häufigkeitsverteilungen aus den aufgezeichneten Daten erzeugt, die die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der eine bestimmte Fahrt- bzw. Abstelldauer zu einer bestimmten Uhrzeit der Fahrt möglich ist. Das Vorgehen ermöglicht die Bereitstellung von Mobilitätsprofilen und auch die Berücksichtigung von instationären Vorgängen, da nicht nur „Fahrten“ erzeugt werden, sondern diese auch in eine zeitliche Reihenfolge in Abhängigkeit von der Uhrzeit festgelegt werden und die

Zuordnung zu Umgebungsbedingungen beispielsweise analog STRUPP ET AL. [139] erfolgen kann. Auch mit der oben erwähnten Weiterentwicklung benötigt es ungefähr 5500 Fahrten, um die vorgegebenen relativen Häufigkeitsverteilungen annähernd abzubilden. Die Anzahl der zu simulierenden Fahrten wird zwar im Vergleich zu der untersuchten Stichprobe (ca. 38.000 Fahrten) deutlich reduziert. Für eine Simulation mit einem detaillierten Längsdynamik- und Innenraummodell wird die Anzahl der zu berechnenden Profile jedoch aufgrund des zu erwartenden Aufwandes zur Plausibilisierung der Ergebnisse als zu hoch erachtet.

Clusteranalyse im Zusammenhang mit Mobilitätsprofilen

Die Klassifizierung der täglichen Fahrten nach [17] ermöglicht es, Mobilitätsprofile zu generieren (bzw. im Falle dieses Ansatzes auszuwählen), die die Fahrten bezüglich ihrer Startzeit (Uhrzeit), Fahrdauer und Streckenlänge beschreiben. Im Gegensatz zu der zuvor aufgeführten Herleitung von Mobilitätsprofilen mittels Markov-Ketten ist es nicht bedingt durch das Grundprinzip der Methode vorgesehen, dass die Häufigkeitsverteilung der Mobilitätsprofile bezüglich Dauer und Startzeit der Fahrten der gesamten Stichprobe entspricht. Ein Vergleich der generierten Fahrten und der Stichprobe diesbezüglich muss gesondert durchgeführt werden. Jedoch kann die Anzahl der zu simulierenden Profile im Vergleich zu der ursprünglichen Stichprobe über diesen Ansatz deutlich reduziert werden: Aus den ca. 9500 Tagen der Datenerhebung konnten über den Ansatz 9 unterschiedliche Tagesverläufe identifiziert und für die nachfolgende Simulation verwendet werden. Die Prüfung dieses Ansatzes in Kombination mit Ansätzen zur Herleitung von Geschwindigkeitsprofilen erscheint deshalb sinnvoll.

3.4.3 Methode zur Herleitung von repräsentativen Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofilkombinationen

In den vorherigen Absätzen sind Methoden dargestellt worden, die sich entweder mit der Herleitung von repräsentativen Geschwindigkeitsprofilen oder mit der Herleitung von repräsentativen Mobilitätsprofilen befasst haben. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Ansätze in Bezug auf ihre ursprüngliche Verwendung wurden kurz aufgeführt.

Es ist naheliegend zu prüfen, ob die vorgestellten Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- oder Fahrprofilen unter bestimmten Kriterien verwendet werden könnten, um eine Kombination aus Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofilen herzuleiten.

Die Möglichkeiten zum Einsatz und zur Kombination der untersuchten Ansätze werden in Abb. 24 dargestellt. Dabei werden Kombination 1 und 2 nicht weiter betrachtet. Die Anzahl der Ziehungen, die es bedarf, um mittels den gegebenen Wahrscheinlichkeitsmatrizen ein Mobilitätsprofil zu generieren, führt für die Zielsetzung dieser Arbeit wie in 3.4.2 erwähnt zu zu vielen Fahrten. Auch ohne Betrachtung der Generierung der zu den Fahrten gehörenden Fahrprofile mittels Markov-Kette oder Clusteranalyse wird der Plausibilisierungsaufwand der Simulationsergebnisse für die hohe Anzahl an Fahrten als zu hoch eingeschätzt.

Fahreinfluss	Ansätze zur Berücksichtigung des Fahreinflusses					
Mobilitätsprofile	Markov-Kette	1 ●	2 ●	3 ●	4 ●	Clusteranalyse
Fahrprofile	Markov-Kette	●	●	●	●	Clusteranalyse

Abb. 24: Morphologischer Kasten zur Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit geprüften Ansatzkombinationen; grau = nicht weiter verfolgt

Kombination 3 – Erzeugung von Mobilitätsprofilen mittels Clusteranalyse und Fahrprofile mittels Markov-Ketten

Mittels Clusteranalyse können entweder Fahrten oder andere definierte Mengen an Fahrten und Abstellzeiten wie beispielsweise „Tagesverläufe“ (Uhrzeiten und Dauer der Fahrten an einem Tag) klassifiziert werden. Nach Durchführung der Clusteranalyse und der Auswahl einer für sinnvoll gehaltenen Clusterlösung wird ein Kriterium benötigt, nach dem Tagesverläufe aus den unterschiedlichen Clustern ausgewählt werden. Wenn dies erfolgt ist, dann müssen die zu den Tagesverläufen gehörenden Fahrprofile erzeugt werden. Wenn die Fahrprofile für die einzelnen Fahrten mittels Markov-Ketten erzeugt werden, dann kann bei der Erstellung der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen nicht auf die Daten aller Fahrten zurückgegriffen werden. Ansonsten wird für eine Fahrt ein Geschwindigkeitsverlauf erzeugt, der im Hinblick auf

die Geschwindigkeit-Beschleunigungsverteilung nicht dem Verlauf der jeweiligen Fahrt, sondern dem Verlauf aller Fahrten entspricht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beispielsweise entspricht in diesem Fall nicht der Durchschnittsgeschwindigkeit der jeweiligen Fahrt sondern der Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrten.

Wenn jedoch für jede Fahrt – oder zumindest für jede Fahrt der ausgewählten Tagesverläufe – einzeln die benötigten Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen erstellt werden müssen, dann kann anstelle des generierten Geschwindigkeitsprofils auch das Originalgeschwindigkeitsprofil verwendet werden. Somit erweist sich diese Kombination nicht als sinnvoll.

Kombination 4: Erzeugung von Mobilitäts- und Fahrprofilen mittels Clusteranalyse

Für diese Kombination bestehen zwei mögliche Ausprägungen.

Getrennte Klassifizierung der Mobilitäts- und der Fahrprofile

Eine mögliche Kombinationsausprägung besteht darin, zuerst Mobilitätsprofile und anschließend Geschwindigkeitsprofile mittels Clusteranalyse herzu-leiten. Die Clusteranalyse zur Herleitung der Geschwindigkeitsprofile kann beispielsweise analog ANDRÉ ET AL. [8] oder ERDMANN [53] erfolgen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die auf diese Weise erzeugten Geschwindigkeitsprofile sinnvoll zu den hergeleiteten Mobilitätsprofilen zugeordnet werden sollten (um beispielsweise dem Mobilitätsprofil eines Autobahnpendlers nicht die Geschwindigkeitssequenzen reiner Stadtfahrten zuzuordnen). Hierzu können Merkmale wie beispielsweise die Dauer und die Durchschnittsgeschwindigkeit einer Fahrt verwendet werden, die sowohl in den Eigenschaften eines Fahrprofils als auch indirekt in den Eigenschaften eines Mobilitätsprofils beinhaltet sind. Um die erwähnte Zuordnung zu ermöglichen, können nicht alle Geschwindigkeitssequenzen der gesamten Stichprobe für die Klassifizierung verwendet werden. Wenn jedoch nur die Geschwindigkeitsprofile von Fahrten der ermittelten Mobilitätsprofile berücksichtigt werden, dann entsteht analog zu Kombination 3 kein Mehrwert, sondern nur ein Mehraufwand, wenn das Geschwindigkeitsprofil jeder ausgewählten Fahrt zuerst zerlegt, klassifiziert und erneut zusammengesetzt wird.

Kombinierte Klassifizierung der Mobilitäts- und der Fahrprofile

Eine weitere Ausprägung der Kombination 4 besteht darin, die Clusteranalyse zur gleichzeitigen Klassifizierung von Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofilen zu verwenden. Hierzu müssen die Clustervariablen sowohl die Mobilitäts- als auch die Geschwindigkeitsprofile beschreiben. Es stellt sich dabei die Frage, ob eine Fahrt, eine Tour (vgl. Abb. 22), ein Tag oder eine andere Menge an Fahrten als Objekt für die Clusteranalyse festgelegt werden soll. Um eine sinnvolle Wahl zu begründen, soll erneut kurz der Zusammenhang zwischen den Mobilitätsprofilen, den Rand- und Umgebungsbedingungen sowie der Fahrweise in Bezug auf die durchzuführenden Simulationen erläutert werden.

Sofern die Umgebungsbedingungen UB_{Fahrt} wie Außentemperatur oder Sonneneinstrahlung einer Fahrt analog zu [17, 99, 139] aus Klimadatentabellen entnommen werden, sind diese abhängig von Region, Uhrzeit und Jahreszeit. Für die Simulation einer Fahrt sind somit die Randbedingungen *Uhrzeit der Fahrt* $t_{Uhrzeit}$ und *Fahrdauer* Δt_{Fahrt} neben der betrachteten Region und Jahreszeit relevant, um die Umgebungsbedingungen aus den Klimadaten der Simulation zuordnen zu können. Weiterhin müssen die Fahrzeugzustände wie beispielsweise Bauteiltemperaturen und die Innenraumtemperatur am Anfang der Fahrt FZ_{FB} bekannt sein, um den Einfluss auf das instationäre Verhalten der Antriebskomponenten und der Innenraumklimatisierung berechnen zu können. Der Fahrzeugzustand zu Beginn der Fahrt hängt davon ab, in welchem Zustand FZ_{FE} , wie lange ($\Delta t_{Abstellzeit}$) und unter welchen Umgebungsbedingungen $UB_{Abstellzeit}$ das Fahrzeug nach der letzten Fahrt abgestellt worden ist. Die Eingangswerte für die Simulation einer Fahrt können somit über ein rekursives Verfahren hergeleitet werden:

$$FZ_{FB,k+1} = f(FZ_{FE,k}, \Delta t_{Abstellzeit,k}, UB_{Abstellzeit,k}(t_{Uhrzeit,k})) \quad (4)$$

Der Zustand des Fahrzeugs nach Fahrtende $FZ_{FE,k+1}$ ist wiederum abhängig von dem Fahrzeugzustand zu Fahrtbeginn $FZ_{FB,k+1}$, von den Umgebungsbedingungen $UB_{Fahrt,k+1}(t_{Uhrzeit,k+1})$ während der Fahrt und von der Fahrweise, also von dem ausgewählten Geschwindigkeitsprofil $v(t)_{k+1}$ sowie von dem Streckenverlauf s_{k+1} .

$$FZ_{FE,k+1} = f(FZ_{FB,k+1}, v(t)_{k+1}, s_{k+1}, UB_{Fahrt,k+1}(t_{Uhrzeit,k+1})) \quad (5)$$

Um das rekursive Verfahren an einer sinnvollen Stelle beginnen zu können, wird ein Punkt im Mobilitätsprofil des Kunden gesucht, bei dem der Anfangszustand des Fahrzeugs bzw. der Energiebedarf während der nächsten Fahrt möglichst unabhängig von der vorhergehenden Fahrt ist. Bei Fahrzeugen ohne Lade- und Vorkonditionierungsmöglichkeit können es hinreichend lange Abstellzeiten, wie beispielsweise die Abstellzeit in der Garage über Nacht sein, die dazu führen, dass die vorhergehende Fahrt einen geringen Einfluss auf die nächste Fahrt hat. In diesem Fall können z. B. die Temperaturen relevanter Bauteile bei Fahrtbeginn mit den Umgebungsbedingungen gleich gesetzt werden. Bei Fahrzeugen mit Lade- und Vorkonditionierungsmöglichkeit müssen Informationen vorliegen oder Annahmen getroffen werden, bei welchen Abstellzeiten diese technischen Möglichkeiten genutzt werden.

Diesbezüglich wird die Annahme getroffen, dass ein Kunde der untersuchten Fahrzeugzielgruppe, der bei dem heutigen (2017) Ladeinfrastrukturnetz ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug oder ein Elektrofahrzeug kauft, eine Garage und eine Lademöglichkeit besitzt. Aus dieser Annahme können zwei weitere Annahmen für die Randbedingungen der ersten Fahrt eines Tages hergeleitet werden:

1. Die Bauteiltemperaturen und die Innenraumlufttemperatur entsprechen bei der ersten Fahrt des Tages annähernd der Garagentemperatur.
2. Die Batterie eines Plug-In-Hybrid- oder eines Elektrofahrzeugs wird über Nacht geladen. Es kann bei der ersten Fahrt von einem 100%igen Batterieladezustand ausgegangen werden.

Basierend auf der dargestellten Rekursion bezüglich der Randbedingungen von Fahrten sowie auf der Annahme bezüglich der Randbedingungen der ersten Fahrt eines Tages ist es sinnvoll, als Objekt für die Clusteranalyse die *Tage* zu definieren, an denen gefahren wurde. Das Ergebnis des Ansatzes sind ausgewählte Tagesverläufe, die als Eingangsdaten für die Simulationen dienen (vgl. Abb. 25). Gemäß dem dargestellten rekursiven Verhalten, müssen für die erste Fahrt am Tag die Randbedingungen sinnvoll angenommen werden. Für die darauffolgenden Fahrten werden die Randbedingungen berechnet. Das erfordert auch, dass die Abstellzeiten simuliert werden (Siehe Kap. 3.5).

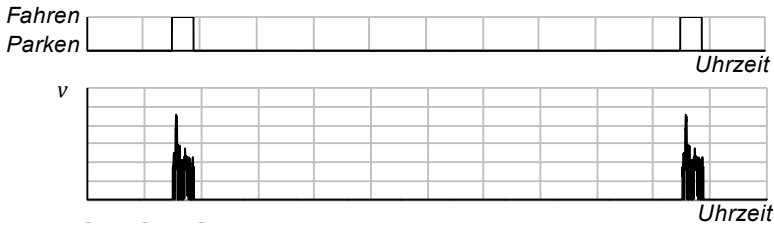


Abb. 25: Beispiel für einen „Tagesverlauf“, der über die Uhrzeit der Fahrten an einem Tag, deren Dauer und Geschwindigkeitsprofil beschrieben wird (schematische Darstellung)

Bewertung

Im Vergleich zu den Ansätzen aus den Kombinationen 1, 2 und 3 kann der Plausibilisierungsaufwand an dieser Stelle noch nicht abgeschätzt werden. Es kann an dieser Stelle auch nicht beurteilt werden, inwiefern die ausgewählten Geschwindigkeitsprofile den Geschwindigkeitsprofilen der Stichprobe bezüglich der relativen Häufigkeitsverteilung über Beschleunigung und Geschwindigkeit entsprechen. Es ist jedoch sichergestellt, dass die ausgewählten Tagesverläufe jeweils mindestens einen real gefahrenen Tag je Cluster wiedergeben.

Im nachfolgenden Unterkapitel wird auf die Ausarbeitung dieses Ansatzes, insbesondere auf die Verwendung der Clusteranalyse eingegangen.

3.5 Clusteranalyse zur Klassifizierung von täglichen Mobilitäts- und Fahrprofilen

Der im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Ansatz zur Herleitung von Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofilen mittels Clusteranalyse kann in folgende Phasen unterteilt werden (vgl. Abb. 26).

Zuerst werden Merkmale definiert, anhand derer die Kombination der täglichen Mobilitäts- und Fahrprofile (im Weiteren nur kurz als „Tagesverläufe“ bezeichnet) beschrieben werden. Diese Merkmale dienen als Klassifikationsvariablen für die Clusteranalyse. Es folgt die Festlegung der Ähnlichkeitsmaße und des Clusteranalyseverfahrens.

Nach Auswahl und Durchführung eines Verfahrens werden Kennzahlen zur Beurteilung der formalen Gültigkeit möglicher Clusterlösungen zusammengestellt. Anschließend wird eine erste inhaltliche Validierung

vorgenommen, um die Anzahl der möglichen Clusterlösungen weiter einzugrenzen. Die ausgewählten Clusterlösungen werden auf Stabilität geprüft.

Nach der finalen Auswahl der Clusterlösung wird untersucht, ob es notwendig ist, alle Cluster der ausgewählten Clusterlösung für die Simulation zu berücksichtigen. Schließlich wird aus jedem ausgewählten Cluster jeweils ein Tagesverlauf für die anschließende Simulation herangezogen. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden näher beschrieben.

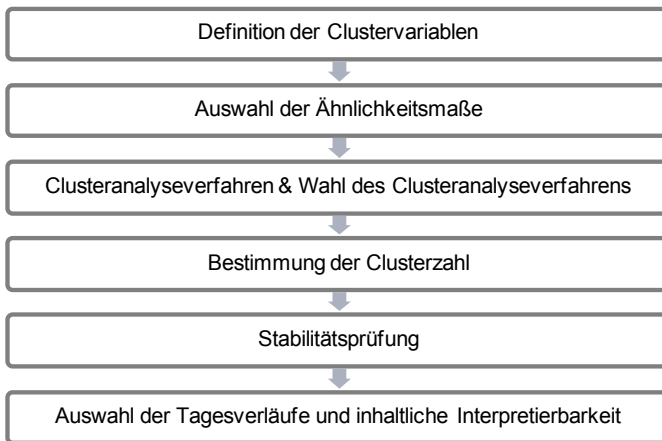


Abb. 26: Vorgehen zur Klassifizierung von Tagesverläufen

3.5.1 Definition der Clustervariablen

In 3.4.3 wurde festgelegt, dass die Clusterobjekte aus „Tagesverläufen“ bestehen. Für die Clusteranalyse sind Variablen erforderlich, die diese Tagesverläufe bezüglich des Mobilitätsverhaltens des Fahrers und bezüglich seiner Fahrweise beschreiben.

Bezüglich des Mobilitätsprofils sind Größen erforderlich, die zu einer Aussage über die Uhrzeit, Fahrdauer, Länge der Fahrstrecke und die Häufigkeit der Fahrten bzw. Touren beitragen. Um auf die Uhrzeit und die Fahrdauer zu gegebenen Uhrzeiten eingehen zu können, wurden die Variablen „gefahrte Minuten zwischen [...] und [...] Uhr“ eingeführt (vgl. Tab. 8). Im Hinblick auf das instationäre Verhalten wie Verbrennungsmotorwarmlauf oder Energiebedarf zur Klimatisierung werden Größen wie „Fahrdauer länger als 30 min“

definiert, also Kennwerte, die auf die Fahrtdauer einzelner Fahrten am Tag eingehen.

Im Hinblick auf die Fahrweise bieten die Clustervariablen nach ANDRÉ ET AL. [8] und ERDMANN [53] weitere Anhaltswerte, auch wenn diese zur Beschreibung von kürzeren Geschwindigkeitssequenzen verwendet werden (vgl. 3.4.1) und das in dieser Arbeit zu beschreibende Geschwindigkeitsprofil sich aus den Geschwindigkeitsprofilen aller Fahrten an einem Tag zusammensetzt.

Es werden die statistischen Kenngrößen wie der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung, der Maximalwert oder das 90. Perzentil auch im Rahmen dieser Arbeit herangezogen, um die Geschwindigkeit, die positive Beschleunigung und die negative Beschleunigung zu beschreiben (vgl. [8, 53]). Bei einer konstanten Abtastrate der Geschwindigkeitsaufzeichnung können diese Größen ohne weitere Umrechnungen gebildet werden. Weiterhin wird die Dauer der Stopp- und Konstantfahrphasen berechnet. Es wird ein Geschwindigkeitsbereich um die Geschwindigkeit des aktuellen Zeitschritts definiert, innerhalb dessen die Geschwindigkeit der darauffolgenden Zeitschritte liegen muss, um den Abschnitt als Konstantfahrt zu betrachten (vgl. [53]).

Es werden Variablen festgelegt, die die Ebene des Mobilitäts- und Fahrprofils miteinander verknüpfen wie beispielsweise „Fahrtdauer unter 60 km/h“ oder „Anzahl der Fahrten am Tag mit einer maximalen Geschwindigkeit unter 60 km/h“. Kennwerte bezüglich der Fahrbahnsteigung und der Straßenkrümmung wurden in Analogie zu den statistischen Werten für die Geschwindigkeit und Beschleunigung in Erwägung gezogen. Sie wurden jedoch nicht eingeführt, um die Anzahl der Variablen nicht weiter zu erhöhen.

Die für die Clusteranalyse untersuchten Variablen werden in Tab. 8 aufgelistet. Zwecks Übersichtlichkeit und zur Förderung der Clusterbildung wird in einem nächsten Schritt geprüft, ob die Anzahl der Variablen reduziert werden kann (vgl. [104]). Mittels bivariater Korrelation wurde die Korrelation paarweise zwischen den Variablen bestimmt und Paarungen mit einem Korrelationskoeffizienten größer als 0.9 identifiziert (vgl. [104]), um eine der Variablen aus diesen Paarungen für das weitere Vorgehen entfallen zu lassen. So konnte der Entfall der Variablen „90. Perzentil der positiven [und negativen] Beschleunigung am Tag“ begründet werden. Um die Anzahl der Variablen weiter zu senken, wurden nicht alle aufgeführten Variablen zur Beschreibung der Dauer und der (maximalen) Geschwindigkeit der Fahrten weiterverfolgt. Dies dient auch gleichzeitig dazu, dass die Objekteigenschaften bezüglich

Fahrdauer und Geschwindigkeit nicht zu stark repräsentiert werden (vgl. Empfehlung nach [21]).

Variablen / Kennwerte	Einheit
Fahrtstrecke am Tag	[km]
Anzahl der Fahrten am Tag	[-]
Anzahl der Touren am Tag mit Mindestabstellzeit 60 Min. ¹⁸	[-]
Anzahl der Touren am Tag mit Mindestabstellzeit 150 Min. ¹⁸	[-]
Fahrdauer am Tag	[Min]
Gefahrene Minuten zwischen 0 und 2 Uhr	[Min]
...	[Min]
Gefahrene Minuten zwischen 22 und 0 Uhr	[Min]
Anzahl der Fahrten am Tag kürzer 5 Min	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag länger als 5 Min aber kürzer als 30 Min	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag länger als 30 Min aber kürzer als 60 Min	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag länger 5 Min	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag länger 30 Min	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag länger 60 Min	[-]
Maximale Geschwindigkeit am Tag	[km/h]
Mittelwert der Geschwindigkeit am Tag	[km/h]
Standardabweichung der Geschwindigkeit am Tag	[km/h]
90. Perzentil der Geschwindigkeit am Tag	[km/h]
Fahrdauer unter 60 km/h	[Min]
Fahrdauer über 60 km/h aber unter 110 km/h	[Min]
Fahrdauer über 110 km/h aber unter 140 km/h	[Min]
Fahrdauer über 140 km/h	[Min]
Anzahl der Fahrten am Tag mit einer max. Geschwindigkeit unter 60 km/h	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag mit einer max. Geschwindigkeit über 60 km/h	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag mit einer max. Geschwindigkeit über 110 km/h	[-]
Anzahl der Fahrten am Tag mit einer max. Geschwindigkeit über 140 km/h	[-]
maximale positive Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
Mittelwert der positiven Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
Standardabweichung der positiven Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
90. Perzentil der positiven Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
maximale negative Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
Mittelwert der negativen Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
Standardabweichung der negativen Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
90. Perzentil der negativen Beschleunigung am Tag	[m/s ²]
Konstantfahranteil	[%]
Standanteil	[%]

Tab. 8: Untersuchte Variablen für die Clusteranalyse zur Beschreibung der täglichen Mobilitäts- und Fahrprofile; schwarz=für Clusteranalyse verwendet; grau=nicht weiter verwendet

¹⁸ vgl. „min. Ladedauer“ in Abb. 22

Die 45 Variablen wurden somit auf 34 reduziert. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Variablen besteht in der Faktorenanalyse, die Variablen gemäß ihrer korrelativen Beziehungen in voneinander unabhängige Gruppen einordnet (vgl. [21]). Diese wurde sowohl für die ursprüngliche als auch für die reduzierte Anzahl der Variablen angewandt. Faktoren mit einem Eigenwert kleiner als 1 wurden nicht betrachtet, da ihre Varianz bezogen auf die Gesamtvarianz aller Variablen kleiner ist als die Varianz der einzelnen Variablen (vgl. [21]). Um zu beurteilen, inwiefern eine Variable einen Faktor beeinflusst, werden die Faktorenladungen nach einer varianzmaximierenden Rotationstransformation angeschaut. BACHER ET AL. [13] empfehlen die Verwendung der resultierenden Faktoren statt den ursprünglichen Variablen, wenn diese auch im Späteren zur inhaltlichen Beurteilung der Clusterlösungen in Frage kommen. Diese Bedingung kann beispielsweise erfüllt werden, wenn jedem Faktor anhand der Variablen, die sie vereinen, ein inhaltlich aussagekräftiger Name zugeordnet werden kann. Im vorliegenden Fall konnte auch für Variablen, zwischen denen kein physikalisch erklärbarer Zusammenhang besteht, eine hohe Ladung auf denselben Faktor abgelesen werden. Es kann deshalb keine sinnvolle inhaltliche Beschreibung der Faktoren erfolgen und somit werden im Weiteren die 34 Variablen statt den neuen Faktoren für die Clusteranalyse verwendet.

Wird nach Durchführung der Clusteranalyse eine Anpassung des Clusteranalysemodells als sinnvoll erachtet, dann bietet es sich an, die Variablenauswahl anzupassen. Dabei kann das Vorgehen in mehreren Iterationen münden.

3.5.2 Auswahl der Ähnlichkeitsmaße

Um die Objekte bezüglich ihrer Ähnlichkeit klassifizieren zu können, muss ein Maß für diese Ähnlichkeit bestimmt werden. Die oben ausgewählten Variablen stellen quantitative Variablen bzw. intervallskalierte (teils verhältnisskalierte) Merkmale dar. Laut BACHER ET AL. [13] und BORTZ&SCHUSTER [21] wird für diese Art von Variablen das Ähnlichkeitsmaß über ein Distanzmaß beschrieben. Wenn die Merkmale gleiche Mittelwerte und Streuung aufweisen, dann kann auch die Produkt-Momenten-Korrelation zur Beschreibung der Ähnlichkeit von Profilverläufen unterschiedlicher Objekte herangezogen werden (vgl. [21]).

Vier Distanzmaße können mit Hilfe der Minkowski-Metrik verallgemeinert nach Gleichung (6) dargestellt werden, um die Distanz d zwischen zwei Objekten m und m' mit den Variablen i zu beschreiben (vgl. [13]).

$$d(q,r)_{m,m'} = \left[\sum_i |x_{mi} - x_{m'i}|^r \right]^{1/q} \quad (6)$$

Die Metrikparameter q und r lauten für die unterschiedlichen Distanzmaße wie folgt:

$r = 1$ und $q = 1$	für die City-Block-Metrik
$r = 2$ und $q = 2$	für die euklidische Distanz
$r = 2$ und $q = 1$	für die quadrierte euklidische Distanz
$r = \infty$ und $q = \infty$	für die Chebyshev-Distanz

Die Wahl des Distanzmaßes wird auch von dem gewählten Clusteranalyseverfahren beeinflusst. Für das WARD- und k-Means-Verfahren wird die quadrierte euklidische Distanz verwendet (vgl. [13]). Um die Berechnung der Distanzen von den unterschiedlichen Einheiten und somit Skalen der Merkmale nicht fälschlicherweise zu beeinflussen, werden die Merkmale über die Objekte nach Gleichung (7) z-transformiert (vgl. [21]).

$$z_{mi} = \frac{x_{mi} - \bar{x}_i}{s_i} \quad (7)$$

mit

z_{mi}	z-transformierter Wert der Variable i des Objektes m
x_{mi}	Wert der Variable i des Objektes m
\bar{x}_i	Mittelwert der Variable i
s_i	Standardabweichung der Variable i

3.5.3 Clusterverfahren

Für die Kategorisierung von Clusteranalyseverfahren existieren je nach Quelle unterschiedliche Möglichkeiten. BORTZ&SCHUSTER [21] unterteilen die Clusteranalyseverfahren in *hierarchische* und *nicht-hierarchische* Verfahren.

Hierarchische Verfahren

Das in der Literatur häufig verwendete hierarchische Verfahren ist die agglomerative Clusteranalyse. Dabei wird zu Beginn jedem Objekt ein eigener Cluster zugewiesen. Es werden alle Cluster paarweise mit Hilfe der gewählten Ähnlichkeitsmaße verglichen. Die Cluster mit der größten Ähnlichkeit (der kleinsten Distanz) werden zu einem Cluster fusioniert. In der nächsten Iteration werden die verbliebenen Cluster miteinander verglichen und die mit der geringsten Distanz fusioniert. So nimmt die Anzahl der Cluster mit jeder Iteration ab (vgl. [21]). Das Gegenteil der agglomerativen Clusteranalyse stellt die divisive Clusteranalyse dar. Dabei wird mit einem Gesamtcluster begonnen, welches schrittweise in Teilcluster aufgeteilt wird (vgl. [21]).

Die agglomerativen hierarchischen Verfahren können im Hinblick auf die Fusionskriterien wie folgt kategorisiert werden:

- *„Single-Linkage“*:
Es bezeichnet das Fusionskriterium, nachdem diejenigen Cluster miteinander vereint werden, die die zueinander am nächsten liegenden Nachbarobjekte besitzen („nearest neighbour“) (vgl. [21]).
- *Complete-Linkage*:
Für dieses Fusionskriterium werden die Cluster ebenfalls paarweise verglichen und die Distanz der voneinander am entferntesten liegenden Objekte („furthest neighbours“) als „Maximaldistanz“ für die Fusion herangezogen. Es werden die Cluster fusioniert, deren Maximaldistanz minimal ist (vgl. [21]).
- *Average-Linkage*:
Für dieses Fusionskriterium werden die Cluster ebenfalls paarweise verglichen und dabei der Durchschnitt aller Objektdistanzen ermittelt („group average“) und schließlich die Cluster mit der geringsten Durchschnittsdistanz fusioniert (vgl. [21]).

- *Median- und Zentroid-Verfahren:*
Für dieses Fusionskriterium werden diejenigen Cluster fusioniert, deren quadrierter, euklidischer Zentroidenabstand¹⁹ am geringsten ist (vgl. [21]).
- *WARD -Verfahren* (auch Minimum-Varianz-Methode genannt):
Dieses Verfahren fusioniert schrittweise diejenigen Cluster, mit deren Fusion die geringste Erhöhung der Fehlerquadratsumme einhergeht (vgl. [21]).

Nicht-hierarchische Verfahren

BORTZ&SCHUSTER [21] listen als nicht-hierarchische Verfahren das *partitionierende Verfahren* auf. Das Vorgehen dieses Verfahrens kann wie folgt zusammengefasst werden (vgl. [21]):

1. Es wird die Anzahl k der Cluster vorgegeben.
2. Für die vorgegebenen k Cluster werden die Clusterzentroide berechnet.
3. Für jedes Objekt wird geprüft, ob dessen Verschiebung in ein anderes Cluster zur Verbesserung der Aufteilung gemäß dem gewählten Optimierungskriterium führt.

Die Schritte 2 und 3 werden wiederholt bis sich die Aufteilung nicht verbessern lässt.

Als Optimierungskriterien führen BORTZ&SCHUSTER [21] das Varianzkriterium, das Determinantenkriterium sowie das Spur-Kriterium auf. Für Schritt 1 können die Anfangspartitionen für die k Cluster per Zufall oder nach vorgegebenen Zentroiden oder nach k ausgewählten Objekten erzeugt werden.

k-Means

Eine besondere Variante dieses Verfahrens ist das k-Means-Verfahren (vgl. [96]). Dabei wird im Schritt 3 ein Objekt eines Clusters demjenigen Cluster zugeordnet, zu dessen Zentroid die euklidische Distanz am geringsten ist. Das Ergebnis dieses Verfahrens kann in Abhängigkeit der Anfangspartitionen stark variieren. Jedoch kann die Zuordnung eines Objektes zu einem Cluster

¹⁹ Der Clusterzentroid entspricht den durchschnittlichen Merkmalsausprägungen aller Objekte in einem Cluster. Beim Median-Verfahren wird bei der Fusion zweier Cluster der neue Clusterzentroid über die durchschnittlichen Merkmalsausprägungen der Zentroide der fusionierten Cluster bestimmt (vgl. [21]).

im Gegensatz zu den hierarchischen Verfahren im Zuge der iterativen Optimierung noch geändert werden.

BANDYOPADHYAY&SAHA [15] führen das *K-Medoid-* und *Fuzzy-C-Means-Verfahren* als weitere partitionierende Verfahren („partitional Clustering“) auf. Diese und die folgenden nicht-hierarchischen Clusteranalyseverfahren (vgl. [13, 15]) werden der angestrebten Vollständigkeit halber aufgelistet, jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht:

- *Probabilistische Clusteranalyseverfahren*
(distribution based clustering technique)
- *Dichtebasierte räumliche Clusteranalyseverfahren*
(Density based clustering technique)
- *Modellbasierte Clusteranalyseverfahren*
(Model based clustering technique) basierend auf Entscheidungsbäumen und neuronalen Netzwerken
- *Grid based Clusteranalyseverfahren*
(grid based clustering technique)

Wahl der Clusterverfahren

Es existieren in der Literatur Bewertungen und Empfehlungen zum Einsatz der unterschiedlichen Clusteranalyseverfahren. BACHER ET AL. [13] empfehlen für die objektorientierte Clusteranalyse die WARD-Methode und für größere Datensätze das k-Means-Verfahren. BORTZ&SCHUSTER [21] empfehlen die WARD-Methode um Anfangspartitionen für das k-Means-Verfahren zu erzeugen und anschließend die Anwendung der k-Means-Methode, um die Clusterzuordnung zu optimieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser zweistufige Ansatz aus dem WARD- und k-Means-Verfahren untersucht. Dabei werden die zwei Methoden gleichzeitig zur Stabilitätsprüfung der ausgewählten Clusterlösung bezüglich des angewendeten Verfahrens herangezogen. Aus der Wahl des Clusteranalyseverfahrens ergibt sich in diesem Fall auch die Wahl für das Ähnlichkeitsmaß, da sowohl das WARD- als auch das k-Means-Verfahren quadrierte euklidische Distanzen benötigen.

Es wurde auch die *Two-Step-Clusteranalyse*²⁰ als Beispiel für ein probabilistisches Verfahren im Rahmen dieser Arbeit geprüft. Nach der inhaltlichen

²⁰ vgl. [136]

Betrachtung wurden diese jedoch nicht weiterverfolgt. Sie lieferte als optimale Lösung zwei Cluster. Dies würde bedeuten, dass es nur zwei unterschiedliche Gruppen von Tagesverläufen im Hinblick auf das Mobilitäts- und Geschwindigkeitsprofil gibt. Nach Sichtung der Daten (34 Fahrzeuge und 900.000 km, 9583 Tage) erschien dies nicht plausibel.

3.5.4 Bestimmung der Clusterzahl

Es existieren verschiedene Kennzahlen, um Clusterlösungen zu bewerten. Im Hinblick auf die Anzahl der Cluster wird in der englischsprachigen Literatur oft vom Abbruchkriterium („Stopping rules“) gesprochen (vgl. [102]). Diese Bezeichnung kann im Zuge der agglomerativen Clusteranalyse nachvollzogen werden, in dem die Fusionierung beim Erreichen eines Optimums einer ausgewählten Kennzahl abgebrochen werden kann.

Tab. 9 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Kriterien zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl. Die graphischen Bewertungshilfen Dendrogramm und Struktogramm sind im Anhang B dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass die Bestimmung der Clusteranzahl über das Dendrogramm aufgrund der Skalierung der Distanzen und Bestimmung der Grenzdistanz unterschiedlich ausfallen kann (siehe Anhang B). In [101, 102] wurden 30 Abbruchkriterien untersucht. Für diese Arbeit wurden lediglich die vier am besten bewerteten Abbruchkriterien nach MILLIGAN&COOPER [102] übernommen. Tab. 9 zeigt diese Kriterien, sowie die dazugehörige Anzahl der Cluster am Beispiel des im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Datensatzes. Es ist durchgängig zu erkennen, dass mittels der Abbruchkriterien eine „richtige“ Clusteranzahl nicht eindeutig begründet werden kann. Vier Kriterien können für die Argumentation der Clusterlösung mit zwei Clustern herangezogen werden. Drei Kriterien können für die Argumentation von 4 und 9 Clustern herangezogen werden. Zwei Kriterien begründen formal die Wahl der Clusterlösung mit 23 bzw. 37 Clustern. Zwar ist der erste deutliche Sprung in der Zunahme des *Verschmelzungsniveaus*²¹ bei 37 Clustern graphisch nicht zu erkennen (siehe Anhang B), aus der tabellarischen Darstellung geht jedoch hervor, dass dieser

²¹ Das Verschmelzungsniveau (Unähnlichkeitsniveau) für den *i*-ten Fusionsschritt entspricht beim WARD-Verfahren dem doppelten Zuwachs der Streuungsquadratsumme (der Fehlerquadratsumme) in den Clustern in diesem Fusionsschritt (vgl. [13]).

Schritt den ersten im Verhältnis zu dem jeweiligen Verschmelzungsniveau großen Sprung in der Agglomeration darstellt.

Kriterien zur Bewertung der Clusterlösung	Anzahl der Cluster gemäß Kriterium
Aufgeführte Kriterien nach BORTZ&SCHUSTER [21]:	
Dendrogramm	23, 37
Struktogramm	3
Aufgeführte Kriterien nach BACHER ET AL. [13]:	
Maximaler VRC-Wert nach CALIŃSKI&HARABASZ [26]	2
Verschmelzungszunahme	2, 4, 7, 9, 12, 14, 16, 23, 28, 37
PRE (Proportionale Fehlerverbesserung)	2
PRE-Abfall in Prozent	9
z-Wert	9
Aufgeführtes Kriterium nach MOOI&SARSTEDT [104]:	
ω_k	3
Die ersten vier Kriterien aufgeführt nach MILLIGAN&COOPER [102]:	
Maximaler VRC-Wert siehe oben	2
Abbruchkriterium nach DUDA&HART [37]	8
C-Index nach HUBERT&LEVIN (vgl. [28, 74, 102])	4
Gamma-Index nach BAKER&HUBERT (vgl. [14, 65, 101, 102])	4

Tab. 9: Zusammenstellung von Abbruchkriterien zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl

BACHER ET AL. [13] listen in einem Anwendungsbeispiel u. a. die „Anzahl der Cluster“ und die „Anzahl der Objekte im kleinsten Cluster“ als weitere Kriterien zur objektiven Beurteilung²² bzw. zum Vergleich von Clusterlösungen auf. Auch die Einbeziehung dieser Kriterien konnte eine weitere sinnvolle Eingrenzung der Clusterlösungen nicht erwirken. Für die Wahl der „richtigen“ Clusteranzahl wird deshalb eine erste inhaltliche Betrachtung geführt.

Erste inhaltliche Betrachtung

Im Zuge der Verarbeitung der Daten ist an Auszügen klar zu erkennen, wie unterschiedlich die Mobilitätsprofile und die Fahrweisen sein können. Es ist daher schwer vorstellbar, dass bereits eine geringe Anzahl von Clustern ausreicht, um innerhalb der Cluster eine hohe Homogenität zu erreichen. Somit wurden die Clusterlösungen aus Tab. 9, die eine geringe Clusteranzahl empfehlen und die nur mit einem Kriterium begründet werden können, verworfen.

²² vgl. „formale Gültigkeit“ nach BACHER ET AL. [13]

Insgesamt bleiben die Clusterlösungen mit 23 und 37 Clustern übrig. Die Clusterzentren dieser zwei Clusterlösungen werden in Abb. 27 bzw. Abb. 28 anhand ihrer z-transformierten Merkmalausprägungen dargestellt, um eventuelle deutliche Veränderungen graphisch zu erkennen. Im Hinblick auf das Merkmal „Konstantfahranteil“ und „Zeitanteil der Fahrtdauer über 140 km/h“ ist eine deutliche Veränderung zu erkennen (vgl. markierte Bereiche in Abb. 27 bzw. Abb. 28). Ein markanter Zentroid der 37-Cluster-Lösung fehlt in der 23-Cluster-Lösung. Die Objekte aus den betroffenen Clustern sind bei der 23-Cluster-Lösung anderen Clustern zugeordnet und verschieben deren Clusterzentroid. Da im weiteren Vorgehen nach Festlegung der Clusterlösung die am nächsten zum jeweiligen Clusterzentrum liegenden Objekte für die Simulation ausgewählt werden, kann dies zu einer Verschiebung des Clusterzentrums zu einer unterschiedlichen Profilauswahl führen. Aus diesem Grund wird die Clusterlösung mit 37-Clustern weiterverfolgt. Es werden im Späteren jedoch noch Ansätze untersucht, um die Anzahl der zu simulierenden Profile zu reduzieren.

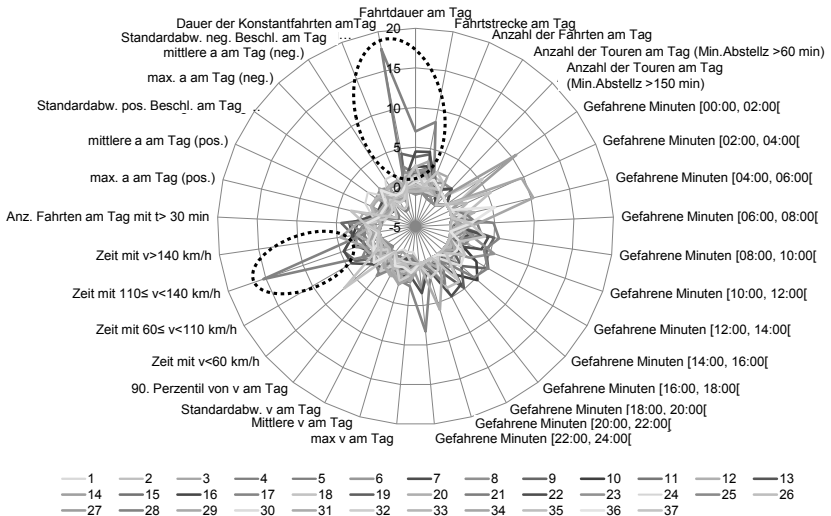


Abb. 27: Darstellung der Clusterzentroide für die Lösung mit 37 Clustern anhand ihrer z-transformierten Merkmalausprägungen; vgl. ausgewählte Variablen in Tab. 8

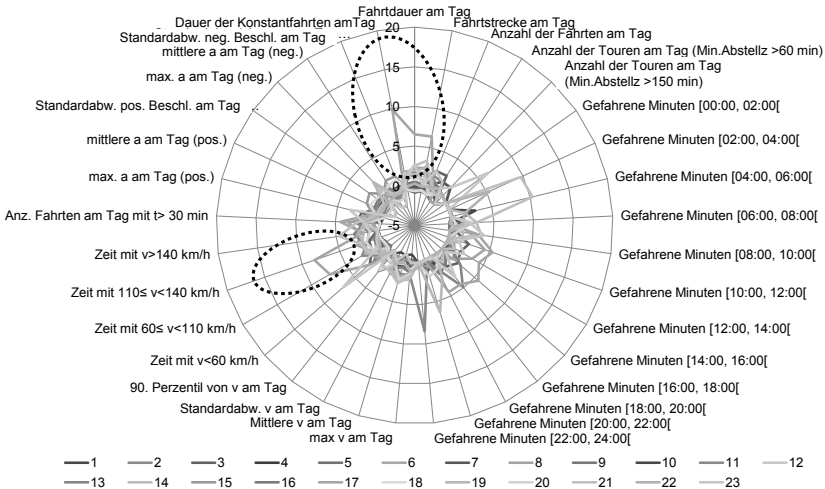


Abb. 28: Darstellung der Clusterzentroide für die Lösung mit 23 Clustern anhand ihrer z-transformierten Merkmalausprägungen; vgl. ausgewählte Variablen in Tab. 8

3.5.5 Stabilitätsprüfung

Unter *Stabilitätsprüfung* wird die Untersuchung des Einflusses geringfügiger Modifikationen der Daten oder des clusteranalytischen Vorgehens auf die ausgewählte Clusterlösung verstanden (vgl. [13]). Eine Lösung kann als stabil angesehen werden, wenn geringfügige Modifikationen die Clusterzahl, die Clusterzentren oder die Zuordnung der Objekte zu den Clustern nicht verändern (vgl. [13]). Geringfügige Modifikationen können über Veränderung der Variablenauswahl, der Objektauswahl oder den Modellspezifikationen (Modell im Sinne des clusteranalytischen Vorgehens) herbeigeführt werden (vgl. [13]).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Auswirkung der Objektauswahl und der Wahl des Clusterverfahrens auf die Objektzuordnungen untersucht.

Letzteres wird in Verbindung mit der Optimierung der durch das WARD-Verfahren ermittelten Clusterlösung mittels des k-Means-Verfahrens untersucht. Die Stabilitätsprüfung bezüglich der Veränderung der Objektauswahl wird nach dem folgenden Vorgehen nach BORTZ&SCHUSTER [21] durchgeführt:

1. Die untersuchte Objektmenge – Menge der gefahrenen Tage aus der Stichprobe – wird in zwei gleich große Mengen *A* und *B* aufgeteilt.

2. Für A und B wird jeweils die Clusteranalyse [für die vorgegebene Clusteranzahl] durchgeführt.
3. Die Objekte aus A werden den Clustern aus B zugeordnet, sodass neue Cluster A^* entstehen. Analog werden die Objekte aus B den Clustern aus A zugeordnet um neue Cluster B^* zu bilden (Doppelkreuzvalidierung).
4. Es wird überprüft inwieweit die Clusterlösungen für A und die Cluster A^* bzw. die Clusterlösungen für B und die Cluster B^* bezüglich der Clusterzuordnung übereinstimmen.

Für die Zuordnungsregeln in Schritt 3 empfiehlt BORTZ&SCHUSTER [21] die „Nearest-Neighbour“-Regel (NN) für das WARD-Verfahren. Demnach wird für ein Objekt m aus B das Objekt m' aus A gesucht, zu der die euklidische Distanz am geringsten ist. Das Objekt m wird schließlich demjenigen Cluster der Clusterlösung für A zugeordnet zu der m' gehört. Für die Distanzberechnung kann Gleichung (6) mit $q = 2$ und $r = 2$ verwendet werden.

Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse nach der „Nearest-Centroid“-Regel (NC) aufgeführt. Für die Überprüfung der Übereinstimmung werden nach [21] der Rand-Index sowie der korrigierte Rand-Index verwendet. Der Rand-Index wird wie folgt berechnet (vgl. [21]):

$$RI = (a + d)/(a + b + c + d) \quad (8)$$

Dabei steht a für die Anzahl der Paarlinge (Objektpaare in A) die in A und gemäß der Clusterlösung A^* jeweils demselben Cluster zugeordnet werden. b und c stehen für die Anzahl der Paarlinge die entweder in A oder gemäß A^* jeweils demselben Cluster zugeordnet werden. d steht für die Anzahl der Paarlinge die sowohl in A als auch nach A^* jeweils unterschiedlichen Clustern zugeordnet werden. Der korrigierte Rand-Index wird wie folgt berechnet (vgl. [21]):

$$RI_c = (a + d - n_c)/(a + b + c + d - n_c) \quad (9)$$

mit

$$n_c = \frac{n \cdot (n^2 + 1) - (n + 1) \cdot \sum_i n_i^2 - (n + 1) \cdot \sum_j n_j^2}{2 \cdot (n - 1)} \tag{10}$$

$$+ \frac{2 \cdot \sum_i \sum_j n_i^2 \cdot n_j^2 / n}{2 \cdot (n - 1)}$$

n steht für die Anzahl der Objekte. n_i bezeichnet die Spaltensumme und n_j die Zeilensumme der Kontingenztabelle, die im Zuge der Zuordnung der Objekte in die Cluster der Clusterlösung für A und der Cluster aus A^* erstellt wird.

Tab. 10 stellt die Rand-Indizes und die korrigierten Randindizes dar. Da die Clusterlösung, die mit dem WARD-Verfahren bestimmt wurde, mittels des k-Means-Verfahrens optimiert werden soll, wurde die Stabilitätsprüfung sowohl für die Clusterlösungen nach WARD als auch für die Clusterlösungen nach k-Means für die Teil-Objektmengen A und B durchgeführt.

BACHER ET AL. [13] nennen als Schwellenwerte für den Rand-Index 0,700 und für den korrigierten Rand-Index 0,224. BORTZ&SCHUSTER [21] nennen als Schwellenwert 0,10 für den korrigierten Rand-Index. Oberhalb dieser Schwellen werden die Übereinstimmungen für überzufällig befunden. Das heißt, die ermittelte Clusterlösung liegt nicht mehr im Zufallsbereich.

		WARD		k-Means	
		$A \leftrightarrow A^*$	$B \leftrightarrow B^*$	$A \leftrightarrow A^*$	$B \leftrightarrow B^*$
NN	Rand-Index	0,9248	0,9530	0,9415	0,9394
	korr. Rand-Index	0,2726	0,2720	0,4270	0,4124
NC	Rand-Index	0,9283	0,9305	0,9582	0,9588
	korr. Rand-Index	0,3042	0,3285	0,5775	0,5781

Tab. 10: Rand-Index zur Bewertung der Übereinstimmung der Clusterlösungen nach Modifikation der Objektauswahl

Eine weitere Möglichkeit der Stabilitätsprüfung bezüglich der Objektauswahl besteht nach BACHER ET AL. [13] darin, die Clusterzentren der nach Schritt 2 erhaltenen Clusterlösungen für Teilmenge A und B als Objekte für eine Clusteranalyse nach dem Mittelwertverfahren (Weighted-Average-Linkage) zu

verwenden. Als Ergebnis der Clusteranalyse sollten zunächst jeweils ein Clusterzentrum der Clusterlösung für die Teilmenge A und B paarweise verschmolzen werden (vgl. [13]). Auch nach diesem Vorgehen kann die Stabilität der Lösung bezüglich der Objektauswahl am vorliegenden Beispiel bestätigt werden (Siehe Anhang B, Abb. 57).

Für die Bewertung der Stabilität der Objektzuordnung im Hinblick auf das verwendete Clusteranalyseverfahren wurden ebenfalls der Rand-Index und der korrigierte Rand-Index verwendet. Verglichen wurden die Clusterlösungen, die für alle Objekte nach dem WARD- und nach dem k-Means-Verfahren ermittelt wurden. Der Rand-Index beträgt $RI = 0,9369$ und der korrigierte Rand-Index $RI_c = 0,3667$. Somit kann auch bezüglich des verwendeten Verfahrens von einer überzufälligen Lösung ausgegangen werden.

Der Rand-Index kann auch für die Bewertung der formalen Gültigkeit zum Vergleich unterschiedlicher Clusterlösungen verwendet werden. Aus Tab. 10 kann entnommen werden, dass für die Clusterlösung nach Durchführung des k-Means-Verfahrens ein höherer Rand-Index (vgl. Tab. 10) vorliegt, als für die Clusterlösung nach WARD.

Neben der Literatur-basierten Entscheidung spricht auch dieser Wert für die Verwendung des k-Means-Verfahrens, das wie bereits erwähnt als Optimierung des Ergebnisses des WARD-Verfahrens durchgeführt wurde. Im vorliegenden Beispiel dienten als Startwert für das k-Means-Verfahren die Clusterzentroiden der 37-Cluster-Lösung aus dem WARD-Verfahren.

3.5.6 Auswahl der Tagesverläufe und inhaltliche Interpretierbarkeit

Nachdem eine Clusterlösung nach formalen Kriterien, einer ersten inhaltlichen Betrachtung und nach Prüfung auf Stabilität ausgewählt worden ist, sollen die Cluster dieser Clusterlösung im Detail angeschaut werden.

Zu jedem Objekt der Clusteranalyse können über die eindeutige Zuordnung zu den Originaldaten die Uhrzeiten und Fahrdauer der einzelnen Fahrten und die gefahrenen Geschwindigkeitsprofile extrahiert werden (vgl. Abb. 29).

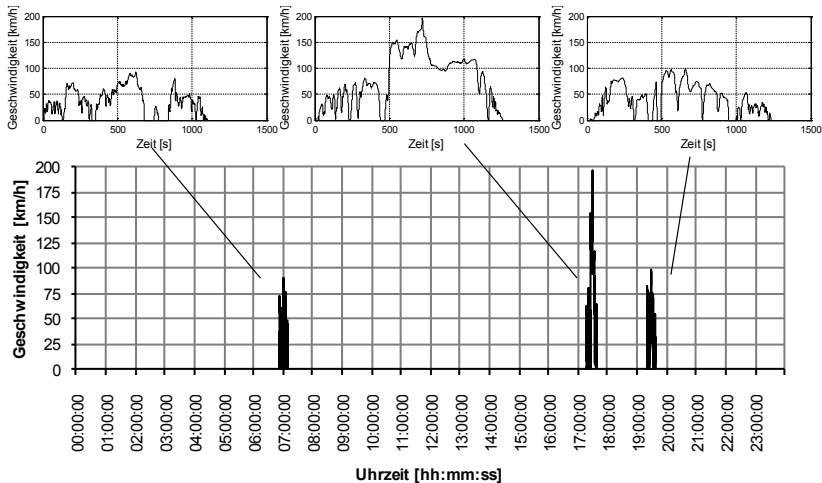


Abb. 29: Beispiel für das extrahierte Fahrten- bzw. Geschwindigkeitsprofil eines Tagesverlaufs; Objekt am nächsten zum Zentroid des Clusters Nr. 13 der 37-Clusterlösung.

Wie zur Einführung des Kapitels kurz beschrieben, soll für die Simulation nur ein Tagesverlauf je Cluster verwendet werden. Hierzu werden diejenigen Objekte ausgewählt, die am nächsten – im Sinne des euklidischen Distanzmaßes – zum jeweils dazugehörenden Clusterzentroiden liegen. Weiterhin wird jedem Cluster die Anzahl ihrer Objekte (Tage) zugeordnet. Diese Information wird später verwendet, um die simulierten Verbrauchswerte der ausgewählten Profile zu gewichten.

Zunächst stellt sich die Frage, inwiefern diese extrahierten Tagesverläufe die untersuchte Stichprobe repräsentieren.

Das Ziel des Vorgehens war, Mobilitäts- und Fahrprofile herzuleiten, da diese den Kraftstoffverbrauch und den elektrischen Energiebedarf beeinflussen. Um zu prüfen, inwiefern das Fahrprofil der ausgewählten Tagesverläufe dem der Stichprobe entspricht, wird für die Geschwindigkeitsprofile der Tagesverläufe die Verweildauer in definierten Geschwindigkeit-Beschleunigungsklassen dargestellt. Die absolute Häufigkeit in den Geschwindigkeit-Beschleunigungsklassen eines Fahrprofils wird entsprechend der Anzahl der Objekte in dem zum Fahrprofil gehörenden Cluster multipliziert. Die aus den

zusammengeführten Geschwindigkeit-Beschleunigungs-Häufigkeitsverteilungen ermittelte relative Häufigkeitsverteilung wird der relativen Häufigkeitsverteilung der untersuchten Stichprobe gegenübergestellt (vgl. Abb. 30).

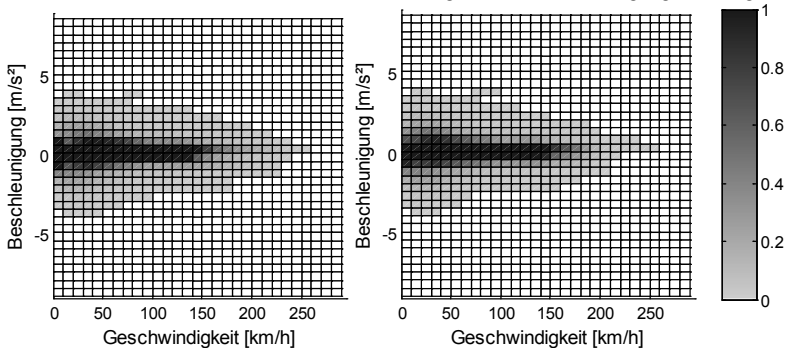


Abb. 30: Vergleich der relativen Verweildauer [%] je Geschwindigkeits-Beschleunigungsklasse; links: alle Tage der Stichprobe; rechts: Tagesverläufe aus der Clusteranalyse gewichtet nach Anzahl der Objekte je Cluster

Dabei kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Der Mittelwert der Geschwindigkeit der gewichteten Tagesverläufe beträgt 65,9 km/h gegenüber dem Mittelwert von 66,8 km/h der untersuchten Stichprobe. Im Gegensatz zu den beschriebenen Markov-Kettenansätzen kann keine Übereinstimmung lediglich aufgrund der Anwendung der „Clusteranalyse“ im Voraus garantiert werden. Die Güte der Übereinstimmung wird u. a. von den gewählten Clustervariablen beeinflusst. Im Falle gravierender Unterschiede zwischen den ausgewählten Profilen und der Stichprobe kann geprüft werden, inwiefern das Clusteranalysenmodell bezüglich der Clustervariablen und der Clusterlösungsauswahl angepasst bzw. verbessert werden kann (vgl. [13]).

Analog zu der Geschwindigkeits-Beschleunigungsverteilung werden auch die gefahrenen Minuten in Abhängigkeit von der Uhrzeit für die Tagesverläufe aus der Clusteranalyse und für die untersuchte Stichprobe dargestellt (vgl. Abb. 31). Dabei kann eine gute Übereinstimmung der Verläufe bis 8 Uhr morgens und zwischen 16 Uhr und 20 Uhr abgelesen werden. Dazwischen betragen die Abweichungen bis zu ca. zwei Prozentpunkte.

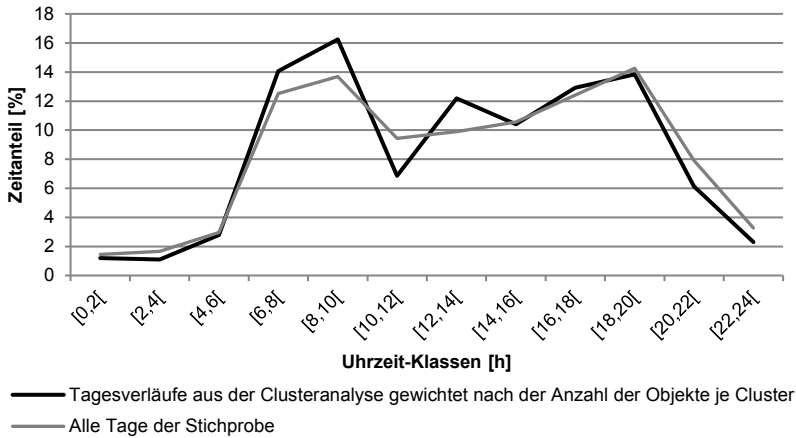


Abb. 31: Vergleich der gefahrenen Minuten in Abhängigkeit von der Uhrzeit (auf die Gesamtfahrdauer normierte Darstellung)

Wird keine Anpassung des Clusteranalysenmodells beispielsweise bezüglich der Clustervariablen oder des Verfahrens für erforderlich erachtet, dann kann das Vorgehen fortgesetzt werden.

Dabei wird im Hinblick auf die Verwendung der Tagesverläufe als Eingangswerte für die Simulationen geprüft, ob es wirklich notwendig ist alle Tagesverläufe zu verwenden. Über die Anzahl der Objekte (Tage) in einem Cluster bezogen auf die Anzahl aller Objekte (Tage) der Stichprobe ergibt sich die relative Häufigkeitsverteilung der Objekte über die jeweiligen Cluster. Wie bereits oben erwähnt kann dies zur Gewichtung der späteren Ergebnisse verwendet werden. An dieser Stelle wird jedoch geprüft, ob es Cluster gibt, deren relative Häufigkeit bezüglich der Anzahl der Tage gering ist. Dabei wurden neun Cluster mit einer relativen Häufigkeit kleiner als ein Prozent identifiziert. Diese wurden für die Simulation nicht weiter beachtet. Den übrig gebliebenen Clustern werden über 96 % der Tage zugeordnet. Im Hinblick auf die Simulation wird mit dem Verlust von ca. 4 % der Tage der Simulationsaufwand um 25 % reduziert.

Nachdem die zu simulierenden Cluster ausgewählt wurden, wurden die für die Simulation ausgewählten Tagesverläufe je Cluster (Objekt am nächsten zum jeweiligen Clusterzentroid, siehe oben) in der obigen Darstellungsform

(vgl. Abb. 29) angeschaut. Um die Profile inhaltlich deuten zu können, wurde jeder Tagesverlauf mit einer Bezeichnung versehen, die bezüglich des Mobilitätsprofils und der Fahrweise eine kurze verbale Zusammenfassung bietet, ggf. um einen möglichen Anwendungsfall ergänzt (siehe Tab. 11).

Aus Tab. 11 ist zu erkennen, dass aus Sicht des Mobilitätsprofils viele Varianten von Pendlerfahrten existieren. Da die Stichprobe der Fahrer zum großen Teil dieselbe berufliche Gruppe widerspiegelt, wurde diese Art von Fahrten erwartet. Die Pendlerfahrten unterscheiden sich in erster Linie in der Fahrweise (Geschwindigkeitsprofil), in der Fahrdauer, aber auch in den Uhrzeiten, zu denen die Fahrten stattfinden. Da das Geschwindigkeitsprofil den Verbrauch maßgeblich über die Fahrwiderstände beeinflussen kann (Siehe Kap. 2.3.3), die Uhrzeit einen Einfluss auf die Randbedingungen der Fahrt hat und die Fahrdauer den Anteil an instationären Vorgängen wie beispielsweise das Abkühlen des Innenraums beeinflusst, werden die Cluster mit unterschiedlichen Pendlerfahrten auch als gerechtfertigt angesehen.

Lfd. Cluster-Nr.	Cluster-Nr.	Clusterbezeichnung mit möglichen Anwendungsfällen vor Kunde
1	1	Zwei kurze Fahrten am Vormittag; Stadt
2	2	Viele Fahrten am Tag; Stop&Go, Stadt, Autobahn, Landstraße, mäßige Geschwindigkeit
3	3	Viele Fahrten am Tag (mehr als Cluster 2); Stop&Go, Stadt, Autobahn, Landstraße, mäßige Geschwindigkeit (schneller als Cluster 2)
4	4	Wenige Fahrten gegen Mittag und am frühen Nachmittag; Stadt, Landstraße
5	5	Zwei kurze Pendlerfahrten (kürzer als 10 Min.), Landstraße
6	6	Eine Fahrt am Morgen, mehrere Fahrten über den Abend verteilt, Landstraße, Autobahn
7	7	Wenige kurze Fahrten über den Tag verteilt; Landstraße, Autobahn
8	8	Viele Fahrten am Tag, mit hohem Landstraßen- und Autobahnanteil und 2-3 kurze Stadtfahrten
9	10	Mehrere Autobahnfahrten am Tag überwiegend am frühen Nachmittag (Urlaub / Dienstreise)
10	11	Eine kurze Fahrt am Tag; Landstraße
11	12	Zwei Pendlerfahrten je 30 min; Stadt, Landstraße, Autobahn
12	13	drei kurze Pendlerfahrten am Tag, teils mit sehr schnellem Autobahnanteil
13	14	Viele sehr kurze Fahrten; Stadt, Landstraße

Lfd. Cluster-Nr.	Cluster-Nr.	Clusterbezeichnung mit möglichen Anwendungsfällen vor Kunde
14	15	Drei kurze Pendlerfahrten am Tag, Landstraße
15	16	Mehrere Fahrten über den Tag verteilt; kurze Stadtfahrten, Autobahn
16	18	Mehrere kurze Fahrten in der Nacht bzw. am frühen Morgen; Landstraße, zügige Autobahnfahrt
17	19	Kurze Stadt/Landstraßenfahrten am Tag, 3,5 Stunden "Anreise/Rückreise" am Abend ("Urlaub")
18	20	Tägliche Pendlerfahrt über Autobahn mit kurzem Stopp am Abend ("Einkauf")
19	21	zwei lange und schnelle Autobahnfahrten (Vormittag; "Urlaub/Dienstreise/Langstreckenpendler mit Anreise am Morgen")
20	23	zwei kurze Landstraßenfahrten und eine lange und schnelle Autobahnfahrt mit Pause ("Urlaub/Ausflug")
21	24	Kurze Pendlerfahrten; Landstraße (teils dynamisch)
22	25	Eine kurze Fahrt am Tag; Landstraße, Autobahn
23	26	Pendler mit Langstreckenweg am Abend ("Freitagabend-Heimreise" ggf. mit Tanken am Nachmittag)
24	29	Pendlerstrecke mit kurzem Zwischenstopp am Morgen
25	30	Eine kurze Fahrt am Morgen und längere Fahrten am Nachmittag; Stadt, Landstraße, Autobahn
26	31	Pendlerstrecke mit zus. langer Autobahnfahrt am Abend (Langstreckenpendler/ Urlaub nach der Arbeit)
27	32	Pendler mit 1 Stunde Autobahnfahrt vor und nach der Arbeit
28	33	Kurze Fahrten in der Nacht bzw. gegen Mittag; Autobahn, dynamisch

Tab. 11: Für die Simulation ausgewählte Tagesverläufe inklusive Cluster-Zuordnung und Beschreibung

Bewertung

Die Klassifizierung von Tagesverläufen (tägliche Mobilitäts- und Fahrprofile) mittels Clusteranalyse und die anschließende Auswahl eines Tagesverlaufs je Cluster ermöglicht es, für die anschließenden Simulationen Geschwindigkeitsprofile (und somit auch Fahrtdauer- und Fahrstreckenvorgaben) aus den aufgezeichneten Nutzerprofilen herzuleiten. Über das in 3.4.3 vorgestellte rekursive Vorgehen kann nach Annahme der Anfangsbedingungen für die jeweils erste Fahrt am Tag die Randbedingung der folgenden Fahrten mittels Simulation hergeleitet werden. Somit können auch Einflüsse von instationären Vorgängen

wie die Innenraumklimatisierung berücksichtigt werden (vgl. Tab. 12). Weiterhin erlaubt das Vorgehen, dass bei Bedarf einzelne Cluster gesondert betrachtet werden, falls diesen eine besondere Bedeutung zugewiesen wird (Szenarienbetrachtung). Dafür ist es (wie bereits oben erwähnt) im Vergleich zu Ansätzen, die auf der Grundidee von Markov-Ketten beruhen, nicht zwingend gegeben, dass die mittels Clusteranalyse ermittelten Cluster bzw. die ausgewählten Objekte der jeweiligen Cluster bezüglich der verbrauchsrelevanten Einflussgrößen wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung die untersuchte Stichprobe wiedergeben. Wird die Repräsentativität bezüglich definierter Merkmale nicht erfüllt, dann kann eine Anpassung des Vorgehens mittels Änderung der Clustervariablenwahl oder der Wahl der „richtigen“ Anzahl der Cluster durchgeführt werden. Bezüglich der Wahl der Clusteranzahl wurde ersichtlich, dass die Auswahl alleine mittels der gängigsten Kriterien wie ein Struktogramm oder Dendrogramm nicht möglich ist. Zwar kann über diese oder weitere Kriterien aus der Literatur eine Einschränkung der Anzahl an Möglichkeiten begründet werden, eine inhaltliche Betrachtung der Clusterlösungen war jedoch für die Stichprobe in der vorliegenden Arbeit unerlässlich. Das bedeutet auch, dass die Herleitung der Tagesverläufe nicht vollständig automatisiert werden kann.

Auch für das vorgestellte Vorgehen gilt die Einschränkung, wie in 3.4 für die anderen Ansätze aufgeführt, dass die Antriebsleistung der untersuchten Fahrzeugkonzepte nicht gravierend von der Antriebsleistung derjenigen Fahrzeuge abweichen darf, deren Datenaufzeichnungen ausgewertet werden.

Die Übertragbarkeit des Vorgehens zur Herleitung von Mobilitätsprofilen für andere Fahrzeugkonzepte wird bis auf reine Elektrofahrzeuge als möglich eingestuft. Für Elektrofahrzeuge muss aufgrund der vergleichsweise geringen Reichweite geprüft werden, ob die aufgestellte These, dass der Fahrer seine Fahrweise und sein Mobilitätsprofil nicht ändert, ggf. in Frage gestellt werden. Nachdem aus den Datenaufzeichnungen Mobilitäts- und Fahrprofile hergeleitet worden sind, soll im nächsten Unterkapitel auf das Simulationsmodell eingegangen werden, das für die hergeleiteten Profile den Kraftstoffverbrauch bzw. den elektrischen Energiebedarf berechnen soll.

		Markov-Kette für Geschwindigkeitsprofile	Clusteranalyse für Geschwindigkeitsprofile	Ansatz nach EGHTESSAD (vgl. [46])	Ansatz nach J284 I (vgl. [129])	Markov-Kette für Mobilitätsprofile	Clusteranalyse für Mobilitätsprofile	Clusteranalyse für Geschwindigkeits- und Mobilitätsprofile
Berücksichtigte Fahrer-Einflussfaktoren auf den Verbrauch / el. Reichweite	Geschwindigkeitsprofil	✓	✓	✓	-	-	-	✓
	Fahrdauer / -strecke	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
	Randbedingungen	-	-	-	-	✓	✓	✓
	Umgebungsbedingungen	-	-	-	-	✓	✓	✓
Sonstiges	Ermöglicht Szenarienbetrachtung	-	✓	-	-	-	✓	✓

Tab. 12: Vergleich der vorgestellten Methode mit den in 2.4 betrachteten Methoden

3.6 Modellierung der Fahrzeugkonzepte

Um den Energiebedarf unter Berücksichtigung des Mobilitätsprofils und der Umgebungsbedingungen zu berechnen, bedarf es eines Simulationsmodells mit den notwendigen Schnittstellen. Gemäß der Methode in 3.5 wurden Mobilitätsprofile ausgewählt, die für die Simulation angeben sollen, wann eine Fahrt bzw. Abstellzeit stattfindet und welches Geschwindigkeitsprofil der Fahrt zu Grunde liegt. Die Methode ermöglicht es, diese beiden Größen (siehe Abb. 32) über die Uhrzeit aufzutragen.

Mittels Klimadaten ist es möglich, Szenarien für die Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Außentemperatur und Luftfeuchte ebenfalls über

die Uhrzeit den einzelnen Fahrten und Abstellzeiten zuzuordnen (vgl. Abb. 6). Auf die Klimaszenarien wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.

Das Simulationsmodell des Fahrzeugs dient somit einmal dazu, den Energiebedarf inklusive Innenraumklimatisierung zu bestimmen und andererseits, wie im Abschnitt 3.5 am rekursiven Vorgehen erläutert, auch zur Bestimmung der Anfangsbedingungen für die anschließende Abstellzeit. Im Anschluss wird mit diesen Anfangsbedingungen auch die Temperaturentwicklung der Bauteile und des Innenraums berechnet, um die entsprechenden Anfangsbedingungen für die darauffolgende Fahrt zu ermitteln.

Für das im Rahmen dieser Arbeit als Beispiel betrachtete Plug-In-Hybrid-Fahrzeug ist auch der Batterieladezustand am Ende der vorangehenden Fahrt von Bedeutung, da dieser als Anfangswert für die nächste Fahrt genommen wird (wie in 3.5 erwähnt, wird für die erste Fahrt des Tages eine vollgeladene Batterie angenommen). Dies ist im Hinblick auf den elektrischen Fahranteil relevant.

Das in Abb. 32 dargestellte Vorgehen zur Berücksichtigung von Mobilitätsprofilen und Umgebungsbedingungen wurde auch in der Zusammenarbeit im Rahmen der Veröffentlichung [17] angewendet, um den Energiebedarf für die Innenraumklimatisierung von Elektrofahrzeugen zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das in [17] entwickelte Innenraumklimatisierungsmodell erweitert und mit einem Längsdynamikmodell gekoppelt (vgl. Abb. 32), um die hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile zu berücksichtigen. Das Innenraumklimatisierungsmodell ermittelt den Energiebedarf für Kühlen und Heizen. Hierfür trägt das Kühlmitteltemperaturmodell des Verbrennungsmotors im Längsdynamikmodell zu einem potenziell nutzbaren Wärmeeintrag \dot{Q}_{VM} zum Aufheizen der in den Innenraum strömenden Luft bei. Der Energiebedarf für den Klimakompressor und im Falle des betrachteten Plug-In-Hybridfahrzeugkonzeptes der Energiebedarf für das PTC-Heizelement wird im Bordnetzmodell des Längsdynamikmodells berücksichtigt.

Entsprechend dieser Aufteilung werden im Folgenden das Längsdynamikmodell und anschließend das Innenraumklimatisierungsmodell beschrieben.

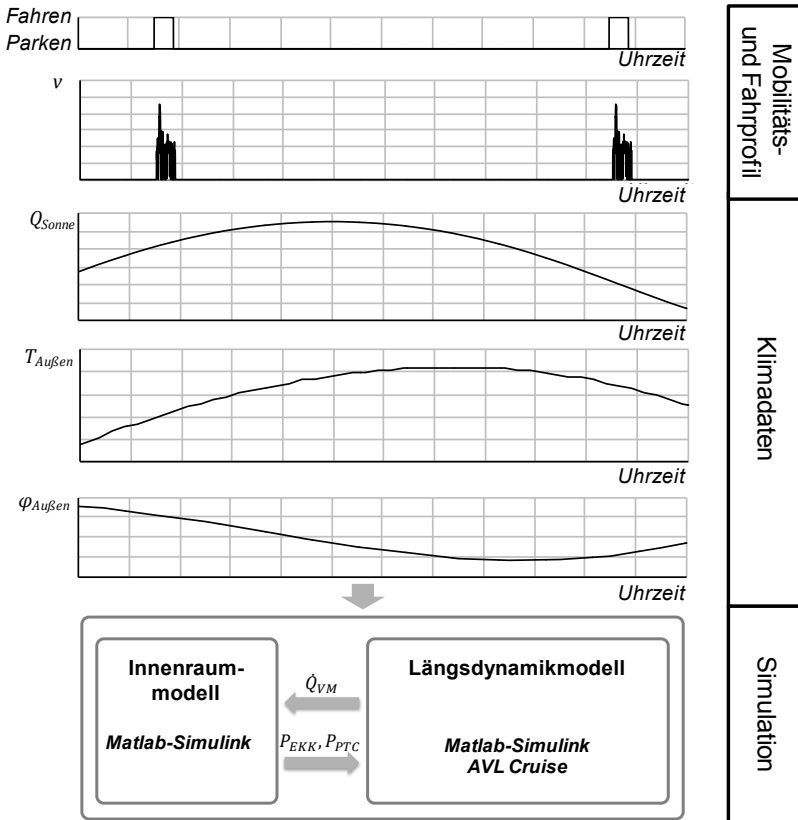


Abb. 32: Berechnung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der ausgewählten Mobilitätsprofile und der Umgebungsbedingungen mittels eines gekoppelten Längsdynamik- und Innenraummodells (schematische Darstellung)

3.6.1 Fahrzeugantrieb – Längsdynamiksimulation

Die Längsdynamikmodelle wurden in Form einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Diplomarbeit (vgl. [63]) basierend auf einem bestehenden Hybrid-Fahrzeugmodell angepasst. Dabei wurden ein Modell für ein konventionelles Fahrzeug mit Start-Stopp und ein Modell für ein Plug-In-Hybridfahrzeug

aufgebaut. Die Modelle wurden erweitert, um Nebenverbraucher wie die Klimaanlage oder das PTC-Element berücksichtigen zu können. Diese Anpassung erfolgte in AVL-Cruise. Schließlich wurde das Modell im Rahmen dieser Arbeit weiter angepasst, um eine Verbindung mit dem Innenraummodell in der Matlab/Simulink-Umgebung zu ermöglichen.

Das Längsdynamikmodell ermöglicht eine dynamische Simulation („Vorwärtsrechnen“). Die betrachteten mechanischen und elektrischen Verbindungen sowie die wichtigsten Ein- und Ausgangswerte der einzelnen Modellkomponenten der dynamischen Simulation sind nach der Darstellungsmethode von [68] im Anhang C abgebildet.

Im Folgenden wird auf den Detaillierungsgrad der Modellierung der Systemkomponenten eingegangen. Dabei wird vor allem geprüft, inwiefern die Einflussfaktoren aus Abschnitt 2.3.3 berücksichtigt werden können. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Funktionen sei auf [11] verwiesen.

Fahrwiderstände

Für den Luftwiderstand wurde angenommen, dass die Außenhaut des simulierten Fahrzeugmodells einem bestehenden realen Fahrzeugmodell gleicht. Somit konnte neben der Bedatung der Stirnfläche A eine geschwindigkeitsabhängige Bedatung des Luftwiderstandsbeiwertes c_w durchgeführt werden.

Der Rollwiderstandsbeiwert f wurde ebenfalls anhand vorhandener Reifendaten geschwindigkeitsabhängig bedatet. Da im Zuge der Datenaufzeichnung keine Informationen zur Fahrzeugbeladung (oder zu Anzahl der Insassen) erfasst worden sind, wird für die Simulation das Fahrzeugleergewicht nach DIN und eine Zuladung von 200 kg angenommen. Für die Massenunterschiede zwischen dem konventionellen Fahrzeug und dem Plug-In Hybridfahrzeug wurden die Massen der hybridspezifischen Komponenten abgeschätzt. Somit fließt für die betrachteten Fahrzeugkonzepte jeweils ein konstanter Wert in die Berechnung des Rollwiderstandes und des translatorischen Anteils des Beschleunigungswiderstandes ein.

Die rotatorischen Trägheiten werden für die rotierenden Komponenten des Verbrennungsmotors, des Getriebes (gangabhängig), des Rotors (elektrische Maschine), der Kupplungen sowie für die Bremscheiben, die Achsen und die Räder berücksichtigt.

Verbrennungsmotor

Die Eigenschaften des Verbrennungsmotors werden u. a. durch folgende gemessene Kennfelder und Kennlinien beschrieben:

- Verbrauchskennfeld (drehzahl- und drehmomentabhängig)
- Volllastkennlinie
- Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur
- Kaltstartanreicherung in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur
- Kennlinie für die Wärmekapazität des Kühlmittels in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur zur Berechnung der Motortemperatur (und in Verbindung mit dem Innenraummodell zur Berechnung des potenziellen Wärmeeintrags zum Aufheizen der Luft am Wärmetauscher)

Somit kann laut Modell der Energiebedarf in Abhängigkeit des Betriebspunktes und der Bauteil- und Umgebungstemperaturen inklusive Warmlauf berücksichtigt werden (vgl. 2.3.3).

Getriebe

Das Getriebemodell liefert das Verlustmoment ebenfalls basierend auf gemessenen Kennfeldern in Abhängigkeit des Ganges, der Getriebeeingangsdrehzahl und des Drehmomentes am Getriebeeingang sowie in Abhängigkeit der Getriebeöltemperatur. Die Entwicklung der Getriebeöltemperatur wird über eine bereits hinterlegte Funktion in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur und der Getriebeverluste berücksichtigt.

Hybridmodul des Plug-In-Hybridfahrzeugs

Das Hybridmodul besteht aus einer Kupplung („K0“) zur An- bzw. Abkoppelung des Verbrennungsmotors und aus einer permanentenerregten Synchronmaschine. Für die Simulation wird die Synchronmaschine zusammen mit dem Pulswechselrichter als eine Einheit betrachtet. Dabei werden die Verluste in Abhängigkeit der Drehzahl und des zu übermittelnden Drehmomentes abgebildet.

Traktionsbatterie

Das auf einem Ersatzschaltbild basierende Batteriemodell ermittelt die Verluste und die anliegende Spannung mittels der Lade- bzw. Entladeströme und der

Innenwiderstände. Dabei wird der Innenwiderstand über Kennfelder in Abhängigkeit des Batterieladezustands, der Batterietemperatur und des Lade- bzw. Entladestroms für eine Pulsdauer von 5 s hinterlegt. Das thermische Verhalten wurde im Rahmen der Diplomarbeit (vgl. [63]) abgebildet. Dabei wird die Batterietemperatur basierend auf den Wärmeeinträgen über die Batterieverluste und über den Kühlkreislauf bestimmt. Wenn eine definierte Temperaturschwelle überschritten wird, wird die Batterie über den Batteriekühler in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Fahrtgeschwindigkeit gekühlt. Nach Überschreiten einer weiteren Temperaturschwelle (obere Hystereseschwelle) wird die Batterie über die verfügbare Kälteleistung des Kältekreislaufs gekühlt, bis die definierte untere Hystereseschwelle unterschritten wird.

Bordnetzverbraucher

Der Energiebedarf für die Niedervolt-Verbraucher ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und von den gewählten Einstellungen des Fahrers. Im Rahmen der Datenerhebung bestand keine Möglichkeit, Daten zu den einzelnen Bordnetzverbrauchern aufzuzeichnen. Es war jedoch möglich, den elektrischen Leistungsbedarf der NV-Bordnetzverbraucher als Kollektiv zu ermitteln.

Die Leistung wurde in Abhängigkeit der Fahrzeit und der Außentemperatur klassifiziert (vgl. Abb. 33). Es ist gut zu erkennen, dass die elektrische Leistung mit zunehmender Fahrzeit abnimmt. Dieser Effekt wird dem Einfluss von Verbrauchern wie Lüfter für Innenraumklimatisierung und Sitzheizung etc. zugeordnet, die am Anfang der Fahrt mehr Energie benötigen bis der Soll-Zustand erreicht ist. Mangels Daten kann die Zuordnung nicht genau belegt werden.

Für die Simulation werden die temperatur- und fahrzeitabhängigen Leistungsverläufe als ein Kennfeld hinterlegt. Für das Plug-In-Hybridfahrzeug wird für die elektrifizierten Nebenaggregate (Lenkunterstützung, Getriebeölpumpe, Vakuumpumpe) ein konstanter Aufschlag (auf der Niedervoltseite) angenommen. Für das konventionelle Fahrzeug wird mittels gemessener Kennfelder für den Generator drehzahl- und leistungsabhängig das Drehmoment bestimmt, das der Verbrennungsmotor zusätzlich aufbringen muss. Für das Plug-In-Hybridfahrzeug wird die Leistung auf der Hochvoltseite über eine Wirkungsgradkennlinie des Gleichspannungswandlers berechnet. Der Bordnetzverbrauch aufgrund Innenraumklimatisierung wird in 3.6.2 beschrieben.

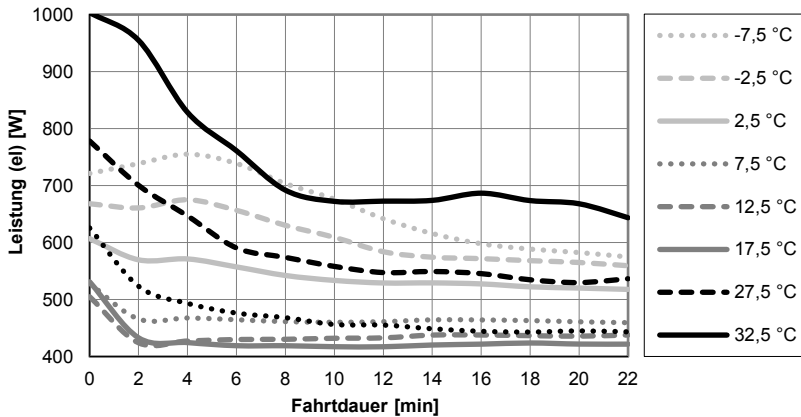


Abb. 33: Empirischer Niedervoltbordnetzverbrauch aus den Datenaufzeichnungen in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Fahrzeit

Betriebsstrategie

Für das konventionelle Fahrzeug wurde die Start-Stop-Funktion vereinfacht implementiert. Dabei wird neben einer Mindesttemperatur für Start-Stop auch eine maximal mögliche Stopp-Dauer in Abhängigkeit der Temperatur (vgl. [70]) hinterlegt. Die eventuell benötigte Kälteleistung wird in der Stoppphase aufintegriert, um diese als zusätzlichen Energiebedarf während der Fahrt zu berücksichtigen.

Die Betriebsstrategie des Plug-In-Hybridfahrzeugs ist komplexer. Entsprechend des Batterieladestandes, des aktuellen Fahrerwunschmomentes, der aktuellen Geschwindigkeit, des Verbrennungsmotorzustandes usw. wird zwischen den verschiedenen Hybridfunktionen gewechselt (vgl. 2.2). Bezüglich der möglichen Fahrmodi wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass das Fahrzeug in einem Modus benutzt wird, in dem zuerst nach der „Charge-Depleting“-Strategie gefahren wird und nach Erreichen eines definierten Ladestandes nach der „Charge Sustaining“-Strategie gefahren wird (vgl. 2.4.1). Das heißt, dass eventuelle Sonderstrategien wie beispielsweise ein (vollständiges) Aufladen der Traktionsbatterie über den Verbrennungsmotor vernachlässigt werden.

Anpassung der Fahrleistungen der betrachteten Fahrzeugkonzepte

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Fahrzeugkonzepte miteinander verglichen. Würden alle Komponenten, die in beiden Fahrzeugkonzepten „verbaut“ sind, gleich ausgelegt werden, dann würde das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug beim gleichen Verbrennungsmotor wie das konventionelle Fahrzeug eine deutlich höhere Systemleistung haben und folglich in einigen Fahrleistungsdisziplinen bessere Werte erreichen. Das heißt, dass die Konzepte nicht rein nach Kraftstoffverbrauch verglichen werden können. In der Fahrzeugentwicklung stellt dies normalerweise kein Problem dar, da Fahrleistungsdisziplinen, Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Kosten, Umweltverträglichkeit usw. nur wenige von vielen Bewertungskriterien sind, zwischen deren Bedeutung gewichtet wird.

Um im Rahmen dieser Arbeit später keine Gewichtung zwischen Fahrleistungsdisziplinen und Kraftstoffverbrauch treffen zu müssen, sondern die Konzepte nur bezüglich Kraftstoffverbrauch und den davon abhängigen Größen zu vergleichen, wurden die zu vergleichenden Fahrzeugkonzepte bezüglich ausgewählter Fahrleistungsdisziplinen normiert. Hierfür wurden vier Fahrleistungsdisziplinen ausgesucht:

- Beschleunigung von 0 auf 100 km/h
- Beschleunigung von 0 auf 50 km/h
- Beschleunigung von 80 auf 120 km/h
- Höchstgeschwindigkeit

Es erfolgt eine Gewichtung mittels Score-Verfahren. Dafür werden in jeder Disziplin ein Minimalziel und ein Maximalziel definiert. (vgl. [63, 126]). Dabei wird dem besten Wert in der jeweiligen Disziplin 100 % und dem schlechtesten Wert 0 % zugeordnet. Da die Disziplin somit unabhängig von Einheiten sind, kann zwischen ihnen gewichtet werden. Der gewichtete Wert wird als Leistungsindex für das Fahrzeug festgehalten. Das Ziel ist es, die beiden Fahrzeugkonzepte über eine Anpassung der Auslegung auf den gleichen Leistungsindex zu setzen. Der 100 %- Wert wurde jeweils an dem Fahrzeug orientiert, das den besten Wert bezüglich der jeweiligen Fahrleistungsdisziplin in der Fahrzeugklasse erreicht hat. Der 0 %-Wert orientiert sich an der schlechtesten bzw. an der noch akzeptablen Leistung in der betrachteten Fahrzeugklasse.

Das Angleichen der Fahrleistungsindizes wurde mit Anpassung des Hubraums erreicht. Normiert wurde auf ein Voll-Hybridfahrzeugkonzept (ohne Nachlademöglichkeit). Das heißt, der Hubraum des Plug-In-Hybridfahrzeugs wurde reduziert („Downsizing“). Für das konventionelle Fahrzeug wurde der Hubraum erhöht. Das iterative Vorgehen zum Erreichen der Zielperformance nach [63] kann dem Anhang D entnommen werden.

Nachdem der Aufbau des Längsdynamikmodells kurz zusammengefasst wurde, wird das Modell zur Abbildung der Innenraumklimatisierung im Hinblick auf den Energiebedarf beschrieben.

3.6.2 Innenraumklimatisierung

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Energiebedarfs für die Innenraumklimatisierung. Ein sehr hohes Potenzial bezüglich Genauigkeit bieten 3D-Simulationen mit integrierter Strömungsberechnungen (vgl. [155]). Sie sind jedoch mit hohem Aufwand und Rechenzeit verbunden (vgl. [155]).

Im Zuge der Ausarbeitung nach GESER [63] wurden einfachere Ansätze für die Berechnung der stationären Kühlleistung nach HUCHO [75] verwendet. GEMANDER [62] ergänzt den Ansatz von GESER [63] mit der Einbeziehung des Energiebedarfs für das instationäre Verhalten mittels empirischer Daten aus einer Reihe von ausgewerteten Messungen. Der Ansatz ermöglicht die Bestimmung des Energiebedarfs für die energieintensiven Abkühl- und Aufwärmvorgänge, jedoch ist er stark von der Verfügbarkeit von Messungen unter verschiedenen Bedingungen abhängig. KONZ ET AL. [90] nutzen ein 1D-analytisches Verfahren und berücksichtigen das instationäre Verhalten mittels Bilanzierung der Wärmeeinträge für den Innenraum und die umhüllenden Bauteile. Dabei wird der Innenraum als eine Zone betrachtet. Da die Unterschiede zwischen Kopf- und Fußraumtemperatur sehr groß sein können (vgl. [66] bzw. Abschnitt 2.3.2), wird eine Unterteilung des Innenraums in Kopf- und Fußraum als sinnvoll erachtet. Im Rahmen einer gemeinsamen Veröffentlichung (siehe [17]) wurde daher ein 1D-analytisches Fahrzeugkabinenmodell mit zwei Zonen für Kopf- und Fußraum für die Berechnung des Energiebedarfs für die Klimatisierung von Elektrofahrzeugen entwickelt. Das Modell ermöglicht neben der Berechnung des Energiebedarfs zur Klimatisierung auch die Berechnung der Temperaturverläufe der für die Wärmeübertragungen relevanten Bauteile. Es erlaubt somit die Berechnung der Anfangstemperaturen zu den

jeweiligen Fahrt- und Abstellzeiten. Aus diesem Grund wird dieses Modell mit einigen Anpassungen auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

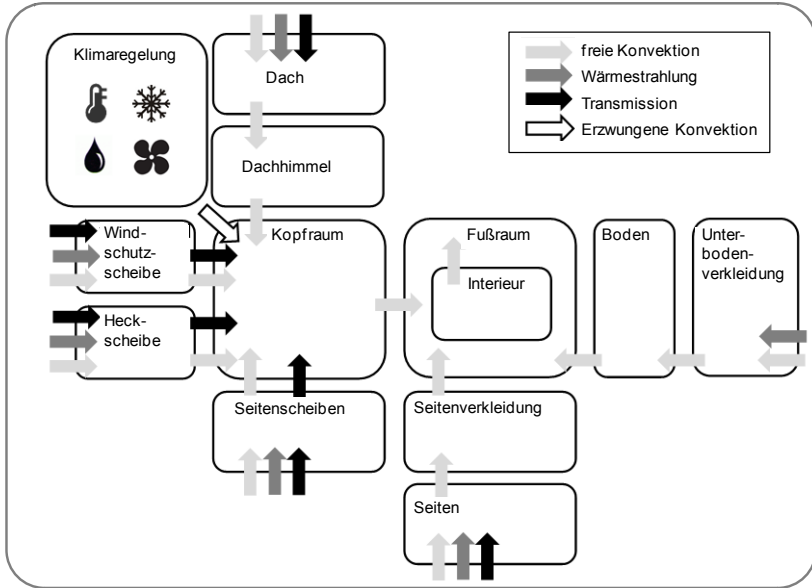


Abb. 34: Bilanzierung der Wärmeeinträge für das analytische 2-Zonen-Fahrzeugkabinenmodell nach [17] (schematische Darstellung)

Gemäß Abb. 34 werden die Wärmeeinträge für die einzelnen Komponenten bilanziert. Für die Wärmeeinträge aufgrund Transmission, Wärmestrahlung und Konvektion gilt nach [17]:

$$\dot{Q}_{Transmission,i} = \sum_{i=1}^n A_{proj,i} \cdot \tau_i \cdot q_{Sonne} \quad (11)$$

mit

q_{Sonne} Sonneneinstrahlung
 $A_{proj,i}$ projizierte Fläche der Scheiben senkrecht zur Sonneneinstrahlung
 τ_i Transmissionskoeffizient

$$\dot{Q}_{Strahlung,i} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A_i \cdot (T_i^4 - T_{umg}^4) \quad (12)$$

mit

- ε_i Emissionskoeffizient der Komponente
- σ Stefan-Boltzmann-Konstante
- A_i Oberfläche der Komponente
- T_i Temperatur der Komponente
- T_{umg} Temperatur der komponentenumgebenden Schicht

$$\dot{Q}_{konvektion,i} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_i}{\lambda_i}} \cdot A_i \cdot (T_i - T_{umg}) \quad (13)$$

mit

- α_i Wärmeübertragungskoeffizient
- s_i Dicke der Komponentenschicht
- λ_i Wärmeleitkoeffizient (Komponentenmaterial)
- A_i für die Wärmeübertragung relevante Fläche der Komponente

Über die relevanten Wärmeeinträge einer Komponente und deren Wärmekapazität kann nach Gleichung (14) die Temperaturänderung der jeweiligen Komponente bestimmt werden.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_{Transmission,i} + \dot{Q}_{Strahlung,i} + \dot{Q}_{Konvektion,i}}{m_i \cdot c_{p,i}} \quad (14)$$

Um die Zieltemperatur nach (vgl. 2.3.2) zu erreichen, wird die Soll-Einblasttemperatur bestimmt und über eine simulierte Klimaregelung der Luftmassenstrom \dot{m} eingestellt.

Wird die Luft zuerst abgekühlt, dann ergibt sich die Kälteleistung nach Gleichung (15) aus dem Luftmassenstrom und der Enthalpiedifferenz zwischen der angesaugten Luft und der hinterlegten Verdampfertemperaturkennlinie.

$$\dot{Q}_{\text{Kälteleistung}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{Luft,ansaug.}} - h_{\text{Verdampfer}}) \quad (15)$$

Dabei wird das Verhältnis zwischen Außenluft und Umluft über eine außen-temperaturabhängige Funktion ermittelt.

Für die Erwärmung der Luft nach dem Verdampfer bis zum Überströmen des Wärmetauschers wird eine ebenfalls außentemperaturabhängige Funktion hinterlegt. Das Aufheizen der Luft wird aus der spezifischen Wärmekapazität der Luft, dem Luftmassenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen der Soll-Einblastemperatur und der Verdampfertemperatur bzw. bei niedrigen Temperaturen nach Gleichung (16) ermittelt.

$$\dot{Q}_{\text{Heizleistung}} = \dot{m} \cdot c_{p,\text{Luft}} \cdot (T_{\text{Einblas}} - T_{\text{Verdampfer}}) \quad (16)$$

Die erforderliche elektrische Leistung ergibt sich mittels einer hinterlegten COP²³-Kennlinie für das für den Kältemittelkreislauf nach Gleichung (17). Wobei bei Bedarf die erforderliche Leistung zum Kühlen der Batterie (vgl. 3.6.1) noch berücksichtigt wird.

$$P_{\text{el,Kühlen}} = \dot{Q}_{\text{Kälteleistung,gesamt}} \cdot COP(T_{\text{Aussen}}) \quad (17)$$

Die erforderliche Leistung zum Heizen in den rein elektrischen Fahrphasen ergibt sich nach Gleichung (18) mittels des Wirkungsgrades des PTC-Elements:

$$P_{\text{el,Heizen}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Heizleistung}}}{\eta_{\text{PTC}}} \quad (18)$$

Kann die nach Gleichung (17) ermittelte erforderliche Kälteleistung nicht über den installierten Kältemittelkreislauf gewährleistet werden, dann wird der Luftmassenstrom entsprechend zurückgeregelt. Kann die nach Gleichung (18)

²³ Engl. „Coefficient of Performance“; Der Begriff beschreibt das Verhältnis von erzeugter Kälteleistung zur eingesetzten Leistung.

ermittelte Heizleistung aufgrund der installierten PTC-Leistung bzw. des Wärmeeintrags vom Verbrennungsmotor nicht gewährleistet werden, dann wird der Luftmassenstrom ebenfalls entsprechend zurückgeregelt.

Die Validierung bzw. Anpassung des Modells erfolgte mittels Messungen zum passiven Aufheizen bzw. Abkühlen eines Fahrzeugs, dessen Karosserie- und Materialeigenschaften für die Berechnung angenommen wurden.

Die Validierung des Klimareglers erfolgte anhand des Modells für ein Fahrzeug einer anderen Fahrzeugklasse, für das Messungen zum passiven und aktiven Aufheizen und Abkühlen vorlagen.

4. Analyse der Fahrzeugkonzepte

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs- bzw. des elektrischen Energiebedarfs unter Berücksichtigung realer Nutzerprofile wurden Mobilitäts- und Fahrprofile hergeleitet sowie Simulationsmodelle für die zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte aufgebaut (vgl. 3.4 und 3.6). Damit wurden wesentliche Anteile der Einflussfaktoren *Fahrer* und *Fahrzeug* berücksichtigt. Indirekt sind auch Einflüsse der Fahrzeugumgebung berücksichtigt. Die Fahrprofile werden beispielsweise von der Topografie oder dem Verkehrsaufkommen beeinflusst, indem der Fahrer seine Fahrweise entsprechend anpassen muss. Auf weitere Einflüsse der Fahrzeugumgebung, die bisher nicht berücksichtigt sind, wird im Folgenden über verschiedene Szenarien eingegangen. Anschließend werden die Simulationsergebnisse bezüglich des Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs für die untersuchten Fahrzeugkonzepte in den ausgewählten Szenarien vorgestellt. Schließlich wird die Einbindung dieser Ergebnisse in die Ökobilanz- und Gesamtbetriebskostenbetrachtungen erörtert. Bezüglich der Ökobilanzbetrachtungen liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung in den frühen Produktentwicklungsphasen. Für die Gesamtbetriebskostenberechnung werden für die untersuchten Szenarien auch Beispiele aufgeführt.

4.1 Untersuchung des Energiebedarfs in ausgewählten Szenarien

Szenarien für Fahrzeugumgebung

Für das instationäre und das stationäre thermische Verhalten des Fahrzeugs, beispielsweise im Hinblick auf den Energiebedarf für die Innenraumklimatisierung, sind die Umgebungsbedingungen Sonneneinstrahlung, Außentemperatur und Luftfeuchte in Verbindung mit den Mobilitätsprofilen von Bedeutung (vgl. 2.3.3 und 3.6). Um eine Verknüpfung zwischen diesen Umgebungsbedingungen und den Mobilitätsprofilen zu ermöglichen, wurden Datenquellen gesucht, die in Abhängigkeit der Uhrzeit und der Region Auskunft über

Sonneneinstrahlung, Außentemperatur und Luftfeuchte geben. Sofern im Rahmen der Fahrzeugdatenaufzeichnungen hinreichend Informationen über die Umgebungsbedingungen gesammelt werden können, kann auch auf diese zurückgegriffen werden, um auch auf eventuelle Kombinationen der Umgebungsbedingungen und der Mobilitäts- und Fahrprofile einzugehen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Datenaufzeichnungen beinhalten lediglich Werte zu Sonneneinstrahlung und Außentemperatur (während der Fahrt).

Weitere Möglichkeiten, um uhrzeit- und regionsabhängige Daten zu erhalten, bestehen in der Auswertung von Wetterstationsdaten (vgl. [108, 114]) oder im Zugriff auf bereits ausgewertete Wetterstationsdaten (vgl. [150]) bzw. auf Modelle, die auf solchen Daten beruhen (vgl. [84]). Die Datenaufzeichnungen von Wetterstationen können analog zu den Nutzerprofilen als uhrzeitabhängige Temperatur-, Luftfeuchte- und Sonneneinstrahlungsverläufe betrachtet werden, um mittels Klassifizierung²⁴ mögliche Szenarien herzuleiten. Bei dieser Möglichkeit können im Vergleich zum oben genannten Vorgehen Informationen bezüglich eventueller Kombinationen der Umgebungsbedingungen und der Mobilitäts- und Fahrprofile verloren gehen.

Da bereits für die Mobilitätsprofile eine ausführliche Klassifikation durchgeführt wurde, wurde an dieser Stelle zwecks Überschaubarkeit auf eine weitere Klassifizierung für die Beispielergebnisse verzichtet. Stattdessen werden Szenarien bezüglich der *Region eines Absatzmarktes* und der *Jahreszeiten* für die Kombination der uhrzeitabhängigen Temperatur-, Sonneneinstrahlungs- und Luftfeuchtwerte betrachtet. Hierzu wurden *gemittelte* Temperatur-, Sonneneinstrahlungs- und Luftfeuchtwerte in Abhängigkeit der Region, Uhrzeit und des Monats für jedes hergeleitete Mobilitäts- und Fahrprofil verwendet. Dabei wird vermutet, dass der Verlauf der gemittelten Umgebungswerte im Vergleich zu den Profilen aus der oben erwähnten Klassifizierung einen geringeren Einfluss auf die Ergebnisse haben wird. Abb. 35 stellt das generalisierte Vorgehen zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Energiebedarfs unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien dar. Als Regionen wurden Berlin, Los Angeles und Oslo ausgewählt. Berlin und Los Angeles dienen als Beispiele für zwei relevante Absatzmärkte, Deutschland und USA, der untersuchten Kundenzielgruppe. Oslo wurde ausgewählt, da Norwegen aufgrund der finanziellen

²⁴ Die Klassifizierung ist an dieser Stelle sowohl nach fest vorgegebenen Kategorien als auch mittels Clusteranalyse möglich (vgl. 3.5)

Förderung von Elektromobilität (2014) sowie des guten Strommixes womöglich eine Besonderheit bezüglich der Gesamtbetriebskosten und der Ökobilanz eines Plug-In-Hybridfahrzeugs darstellt. Da für Los Angeles und Oslo keine Fahrzeugdatenaufzeichnungen vorlagen, um Mobilitäts- und Fahrprofile herzuleiten, wurden die Mobilitäts- und Fahrprofile für diese Regionen aus 3.5 verwendet. Die Ergebnisse dienen somit lediglich als Vergleich, um die Auswirkungen zu beobachten, wenn nur die Dimension *Region* bezüglich der betrachteten Umgebungsbedingungen verändert wird.

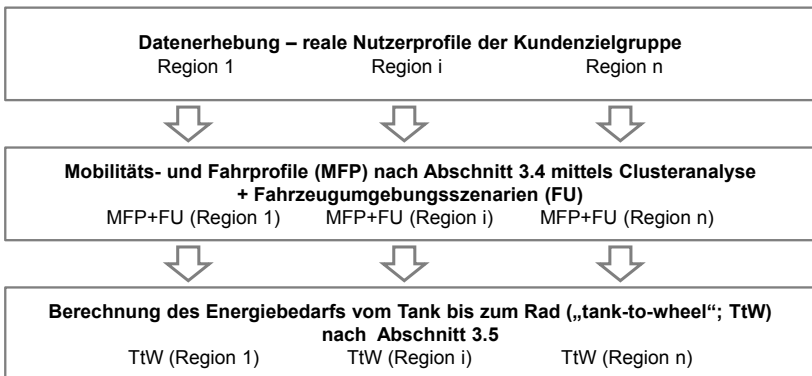


Abb. 35: Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Energiebedarfs unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien

Bevor die Auswirkung der regionalen Unterschiede auf die Ergebnisse gezeigt wird, wird beispielhaft für eine Region und einen Monat der berechnete Kraftstoffverbrauch bzw. Energiebedarf für 7 der 28 hergeleiteten Tagesverläufe gezeigt (vgl. Abb. 36). Der ausgewählte Tagesverlauf aus *Cluster 1* setzt sich aus zwei sehr kurzen Stadtfahrten zusammen (vgl. Tab. 11). Der hohe Kraftstoffverbrauch beim konventionellen Fahrzeug lässt sich durch den Kaltstart sowie aufgrund des hohen Leistungsbedarfs der Nebenverbraucher (vgl. 12-V-Bordnetzverbraucher und instationäres Verhalten der Klimatisierung in 3.6) bei geringer Durchschnittsgeschwindigkeit erklären. Letzteres gilt auch für das Plug-In Hybridfahrzeug. In *Cluster 4*, *Cluster 5* und *Cluster 7* ist hingegen die mittlere Geschwindigkeit höher und die Fahrdauer länger. Der Einfluss der Nebenverbraucher auf den streckenbezogenen Verbrauch nimmt somit ab. In

Cluster 2, Cluster 3 und Cluster 6 ist für das Plug-In-Hybridfahrzeug der Einfluss der Fahrtstrecke zu erkennen. Der Verbrennungsmotor ist (auch) aufgrund der geringen elektrischen Reichweite öfters aktiv. Je schneller und länger die Fahrten, desto geringer der Einfluss der instationären Vorgänge wie beispielsweise das Aufheizen oder Abkühlen des Innenraums auf den Energiebedarf. Bezüglich des elektrischen Energiebedarfs ist anzumerken, dass dieser im Hinblick auf die Gesamtbetriebskosten und die Ökobilanz nicht nur auf die elektrisch zurückgelegte Strecke bezogen wird, sondern auf die gesamte zurückgelegte Strecke. Generell wird aus Abb. 36 nochmals ersichtlich, dass die unterschiedlichen Tagesverläufe zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

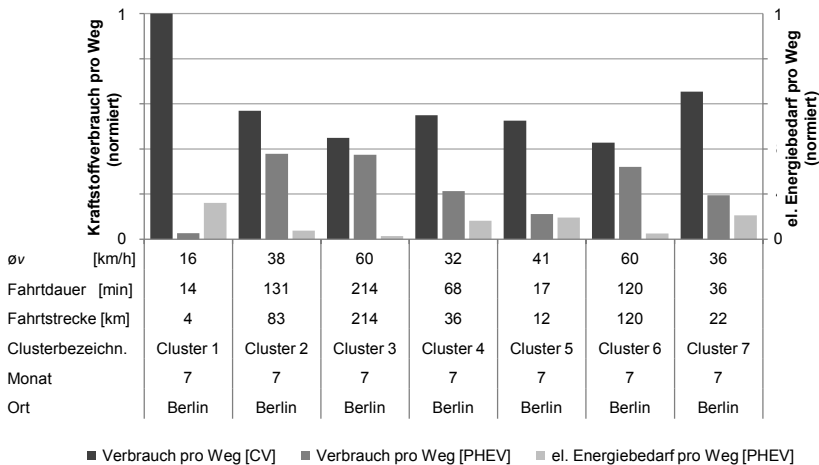


Abb. 36: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf²⁵ für 7 der 28 hergeleiteten Tagesverläufe für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage

Abb. 37 zeigt den Einfluss der Jahreszeiten beispielhaft für ein Mobilitätsprofil mit geringer Fahrdauer. Dabei unterscheidet sich der elektrische Energiebedarf für das Plug-In Hybridfahrzeug zwischen Sommer (Juli) und Winter

²⁵ Auch die folgenden Diagramme werden zwecks Vergleichbarkeit bezüglich des Kraftstoffverbrauchs auf den maximalen Kraftstoffverbrauchswert in Abb. 36 normiert. Die Normierung des elektrischen Energiebedarfs ist so gewählt, dass 1 J Kraftstoff-Energieinhalt 1 J elektrischen Energiebedarf entspricht.

(Januar) am meisten. Das liegt hauptsächlich an dem hohen Heizaufwand im Winter. Da für die erste Fahrt am Tag dieselben Temperaturbedingungen in der Garage angenommen werden, ist beim konventionellen Fahrzeug nur ein minimaler Unterschied im Kaltstartverhalten zu bemerken. Der Einfluss der Jahreszeiten ist generell im Vergleich zum Einfluss der Mobilitäts- und Fahrprofile – gegebenenfalls bedingt durch die Umgebungsszenarienauswahl – gering. Der Einfluss der Regionen bezüglich ihrer Mobilitäts- und Fahrprofile könnte somit größer ausfallen und sollte, sofern die Daten vorliegen, berücksichtigt werden.

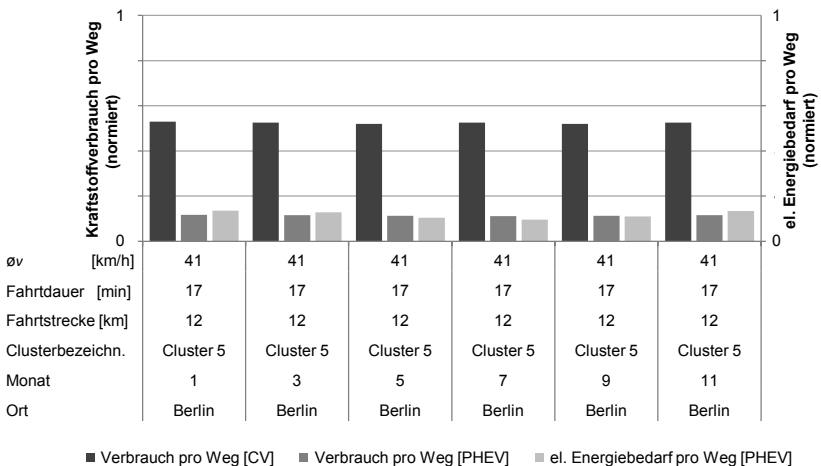


Abb. 37: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf für Tagesverlauf Nr. 5 für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) in verschiedenen Monaten; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36

Abb. 38 vergleicht den Energiebedarf für dasselbe Mobilitätsprofil im Winter und im Sommer für Berlin, Los Angeles und Oslo. Es ist ersichtlich, dass die regionalen Klimabedingungen bei gleich angesetzten Mobilitäts- und Fahrprofilen einen geringeren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch bzw. den elektrischen Energiebedarf haben als die Jahreszeiten.

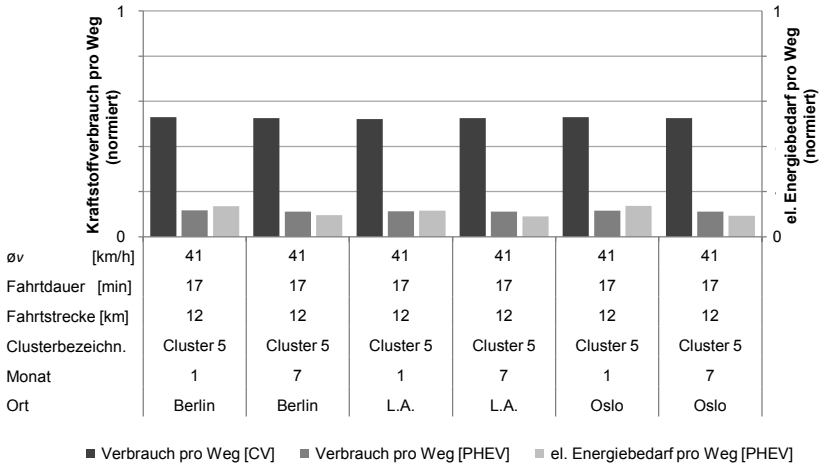


Abb. 38: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf für Tagesverlauf Nr. 5 für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) im Sommer und im Winter in Berlin, Los Angeles (L.A.) und Oslo; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36

Zwecks Übersichtlichkeit kann es hilfreich sein, wenn die Ergebnisse, die aktuell in Abhängigkeit des Mobilitätsprofils, der Region und des Monats dargestellt werden, zusammengefasst werden können. Dafür werden die Werte für den streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch und Energiebedarf der einzelnen Tagesverläufe gemäß dem Streckenanteil ihrer Cluster an der Gesamtstrecke aller Cluster gewichtet (siehe Gleichungen (19) und (20)).

$$B_{e,Kraftst,gew,i,j} = \sum_k \left(\frac{S_{Cluster,k}}{S_{Gesamt}} \cdot B_{e,Kraftst,i,j,k} \right) \quad (19)$$

mit

- $B_{e,Kraftst,gew,i,j}$ nach Streckenanteilen der Cluster gewichteter Kraftstoffverbrauch für eine Region i in Monat j
- $S_{Cluster,k}$ Summe der Streckenlängen der Tage in Cluster k
- S_{Gesamt} Summe der Streckenlängen aller Tage

$B_{e,Kraftst,i,j,k}$ streckenbezogener Kraftstoffverbrauch des ausgewählten Tagesverlaufs in Cluster k in Monat j für eine Region i

$$B_{e,El,gew,i,j} = \sum_k \left(\frac{S_{Cluster,k}}{S_{Gesamt}} \cdot B_{e,El,i,j,k} \right) \quad (20)$$

mit

$B_{e,El,gew,i,j}$ nach Streckenanteilen der Cluster gewichteter elektrischer Energiebedarf für eine Region i in Monat j

$B_{e,El,i,j,k}$ streckenbezogener elektrischer Energiebedarf des ausgewählten Tagesverlaufs in Cluster k in Monat j für eine Region i

Abb. 39 zeigt die gewichteten Werte für den Kraftstoffverbrauch und Energiebedarf. Der geringe Unterschied zwischen den Monaten kann im Vergleich zu Abb. 37 darüber erklärt werden, dass die Tagesverläufe mit höheren Fahrtauern bzw. Fahrtstrecken und Durchschnittsgeschwindigkeiten einerseits aufgrund der Fahrtstreckenlänge und andererseits aufgrund der Häufigkeit dieser Fahrten die Gewichtung stark beeinflussen. Da bei diesen Tagesverläufen der Energiebedarf für den Antrieb einen höheren Anteil als die Innenraumklimatisierung einnimmt²⁶, werden auch Änderungen des Energiebedarfs für die Innenraumklimatisierung den Gesamtenergieverbrauch geringer beeinflussen (vgl. Abb. 9). Für eine Kundenzielgruppe bzw. eine Stichprobe, die zu einem höheren Anteil Stadt- und Landstraßenfahrten unternimmt, würden die Unterschiede zwischen den Monaten stärker ausfallen. Je niedriger die mittlere Geschwindigkeit der Stichprobe ist, desto höher der Einfluss der Innenraumklimatisierung (vgl. auch 2.3.3 und Abb. 9)

Die hergeleiteten Mobilitätsprofile ermöglichen auch die Betrachtung weiterer *Ladeszenarien* basierend auf der Länge der Abstellzeit (vgl. 3.3). Abb. 40 zeigt den Einfluss vom häufigeren Nachladen auf den Kraftstoffverbrauch bzw. Energiebedarf. In diesem Szenario steigt der elektrische Energiebedarf und es sinkt der Kraftstoffbedarf, da aufgrund des Öfteren Nachladens der Traktionsbatterie die elektrische Reichweite erhöht wird.

²⁶ vgl. Abb. 9

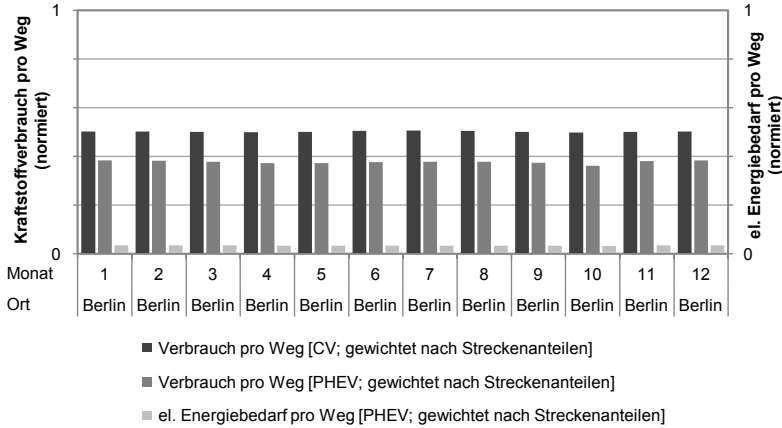


Abb. 39: Nach dem Streckenanteil der einzelnen Cluster an der Gesamtstrecke gewichteter Wert des berechnetes Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36

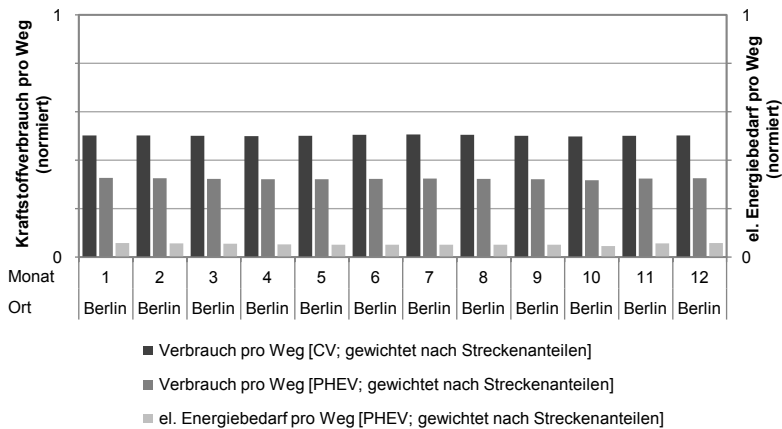


Abb. 40: Nach dem Streckenanteil der einzelnen Cluster an der Gesamtstrecke gewichteter Wert des berechnetes Kraftstoffverbrauchs und des el. Energiebedarfs für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden, sobald Abstellzeit länger als 2,5 Stunden; Normierung analog Abb. 36

Die Auswirkungen der untersuchten Fahrzeugkonzepte auf den Kraftstoffverbrauch und elektrischen Energiebedarf wurden in verschiedenen Szenarien unter Berücksichtigung der erfassten Nutzerprofile untersucht. Auf den Vergleich der Ergebnisse zwischen den zwei Fahrzeugkonzepten in Bezug auf die Umweltauswirkung und auf die Kosten vor Kunde wird im Folgenden eingegangen.

4.2 Ökologische Bewertung

In 4.1 wurde der Kraftstoffverbrauch bzw. der elektrische Energiebedarf für die untersuchten Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung der hergeleiteten Tagesverläufe und der betrachteten Fahrzeugumgebungsszenarien berechnet. Diese Werte können bereits existierende Bewertungskriterien, anhand derer ein Konzept verfolgt oder verworfen wird, ergänzen. Da eine der Motivationen hinter der Senkung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des elektrischen Energiebedarfs im Bestreben nach ökologisch verträglicheren Fahrzeugen besteht, ist es sinnvoll, die Umweltauswirkungen eines Fahrzeugs über dessen gesamten Lebensweg zu untersuchen. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn ein Fahrzeugkonzept im Vergleich zu anderen Fahrzeugkonzepten zu niedrigeren Verbrauchswerten führt, in der Herstellung jedoch mit einem höheren Aufwand verbunden ist oder in der Verwertung größere Risiken birgt. Die Ökobilanz nach ISO 14040 [32] und 14044 [31], wie in Kap. 2.5 beschrieben, dient zur Untersuchung der Umweltauswirkungen eines Produktes und kommt bereits in der Automobilindustrie zum Einsatz. Unter Einbindung des Vorgehens aus 3.5 und der Ergebnisse aus 4.1 kann die Sachbilanz unter Berücksichtigung der Nutzerprofile einer Kundenzielgruppe erstellt werden (vgl. Abb. 41). Im Hinblick auf die frühen Entwicklungsphasen ergeben sich dabei Herausforderungen bezüglich der Erstellungsdauer und der Güte der Datengrundlage einer Ökobilanz.

Zur Reduzierung der Erstellungsdauer beschreibt KOFFLER [88] einen Teilautomatisierungsansatz, der den Aufwand zu Erstellung einer Ökobilanz von ca. 66 bis 126 Manntagen auf 2 bis 33 Manntage senkt. Dabei beruht die Teilautomatisierung in dem automatischen Auslesen für die Sachbilanz relevanter Daten aus bestehenden Datenquellen und aus dem Zusammenführen dieser Daten zu einer Schnittstellendatei, die als Datenquelle für das Bilanzierungswerkzeug dient (vgl. [88]). Für den Einsatz in der frühen Entwicklungsphase

bedeutet das, dass der Aufwand für die Erstellung von Ökobilanzen deutlich reduziert werden kann, wenn die Auswahl der zu untersuchenden Konzeptvarianten anhand anderer Bewertungskriterien bereits eingeschränkt werden kann.

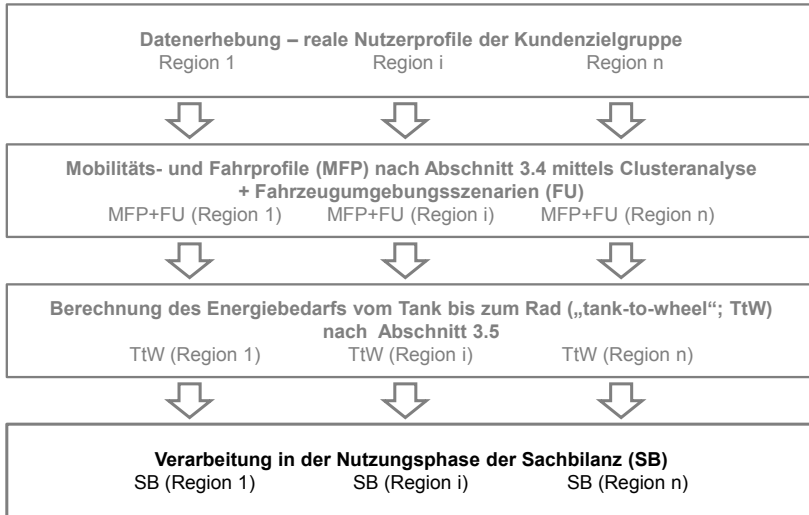


Abb. 41: Erstellung der Sachbilanz für ein untersuchtes Fahrzeugkonzept unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien

Die Herausforderung bezüglich der Datengrundlage ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn ein Fahrzeugkonzept untersucht wird, das im Vergleich zu bisherigen Fahrzeugen neue Komponenten enthält, die in der Herstellung beispielsweise als energieintensiv vermutet werden oder seltene Ressourcen benötigen. Je früher in der Entwicklungsphase Ökobilanzen erstellt werden sollen, desto schwieriger ist es, Daten zu Komponenten zu beziehen, die noch entwickelt werden. In diesem Fall können Überblicks-Ökobilanzen (Screening LCA) erstellt werden. Diese bauen zwar ebenfalls auf den Vorgaben der ISO 14040 [32] und 14044 [31] auf, unterscheiden sich jedoch durch die reduzierte Datengrundlage von vollständigen Ökobilanzen (vgl. [98]).

Im Folgenden wird auf das in Anlehnung an die ISO14040 erstellte Vorgehen (vgl. Abb. 42) nach [98] eingegangen. Dabei liegt der Fokus einerseits auf den potenziellen Hürden einer Ökobilanz in den frühen Entwicklungsphasen. Andererseits wird der Einfluss der hergeleiteten Mobilitäts- und Nutzerprofile

am Beispiel der CO₂-Emissionen gezeigt. Die vollständigen Ergebnisse der in [98] durchgeführten Überblicks-Ökobilanz werden in dieser Arbeit nicht aufgeführt, da diese für die vorgestellte Methode zweitrangig sind.

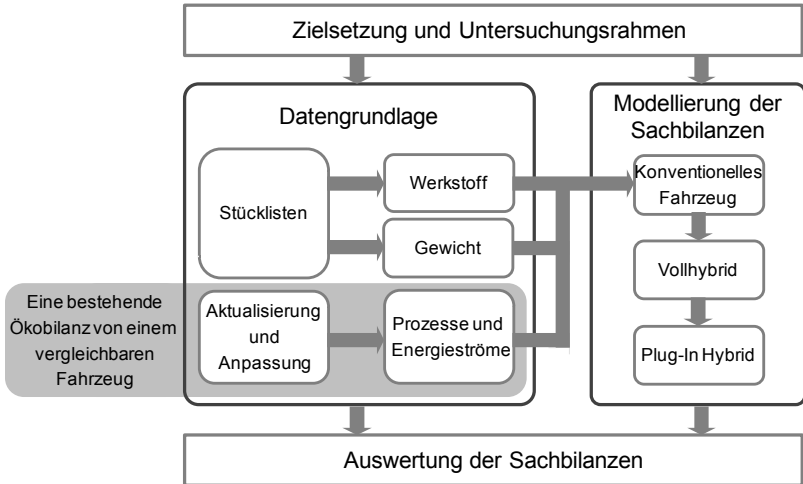


Abb. 42: Vorgehen nach MAKHOTIN [98] zur Erstellung von Sachbilanzen für die im Rahmen dieser Arbeit als Beispiel untersuchten Fahrzeugkonzepte.

Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Aus der Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen (vgl. Abb. 42) folgen die Anforderungen an die Datengrundlage und an die Modellierung der Sachbilanzen der zu vergleichenden Fahrzeugkonzepte. In dem untersuchten Fallbeispiel war das Ziel die Ermittlung der Wirkungsabschätzung anhand des Treibhauspotenzials (vgl. 2.5). Als ein Indikator für den Ressourcenverbrauch wurde der Primärenergieaufwand herangezogen (vgl. [98]). Neben dem in Kap. 4.1 verwendeten konventionellen Fahrzeug und Plug-In-Hybridfahrzeug wurde auch ein Voll-Hybrid-Fahrzeug mit derselben P2-Antriebstopologie wie das Plug-In-Hybridfahrzeug modelliert.

Datengrundlage

Die Datengrundlage wird aus Stücklisten, Materialzusammensetzungen und Prozessen²⁷ gebildet. Stücklisten werden in Verbindung mit Gewichtsangaben bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung erstellt und können somit als Entwurfsstände herangezogen werden. Die Struktur der Stückliste beeinflusst auch die Struktur der Bilanzierung. Dies ist beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien relevant, da eine Position, die in zwei Studien dieselbe Bezeichnung trägt, nicht zwingend dieselben Komponenten beinhaltet (vgl. [98]).

Bezüglich der Materialzusammensetzungen werden Lieferanten oft vertraglich dazu verpflichtet, diese für ihre Teile in das IMDS²⁸ einzutragen (vgl. [98]). Die Informationen zu den Materialzusammensetzungen liegen jedoch – wie oben erwähnt – in der frühen Entwicklungsphase für neue Komponenten nicht immer vor, zumal eine Vergabe an einen Lieferanten in der Phase noch nicht erfolgt ist.

Um den Aufwand möglichst gering zu halten, soll die Ökobilanz auf bestehende Ökobilanzen von vergleichbaren Fahrzeugen aufbauen. Da die *Prozesse* Angaben zu Energie-, Strom- und Betriebsmittelflüssen sowie zu Bearbeitungsschritten enthalten, können sie nicht vollumfänglich übernommen werden (vgl. [98]). MAKHOTIN setzt voraus, dass zumindest die Bearbeitungsschritte in den meisten Fällen übernommen werden können (vgl. [98]). Die Energieströme werden über eine Skalierung anhand des Gewichts (der neuen und alten Komponente mit derselben Funktion) vorgenommen, wobei zwischen der Gewichtsänderung eines Produktes und der Änderung der Flussgrößen nicht zwingend ein linearer Zusammenhang besteht (vgl. [98]). Auch für die Prozesse gilt in der frühen Phase das Risiko, dass noch keine detaillierten Informationen seitens der Zulieferer vorliegen.

Um die Güte der Datensätzen zu bewerten, kann das Verfahren nach WEIDEMA [158] eingesetzt werden. Das Verfahren sieht fünf Kategorien zur Beschreibung der Datensätze vor: Repräsentativität, Vollständigkeit, zeitliche, geographische und technologische Korrelation. Diese Kriterien finden sich auch unter den zu berücksichtigenden Anforderungen einer Ökobilanz nach

²⁷ Nach ISO 9000:2005 [30] ist ein *Prozess* ein „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“ [30].

²⁸ International Material Data System, vgl. [69]

ISO 14044 [31] wieder, die auch an die Bedingung der Veröffentlichung von Ökobilanzen gekoppelt sind. Den Datensätzen wird nach WEIDEMA in jeder Kategorie ein Indikatorwert von 1 bis 5 zugeordnet²⁹. Die Bewertung der Datengrundlage dient in erster Linie zur Beurteilung der Belastbarkeit der Ergebnisse der Ökobilanz bzw. der Ökobilanzstudie im Hinblick auf den Entscheidungsprozess.

Modellierung der Sachbilanzen

Die Modellierung der Sachbilanzen geht auf den gesamten Lebensweg, also auf die Herstellungsphase, die Nutzungsphase und die End-of-Life-Phase ein. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Nutzungsphase und deren möglichen Einbindung in die Bewertung von Fahrzeugkonzepten liegt, wird zuerst auf die Herstellung, dann auf die End-of-Life-Phase und anschließend auf die Nutzungsphase eingegangen.

Herstellung

Es wird zuerst das Fahrzeugkonzept modelliert, das bezüglich der Herstellung dem Fahrzeug am ähnlichsten ist, zu dem Daten aus einer bereits vorhandenen Ökobilanzstudie vorliegen. In dem betrachteten Fallbeispiel wird das konventionelle Fahrzeug als Ausgangsbasis genommen. Anschließend werden daraus stufenweise die anderen Fahrzeugkonzepte abgeleitet (vgl. Abb. 42).

Die wesentlichen Änderungen ergeben sich aus den hybridspezifischen Komponenten, aber auch der Einfluss durch Downsizing der Verbrennungskraftmaschine (vgl. Leistungsanpassung Kap. 3.5) und der Unterschied in Nebenaggregaten wird berücksichtigt.

Die drei wichtigsten hybridspezifischen Komponenten sind im Fallbeispiel die elektrische Maschine, die Traktionsbatterie und die Leistungselektronik.

Sofern keine Informationen zu den Herstellungsprozessen der elektrischen Maschine vorliegen (aufgrund der frühen Phase der Entwicklung), kann eine Skalierung von Modellen ähnlicher Komponenten oder der Einsatz von aggregierten Modellen in Erwägung gezogen werden. Im Rahmen der Diplomarbeit kam ein aggregiertes Modell der Firma PE-International³⁰ zum Einsatz, das mit Hilfe der Materialzusammensetzung aus den IMDS-Blättern bedatet wurde (vgl. [98]).

²⁹ vgl. „Pedigree matrix“ nach [158]

³⁰ PE-International, mittlerweile thinkstep <https://www.thinkstep.com/>

Für die Traktionsbatterie stellt die Bilanzierung der Zellen die größte Herausforderung dar. Für die Prozesse und Energieströme in der Herstellung wird ein Modell einer prismatischen Lithium-Ionen-Zelle in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung bedatet. Da die Information über die Materialzusammensetzung von den Herstellern geheim gehalten wird, wurde im Rahmen der Diplomarbeit die Bedatung mittels Literaturwerte und Expertenwissen vorgenommen (vgl. [98]). Zwecks Plausibilisierung der Ergebnisse wurden diese mit Literaturwerten verglichen (vgl. Quellen: [97, 115, 130, 140]). Die Ergebnisse weichen bezüglich des Treibhauspotenzials am geringsten im Vergleich zu MAJEAU-BETTES [97] ab. Die Abweichung beträgt weniger als 5 % (vgl. [98]).

Für die Bilanzierung der Leistungselektronik wird ebenfalls ein aggregiertes Modell verwendet, das über die Materialzusammensetzung bedatet werden kann. Für die Bedatung wurde im Rahmen der Diplomarbeit [98] eine Zerlegestudie durchgeführt, dabei wurden die Materialhauptgruppen (Aluminium, Kupfer, Stahl, Elektronikbauteile) ermittelt.

End-of-Life-Phase (Fahrzeugverwertung):

Für die End-of-Life-Phase werden die Trockenlegung des Fahrzeugs, die Demontage von vorgeschriebenen Bauteilen und das Schreddern der Restkarosserie berücksichtigt. Im Schredder erfolgt eine Trennung in Metalle und in die Schredderfraktion. Die Schredderfraktion kann thermisch (als Abwärme) und energetisch (zur Stromerzeugung) verwertet werden. Für diese Verwertung können Gutschriften vergeben werden.

Für die Metalle können verschiedene Gutschriftszenarien angesetzt werden (vgl. [162]). Die aus dem Recyclingprozess gewonnenen Materialien (beispielsweise Sekundäraluminium) verfügen nicht zwingend über die gleiche Qualität wie die Primärmaterialien, die sie ersetzen sollen. MAKHOTIN weist die Gutschriften in Höhe der Primärmaterialien zu, um ein maximales Potenzial darzustellen (vgl. [162]). Eine Ausnahme dabei stellen die hybridspezifischen Komponenten dar. Beispielsweise werden die Neodym-Dauermagnete der elektrischen Maschine in das Statorgehäuse eingepresst, sodass nicht von einer sortenreinen Trennung ausgegangen wird, obwohl die Wiederverwertung der seltenen Erde Neodym ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Im Zuge der Bilanzierung wird die elektrische Maschine analog der Restkarosserie behandelt. Für die Li-Ionen-Batteriezellen kann laut der Firma Umicore (vgl. [148]) eine durchschnittliche Recyclingquote von 69.7 % erreicht werden. Alternativ kann eine Wiederverwendung der Batterie für den stationären Einsatz erfolgen

(vgl. [109] für Prämissen). Da diese Angaben noch nicht als Stand der Technik betrachtet werden, wird die Traktionsbatterie analog des konventionellen Recyclingprozesses bilanziert (Demontage und Schreddern). Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Gutschriften empfiehlt es sich im Zuge der Break-Even-Betrachtungen bei der Sachbilanzauswertung und der jeweiligen Umweltauswirkung die Gutschriften separat auszuweisen.

Nutzungsphase

Die Nutzungsphase berücksichtigt die Kraftstoffbereitstellung, Stromerzeugung, das Laden und den Betrieb. Weiterhin werden Wartung und Verschleiß basierend auf vergleichbaren Fahrzeugen in der Bilanzierung berücksichtigt.

Die Diplomarbeit verwendet Verbrauchssimulationen nach GESER [63] und eine unterschiedliche Gewichtung von Stadt- und Überlandanteilen dieser Simulationen u. a. nach der Geschwindigkeitsverteilung der Fahrten der im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Datenaufzeichnung. Basierend auf dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen methodischen Vorgehen wird vorgeschlagen, an dieser Stelle für die Ermittlung des Energiebedarfs (Tank-to-Wheel) die Nutzerprofile und Fahrzeugsimulationsmodelle zu verwenden, die gemäß Abschnitt 3.4 und 3.6 hergeleitet worden sind (vgl. Abb. 41).

Diese Ergebnisse können anschließend in die Sachbilanzszenarien für die verschiedenen Kundenzielgruppen einfließen. Schließlich können Break-Even-Szenarien bezüglich der festgelegten Ziele der Ökobilanz erstellt werden. Beispielsweise kann die Wirkungsabschätzung bezüglich des Treibhausgaspotenzials für Fahrzeugkonzepte und Nutzerprofile in verschiedenen Märkten untersucht werden. Das Vorgehen soll nicht den Einsatz von Verbrauchswerten in der Sachbilanzierung gemäß Zertifizierung ersetzen, sondern ergänzen. Diese sind weiterhin zwecks Vergleichbarkeit und Nachweis der Emissionen im Betrieb notwendig.

Für den globalen CO₂-Ausstoß (Well-to-Wheel) des Plug-In-Hybrid-Fahrzeugs ist insbesondere der CO₂-Ausstoß während der Stromerzeugung von Bedeutung. Abb. 43 zeigt die regionalen Unterschiede in den Strommix-Werten, die den unterschiedlichen Erzeugungspfaden zuzuordnen sind. Während in Norwegen die Elektrizitätsversorgung fast ausschließlich auf Wasserkraftwerken basiert, wird der deutsche Strommix von Kohlekraftwerken bezüglich des CO₂-Ausstoßes negativ beeinflusst.

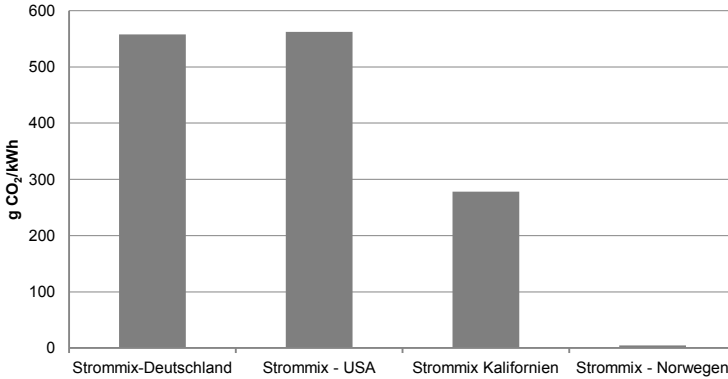


Abb. 43: CO₂-Ausstoß im Zuge der Strombereitstellung (Well-to-Tank);
 Quellen: Strommix Deutschland [78]; Strommix USA [49];
 Strommix Kalifornien [49]; Strommix Norwegen [79]

Abb. 44 stellt den globalen CO₂-Ausstoß (Well-to-Wheel) basierend auf den Ergebnissen aus 4.1 für das untersuchte konventionelle Fahrzeug und Plug-In-Hybridfahrzeug unter Berücksichtigung des deutschen Strommix dar.

Dabei ergibt sich die maximale Kraftstoffeinsparung des Plug-In-Hybridfahrzeugs im Tagesverlauf Nr. 1 (zwei kurze Stadtfahrten; vgl. Tab. 11). Die minimale Kraftstoffeinsparung – in diesem Fall sogar ein Mehrverbrauch – ergibt sich beim Tagesverlauf Nr. 19 (zwei lange und schnelle Autobahnfahrten; vgl. Tab. 11). Entsprechend unterschiedlich fallen die CO₂-Emissionen für diese beiden Tagesverläufe aus. Der nach den Streckenanteilen gewichtete CO₂-Ausstoß wird bei den untersuchten Szenarien nach Gleichung (21) bzw. (22) berechnet. Er fällt für das Plug-In-Hybridfahrzeug geringer aus, trotz des vergleichsweise ungünstigen Strommix.

$$B_{e,Kraftst,gew,i} = \frac{\sum_j B_{e,Kraftst,gew,i,j}}{12} \quad (21)$$

mit

$B_{e,Kraftst,gew,i}$ nach Streckenanteilen der Cluster gewichteter Kraftstoffverbrauch für eine Region i

$B_{e,Kraftst,gew,i,j}$ nach Streckenanteile der Cluster gewichteter Kraftstoffverbrauch für eine Region i in Monat j

$$B_{e,El,gew,i} = \frac{\sum_j B_{e,El,gew,i,j}}{12} \quad (22)$$

mit

$B_{e,El,gew,i}$ nach Streckenanteilen der Cluster gewichteter elektrischer Energiebedarf für eine Region i

$B_{e,El,gew,i,j}$ nach Streckenanteile der Cluster gewichteter elektrischer Energiebedarf für eine Region i in Monat j

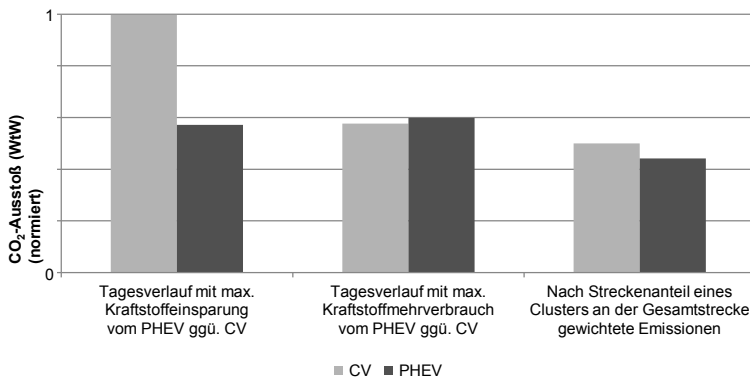


Abb. 44: Vergleich des CO₂-Ausstoßes (Well-to-Wheel; WtW) für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Deutschland. Strommix nach [78]; normiert auf den höchsten Wert in Abb. 47;

Abb. 45 zeigt einerseits, dass die lokalen CO₂-Emissionen für das Plug-In-Hybridfahrzeug deutlich (um 25 %) geringer sind als beim konventionellen Fahrzeug. Der Emissionsanteil, der der elektrischen Energieerzeugung zugeordnet wird, kann als konservativer Wert angesehen werden, da der deutsche Strommix zwecks regionalen Vergleichs herangezogen wurde. Jedoch werden für Plug-In-Hybridfahrzeuge über den Fahrzeughersteller auch Energieerzeuger vermittelt, die die Elektrizität mit 0 g/kWh bzw. mit sehr niedrigen CO₂-Emissionen bereitstellen (vgl. [163]).

Abb. 46 und Abb. 47 stellen den globalen CO₂-Ausstoß (Well-to-Wheel) für den Strommix von Los Angeles (Kalifornien) und den Strommix von Oslo

dar. Die Vorteile der hohen Anteile an Wasserkraftwerken an der Energieerzeugung in Norwegen kommen insbesondere im Tagesverlauf mit dem größten Kraftstoffeinsparpotenzial des Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem konventionellen Fahrzeug zum Tragen, da das Plug-In-Hybridfahrzeug dieses Tagesprofil überwiegend aus der extern nachgeladenen elektrischen Energie absolviert.

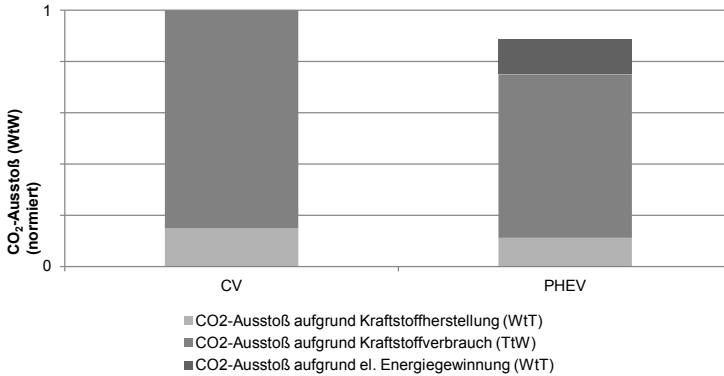


Abb. 45: Vergleich des CO₂-Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Deutschland; basierend auf dem nach Streckenanteilen gewichteten Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf. Strommix nach [78]

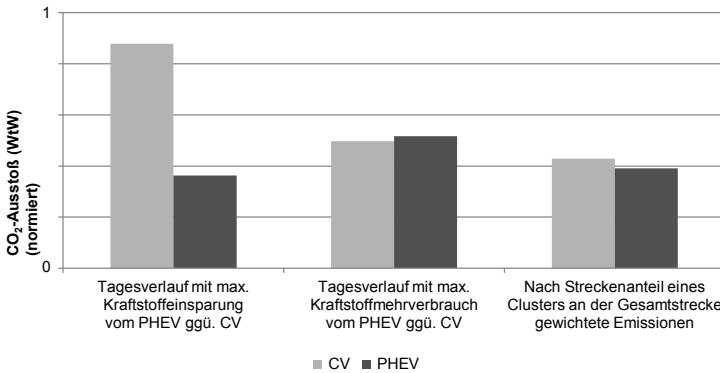


Abb. 46: Vergleich des CO₂-Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für USA. Strommix nach [49]; normiert auf den höchsten Wert in Abb. 47;

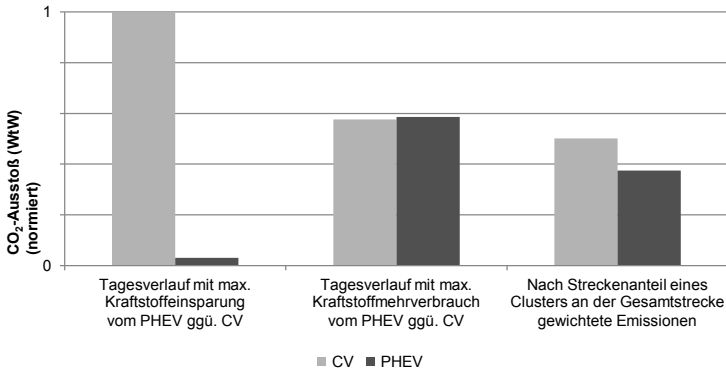


Abb. 47: Vergleich des CO₂-Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Norwegen. Strommix nach [79];

Mittels Sensitivitätsanalysen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs können zwar ebenfalls Spannbreiten bezüglich der untersuchten Emissionen oder der anschließenden Vergleiche der Wirkungsabschätzungen aufgezeigt werden. Aufgrund der hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile und der verwendeten Gewichtung ist es jedoch möglich für die jeweiligen Wirkungsabschätzungen Werte zu verwenden, die für die untersuchte Kundenzielgruppe begründet werden können. Weiterhin ermöglicht die in 3.5 beschriebene Klassifikation von Tagesverläufen, dass bei Bedarf einzelne Tagesverläufe, sofern sie für eine Kundenzielgruppe besonders relevant erscheinen, gesondert betrachtet werden.

Entscheidungshilfe

Nach Erstellung der Ökobilanzen für die untersuchten Fahrzeugkonzepte, stellt sich die Frage, inwiefern die Ergebnisse als Entscheidungshilfe dienen können. Falls die Wirkungsabschätzung nur für eine Umweltkategorie, beispielsweise das Treibhauspotenzial, ermittelt wird, dann ist ein Vergleich der Fahrzeugkonzepte aus Sicht der untersuchten ökologischen Auswirkung einfach. Für den Fall, dass mehrere Umweltkategorien untersucht werden, kann u. a. eine Gewichtung der Ergebnisse bezüglich einzelner Umweltkategorien vorgenommen werden oder eine Rangordnung der untersuchten Fahrzeugkonzepte

anhand von Gruppenentscheidungen erstellt werden (vgl. [88]). Diese Ansätze können auch verwendet werden, wenn die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung mit den Ergebnissen anderer Bewertungskriterien wie beispielsweise dem Typisierungsverbrauch oder den Herstellungskosten in die Entscheidungsfindung einfließen sollen. Wenn Fahrzeugkonzepte anhand ihrer Ökobilanzen und ihrer Produktnutzen miteinander verglichen werden sollen, dann kann auch auf die Ökoeffizienzbewertung nach ISO 14045 [33] zurückgegriffen werden. Als quantitatives Managementwerkzeug dient sie zur Untersuchung der Umweltauswirkung eines Produktsystems in Bezug auf dessen Nutzen (vgl. [33]).

Unabhängig von dem letztendlich gewählten Vergleich der Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung aller Bewertungskriterien ermöglicht eine frühe Betrachtung des gesamten Lebenswegs eines Fahrzeugs die Entscheidungsfindung aus ökologischer Sicht zu unterstützen, Konzepte auszuschließen und eventuell notwendige Maßnahmen oder Anforderungen bezüglich der ökologischen Verträglichkeit eines Fahrzeugs frühzeitig zu definieren.

Erkenntnisse:

- Überblicks-Ökobilanzen können in der frühen Phase an ISO 14040 und ISO 14044 orientiert durchgeführt werden.
- Der Mehrwert in der Erstellung der Ökobilanzen in der frühen Entwicklungsphase im Vergleich zu der Betrachtung lokaler (Tank-to-Wheel) und globaler (Well-to-Wheel) Emissionen ergibt sich, sofern größere Unterschiede bezüglich der Wirkungsabschätzungen aufgrund der Herstellungsphase oder der Fahrzeugverwertung erwartet werden.
- Für den Umgang mit fehlenden Daten existieren verschiedene Ansätze. Zwecks Transparenz und Belastbarkeit der Ergebnisse können und müssen die Unterschiede in der Güte der Datengrundlage quantifiziert werden.
- Die Erstellung von Ökobilanzen kann trotz Optimierungsmöglichkeiten zeitintensiv werden, sodass ihre Anwendung erst sinnvoll ist, wenn die Auswahl der zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte bereits nach anderen Kriterien eingegrenzt werden kann.
- Der Einfluss der realen Nutzerprofile kann über die im Abschnitt 3.5 hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile in Szenarien betrachtet werden.

4.3 Ökonomische Bewertung

Nachdem in 4.1 der Kraftstoffverbrauch und der elektrische Energiebedarf für die untersuchten Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung der hergeleiteten Tagesverläufe und Fahrzeugumgebungsszenarien berechnet worden sind, können diese in die Gesamtbetriebskostenrechnung für die unterschiedliche Märkte eingebunden werden (vgl. Abb. 48).

Auch in diesem Abschnitt werden beispielhaft neben Deutschland die USA und Norwegen betrachtet, um den Einfluss der örtlichen finanziellen Randbedingungen zu veranschaulichen.

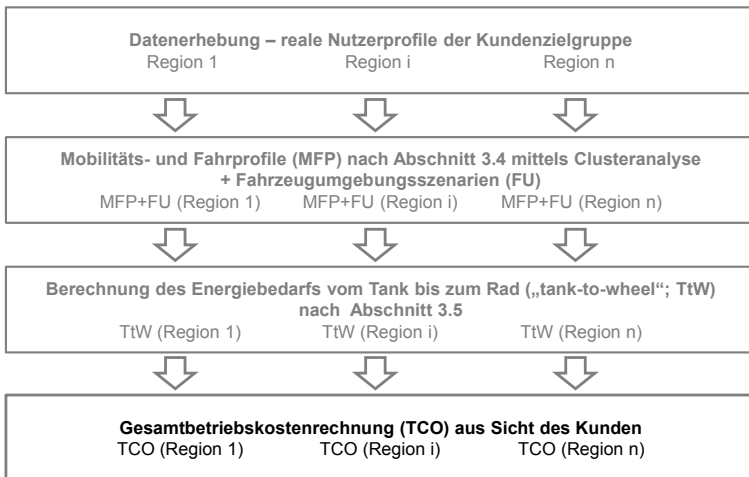


Abb. 48: Gesamtbetriebskostenrechnung aus Sicht des Kunden unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien

Zuerst wird jedoch auf die Kostenzusammensetzung eingegangen. Die Gesamtbetriebskosten C_{Gesamt} setzen sich aus den Fixkosten C_{Fix} und aus den variablen Kosten C_{var} zusammen.

$$C_{Gesamt} = C_{Fix} + C_{var} \quad (23)$$

Fixkosten

Die Fixkosten ergeben sich aus den Anschaffungskosten C_{Kauf} , aus eventuellen Zulassungs- und Importkosten $C_{Zulassung}$ sowie aus Ermäßigungen beispielsweise in Form von staatlichen Subventionen $C_{Ermäßigung}$.

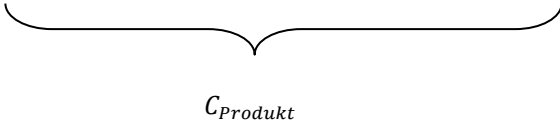
$$C_{Fix} = C_{Kauf} + C_{Zulassung} + C_{Ermäßigung} \quad (24)$$

Für die USA werden als $C_{Zulassung}$ die sogenannten „Registration Fee“ und „Use/Sales Tax“ beispielhaft für Kalifornien berücksichtigt (vgl. [25]). Für Norwegen werden die Zulassungs- bzw. Importkosten berücksichtigt, da diese einen deutlichen Einfluss auf den Vergleich der zwei Fahrzeugkonzepte zugunsten des Plug-In-Hybridfahrzeugs haben (vgl. [35]). Die Kaufprämie für Plug-In-Hybridfahrzeuge in Deutschland wurde nicht berücksichtigt, da von einem Listenpreis ausgegangen wird, der nicht zur Inanspruchnahme der Prämie berechtigt (vgl. [19]). Hinter diesem Einfluss verbirgt sich eine staatliche Förderung. Die Kostenposition wird für die Berechnung den Zulassungsgebühren zugeordnet. Die Bundessteuergutschrift (federal tax credit) für Hybridfahrzeuge in den USA wird gemäß einem vergleichbaren Plug-In-Hybridfahrzeugmodell angesetzt (vgl. [147]).

Da für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fahrzeugkonzepte keine Preiskalkulationen basierend auf den realen Produktkosten vorliegen, werden die Anschaffungskosten für die aufgeführten Beispiele anhand von Szenarien basierend auf Literaturwerten berechnet. Dabei werden die jeweils niedrigsten und höchsten Werte für Komponentenkosten aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.6) herangezogen, um ein konservatives Szenario *Anschaffungskosten-Szenario 1* („worst-case“) und ein optimistisches Szenario *Anschaffungskosten-Szenario 2* („best-case“) aus Sicht des Plug-In-Hybridfahrzeugs zu ermitteln. Die Anschaffungskosten C_{Kauf} ergeben sich nach Gleichung (25).

Dabei werden für die Kosten der Batterie $C_{Batterie}$ und für die Kosten der elektrischen Maschine C_{EM} und Leistungselektronik C_{LE} für das „worst-case“-Szenario mit den höchsten und für das „best-case“-Szenario mit dem niedrigsten Wert aus der vorliegenden Literatur angenommen. Da zwei Fahrzeugkonzepte mit vergleichbaren Fahrleistungen untersucht werden, werden die Downsizing-Effekte der Verbrennungskraftmaschine nach den inkrementellen

Kosten (pro kW) nach [132] angesetzt. Die Kostenposition des Gliders C_{glider} (vgl. Kap. 2.6) wird für beide Fahrzeugkonzepte gleich hoch angesetzt und kann somit im Zuge des Vergleichs von den Herstellungskosten beider Fahrzeugkonzepte abgezogen werden.

$$C_{Kauf} = k \cdot (C_{glider} + C_{VKM} + C_{Getriebe} + C_{Batterie} + C_{EM} + C_{LE}) \quad (25)$$


$C_{Produkt}$

k ist der Faktor, der nach SHARMA ET AL. [132] für die Einzelhandelsspanne („retail markup“) angesetzt wird. Dieser Faktor stellt womöglich die größte Vereinfachung und Unsicherheit bezüglich der Literaturwerte dar, da der Wert unabhängig von Einflussfaktoren wie beispielsweise der Fahrzeugklasse, der Antriebsart und marktabhängiger Verkaufsstrategien ist.

Als Abgleich zu den inkrementell berechneten Anschaffungskosten wird ein weiteres Szenario *Anschaffungskosten-Szenario 3* eingeführt. In diesem Fall wird der Unterschied der Anschaffungskosten von ähnlichen Fahrzeugmodellen auf dem Markt angeschaut. Dabei werden ein konventionelles und ein Plug-In-Hybridfahrzeug des gleichen Modells mit ähnlichen Fahrleistungswerten (Beschleunigungswert 0-100 km/h) und gleicher (Sonder-)Ausstattung ausgewählt.

Variable Kosten

Die variablen Kosten $C_{Var,t}$ in dem Jahr t setzen sich aus den jährlichen Kraftstoffkosten $C_{Kraftst,t}$, Elektrizitätskosten $C_{El,t}$, Kraftfahrzeugsteuer $C_{Steuern,t}$, Versicherungskosten $C_{Versicherung,t}$ und den Wartungskosten $C_{Wartung,t}$ zusammen.

$$C_{Var,t} = C_{Kraftst,t} + C_{El,t} + C_{Steuern,t} + C_{Versicherung,t} + C_{Wartung,t} \quad (26)$$

Die jährlichen Kraftstoffkosten $C_{Kraftst,t}$ ergeben sich aus dem Produkt des streckenbezogenen Kraftstoffverbrauchs $B_{e,Kraftst}$ (in l/100km), der Jahresfahrleistung (in km) und den Kraftstoffpreisen bzw. –preisprognosen $k_{Kraftst,t}$ aus der Literatur (in Währung/l).

$$C_{Kraftst,t} = k_{Kraftst,t} \cdot B_{e,Kraftst} \cdot S_{jährlich} / 100 \text{ km} \quad (27)$$

Auch für das Plug-In Hybridfahrzeug wird der Kraftstoffverbrauch auf die gesamte Jahresfahrleistung bezogen, da der Kraftstoffverbrauch aus 4.1 sich jeweils auf die ganze Tagedstrecke und nicht nur auf dessen Charge-Sustaining-Anteil bezieht. Die jährlichen Elektrizitätskosten $C_{El,t}$ werden analog zu den Kraftstoffkosten mit Hilfe des elektrischen Verbrauchs $B_{e,El}$ (in kWh/100km) 4.1 und einem angenommenen Ladewirkungsgrad [41] ermittelt. Für die Elektrizitätspreise $k_{El,t}$ bzw. –preisprognosen werden zwei Szenarien untersucht: Ein niedriges Kostenszenario (Nachtтарif) nach [54] und ein hohes Kostenszenario nach [121].

$$C_{El,t} = k_{El,t} \cdot \frac{B_{e,El}}{\eta_{Laden}} \cdot S_{jährlich} / 100 \text{ km} \quad (28)$$

Die Vorteile für Plug-In-Hybridfahrzeuge bezüglich der Kraftfahrzeugsteuer $C_{Steuern,t}$ aufgrund staatlicher Förderungen in Deutschland und Norwegen werden berücksichtigt (vgl. [36, 144]). Die Versicherungskosten wurden beispielhaft bei einem Versicherungsanbieter für beide Fahrzeugkonzepte anhand vergleichbarer Modelle ermittelt (vgl. [76]) und auch mittels Daten von Autokostenportalen [2, 12] verglichen. Aufgrund des fehlenden bzw. geringen Unterschiedes werden die Versicherungskosten für beide Fahrzeugkonzepte gleich hoch angenommen und somit im Zuge des Vergleichs nicht berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Wartungskosten existieren Rechenmodelle in der Literatur, beispielsweise nach [52]. Bezüglich der Wartungskosten und des Wertverlustes kann auch auf die Autokostenportale [2, 12] zurückgegriffen werden. Die Unterschiede zwischen den zwei Fahrzeugkonzepten bezüglich dieser Positionen werden als vernachlässigbar angesehen. Es ist jedoch unklar,

inwiefern die Autokostenportale einen eventuellen Unterschied im Bremsenverschleiß bezüglich der Wartungskosten berücksichtigen und inwiefern die Batteriealterung bezüglich des Wertverlustes berücksichtigt wird.

Die Batteriealterung wirkt sich weiterhin auf die Kraftstoffersparnis des Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem konventionellen Fahrzeug aus. Es wird dabei zwischen kalendarischer Alterung und zyklischer Alterung unterschieden. Für erstere ist die Nutzung nicht von Bedeutung, jedoch die Batterietemperatur und die Produktionsqualität (vgl. [91]). Die zyklische Alterung wird vor allem von der Entladetiefe, dem Lade- und Entladestrom und der Batterietemperatur beeinflusst (vgl. [91]). Die Alterung wirkt sich negativ auf den Batterieinnenwiderstand und somit auf die nutzbare Batteriekapazität sowie auf die verfügbare elektrische Leistung aus (vgl. [91, 161]). Mittels der hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile ist es auch möglich, Batteriealterungsszenarien zu betrachten, indem die Entladetiefen der simulierten Tagesverläufe in Kombination mit der relativen Häufigkeit der Tagesverläufe berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Simulationsaufwand proportional zu den Batteriealterungsszenarien ansteigt. Da kein geeignetes Batteriemodell zur Berücksichtigung der Alterung vorlag, wurde dieser Effekt bei den folgenden Ergebnissen nicht berücksichtigt.

Ergebnisse

Um die Fixkosten und variablen Kosten auf einen Zeitraum zu beziehen, werden die jährlichen variablen Kosten („Nettozahlungen“ im Sinne der Kapitalwertrechnung vgl. [4]) auf den Zeitpunkt der Anschaffung diskontiert. Der Kalkulationszinsfuß wurde analog [121] angesetzt.

Die variablen Kosten ergeben sich somit wie folgt:

$$C_{var} = \sum_t \frac{C_{var,t}}{(1+i)^t} \quad (29)$$

Anstatt die Gesamtbetriebskosten in allen Szenarien als zeitlichen Verlauf darzustellen, wird im Folgenden die Darstellung nach [54] verwendet. Dabei wird die kumulierte Ersparnis als die Differenz der variablen Kosten des Plug-In-Hybridfahrzeugs und des konventionellen Fahrzeugs dargestellt. Abb. 49 stellt die verschiedenen kumulierten Ersparniszenarien gegenüber dem Anschaf-

funktionskostenunterschied zwischen Plug-In-Hybrid-Fahrzeug und dem konventionellen Fahrzeug dar. Die großen Differenzen in den Anschaffungskostenunterschieden „ Δ PHEV-CV“ zwischen der inkrementellen Berechnung (*Anschaffungskosten-Szenario 1 und 2*) und den Anschaffungskostenunterschieden „ Δ PHEV-CV“ von im Markt befindlichen vergleichbaren Fahrzeugmodellen (*Anschaffungskosten-Szenario 3*; in den Abbildungen: „ähnliches Modell“) können dem Mangel an richtigen Komponentenkosten und an der Information über die Einzelhandelsspanne zugeordnet werden. Die Abweichungen stellen jedoch nicht die Sinnhaftigkeit der Gesamtkostenbetrachtungen in der frühen Entwicklungsphase in Frage, da davon ausgegangen werden kann, dass in dieser Phase basierend auf Lieferantenaussagen und -angeboten im Zuge von Wirtschaftlichkeitsrechnungen die Anschaffungskosten besser angenähert werden können.

Ladeszenario 1 entspricht dem Ladeszenario (für das Plug-In-Hybridfahrzeug), in dem die Fahrzeugbatterie über Nacht geladen wird. Ladeszenario 2 ist ein optimistisches Ladeszenario und geht (vgl. Kap.4.1) davon aus, dass das Fahrzeug jedes Mal geladen wird, wenn die Abstelldauer länger als 2,5 Stunden ist.

Um die Übersicht zu bewahren, werden die Kosten nicht für alle ausgewählten Tagesverläufe aus 3.4 bzw. 4.1 dargestellt. Um die Spannbreite, aufzuzeigen werden die Kosten für die Tagesverläufe mit der höchsten Kraftstoffeinsparung bzw. mit dem höchsten Kraftstoffmehrverbrauch des Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem konventionellen Fahrzeug dargestellt. Dabei fällt auf, dass das Plug-In-Hybridfahrzeug auch beim Mehrverbrauch eine kumulierte Einsparung aufweist. Dies liegt hauptsächlich an den geringer angesetzten Wartungskosten des Plug-In-Hybridfahrzeugs (anhand [12] für die oben erwähnten vergleichbaren Fahrzeuge). Weiterhin wurden die variablen Kosten für den gewichteten Kraftstoffverbrauch bzw. elektrischen Energiebedarf der Tagesverläufe ermittelt. Die Gewichtung erfolgte dabei nach dem Streckenanteil des zum jeweiligen Tagesverlauf gehörenden Clusters an der Gesamtstrecke (vgl. 4.1). Es ist zu erkennen, dass das Ladeszenario die auf den gewichteten Verbrauchswerten basierende Kostenersparnis beeinflusst, nicht jedoch die Spannbreite (vgl. Abb. 49). Für die Kostenersparnis basierend auf den gewichteten Verbrauchswerten lohnt sich die Investition in das Plug-In-Hybridfahrzeug nach 9 bzw. erst nach mehr als 10 Jahren in Bezug auf das *Anschaffungskosten-Szenario 1* („worst case“ nach Literaturdaten) und nach

5,5 bzw. 6 Jahren in Bezug auf das *Anschaffungskostenszenario 2* („best-case“ nach Literaturdaten). Wird der Kaufpreisunterschied nach *Anschaffungskosten-Szenario 3* („ähnliches Modell“) angesetzt, dann lohnt sich die Investition in das Plug-In-Hybridfahrzeug für alle Tagesverläufe spätestens nach 3,5 Jahren.

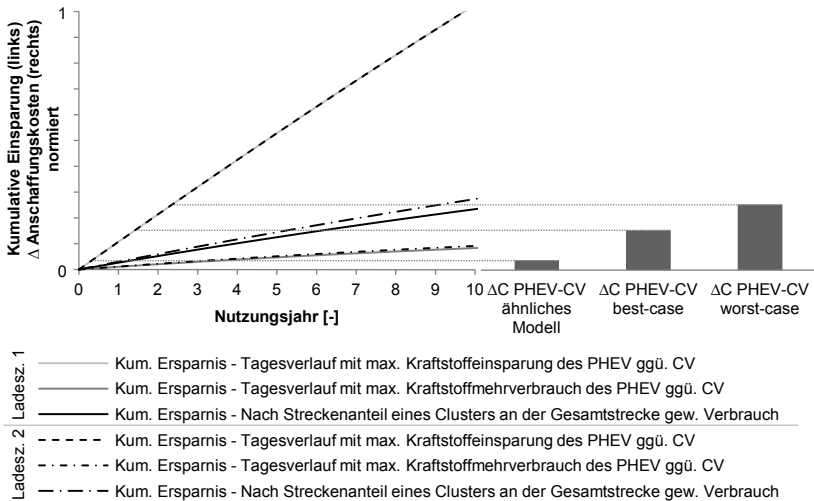


Abb. 49: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; Deutschland; Elektrizitätskosten nach [121]

In einem optimistischen Elektrizitätskostenszenario nach [54] lohnt sich die Investition für die Tagesverläufe mit den gewichteten Verbrauchswerten nach ca. 8 bzw. 10 Jahren für das *Anschaffungskosten-Szenario 1* und nach ca. 4,5 bzw. 5,5 Jahren für das *Anschaffungsszenario 2*, während nach *Anschaffungsszenario 3* die Investition sich für die gewichteten Tagesverläufe nach bereits einem Jahr rentiert (vgl. Abb. 50).

Als Jahresfahrleistung wurde der Mittelwert der Jahresfahrleistungen der untersuchten Kundenzielgruppe angesetzt. Abb. 51 zeigt die Sensitivität der kumulierten Ersparnis in Abhängigkeit verschiedener Jahreslaufleistungszenarien basierend auf den oben erwähnten gewichteten Verbrauchswerten.

Dabei ist zu erkennen, dass die Spannbreite aufgrund der unterschiedlichen Tagesverläufe – Mobilitäts- und Fahrprofile – viel größer ist, als die Spannbreite aufgrund der unterschiedlichen Jahresfahrleistungen.

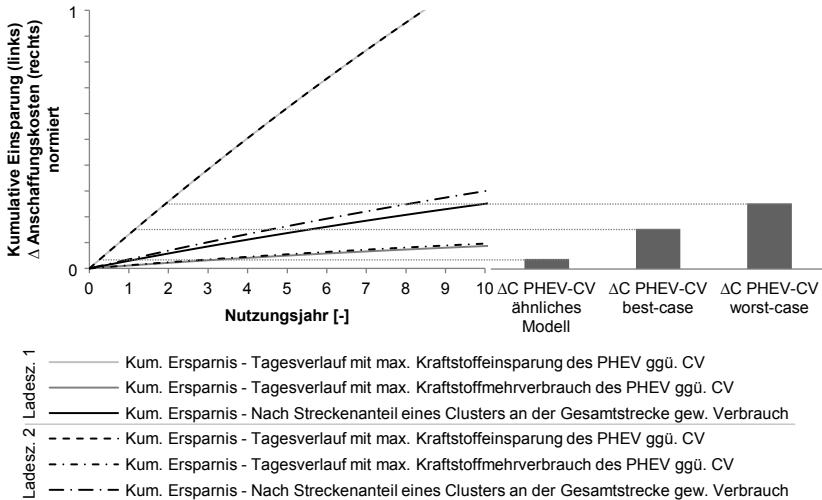


Abb. 50: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs (PHEV) gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug (CV); Deutschland; Elektrizitätskosten nach [54]

Wie bereits erwähnt sind die untersuchten Fahrzeugkonzepte in Deutschland in keinen der Anschaffungsszenarien (bedingt durch den hohen Listenpreis) von der Kaufprämie für Plug-In-Hybridfahrzeuge betroffen (vgl. [19]). Somit hat die absolute Höhe der Anschaffungskosten ebenfalls einen Einfluss auf den Vergleich der Fahrzeugkonzepte.

Für Los Angeles und Oslo wachsen die Kostenvorteile des Plug-In-Hybridfahrzeugs aufgrund deutlicher Steuerermäßigungen bzw. der Ermäßigungen beim Import und bei der Zulassung (vgl. Abb. 52 und Abb. 53). Weitere Kundenvorteile des Plug-In-Hybridfahrzeugs, die sich über Privilegien wie die Nutzung von Busspuren oder ausgewiesenen Parkplätzen ergeben können (jeweils von der Region abhängig) wurden nicht berücksichtigt.

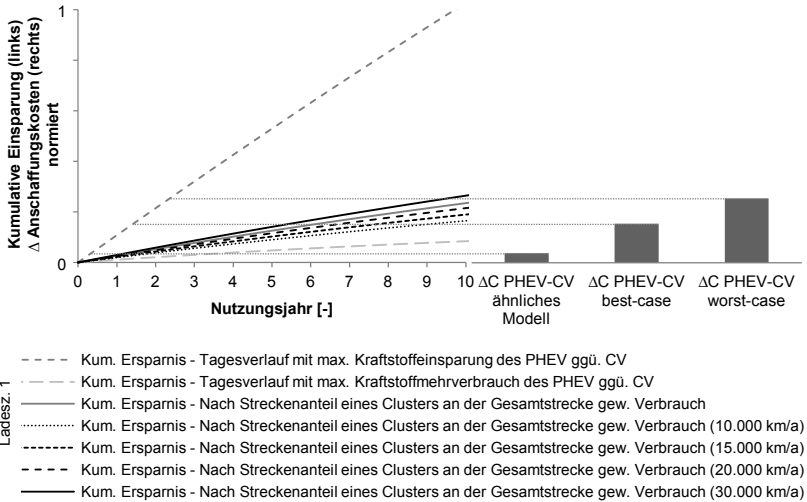


Abb. 51: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs (PHEV) gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug (CV); Deutschland; Elektrizitätskosten nach [121]; Variation der jährlichen Laufleistung

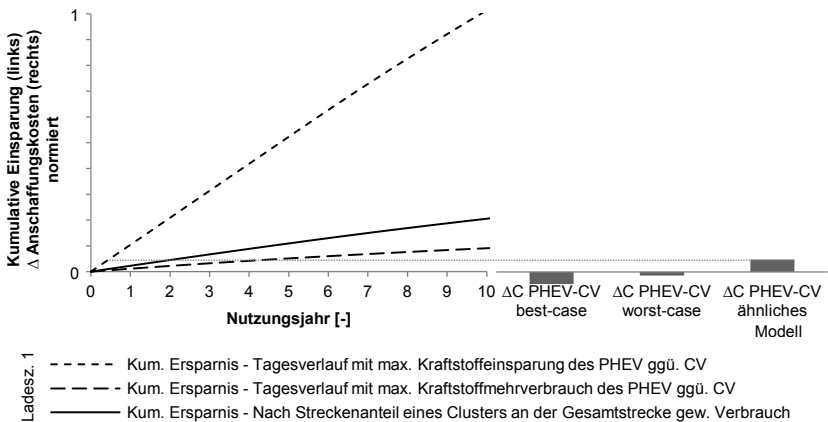


Abb. 52: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; USA, Kalifornien

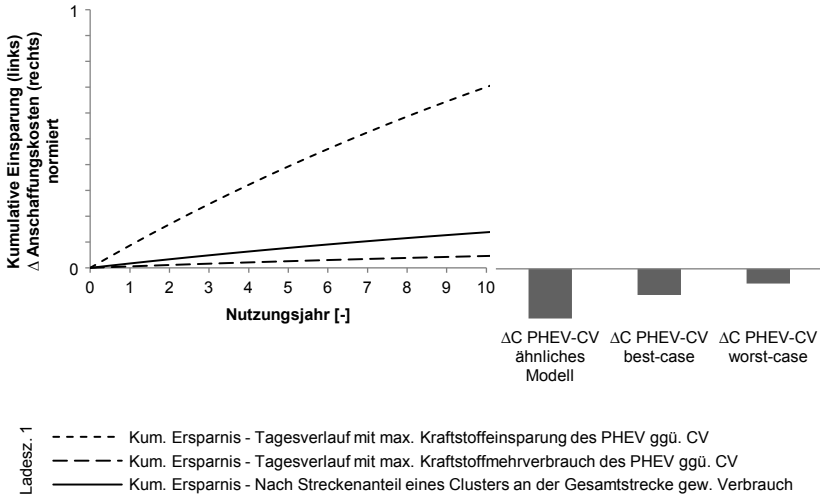


Abb. 53: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; Norwegen, Oslo

Schlussfolgerung

- Die Anschaffung eines Plug-In-Hybridfahrzeugs ist aufgrund der starken Förderung von Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen am meisten in Norwegen finanziell rentabel.
- *Fixkosten*
Die Fixkosten-Szenarien haben nach den Tagesverläufen den größten Einfluss auf die Gewinnschwelle. In den *Anschaffungskosten-Szenarien 1 und 2* lohnt sich der Einsatz von Plug-In-Hybridfahrzeugen in Deutschland nicht bei jedem betrachteten Mobilitätsprofil (Tagesverlauf), während Anschaffungsszenario 3 sich für jeden Tagesverlauf spätestens nach 3,5 Jahren finanziell lohnt.
- *Variable Kosten*
In Hinblick auf die aufgeführte Methode zur Herleitung von Nutzerprofilen in 3.4 und auf die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs in 4.1, kann festgehalten werden, dass der Aufwand im Gegensatz zu der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs nach [3, 110] basierend auf gesetzlichen Zyklen

und Utility-Factor-Gewichtungen nach SAE J2841 höher ist. Im Gegenzug wird nach der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methode einerseits eine höhere Spannbreite an Nutzungsprofilen (Fahrweise und Mobilitätsprofil) und Umgebungsbedingungen untersucht, die es ermöglichen, sowohl Ladeszenarien als auch das instationäre Verhalten der Fahrzeuginnenraumklimatisierung mit geeigneten Randbedingungen zu berücksichtigen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Gesamtbetriebskosten aus Sicht des Kunden und die Ökobilanz eines Fahrzeugs sind abhängig vom Kraftstoffverbrauch und somit vom Nutzungsverhalten der Kunden. Um bezüglich dieser Aspekte kundenorientierte Fahrzeuge anzubieten, sind Erkenntnisse über das Nutzungsverhalten der Kundenzielgruppen notwendig. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die reale Nutzerprofile aus Fahrzeugdatenaufzeichnungen verwendet, um Fahrzeugkonzepte bezüglich ihrer Verbrauchswerte, ihrer Ökobilanz und ihrer Gesamtbetriebskosten in der frühen Produktentwicklungsphase bewerten zu können. Dafür wurden die relevanten Wechselwirkungen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs untersucht. Neben der Fahrweise des Kunden, die über die Fahrwiderstände den Kraftstoffverbrauch beeinflusst, wird insbesondere bei Plug-In-Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen der Einfluss der Innenraumklimatisierung als relevant eingestuft. Dieser Einflussfaktor hängt jedoch vom Mobilitätsprofil des Kunden, gegeben durch Uhrzeit, Dauer und Streckenlänge seiner Fahrten und den Umgebungsbedingungen ab. Weiterhin beeinflussen das Mobilitäts- und das Fahrprofil auch den Anteil der rein elektrisch gefahrenen Strecken von Plug-In-Hybridfahrzeugen. Somit werden diese Wechselwirkungen in der erarbeiteten Methode berücksichtigt.

Für die Auswertung der Mobilitätsprofile ist die Kenntnis der Randbedingungen der Datenerhebung relevant, da gegebenenfalls Korrekturgewichtungen aufgrund der Zusammensetzung der Stichprobe oder aufgrund des Erhebungszeitraums vorgenommen werden müssen. Bezüglich des Vorgehens werden aufgrund des Zielkonfliktes zwischen Detaillierungsgrad des Mobilitäts- und Fahrverhaltens, Detaillierungsgrad (Genauigkeit) des Fahrzeugmodells und dem Simulationsaufwand zwei Alternativen aufgeführt. Es besteht die Möglichkeit, allgemeine Statistiken bezüglich der Mobilitäts- und Fahrprofile zu erzeugen, um beispielsweise anhand der täglich zurückgelegten Strecken Anforderungen bezüglich der elektrischen Reichweite herzuleiten. Mittels vereinfachter Fahrzeugmodelle können ohne Einbußen bezüglich des Detaillierungsgrads der Mobilitätsprofile und der Fahrweisen Anforderungen an Systemkomponenten hergeleitet werden. Als Ergebnis solcher Betrachtungen

konnte der Einfluss verschiedener Systemkombinationen auf die rein elektrische Reichweite eines Plug-In-Hybridfahrzeugs gezeigt werden. Da mittels vereinfachter Fahrzeugmodelle nicht alle relevanten Fahrzeugeinflussgrößen berücksichtigt werden können, werden auch Ansätze untersucht, die die Verwendung von detaillierteren Fahrzeugmodellen ermöglichen. Dabei wird dem Zielkonflikt bezüglich Simulationsaufwand begegnet, indem nicht alle Fahrzeugdatenaufzeichnungen als Eingangsinformation für die Simulationen verwendet werden, sondern aus den Aufzeichnungen hergeleitete Mobilitäts- und Fahrprofile.

Für die Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen wurden aus der Literatur bekannte Ansätze bewertet. Der Schwerpunkt dieser Ansätze lag jedoch entweder „nur“ auf der Herleitung von Mobilitätsprofilen oder „nur“ auf der Herleitung der Fahrprofile. Schließlich wurde ein Ansatz zur Klassifizierung von Tagesverläufen, von täglichen Mobilitäts- und Fahrprofilen, mittels Clusteranalyse erarbeitet. Als Clustervariablen wurden Kennwerte definiert, die das Geschwindigkeitsprofil, die Uhrzeit und die Dauer der Fahrten beschreiben. Die Clusteranalyse wurde zweistufig durchgeführt. In der ersten Stufe erfolgt die Clusterbildung nach dem WARD-Verfahren. Anschließend wird die Clusterzuordnung der Objekte nach dem k-Means-Verfahren optimiert. Um die „richtige“ Clusteranzahl (bzw. Clusterlösung) zu finden, wurden verschiedene Kennzahlen aus Literaturquellen gesammelt und verwendet. Dabei wurde ersichtlich, dass mittels der Literaturansätze die Anzahl der möglichen Clusterlösungen zwar eingeschränkt werden kann, eine erste inhaltliche Interpretation der Clusterlösungen für die vorliegende Stichprobe jedoch unumgänglich ist. Nach Auswahl der zu verfolgenden Clusterlösung wurde eine Stabilitätsprüfung der Clusterlösung im Hinblick auf die Datenmenge und das Clusteranalyseverfahren durchgeführt. Als Tagesverlauf für die Simulation wird jeweils der Tagesverlauf aus den Originalaufzeichnungen extrahiert, der am nächsten zum jeweiligen Clusterzentrum liegt. Es wurde überprüft, inwiefern die extrahierten Tagesverläufe bezüglich der Beschleunigungs-Geschwindigkeitsverteilung und der gefahrenen Minuten je nach Uhrzeit der Stichprobe entsprechen. Die ausgewählten Tagesverläufe ermöglichen es, in Kombination mit den uhrzeitabhängigen Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchte, den Kraftstoffverbrauch und den elektrischen Energiebedarf – inklusive instationärer Vorgänge wie beispielsweise der Innenraumklimatisierung – der einzelnen Fahrten sowie die Randbedingungen

der Folgefahrten zu ermitteln. Es wurde ein Fahrzeugmodell für ein konventionelles und ein Plug-In-Hybridfahrzeug aufgebaut, das die Ermittlung des Energiebedarfs aufgrund Antrieb und Innenraumklimatisierung berücksichtigt. Mittels der hergeleiteten Mobilitäts- und Fahrprofile, der Fahrzeugmodelle und definierter Szenarien zu Klimabedingungen wird schließlich der Kraftstoffverbrauch bzw. der elektrischer Energiebedarf berechnet. Werden Fahrzeugdatenaufzeichnungen für unterschiedliche Absatzmärkte einer Kundenzielgruppe durchgeführt, dann können regionale Mobilitäts- und Fahrprofile bestimmt werden und entsprechend der Kraftstoffverbrauch und der elektrische Energiebedarf für verschiedene Absatzmärkte einer Kundenzielgruppe berechnet werden.

Mittels der Simulationsergebnisse für die einzelnen Tagesverläufe und einer Gewichtung der Ergebnisse nach den Streckenanteilen der einzelnen Tagesverläufe, kann sowohl eine sinnvolle Spannbreite als auch ein gewichteter Wert für den Kraftstoffverbrauch und den Energiebedarf in weiterführende Betrachtungen eingebunden werden. Die Einbindung der Simulationsergebnisse in die ökologische Bewertung der Fahrzeugkonzepte mittels Überblicks-Ökobilanzen wird empfohlen, sofern ein gravierender Unterschied in der Herstellung oder Fahrzeugverwertung bezüglich der betrachteten Umweltkategorien zu erwarten ist. Analog zu diesen Betrachtungen können die Simulationsergebnisse in die Gesamtbetriebskostenberechnung eingebunden werden. Sowohl für die Überblicks-Ökobilanz als auch für die Gesamtbetriebskostenberechnung muss die Sensitivität bezüglich der Datengrundlagen untersucht werden.

Die Hauptneuerungen der entwickelten Methodik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Mobilitäts- und das Fahrverhalten einer Nutzergruppe werden bei der Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen aus Fahrzeugdatenaufzeichnungen kombiniert betrachtet, sodass für simulationsgestützte Untersuchungen neuer Fahrzeugkonzepte sowohl Geschwindigkeitsprofile als auch die Randbedingungen am Start (z. B. Batterieladezustand, Innenraumtemperatur) und die Randbedingungen bezüglich ausgewählter Umgebungseinflüsse bestimmt werden können.
- Dadurch können Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch bzw. auf den elektrischen Energiebedarf wie die Innenraumklimatisierung oder Ladeszenarien berücksichtigt werden, die auch von den Randbedingungen der Fahrten abhängen.

- Entsprechend ist die Einbindung der derartig hergeleiteten Profile aus realen Nutzerprofilen in die ökonomischen und ökologischen Bewertungen von Fahrzeugkonzepten neu, die neben gewichteten Ergebnissen für die Gesamtstichprobe auch eine sinnvolle Spannbreite der Ergebnisse aufzeigen lässt.
- Weiterhin ist es im Vergleich zu den in der Arbeit erwähnten stochastischen Ansätzen möglich, nicht nur die Gesamtstichprobe zu betrachten, sondern ausgewählte Tagesverläufe entsprechend der Interpretation der zugehörigen Clustereigenschaften auch gesondert als typische Mobilitäts- und Fahrprofilszenarien zu untersuchen. Wodurch sich auch Anwendungsmöglichkeiten über die vorgestellten Beispiele bzw. über die Zielsetzung dieser Arbeit hinaus ergeben.

Für den Ausblick wird auf den Einsatz der Methode, mögliche Erweiterungen der Datenerhebung und Erweiterung der Clustervariablen eingegangen. In Kapitel 4 wird vorgeschlagen, mittels marktabhängiger realer Nutzerdaten marktabhängige Bewertungen vorzunehmen. Für eine erste Umsetzung erscheinen Datenerhebungen in relevanten Absatzmärkten als sinnvoll. Dabei wird die Chance gesehen, marktgerechte Produkte entwickeln bzw. anbieten zu können. Ein Risiko wird im Aufwand für die Datenerhebung, -verwaltung und -auswertung gesehen.

Für die Übertragbarkeit der Methode auf Elektrofahrzeuge sind Datenerhebungen zu Elektrofahrzeugen erforderlich. Um diese Daten für die Bewertung nachfolgender Elektrofahrzeugkonzepte verwenden zu können, müssen Unterschiede zwischen den Fahrzeugen aus der Datenerhebung und den zu untersuchenden Fahrzeugkonzepten bezüglich der Reichweite und der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. Weiterhin können bei der Berücksichtigung der Fahrweise weitere Aspekte wie eventuelle zusätzliche Einstellmöglichkeiten für Rekuperation oder das Kriechverhalten des Fahrzeugs von Bedeutung sein.

Für Plug-In-Hybridfahrzeuge und Elektrofahrzeuge stellt sich die Frage, ob neben Fahrzeugdaten auch Daten bezüglich der Ladeinfrastruktur wie beispielsweise die Verfügbarkeit und Nutzung von Ladestationen an den jeweiligen Abstellorten berücksichtigt werden können. Im Hinblick auf die Clustervariablen zur Beschreibung der Tagesverläufe erscheint die Untersuchung von

weiteren Größen wie beispielsweise das Höhenprofil oder die Straßenkrümmungen der täglichen Strecken sowie die zuvor erwähnte Verfügbarkeit und Nutzung von Ladestationen als sinnvoll.

A Verzeichnisse

A.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Abb.	Abbildung
ABS	Antiblockiersystem
CAN	Control Area Network
CATI	computer assisted telephone interview
CAWI	computer assisted web interview
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	Leistungszahl (engl. coefficient of performance)
CV	konventionelles Fahrzeug (engl. conventional vehicle)
DIN	Deutsches Institut für Normung
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FTP	Federal Test Procedure
GHG	Treibhausgas (engl. greenhouse gas)
GPS	Global Positioning System
HV	Hochvolt
IMDS	International Material Data System
ISO	Interanational Organization for Standardisation
Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
LCA	Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz (engl. life cycle assessment)
MiD	Mobilität in Deutschland

Abkürzung	Bedeutung
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
NC	Nearest Centroid
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NHTS	National Household Travel Survey
NN	Nearest Neighbour
NV	Niedervolt
PAPI	paper and pencil interview
PE	Primärenergieaufwand
PHEV	Plug-In Hybridfahrzeug (engl. plug-in hybrid electric vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PTC	Positive Temperature Coefficient
SAE	Society of Automotive Engineers
SD-Karte	sichere digitale Speicherkarte (engl. Secure Digital Memory Card)
UF	utility factor
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLTC	Worldwide harmonized Light-Duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure

A.2 Formelzeichen

Die Formelzeichen werden nach Kapiteln gegliedert.

Kapitel 2

Zeichen	Einheit	Beschreibung
F_W	N	Fahrwiderstand
F_{Ro}	N	Rollwiderstand
F_L	N	Luftwiderstand
F_{St}	N	Steigungswiderstand
P_W	P	Fahrwiderstandsleistung
f	-	Rollwiderstandsbeiwert
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
m	kg	Fahrzeugmasse
β	rad	Steigungswinkel
v	m/s ²	Geschwindigkeit
b_e	l/kWh	spezifischer Verbrauch
B_e	l	Absoluter Verbrauch
η	-	Wirkungsgrad
$\eta_{\ddot{u}}$	-	Wirkungsgradkette für Kraftübertragung
η_{gen}	-	Wirkungsgrad der elektrischen Maschine im generatorischen Betrieb
$\overline{\eta}_{mot}$	-	geschätzter Wirkungsgrad der elektrischen Maschine im motorischen Betrieb (vgl. [72])
η_{batein}	-	Einspeisewirkungsgrad der Traktionsbatterie
η_{bataus}	-	Ausspeisewirkungsgrad der Traktionsbatterie
$BE_{(MVKM)}$	g/h	Absolutverbrauch der VKM bei n (vgl. [72])

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$b_{e(LPA) n=konst}$	g/kWh	spezifischer Verbrauch für Lastpunktanhebung bei konstanter Drehzahl (vgl. [72])
P	W	Leistung
P_{Soll}	W	Erforderliche Antriebsleistung an der Kupplung vor dem Getriebeeingang
P_{EM}	W	Erforderliche Leistung der elektrischen Maschine
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
A	m ²	Stirnfläche
a	m/s ²	Beschleunigung
l	m	Radstand
l_v	m	Abstand der Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt
l_h	m	Abstand der Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt
J_x	kg · m ²	rotatorisches Trägheitsmoment
i_x	-	Übersetzung
r_x	m	Radius
T	K	Temperatur
$a_{längs}$	m/s ²	Fahrzeuglängsbeschleunigung
a_{quer}	m/s ²	Fahrzeugquerbeschleunigung
Δt_{Fahrt}	s	Fahrdauer
$\Delta t_{Abstellzeit}$	s	Abstelldauer
a_i	-	Absorptionskoeffizient
τ_i	-	Transmissionskoeffizient
$m_{cp,i}$	J/K	Gesamtwärmekapazität der Einbauten
ε_i	-	Emissionskoeffizient
T	K	Temperatur
φ	%	Luftfeuchte

Zeichen	Einheit	Beschreibung
E_{Solar}	W/m ²	Sonneneinstrahlung
T_i	K	Temperatur der Komponente
T_{Innen}	K	Temperatur Innenraum
φ_{Innen}	%	relative Luftfeuchte im Innenraum
$P_{Grenze,Antrieb}$	W	max. Nennleistung der elektrischen Maschine
$E_{Grenze,Antrieb}$	kWh	Nennkapazität der Traktionsbatterie
UF	-	Utility factor
R_{CD}	-	Charge-Depleting Reichweite
d_k	-	Tagesstrecke
$min()$		Funktion, die den Minimalwert der Eingabewerte ausgibt

Kapitel 3

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$P_{Antrieb}$	W	Erforderliche mechanische Leistung am Getriebeeingang zur Überwindung der Fahrwiderstände
$P_{el.Antrieb}$	W	elektrische Leistung der elektrischen Maschine zur Bereitstellung der erforderlichen mechanischen Leistung am Getriebeeingang zur Überwindung der Fahrwiderstände
P_{KK}	W	Erforderliche mechanische Leistung des Klimakompressors
P_{EKK}	W	Erforderliche elektrische Leistung des elektrischen Klimakompressors
$P_{Bordnetz}$	W	Bordnetzleistung der konventionellen Fahrzeugs
$P_{NV-Bordnetz}$	W	Niedervolt-Bordnetzleistung des Plug-In Hybrid Fahrzeugs

Zeichen	Einheit	Beschreibung
η_{EM}	-	Wirkungsgrad der elektrischen Maschine
$\eta_{Batterie}$	-	Ein- respektive Ausspeisewirkungsgrad der Traktionsbatterie
$\eta_{DC/DC}$	-	Wirkungsgrad des Gleichspannungswandlers
t	s	Dauer
X		Zufallsvariable
$P(X_{n+1} X_n)$		Bedingte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Zustands X_{n+1} nach dem vorhergehenden Zustand X_n
i, k, n	-	Zählvariable
$FZ_{FB,k+1}$		Fahrzeugzustand $\{T_i, T_{Innen}, \dots \text{SoC}\}$ zu Beginn der Fahrt $k + 1$
$FZ_{FE,k+1}$		Fahrzeugzustand $\{T_i, T_{Innen}, \dots \text{SoC}\}$ am Ende der Fahrt $k + 1$
$v(t)_{k+1}$	km/h	Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit der Fahrtdauer der Fahrt $k + 1$
s_{k+1}	km	Streckenlänge der Fahrt $k + 1$
$UB_{Fahrt,k+1}$		Umgebungsbedingungen {Außentemperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, ...} der Fahrt $k + 1$
$t_{Uhrzeit,k+1}$	hh:mm	Uhrzeit der Fahrt $k + 1$
m, m'	-	Objektbezeichnung (Clusteranalyse)
q, r	-	City-Block-Metrik
$x_{mi}, x_{m'i}$	-	Wert des Clustervariablen i des Objektes m bzw. m'
A, A^*, B, B^*		Clusterbezeichnung
RI		Rand-Index
RI_c		korrigierter Rand-Index
a, b, c, d		Paarlingbezeichnungen
n	-	Anzahl der Objekte

Zeichen	Einheit	Beschreibung
n_i	-	Spaltensumme der Kontingenztafel
n_j	-	Zeilensumme der Kontingenztafel
$\dot{Q}_{Transmission,i}$	W	Wärmeeintrag aufgrund Transmission in die bilanzierte Komponente i
$A_{proj,i}$	m ²	projizierte Fläche der Scheiben senkrecht zur Sonneneinstrahlung
τ_i	-	Transmissionskoeffizient
Q_{Sonne}	W/m ²	Sonneneinstrahlung
$\dot{Q}_{Strahlung,i}$	W	Wärmeeintrag durch Wärmestrahlung
ε	-	Emissionskoeffizient
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante
T_i	K	Temperatur der Komponente i
T_{umg}	K	Temperatur der komponentenumgebenden Schicht
α	W/(m ² K)	Wärmeübertragungskoeffizient
s	m	Dicke der Komponentenschicht
λ	W/(m K)	Wärmeleitungskoeffizient
\dot{m}	kg/s	Luftmassenstrom
A	m ²	für die Wärmeübertragung relevante Fläche der Komponente
$\dot{Q}_{Kälteleistung}$	W	erforderliche Kälteleistung (luftseitig) zur Kühlung des Innenraums
$h_{Luft,ansaug.}$	J/kg	spezifische Enthalpie
$h_{Verdampfer}$	J/kg	spezifische Enthalpie
$\dot{Q}_{Heizleistung}$	W	erforderliche Heizleistung (luftseitig)
$c_{p,Luft}$	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität der Luft
$T_{Einblas}$	K	Temperatur der Luft an den Einblasdüsen
$T_{Verdampfer}$	K	Temperatur der Luft am Verdampfer
$P_{el,Kühlen}$	W	erforderliche elektrische Leistung zum Kühlen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\dot{Q}_{\text{Kälteleistung, gesa}}$	W	erforderliche Kälteleistung (luftseitig) zur Kühlung des Innenraums und der Traktionsbatterie
η_{PTC}	-	Wirkungsgrad des PTC-Heizelements

Kapitel 4

Zeichen	Einheit	Beschreibung
C_{Gesamt}	Währung	Gesamtbetriebskosten
C_{Fix}	Währung	Fixkosten
C_{var}	Währung	Variable Kosten
C_{Kauf}	Währung	Anschaffungspreis
$C_{\text{Zulassung}}$	Währung	Zulassungsgebühren
$C_{\text{Ermäßigung}}$	Währung	Ermäßigungen
k	-	Faktor für Einzelhandelsspanne
C_{glider}	Währung	Produktkosten des Gliders
C_{VKM}	Währung	Produktkosten der Verbrennungskraftmaschine
C_{Getriebe}	Währung	Produktkosten der Verbrennungskraftmaschine
C_{Batterie}	Währung	Produktkosten der Traktionsbatterie
C_{EM}	Währung	Produktkosten der elektrischen Maschine
C_{LE}	Währung	Produktkosten der Leistungselektronik
$C_{\text{Kraftst},t}$	Währung	Kraftstoffkosten im Nutzungsjahr t
$C_{EL,t}$	Währung	Elektrizitätskosten im Nutzungsjahr t
$C_{\text{Steuern},t}$	Währung	Kraftfahrzeugsteuern im Nutzungsjahr t
$C_{\text{Versicherung},t}$	Währung	Kraftfahrzeugversicherung im Nutzungsjahr t
$C_{\text{Wartung},t}$	Währung	Wartungskosten im Nutzungsjahr t
$k_{\text{Kraftst},t}$	Währung/l	Kraftstoffkosten im Nutzungsjahr t

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$B_{e,Kraftst}$	l/100 km	streckenbezogener Kraftstoffverbrauch
$S_{jährlich}$	Km	Jahresfahrleistung
$k_{EL,t}$	Währung/kWh	Elektrizitätskosten im Nutzungsjahr t
$B_{e,El}$	kWh/100 km	streckenbezogener elektrischer Energiebedarf (Laden)
η_{Laden}	-	Ladewirkungsgrad - Traktionsbatterie

A.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der durchschnittlichen Zertifizierungswerte lokaler Kohlenstoffdioxidemissionen neu zugelassener Pkw in Deutschland (Daten:[44]).....	1
Abb. 2:	Gliederung der Arbeit.....	5
Abb. 3:	Beispiel für zu berücksichtigende Anforderungen bei Fahrzeugkonzeption und Package; Darstellung nach BRAESS ET AL. (vgl. [22])	8
Abb. 4:	V-Modell nach VDI 2206 [149]	9
Abb. 5:	Fahrwiderstände	17
Abb. 6:	Als behaglich empfundene Innenraumtemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (vgl. [75])	18
Abb. 7:	Kaltdampf-Kompressionskälte-Kreislauf [66]	20
Abb. 8:	Beispiel für die Größenordnung und Verhältnisse der Fahrwiderstände für ein Mittelklassefahrzeug ($m = 1500 \text{ kg}$, $f = 0,011$, $A = 2 \text{ m}^2$, $cw = 0,3$).....	24
Abb. 9:	Einfluss der Nebenverbraucher (inkl. Verluste) auf den streckenbezogenen Energiebedarf in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit	27
Abb. 10:	Beispiel für Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen nach [145].....	36
Abb. 11:	Ablaufdiagramm der Zyklerstellung nach [145]	37
Abb. 12:	Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040 (vgl. [32]).....	42
Abb. 13:	Wissenschaftliche Arbeiten zur Bewertung von Fahrzeugkonzepten aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Fahr- und Mobilitätsprofilen; <input type="checkbox"/> = methodisch betrachtet; <input checked="" type="checkbox"/> = auch Beispielergebnisse gezeigt.....	47

Abb. 14:	Wissenschaftliche Arbeiten zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen bezüglich Fahrweise und Mobilitätsverhalten; □ = methodisch betrachtet; ■ = auch Beispielergebnisse gezeigt	48
Abb. 15:	Zielkonflikt zwischen Simulationsaufwand, Detaillierungsgrad des Mobilitätsprofils und der Fahrweise und Detaillierungsgrad des Fahrzeugmodells	52
Abb. 16:	Methode zur Einbeziehung realer Nutzerprofile in die Bewertung von Fahrzeugkonzepten bezüglich ihrer Ökobilanz und Gesamtbetriebskosten	54
Abb. 17:	Datenverarbeitung; grau hinterlegt= im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Algorithmen	62
Abb. 18:	Relative Häufigkeitsverteilung der zurückgelegten Strecken am Tag aus der Datenerhebung	65
Abb. 19:	Vereinfachte Überleitung des Leistungsbedarfs für Antriebs-, Klimatisierung und Bordnetzfunktionen von einem konventionellen Fahrzeug auf ein P2-Hybrid zur Betrachtung von rein elektrischen Fahrten	66
Abb. 20:	Tagesenergiebedarf für Antrieb aus den Fahrzeugaufzeichnungen ohne Berücksichtigung des Rekuperationspotenzials	67
Abb. 21:	Potenzial für rein elektrisch gefahrenen Tage in Abhängigkeit der Batteriekapazität (nutzbar) und der Leistung der elektrischen Maschine (EM) und der aufgezeichneten fahrzeugspezifischen Größen	68
Abb. 22:	Abstellzeitabhängige Ladeszenarienbetrachtung. Die Fahrten zwischen zwei Ladevorgängen werden zusammengefasst (Tour).	68

Abb. 23: Potenzial für rein elektrisch gefahrenen Tage in Abhängigkeit der Ladeszenarien bei 10 kWh Batteriekapazität (nutzbar), 100 kW Leistung der elektrischen Maschine (EM) und der aufgezeichneten fahrzeugspezifischen Größen 69

Abb. 24: Morphologischer Kasten zur Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit geprüften Ansatzkombinationen; grau = nicht weiter verfolgt 76

Abb. 25: Beispiel für einen „Tagesverlauf“, der über die Uhrzeit der Fahrten an einem Tag, deren Dauer und Geschwindigkeitsprofil beschrieben wird (schematische Darstellung) 80

Abb. 26: Vorgehen zur Klassifizierung von Tagesverläufen 81

Abb. 27: Darstellung der Clusterzentroide für die Lösung mit 37 Clustern anhand ihrer z-transformierten Merkmalausprägungen; vgl. ausgewählte Variablen in Tab. 8 91

Abb. 28: Darstellung der Clusterzentroide für die Lösung mit 23 Clustern anhand ihrer z-transformierten Merkmalausprägungen; vgl. ausgewählte Variablen in Tab. 8 92

Abb. 29: Beispiel für das extrahierte Fahrten- bzw. Geschwindigkeitsprofil eines Tagesverlaufs; Objekt am nächsten zum Zentroid des Clusters Nr. 13 der 37-Clusterlösung..... 96

Abb. 30: Vergleich der relativen Verweildauer [%] je Geschwindigkeits-Beschleunigungsklasse; links: alle Tage der Stichprobe; rechts: Tagesverläufe aus der Clusteranalyse gewichtet nach Anzahl der Objekte je Cluster 97

Abb. 31: Vergleich der gefahrenen Minuten in Abhängigkeit von der Uhrzeit (auf die Gesamtfahrdauer normierte Darstellung) 98

Abb. 32: Berechnung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der ausgewählten Mobilitätsprofile und der Umgebungsbedingungen mittels eines gekoppelten Längsdynamik- und Innenraummodells (schematische Darstellung)	104
Abb. 33: Empirischer Niedervoltbordnetzverbrauch aus den Datenaufzeichnungen in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Fahrzeit	108
Abb. 34: Bilanzierung der Wärmeeinträge für das analytische 2-Zonen-Fahrzeugkabinenmodell nach [17] (schematische Darstellung)	111
Abb. 35: Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Energiebedarfs unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien	117
Abb. 36: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für 7 der 28 hergeleiteten Tagesverläufe für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage.....	118
Abb. 37: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf für Tagesverlauf Nr. 5 für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) in verschiedenen Monaten; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36	119
Abb. 38: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf für Tagesverlauf Nr. 5 für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) im Sommer und im Winter in Berlin, Los Angeles (L.A.) und Oslo; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36	120

Abb. 39: Nach dem Streckenanteil der einzelnen Cluster an der Gesamtstrecke gewichteter Wert des berechnetes Kraftstoffverbrauchs und des elektrischen Energiebedarfs für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage; Normierung analog Abb. 36..... 122

Abb. 40: Nach dem Streckenanteil der einzelnen Cluster an der Gesamtstrecke gewichteter Wert des berechnetes Kraftstoffverbrauchs und des el. Energiebedarfs für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV); Ladeszenario: Laden, sobald Abstellzeit länger als 2,5 Stunden; Normierung analog Abb. 36 122

Abb. 41: Erstellung der Sachbilanz für ein untersuchtes Fahrzeugkonzept unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien 124

Abb. 42: Vorgehen nach MAKHOTIN [98] zur Erstellung von Sachbilanzen für die im Rahmen dieser Arbeit als Beispiel untersuchten Fahrzeugkonzepte. 125

Abb. 43: CO₂-Ausstoß im Zuge der Strombereitstellung (Well-to-Tank); Quellen: Strommix Deutschland [78]; Strommix USA [49]; Strommix Kalifornien [49]; Strommix Norwegen [79]..... 130

Abb. 44: Vergleich des CO₂-Ausstoßes (Well-to-Wheel;WtW) für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Deutschland. Strommix nach [78]; normiert auf den höchsten Wert in Abb. 47;..... 131

Abb. 45: Vergleich des CO ₂ -Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Deutschland; basierend auf dem nach Streckenanteilen gewichteten Kraftstoffverbrauch und el. Energiebedarf. Strommix nach [78].....	132
Abb. 46: Vergleich des CO ₂ -Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für USA. Strommix nach [49]; normiert auf den höchsten Wert in Abb. 47;	132
Abb. 47: Vergleich des CO ₂ -Ausstoßes für das untersuchte konventionelle Fahrzeug (CV) und das untersuchte Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) für Norwegen. Strommix nach [79];.....	133
Abb. 48: Gesamtbetriebskostenrechnung aus Sicht des Kunden unter Berücksichtigung von realen Nutzerprofilen und Fahrzeugumgebungsszenarien.....	135
Abb. 49: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; Deutschland; Elektrizitätskosten nach [121]	141
Abb. 50: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs (PHEV) gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug (CV); Deutschland; Elektrizitätskosten nach [54]	142
Abb. 51: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs (PHEV) gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug (CV); Deutschland; Elektrizitätskosten nach [121]; Variation der jährlichen Laufleistung.....	143

Abb. 52: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; USA, Kalifornien 143

Abb. 53: Kumulierte Kostenersparnis aufgrund der Differenz der variablen Kosten des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs gegenüber dem untersuchten konventionellen Fahrzeug; Norwegen, Oslo 144

Abb. 54: Dendrogramm – Clusterlösung mit 23 Clustern; dargestellt mit [136] 189

Abb. 55: Dendrogramm – Clusterlösung mit 37 Clustern; dargestellt mit Matlab® 190

Abb. 56: Verschmelzungsniveau und -zunahme nach Durchführung der Clusteranalyse nach dem WARD-Verfahren 191

Abb. 57: Stabilitätsprüfung bzgl. der Objektauswahl. Clusteranalyse der 37 Clusterzentren der Teilmengen A und B der Stichprobe (vgl. 3.5.5) 192

Abb. 58: Längsdynamikmodell des untersuchten konventionellen Fahrzeugs, Darstellung der Verbindungen (a) und Funktionsein- und ausgangswerte (b) nach [68] 193

Abb. 59: Längsdynamikmodell des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs, Darstellung der Verbindungen (a) und Funktionsein- und ausgangswerte (b) nach [68] 194

Abb. 60: Methodischer Ansatz zum Angleichen der Längsdynamik nach (vgl. [63]) 195

Abb. 61: Einordnung der Fahrzeugmodelle in den Performance Index (vgl. [63]) 196

Abb. 62: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage 197

Abb. 63:	Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage.....	197
Abb. 64:	Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage.....	198
Abb. 65:	Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage.....	198
Abb. 66:	Berechneter Kraftstoffverbrauch und el.Energiebedarf nach Strecken-anteilen gewichtet; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage, Los Angeles.....	199
Abb. 67:	Berechneter Kraftstoffverbrauch und el.Energiebedarf nach Strecken-anteilen gewichtet; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage, Oslo	199

A.4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Klassifizierung von Fahrzeugantrieben nach [122].....	11
Tab. 2:	Gliederung von Parallelhybridantrieben nach [122].....	13
Tab. 3:	Einfluss des Fahrers, des Fahrzeugs und der Fahrzeugumgebung auf den Energiebedarf.....	23
Tab. 4:	Untersuchung von Mobilitätsprofilen; Ziele, Methoden und Relevanz für die vorliegende Arbeit.....	33
Tab. 5:	Untersuchung von Fahrprofilen; Ziele, Methoden und Relevanz für die vorliegende Arbeit.....	35
Tab. 6:	Antriebsspezifische Messgrößen zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher sowie Größen zur Beschreibung der Komponentenzustände	56
Tab. 7:	Fahrzeugantriebsunabhängige Messgrößen zur Bestimmung des Energiebedarfs für den Antrieb und für die Nebenverbraucher sowie Größen zur Beschreibung der Umgebungszustände.....	58
Tab. 8:	Untersuchte Variablen für die Clusteranalyse zur Beschreibung der täglichen Mobilitäts- und Fahrprofile; schwarz=für Clusteranalyse verwendet; grau=nicht weiter verwendet.....	83
Tab. 9:	Zusammenstellung von Abbruchkriterien zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl.....	90
Tab. 10:	Rand-Index zur Bewertung der Übereinstimmung der Clusterlösungen nach Modifikation der Objektauswahl.....	94
Tab. 11:	Für die Simulation ausgewählte Tagesverläufe inklusive Cluster-Zuordnung und Beschreibung.....	100
Tab. 12:	Vergleich der vorgestellten Methode mit den in 2.4 betrachteten Methoden	102

A.5 Literaturverzeichnis

- [1] ABAY & MEIER VERKEHRSPANUNG UND -ÖKONOMIE: *Konzeptstudie Klimaanlage von Personenwagen Überprüfung des Fahrverhaltens von Personenwagen in der Schweiz*, Nr. 255. Zürich, 2002
- [2] ADAC E.V.: *ADAC Autokostenrechner*.
<http://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/autokostenrechner/default.aspx>. - abgerufen am 12.06.2014
- [3] AL-ALAWI, B.M. ; BRADLEY, T.H.: Total cost of ownership, payback, and consumer preference modeling of plug-in hybrid electric vehicles. In: *Applied Energy* Bd. 103, Elsevier Ltd (2013), S. 488–506
- [4] ALISCH [RED.], K. ; WINTER [RED.], E. ; ARENTZEN [RED.], U.: *Gabler Wirtschafts Lexikon*. 16. Auflage. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2004
- [5] ANDRÉ, M. ; HASSEL, D. ; WEBER, F.: *Development of short driving cycles: short driving cycles for the inspection of in-use cars, representative European driving cycles for the assessment of the assessment of the I/M schemes*. INRETS report, nLEN9809, Bron, France, 1998
- [6] ANDRÉ, M.: *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles*, Nr. Report INRETS-LTE 0411. Report INRETS-LTE 0411, Bron, France, 2004
- [7] ANDRÉ, M.: *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part B: Driving cycles according to vehicle power*, Nr. Report INRETS-LTE 0412. Report INRETS-LTE 0412, Bron, France, 2006
- [8] ANDRÉ, M. ; HICKMAN, A.J. ; HASSEL, D. ; JOUMARD, R.: Driving Cycles for Emission Measurements Under European Conditions. In: *SAE Technical Paper* (1995), Nr. 950926
- [9] ARAL AKTIENGESELLSCHAFT - MARKTFORSCHUNG: *Aral Studie - Trends beim Autokauf*. Bochum, 2011

- [10] ARGONNE NATIONAL LABORATORY TRANSPORTATION TECHNOLOGY R&D CENTER: *Greet Model*. <https://greet.es.anl.gov/>. - abgerufen am 07.10.2014
- [11] AVL LIST GMBH: *Users Guide AVL Cruise Version 2010*. Graz : AVL List GmbH, 2010
- [12] B. REGNIET: *autokostencheck.de*. <http://www.autokostencheck.de>. - abgerufen am 02.12.2014
- [13] BACHER, J. ; PÖGE, A. ; WENZIG, K.: *Clusteranalyse, Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren*. 3. Auflage. München : Oldenburg Verlag München, 2010
- [14] BAKER, F.B. ; HUBERT, L.J.: Measuring the Power of Hierarchical Analysis Cluster. In: *Journal of the American Statistical Association* Bd. 70 (1975), Nr. 349, S. 31–38
- [15] BANDYOPADHYAY, S. ; SAHA, S.: *Unsupervised classification: similarity measures, classical and metaheuristic approaches, and applications*. Berlin Heidelberg : Springer, 2013 — ISBN 9783642324505
- [16] BARTELT, B. ; REGNIET, G. ; SCHMIDT, G. ; JOST, P. ; SONNBORN, K.-S.: *Untersuchungen des repräsentativen Fahrverhaltens von PKW auf Stadt- und Landstraßen*. UBA-FB 94-082, Berlin : Umweltbundesamt, 1994
- [17] BASLER, A. ; FREESE, B. ; MEGYESI, P. ; ROTH, M. ; GAUTERIN, F.: Evaluation of the energy demand for air conditioning by means of weather and mobility data. In: BARGENDE, M. ; REUSS, H.-C. ; WIEDEMANN, J. (Hrsg.): *14th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Proceedings*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 — ISBN 978-3-658-05129-7, S. 705–719
- [18] BIRKHOLD, J.-M.: *Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben*. Forschungsberichte: IPEK, Bd 60, Karlsruhe, KIT-Bibliothek, Dissertation, 2013

- [19] BMWI: www.bmwi.de.
<http://www.bmwi.de/DE/Presse/pressemitteilungen,did=766888.html>.
- abgerufen am 12.01.2017
- [20] BORTZ, J. ; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Heidelberg : Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2009
- [21] BORTZ, J. ; SCHUSTER, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7. Auflage. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [22] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT(HRSG.), U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 — ISBN 978-3-8348-1011-3
- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Mobilität in Deutschland 2008 Tabellenband*. FE-Nr. 70.801/2006, Bonn und Berlin, 2008
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR BAU UND STADTENTWICKLUNG: *MiD 2008, Mobilität in Deutschland 2008 Ergebnisbericht*. FE-Nr. 70.801/2006, Bonn und Berlin, 2010
- [25] CALIFORNIA DEPARTMENT OF MOTOR VEHICLES: *Vehicle Registration Fee Calculator*.
<https://www.dmv.ca.gov/wasapp/FeeCalculatorWeb/newVehicleFees.do>. - abgerufen am 10.11.2014
- [26] CALIŃSKI, T. ; HARABASZ, J.: A dendrite method for cluster analysis. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* Bd. 3 (1974), Nr. 1, S. 1–27
- [27] CHLOND, B. ; KAGERBAUER, M. ; OTTMANN, P. ; ZUMKELLER, D.: Mobilitätspanel : Pkw-Fahrleistungen und Treibstoffverbrauch im Vergleich. In: *INTERNATIONALES VERKEHRSWESSEN (61) 3/2009* (2009), S. 1–6
- [28] DALRYMPLE-ALFORD, E.C.: Measurement of clustering in free recall. In: *Psychological Bulletin* Bd. 74 (1970), Nr. 1, S. 32–34

- [29] DIN: *Straßenfahrzeuge - Kraftfahrzeugbau - Teil 3: Prüfbedingungen, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Elastizität, Masse, Begriffe, Verschiedenes (DIN 70020-3:2008-03)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008
- [30] DIN EN ISO: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005
- [31] DIN EN ISO: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2006
- [32] DIN EN ISO: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2009
- [33] DIN EN ISO: *Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14045:2012)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012
- [34] DINGER, A. ; MARTIN, R. ; MOSQUET, X. ; RABL, M. ; RIZOULIS, D. ; RUSSO, M.: Batteries for electric cars: challenges, opportunities, and the outlook to 2020. In: *Boston Consulting Group* (2010)
- [35] DIRECTORATE OF CUSTOMS AND EXCISE OSLO: *Importation of motor vehicles*. <http://www.toll.no/en/international/english/motor-vehicles/import-a-car-motorcycle-or-other-vehicle/importation/importation-of-motor-vehicles/?step=3>. - abgerufen am 11.10.2014
- [36] DIRECTORATE OF NORWEGIAN CUSTOMS: <http://www.toll.no>. <http://www.toll.no/en/international/english/motor-vehicles/annual-motor-vehicle-tax/annual-motor-vehicle-tax-for-2014>. - abgerufen am 23.12.2014
- [37] DUDA, R.O. ; HART, P.E. ; STORK, D.G.: *Pattern Classification*. 2. Auflage. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001
- [38] EBERLE, R.: *Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau*. Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr / Schriftenreihe B - Fahrzeugtechnik - des Instituts für Strassen- und Schienenverkehr, Bd 8, Berlin, TU, Univ.-Bibliothek, Abt. Publ., Dissertation, 2000

- [39] ECE101: Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) : Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, 2012, S. 1–77
- [40] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE; INLAND TRANSPORT COMMITTEE: *Proposal for a new global technical regulation on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)*. https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/25270844/WLT_P-11-04e-clean_GTR_Version_26.05.2015.docx?api=v2. - abgerufen am 01.12.2015
- [41] EDWARDS, R. ; LARIVE, J.-F. ; BEZIAT, J.-C.: *Well-to-wheels analysis of alternative fuels and powertrains in the European context; APPENDIX 2 WTW GHG-Emissions of Externally Chargeable Electric Vehicles; Version 3c*. http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/wtw3_wtw_appendix2_eurformat.pdf
- [42] EDWARDS, R. ; LARIVÉ, J.-F. ; MAHIEU, V. ; ROUVEIROLLES, P.: *WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT, TANK-to-WHEELS Report Version 3*. <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>. - abgerufen am 04.05.2010
- [43] EDWARDS, R. ; LARIVÉ, J.-F. ; RICKEARD, D. ; WEINDORF, W.: *WELL-TO-TANK Report Version 4 . a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS, WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT*. Ispra, 2014 — ISBN 9789279338885
- [44] EEA: *Monitoring CO2 emissions from new passenger cars and vans in 2015*, Nr. 27. Kopenhagen, 2016 — ISBN 978-92-9213-822-6
- [45] EG: VERORDNUNG (EG) Nr. 443/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009. Bd. L, Nr. 140 : DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2009, S. 1–15
- [46] EGHTESSAD, M.: *Optimale Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge*. Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Bd 35, Aachen, Shaker, Dissertation, 2014

- [47] EPA: Final Regulations for Revisions to the Federal Test Procedure for Emissions From Motor Vehicles. Bd. 61, Nr. 205 : Environmental Protection Agency, 1996, S. 54851–54906
- [48] EPA: Fuel Economy Labeling of Motor Vehicles: Revisions To Improve Calculation of Fuel Economy Estimates. Bd. 71, Nr. 248 : Environmental Protection Agency, 2006, S. 77871–77969
- [49] EPA: *eGRID 9th edition Version 1 . 0 Year 2010 GHG Annual Output Emission Rates*.
http://epa.gov/cleanenergy/documents/egridzips/eGRID_9th_edition_V1-0_year_2010_GHG_Rates.pdf. - abgerufen am 12.06.2014
- [50] EPA ; NHTSA ; DOT: Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards; Final Rule. Bd. 75, Nr. 88 : Environmental Protection Agency (EPA) and National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), DOT, 2010, S. 25323–25728
- [51] EPA ; NHTSA ; DOT: 2017 and later model year light-duty vehicle greenhouse gas emissions and corporate average fuel economy standards; final rule. Bd. 77, Nr. 199 : Environmental Protection Agency (EPA) and National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA), DOT., 2012, S. 62623–63200
- [52] EPRI: *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options*. EPRI 2001. 1000349, Palo Alto, 2001
- [53] ERDMANN, N.: *Ableitung von äquivalenten Verbrauchszyklen auf der Basis von realen Fahrdaten*, Westsächsische Hochschule Zwickau (FH), Diplomarbeit, 2004
- [54] ERNST, C.-S. ; HACKBARTH, A. ; MADLENER, R. ; LUNZ, B. ; UWE SAUER, D. ; ECKSTEIN, L.: Battery sizing for serial plug-in hybrid electric vehicles: A model-based economic analysis for Germany. In: *Energy Policy* Bd. 39 (2011), Nr. 10, S. 5871–5882
- [55] EWG: RICHTLINIE 92 / 21 / EWG DES RATES vom 31 . März 1992 über Massen und Abmessungen von Kraftfahrzeugen der Klasse M1, Nr. L129 : Der Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1992, S. 1–10

- [56] EWG: 70/220/EWG Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen : Der Rat der Europäischen Gemeinschaften, 2007
- [57] FANGER, P.O.: *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environment Engineering*. USA; zitiert nach H. Großmann; Pkw-Klimatisierung; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 2010. : McGraw-Hill Book Company, 1972
- [58] FISCH UND FISCHL GMBH: *Spritmonitor.de*.
<http://www.spritmonitor.de/>. - abgerufen am 15.06.2013
- [59] FISCHER, R. ; JÜRGENS, G. ; KÜCÜKAY, F. ; NAJORK, R. ; POLLAK, B.: *Das Getriebebuch*. Wien : Springer-Verlag/Wien, 2012 — ISBN 978-3-7091-0876-5
- [60] FLECKNER, M.: *Strategien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für ein Vollhybridfahrzeug*. Schriftenreihe Automobiltechnik, Bd 139, Aachen, FKA Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbh Aachen, Dissertation, 2010
- [61] FRANKE, T. ; KREMS, J.F.: What drives range preferences in electric vehicle users? In: *Transport Policy* Bd. 30 (2013), S. 56–62
- [62] GEMANDER, A.: *Erstellung und Validierung von Simulationsmodellen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2011
- [63] GESER, A.: *Erweiterung von Simulationsmodellen für hybride Fahrzeugkonzepte zwecks Untersuchung des Einflusses von Umgebungsbedingungen und Fahrverhalten*. München, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2011
- [64] GONDER, J. ; SIMPSON, A.: Measuring and Reporting Fuel Economy of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In: *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition*. Japan : National Renewable Energy Laboratory, 2006
- [65] GOODMAN, L. ; KRUSKAL, W.: Measures of association for cross classifications. In: *Journal of the American Statistical Association* Bd. 49 (1954), Nr. 268, S. 732–764

- [66] GROßMANN, H.: Pkw-Klimatisierung. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (2010) — ISBN 978-3-642-05494-5
- [67] GROTE, K.-H. ; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *DUBBEL—Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage : Springer Berlin Heidelberg New York, 2007 — ISBN 978-3-540-49714-1
- [68] GUZZELLA, L. ; SCIARRETTA, A.: *Vehicle Propulsion Systems*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 — ISBN 13 978-3-540-25195
- [69] HEWLETT-PACKARD GMBH: www.mdsystem.com.
<http://www.mdsystem.com>. - abgerufen am 12.10.2014
- [70] HOFMANN, J. ; KEHL, S. ; ROTH, M. ; MEGYESI, P. ; WALLISER, F.-S.: Integration von Start-Stopp in Oberklasse-Fahrzeugen mit Automatikgetriebe. In: *14. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Baden-Baden, 7. und 8. Oktober 2009*. Baden-Baden : VDI Verlag GmbH, 2009
- [71] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge*. 2. Auflage. Wien : Springer Verlag - Wien, 2014 — ISBN 978-3-7091-1780-4
- [72] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge*. Vienna : Springer Vienna, 2010 — ISBN 978-3-211-89190-2
- [73] HOUGHTON, J. T. ; MEIRA FILHO, L. G. ; CALLANDER, B. A. ; HARRIS, N. ; KATTENBERG, A. ; MASKELL, K. (Hrsg.): *Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : University Press, 1996 — ISBN 0 521 56433 6
- [74] HUBERT, L.J. ; LEVIN, J.R.: A general statistical framework for assessing categorical clustering in free recall. In: *Psychological Bulletin* Bd. 83 (1976), Nr. 6, S. 1072–1080 — ISBN 1939-1455(Electronic);0033-2909(Print)
- [75] HUCHO, W.-H. ; AHMED, S.R.: *Aerodynamik des Automobils : Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. 5. Auflage. Wiesbaden : Vieweg, 2005 — ISBN 3-528-03959-0
- [76] HUK24: *HUK24*. www.huk24.de. - abgerufen am 24.12.2014

- [77] HUNG, W.T. ; TONG, H.Y. ; LEE, C.P. ; HA, K. ; PAO, L.Y.:
Development of a practical driving cycle construction methodology:
A case study in Hong Kong. In: *Transportation Research Part D:
Transport and Environment* Bd. 12 (2007), Nr. 2, S. 115–128
- [78] ICHA, P.: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des
deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012*. Bd. 7. Dessau-
Roßlau, 2013 — ISBN 9781781002490
- [79] IEA: *Energy Policies of IEA Countries - Norway 2011 Review*.
Paris : International Energy Agency, 2011 — ISBN 9789264098152
- [80] INFAS; DIW: *Tabellenband Mobilität in Deutschland -
Basisstichprobe*. Bonn und Berlin : Institut für angewandte
Sozialwissenschaft GmbH (Infas), Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung (DIW), 2003
- [81] JANBEN, A. ; KÜÇÜKAY, F.: Simulation repräsentativer Lastkollektive
für Fahrwerkskomponenten. In: *VDI Berichte* (2002), S. 1–14
- [82] JANBEN, A.: *Repräsentative Lastkollektive für Fahrwerkskomponenten*.
Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig,
bd 12, Aachen, Shaker, Dissertation, 2007
- [83] JOST, P. ; SONNBORN, K.-S. ; SCHMIDT, G. ; REGNIET, G.:
*Clusteranalytische Ermittlung von repräsentativen Fahrkurven von
Personenwagen in der Schweiz*. Bern : Bundesamt für Umwelt, Wald
und Landschaft, 1993
- [84] JRC: *Photovoltaic Geographical Information System*.
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/DRcalc.php>. - abgerufen am
12.10.2014
- [85] KAMBLE, S.H. ; MATHEW, T. V. ; SHARMA, G.K.: Development of
real-world driving cycle: Case study of Pune, India. In:
Transportation Research Part D: Transport and Environment Bd. 14,
Elsevier Ltd (2009), Nr. 2, S. 132–140
- [86] KARABASOGLU, O. ; MICHALEK, J.: Influence of driving patterns on
life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle
powertrains. In: *Energy Policy* Bd. 60, Elsevier (2013), S. 445–461

- [87] KICKARTZ, K.: *Analyse des Kundenfahrverhaltens und Anforderungsbeschreibung an Plug-In-Hybridfahrzeuge zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs*, Hochschule Esslingen University of Applied Sciences, Bachelorarbeit, 2011
- [88] KOFFLER, C.: *Automobile Produkt-Ökobilanzierung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2007
- [89] KOLKE, R.: *Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Strassenverkehr*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2004
- [90] KONZ, L. ; LEMKE, N. ; FÖRSTERLING, S. ; EGHTESSAD, M.: Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge. In: *FAT Schriftreihe 233*. Berlin (2011)
- [91] KORTHAUER, R. ; KORTHAUER, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-30652-5
- [92] KRINKE, S. ; BOßDORF-ZIMMER, B. ; GOLDMANN, D.: *Ökobilanz Altfahrzeug-Recycling Vergleich des VW-SiCon Verfahrens und der Demontage von Kunststoff-Bauteilen mit nachfolgender werkstofflicher Verwertung*. Wolfsburg : Volkswagen AG, 2005
- [93] KUHLE, M. ; KARSTENS, D.: Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions. In: *SAE* (1978), Nr. 780650
- [94] DE LA LAYOS FUNTE, L.A.: Mobilität im Personenverkehr in Europa. In: *Statistik kurz gefasst. Verkehr* (2007), Nr. 87/2007
- [95] LEE, T. ; FILIPI, Z.S.: Representative Real-world Driving Cycles in Midwestern US. In: *International scientific conference on hybrid and electric vehicles RHEVE 2011*. Rueil-Malmaison, 2011
- [96] MACQUEEN, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Bd. 1. Berkeley, California : University of California Press, 1967, S. 281–297

- [97] MAJEAU-BETTEZ, G. ; HAWKINS, T.R. ; STRÖMMAN, A.H.: Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. In: *Environmental science & technology* Bd. 45 (2011), Nr. 10, S. 4548–54
- [98] MAKHOTIN, S.: *Vergleich verschiedener PKW-Konzepte anhand von Primärenergieaufwand und CO₂-Äquivalenten*, Universität Bremen, Diplomarbeit, 2011
- [99] MEGYESI, P. ; ROTH, M. ; GAUTERIN, F.: Solar roof panel application to support the vehicle power supply and reduce fuel consumption. In: *International scientific conference on hybrid and electric vehicles RHEVE 2011*. Rueil-Malmaison, 2011
- [100] MERCEDES-BENZ: *Umweltzertifikat für den S 400 Hybrid*. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1312394-49-1312442-1-0-0-0-0-0-13-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>. — Mercedes-Benz Technology Center
- [101] MILLIGAN, G.W.: A monte carlo study of thirty internal criterion measures for cluster analysis. In: *Psychometrika* Bd. 46 (1981), Nr. 2, S. 187–199
- [102] MILLIGAN, G. ; COOPER, M.: An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. In: *Psychometrika* Bd. 50 (1985), Nr. 2, S. 159–179
- [103] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Auflage. Auflage : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [104] MOOI, E. ; SARSTEDT, M.: *A Concise Guide to Market Research*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011 — ISBN 978-3-642-12540-9
- [105] MOSQUET, X. ; DEVINENI, M. ; MEZGER, T. ; ZABLIT, H. ; DINGER, A. ; GERRITS, M. ; RUSSO, M.: *Report Powering Autos to 2020 The Era of the Electric Car?*, 2011
- [106] MÜLLER-KOSE, J.-P.: *Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe*. Bd 3 der Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Aachen, Shaker, Dissertation, 2002

- [107] *National Household Travel Survey (NHTS)*.
<http://nhts.ornl.gov/introduction.shtml>. - abgerufen am 11.08.2014
- [108] *National Solar Radiation Data Base*.
http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2010/hourly/list_by_state.html. - abgerufen am 12.10.2014
- [109] NEUBAUER, J. ; SMITH, K. ; WOOD, E. ; PESARAN, A. ; NEUBAUER, J. ; SMITH, K. ; WOOD, E. ; PESARAN, A.: *Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries*. Denver, 2015
- [110] NEUBAUER, J. ; BROOKER, A. ; WOOD, E.: Sensitivity of battery electric vehicle economics to drive patterns, vehicle range, and charge strategies. In: *Journal of Power Sources* Bd. 209, Elsevier B.V. (2012), S. 269–277
- [111] NEUBAUER, J. ; BROOKER, A. ; WOOD, E.: Sensitivity of plug-in hybrid electric vehicle economics to drive patterns, electric range, energy management, and charge strategies. In: *Journal of Power Sources* Bd. 236, Elsevier B.V (2013), S. 357–364
- [112] NIEMEIER, D. ; LIMANOND, T. ; MOREY, J.: *Data collection for driving cycle development: evaluation of data collection protocols*. Davis, 1999
- [113] NIES, B. ; KELL, T. ; WILDE, A.: Capability of a Plug-In Hybrid (PHEV) System to Reduce the Consumption Depending on the Type of Use. In: *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012*. Aachen, 2012, S. 279–296
- [114] *Norwegian Meteorological Institute, „eKlima“,“*.
http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL. - abgerufen am 13.06.2014
- [115] NOTTER, D. A ; GAUCH, M. ; WIDMER, R. ; WÄGER, P. ; STAMP, A. ; ZAH, R. ; ALTHAUS, H.-J.: Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. In: *Environmental science & technology* Bd. 44 (2010), Nr. 17, S. 6550–6
- [116] PETERSON, S.B. ; APT, J. ; WHITACRE, J.F.: Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization. In: *Journal of Power Sources* Bd. 195 (2010), Nr. 8, S. 2385–2392 — ISBN 0378-7753

- [117] PFRIEM, M. ; GAUTERIN, F. ; MEYER, T.: Selected results from a large-scale field operational test with electric vehicles in Germany and France. In: *Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2014), 5th IET*. London, 2014
- [118] PINKOFSKY, L.: *Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage*, TU Braunschweig, Dissertation, 2006
- [119] PLÖTZ, P. ; GNANN, T. ; KÜHN, A. ; WIETSCHER, M.: *Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2014
- [120] RADKE, T.: *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd 19, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2013
- [121] REDELBACH, M. ; ÖZDEMİR, E.D. ; FRIEDRICH, H.E.: Optimizing battery sizes of plug-in hybrid and extended range electric vehicles for different user types. In: *Energy Policy* Bd. 73, Elsevier (2014), S. 158–168
- [122] REIF, K. ; NOREIKAT, K. ; BORGEEST, K. ; REIF, K. ; NOREIKAT, K.-E. ; BORGEEST, K. (Hrsg.): *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 — ISBN 978-3-8348-0722-9
- [123] REISER, C. ; ZELLBECK, H. ; HÄRTLE, C. ; KLAIB, T.: Kundenfahrverhalten im Fokus der Fahrzeugentwicklung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* Bd. 110 (2008), Nr. 07–08, S. 684–692
- [124] REM: *regional eco mobility 2030 (REM 2030) – Systemkonzepte für die urbane Mobilität von morgen*. <http://www.rem2030.de/rem2030-de/index.php>. - abgerufen am 05.11.2014
- [125] ROHDE-BRANDENBURGER, K.: Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffeinsparpotentialen. In: *Haus der Technik*. Essen, 1996
- [126] ROTH, M.: *Ein Beitrag zur Lösung des Zielkonflikts zwischen Performance und Kraftstoffverbrauch*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2010

- [127] RUBINSTEIN, R.Y.; KROESE, D.P.: *Simulation and the Monte Carlo method*. 2. Auflage. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2008 — ISBN 978-0-470-17794-5
- [128] SAE: Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles, SAE International (2010), Nr. J1711 JUN2010
- [129] SAE: Utility Factor Definitions for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Travel Survey Data. In: *SAE International*, SAE International (2010), Nr. J2841 SEP2010
- [130] SAMARAS, C. ; MEISTERLING, K.: Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy. In: *Environmental science & technology* Bd. 42 (2008), Nr. 9, S. 3170–6
- [131] SCHOBER, V.: *Analyse und Optimierung der Baugruppen eines Doppelkupplungsgetriebes hinsichtlich Wirkungsgrad und Schleppverlusten*, Fachhochschule München, Diplomarbeit, 2007
- [132] SHARMA, R. ; MANZIE, C. ; BESSEDE, M. ; BREAR, M.J. ; CRAWFORD, R.H.: Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions – Part 1: Technical and financial analysis. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 25, Elsevier Ltd (2012), S. 238–249
- [133] SHARMA, R. ; MANZIE, C. ; BESSEDE, M. ; CRAWFORD, R.H. ; BREAR, M.J.: Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions. Part 2: Life cycle CO₂-e emissions. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 28 (2013), S. 63–73
- [134] SIMPSON, A.: Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology. In: *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition*. Yokohama, Japan, 2006

- [135] SOLOMON, S. ; QIN, D. ; MANNING, M. ; CHEN, Z. ; MARQUIS, M. ; AVERYT, K.B. ; TIGNOR, M. ; MILLER, H.L.: *IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*,. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin : Cambridge University Press, 2007
- [136] SPSS INC.: PASW Statistics for Windows, Version 18.0. Chicago, SPSS Inc. (2009)
- [137] STAN, C.: *Alternative Antriebe für Automobile*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012 — ISBN 978-3-642-25266-2
- [138] STANDLEY, G. ; MARCO, J. ; CHO, B.: The impact of vehicle usage and recharging infrastructure on the energy storage requirements of a plug-in hybrid electric vehicle. In: *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* Bd. 2 (2010), Nr. 3, S. 222
- [139] STRUPP, N.C. ; LEMKE, N.: Klimatische Daten und Pkw-Nutzung : Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien. In: *FAT Schriftreihe 224*. Berlin, VDA (2009)
- [140] SULLIVAN, J.L. ; GAINES, L.: *A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs*. Argonne, 2010
- [141] TESLA MOTORS INC: *Model S Owner's manual* : Tesla Motors Inc, 2012
- [142] TESSUM, C.W. ; HILL, J.D. ; MARSHALL, J.D.: Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2014), S. 201406853
- [143] THIEL, C. ; PERUJO, A. ; MERCIER, A.: Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. In: *Energy Policy* Bd. 38, Elsevier (2010), Nr. 11, S. 7142–7151

- [144] THOMAS W. W. RODE TORSTEN RÖMER GBR: <http://www.kfz-steuer.de>. http://www.kfz-steuer.de/kfz-steuer_pkw_neu.php. - abgerufen am 21.12.2014
- [145] TORP, E. ; ÖNNEGREN, P.: *Driving cycle generation using statistical analysis and markov chains*, Linköpings universitet, Masterarbeit, 2013
- [146] TUTUIANU, M. ; MAROTTA, A. ; STEVEN, H. ; ERICSSON, E. ; HANIU, T. ; ICHIKAWA, N. ; ISHIL, H.: *Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle*. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/G RPE-68-03e.pdf>. - abgerufen am 01.01.2017. — Technical Report
- [147] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY: *Federal Tax Credits for Plug-in Hybrids*. <http://www.fueleconomy.gov/feg/taxphev.html>. - abgerufen am 10.11.2014
- [148] UMICORE BATTERY RECYCLING: *The UMICORE Process: Recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial Closed Loop*. <http://www.batteryrecycling.umicore.com/download>. - abgerufen am 01.06.2011
- [149] VDI: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme VDI 2206*. ICS 03.100. Auflage. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2004
- [150] VDI: *Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung, Außereuropäische Klimadaten; VDI 4710 Blatt 1*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008
- [151] VDI: *Kumulierter Energieaufwand (KEA) Begriffe, Berechnungsmethoden VDI4600*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012
- [152] VAN VLIET, O. ; BROUWER, A.S. ; KURAMOCHI, T. ; VAN DEN BROEK, M. ; FAAIJ, A.: Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. In: *Journal of Power Sources* Bd. 196, Elsevier B.V. (2011), Nr. 4, S. 2298–2310
- [153] VOLKSWAGEN AG: *Der Passat Umweltprädikat – Datenblatt*. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/Produkte/Umweltpraedikat/datenblaetter/datenblatt_passat2012d/_jcr_content/renditions/rendition.file/datenblatt_umweltpraedikat_passat.pdf

- [154] VORTISCH, P. ; CHLOND, B. ; WEIB, C. ; STREIT, T. ; WIRTZ, M. ; ZUMKELLER, D.: *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen*. Karlsruhe, 2011
- [155] WAGNER, S.: Idealisierte energetisch-analytische Abbildungsmethode der Temperaturschichtung bei der passiven Aufheizung in der Fahrzeugkabine. In: *PKW-Klimatisierung VI, Haus der Technik Fachbuch 107*. Essen : expert verlag, 2009 — ISBN 978-3-8169-2934-5, S. 94–110
- [156] WALDMANN, K.-H. ; STOCKER, U.M.: *Stochastische Modelle - Eine anwendungsorientierte Einführung* : pringer Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [157] WALDOWSKI, P. ; MARKER, S. ; SCHULZ, A. ; SCHINDLER, V.: BEV , REEV or PHEV ? – Deciding Between Different Alternative Drives Based on Measured Individual Operational Profiles. In: *International scientific conference on hybrid and electric vehicles RHEVE 2011*. Rueil-Malmaison
- [158] WEIDEMA, B.P. ; WESNÆS, M.S.: Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. In: *Journal of Cleaner Production* Bd. 4 (1996), Nr. 3–4, S. 167–174
- [159] WERMUTH, M. ; NEEF, C. ; WIRTH, R. ; HANITZ, I. ; LÖHNER, H. ; HAUTZINGER, H. ; STOCK, W. ; PFEIFFER, M. ; FUCHS, M. ; U. A.: *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010)*. Bd. 2010, Nr. 70. Braunschweig, 2012
- [160] WOLFRAM, A.P. ; LUTSEY, N.: *Electric vehicles : Literature review of technology costs and carbon emissions*.
http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LitRvw_EV-tech-costs_201607.pdf. - abgerufen am 07.01.2017
- [161] WOOD, E. ; ALEXANDER, M. ; BRADLEY, T.H.: Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles. In: *Journal of Power Sources* Bd. 196, Elsevier B.V. (2011), Nr. 11, S. 5147–5154
- [162] WÖTZEL, K.: *Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik*, TU Braunschweig, 2007

- [163] *www.lichtblick.de*.
<http://www.lichtblick.de/medien/news/?detail=256&type=press>. -
abgerufen am 21.12.2014
- [164] XIAO, Z. ; DUI-JIA, Z. ; JUN-MIN, S.: A Synthesis of Methodologies
and Practices for Developing Driving Cycles. In: *Energy Procedia*
Bd. 16 (2012), S. 1868–1873

B Clusteranalyse

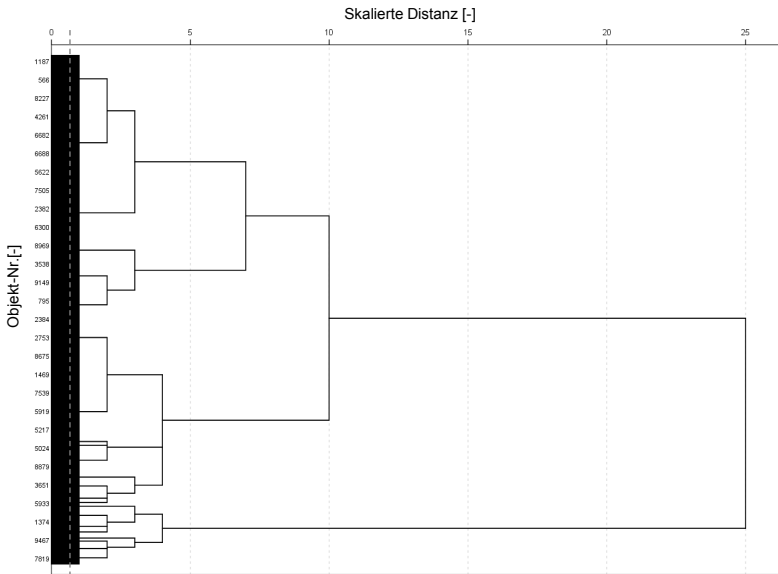


Abb. 54: Dendrogramm – Clusterlösung mit 23 Clustern; dargestellt mit [136]

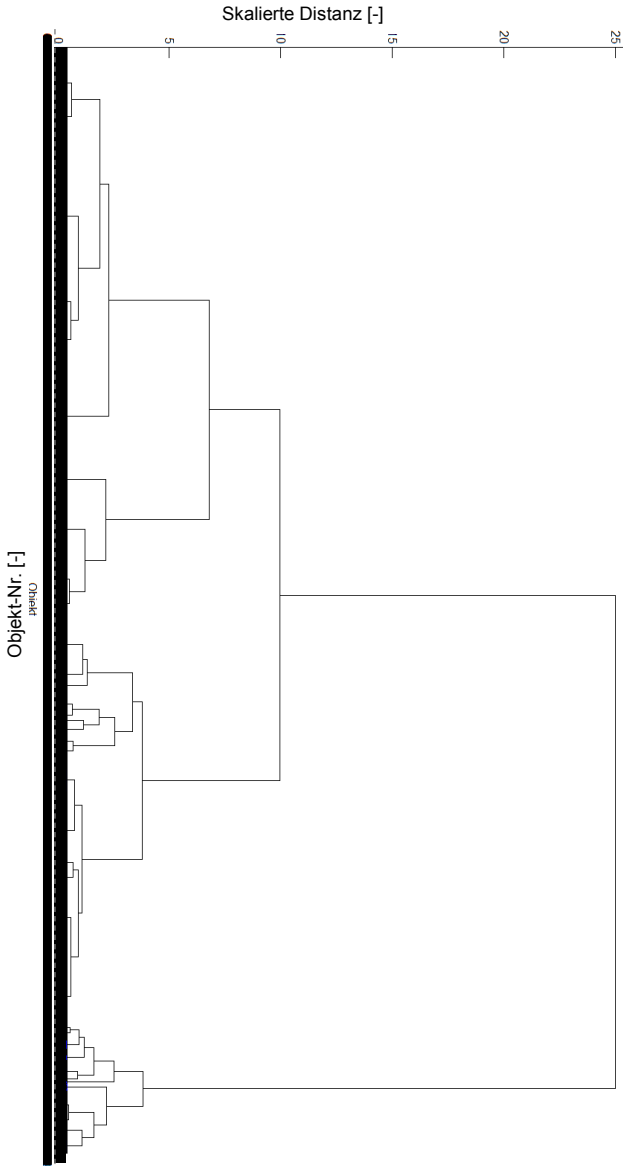


Abb. 55: Dendrogramm – Clusterlösung mit 37 Clustern; dargestellt mit Matlab®

Cluster	Verschmelzungs- niveau	Verschmelzungs- zunahme
40	1667	30
39	1697	6
38	1703	9
37	1712	190
36	1902	243
35	2145	149
34	2295	79
33	2373	23
32	2396	114
31	2510	106
30	2617	189
29	2806	5
28	2810	231
27	3041	502
26	3543	144
25	3687	55
24	3742	69
23	3811	553
22	4364	91
21	4455	44
20	4499	113
19	4612	245
18	4657	115
17	4972	444
16	5416	1102
15	6518	50
14	6568	981
13	7549	157
12	7706	1036
11	8742	202
10	8944	350
9	9293	1006
8	10299	23
7	10322	3316
6	13638	1722
5	15360	181
4	15541	12086
3	27626	12842
2	40469	61123
1	101591	

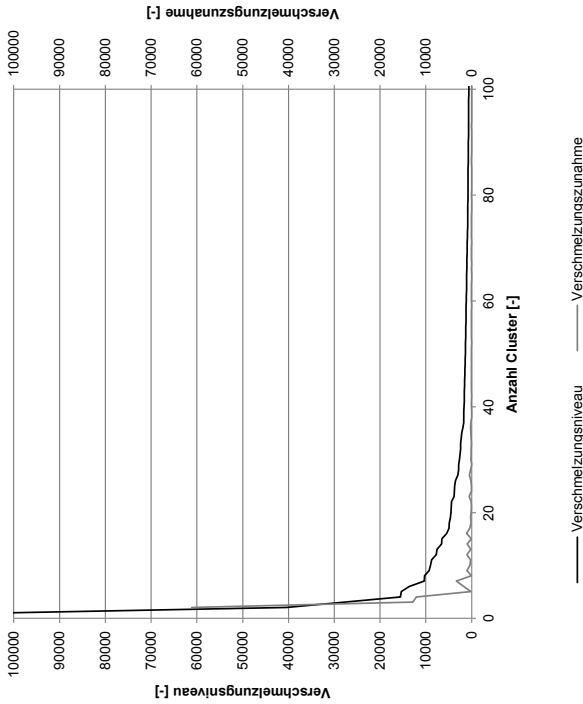


Abb. 56: Verschmelzungsniveau und -zunahme nach Durchführung der Clusteranalyse nach dem WARD-Verfahren

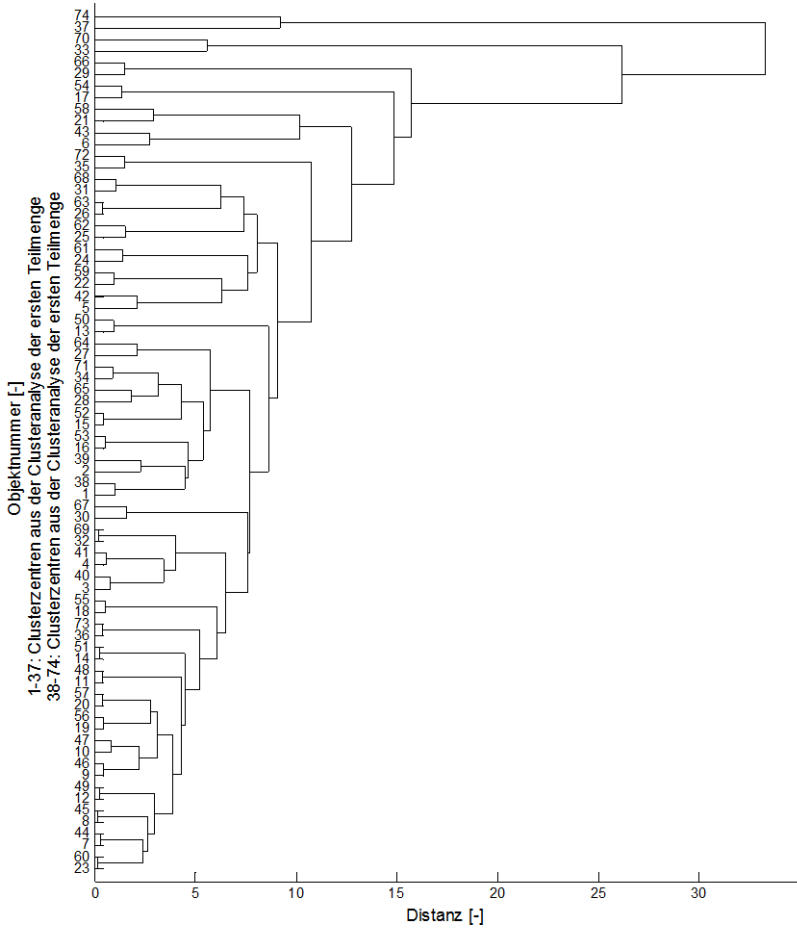


Abb. 57: Stabilitätsprüfung bzgl. der Objektauswahl. Clusteranalyse der 37 Clusterzentren der Teilmengen A und B der Stichprobe (vgl. 3.5.5)

C Fahrzeugmodellierung

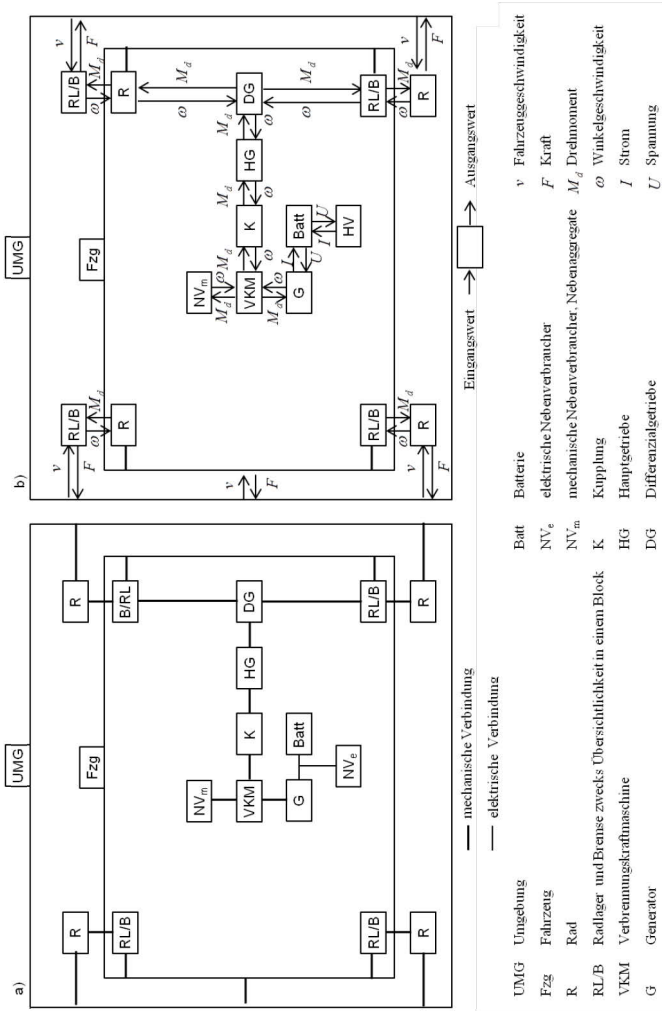


Abb. 58: Längsdynamikmodell des untersuchten konventionellen Fahrzeugs, Darstellung der Verbindungen (a) und Funktionsein- und ausgangswerte (b) nach [68]

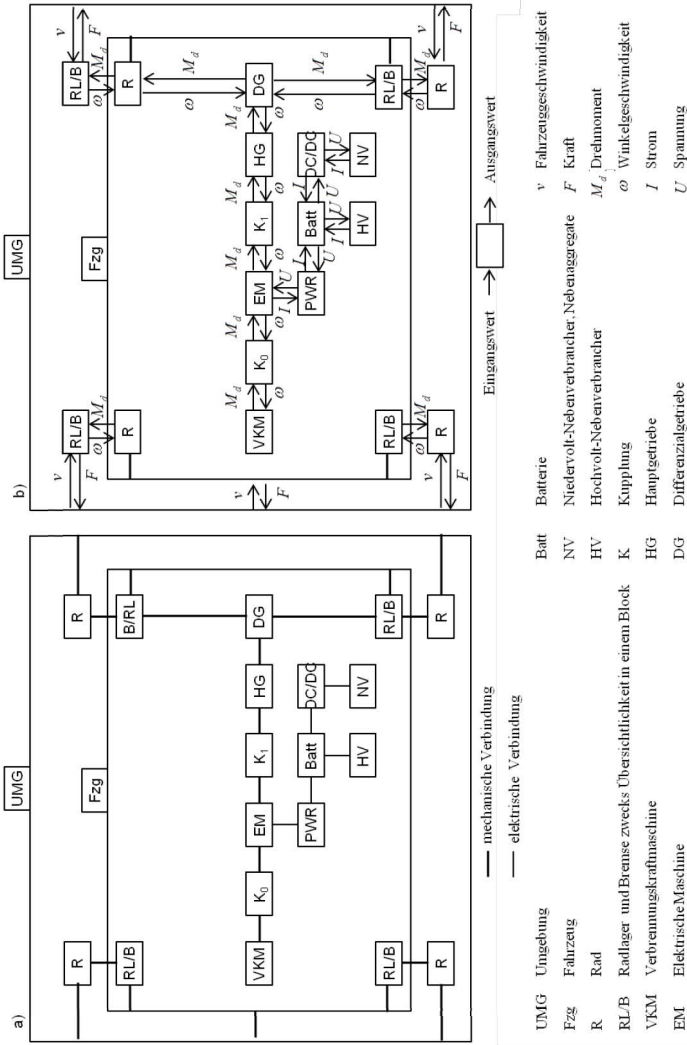


Abb. 59: Längsdynamikmodell des untersuchten Plug-In-Hybridfahrzeugs, Darstellung der Verbindungen (a) und Funktionsein- und ausgangswerte (b) nach [68]

D Anpassung – Fahrleistung

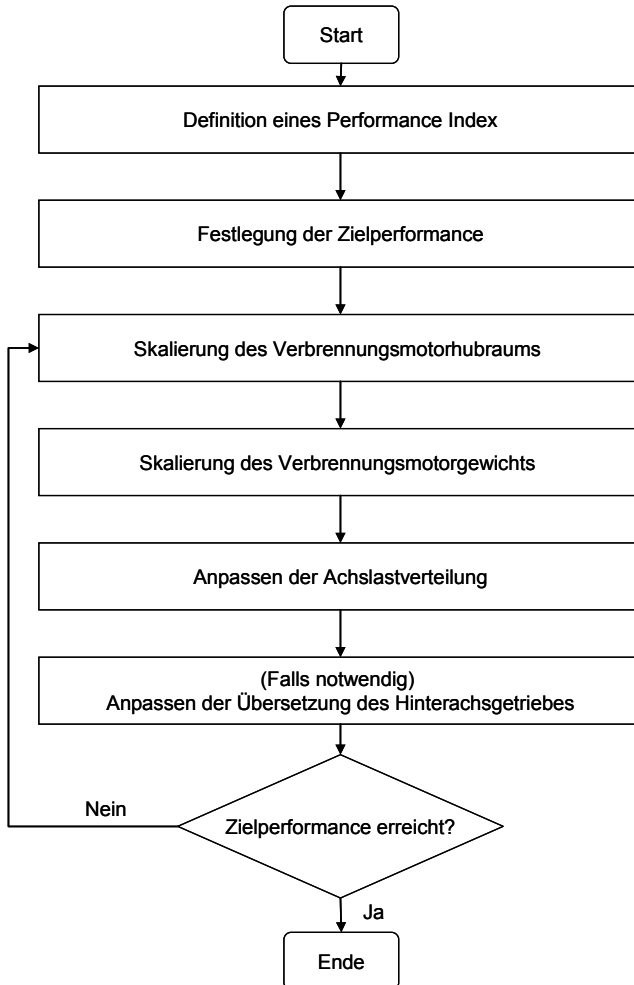


Abb. 60: Methodischer Ansatz zum Angleichen der Längsdynamik nach (vgl. [63])

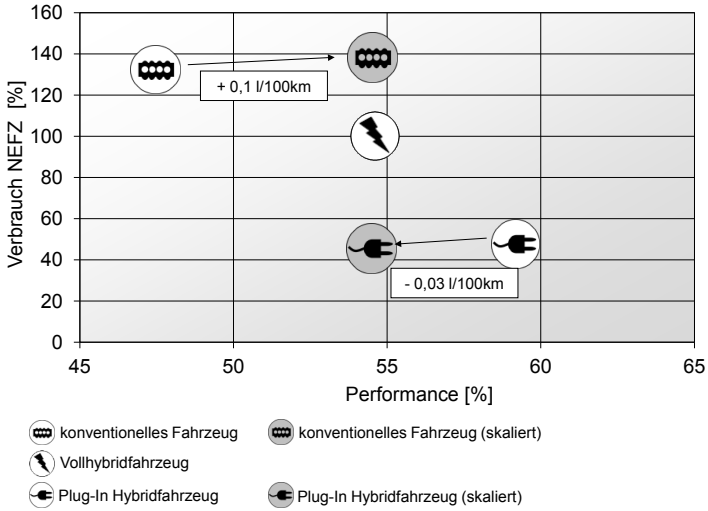


Abb. 61: Einordnung der Fahrzeugmodelle in den Performance Index (vgl. [63])

E Ergebnisse

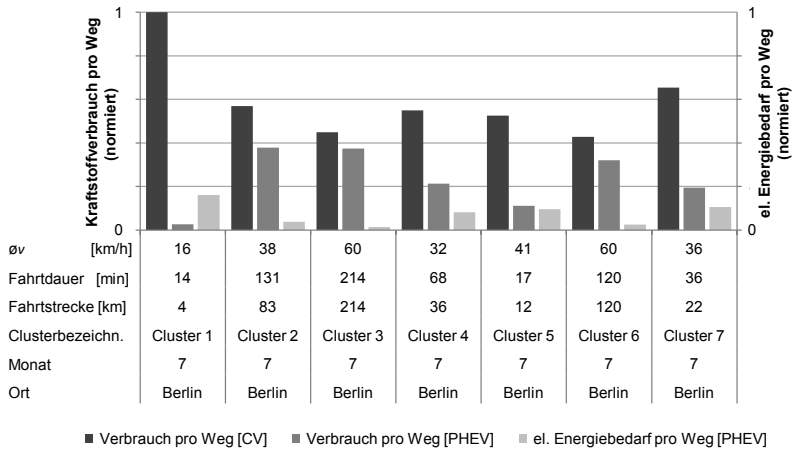


Abb. 62: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage

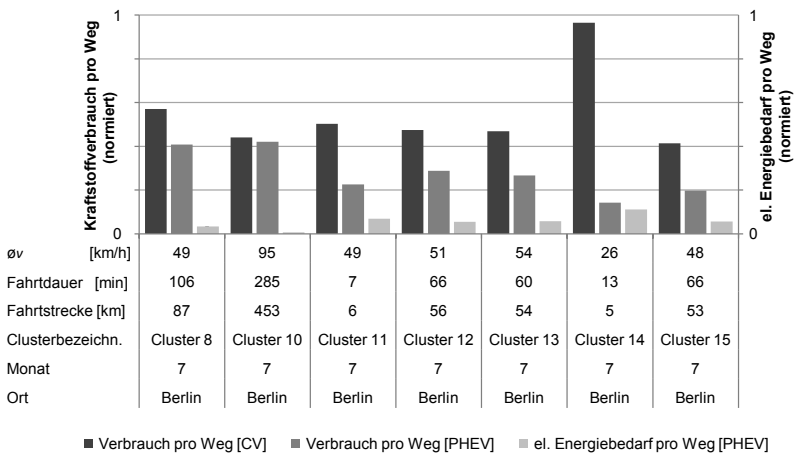


Abb. 63: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage

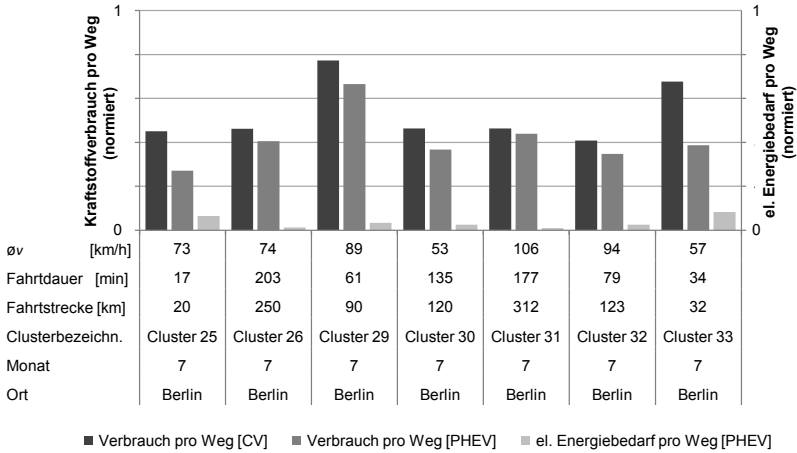


Abb. 64: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage

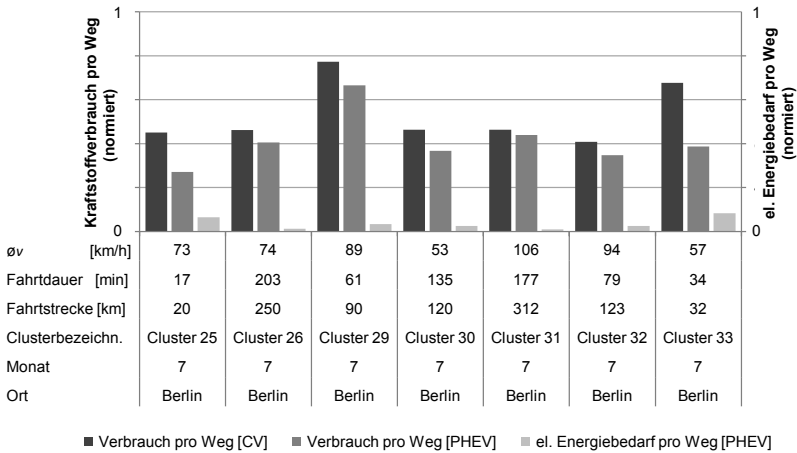


Abb. 65: Berechneter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energiebedarf für die hergeleiteten Tagesverläufe; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage

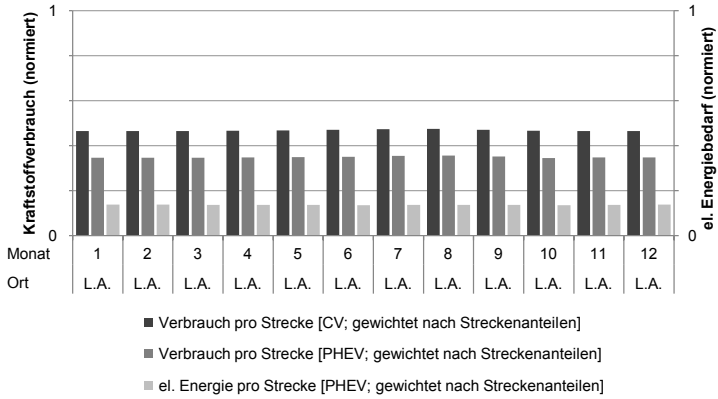


Abb. 66: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el.Energiebedarf nach Strecken-anteilen gewichtet; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage, Los Angeles

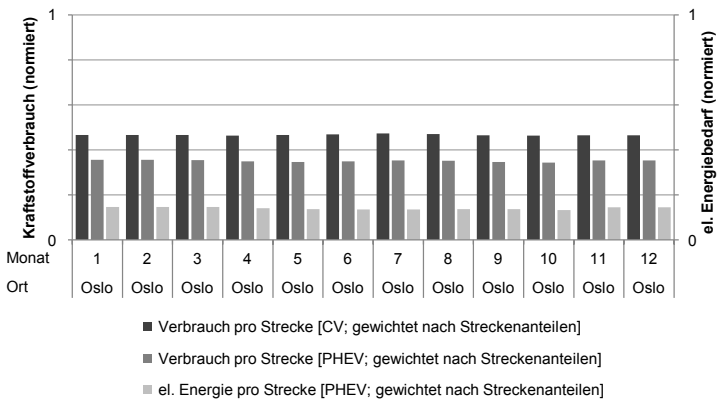


Abb. 67: Berechneter Kraftstoffverbrauch und el.Energiebedarf nach Strecken-anteilen gewichtet; Ladeszenario: Laden über Nacht in der Garage, Oslo

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrentriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrhahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. Noch nicht erschienen
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 31** Michael Eckert
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung
mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines
dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven
Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit
sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in
mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung
von Nutzfahrzeugen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahntrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch
Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose
Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 59** Dirk Hülsebusch
Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit. 2018
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt
Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier
Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder. 2018
ISBN 978-3-7315-0778-9
- Band 62** Stephan Rhode
Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation. 2018
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63** Péter Megyesi
Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten. 2018
ISBN 978-3-7315-0808-3

Für eine kunden- und nutzungsspezifische Fahrzeugauslegung in den frühen Entwicklungsphasen stellt sich die Frage, wie das Nutzungsverhalten einer Kundenzielgruppe in Ökobilanzen und Gesamtbetriebskostenberechnungen berücksichtigt werden kann. Die vorliegende Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, um aus Fahrzeugdatenaufzeichnungen zum Nutzerverhalten Anforderungen an Fahrzeugkonzepte abzuleiten. Der Schwerpunkt liegt in der Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen, die der anschließenden rechnergestützten Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des elektrischen Energiebedarfs am Beispiel von zwei Fahrzeugkonzepten dienen. Hierzu wird auf die Wechselwirkungen zwischen Kraftstoffverbrauch, Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumgebung eingegangen und Ansätze zur Herleitung von Mobilitäts- und Fahrprofilen untersucht. Auf dieser Grundlage wird eine Methode ausgearbeitet, die auch die Randbedingungen von Fahrten zur Einbeziehung von instationären Vorgängen wie die Innenraumklimatisierung berücksichtigt. Schließlich wird die Einbindung der über die realen Nutzerprofile ermittelten Kraftstoffverbrauchswerte in die Erstellung von Ökobilanzen und Gesamtkostenberechnungen zur Bewertung von Fahrzeugkonzepten erörtert.

