

Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

Stefan Kraus

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 653

ISBN 978-3-95806-802-5

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute of Climate and Energy Systems (ICE)
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)

Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

Stefan Kraus

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 653

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-802-5

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

Herausgeber und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
52425 Jülich
Tel.: +49 2461 61-5368
Fax: +49 2461 61-6103
zb-publikation@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2025

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 653

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2024)

ISSN 1866-1793
ISBN 978-3-95806-802-5

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank an all jene aussprechen, die mich während meiner Dissertation unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank geht an meinen Erstprüfer und Doktorvater, Prof. Dr. Detlef Stolten, für die wertvollen Anregungen und die kritische Auseinandersetzung mit meiner Arbeit. Ihr Feedback war entscheidend für die Weiterentwicklung meiner Forschung. Ebenso gilt mein Dank meinem Zweitprüfer, Prof. Dr. Eike Stumpf, für die angenehme Begleitung während des gesamten Prüfungsprozesses.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer, Dr. Thomas Grube, für seine wertvolle Anleitung, sein unermüdliches Engagement und seine konstruktiven Rückmeldungen. Seine Expertise hat mir geholfen, meine Ideen zu entwickeln und meine Arbeit zu optimieren.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die mich in schwierigen Phasen motiviert und stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatten. Die gemeinsamen Diskussionen und der Austausch von Ideen haben meine Arbeit bereichert. Hervorzuheben ist hier mein langjähriger Wegbegleiter Julian Reul.

Mein Dank geht außerdem an meine Familie und Freunde, die mir Rückhalt gegeben haben und immer an mich geglaubt haben. Allen voran danke ich meiner Frau Anna, die mir stets rücksichtsvoll zur Seite stand. Durch ihre Unterstützung und ihre positive Art hat sie mir die nötige Kraft und den Antrieb gegeben, diese Herausforderung erfolgreich zu meistern.

Kurzfassung

Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

Die gesetzten Klimaschutzziele der Bundesregierung erfordern eine vollständige Defossilisierung des Verkehrssektors. Trotz der Kenntnis möglicher Umsetzungsoptionen wurde im Verkehrssektor bis 2021 lediglich eine vernachlässigbar geringe Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 erzielt. Zudem wird weiterhin diskutiert, welche Technologie in welchen Anwendungsfeldern eingesetzt werden soll. Folglich ist das Ziel dieser Arbeit modellbasierte Analysen zu entwickeln, welche zum einen die Techno-Ökonomie der Verkehrsmittel in Abhängigkeit relevanter Faktoren beleuchtet. Zum anderen werden modellgestützte Transformationspfade des Verkehrssektors erarbeitet, welche die sektorspezifischen Treibhausgasreduktionsziele berücksichtigen.

Die techno-ökonomische Analyse der Verkehrsmittel erfolgt mittels eines entwickelten Modells, welches die *Total Cost of Ownership* berechnet. Im Vergleich zur Literatur zeichnet sich das Modell durch eine detaillierte Bestimmung der drei wesentlichen Kostenarten, den Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten, aus. Die mit dem Modell berechneten Fahrzeugparameter werden nicht nur zur antriebspezifischen Analyse der Verkehrsmittel genutzt, sondern dienen ebenso als Input des entwickelten Optimierungsmodells zur Analyse möglicher Transformationspfade des Verkehrssektors. Dieses Modell zeichnet sich durch eine hohe Auflösung der Verkehrsnachfrage und die Abbildung der Effekte der Elektrifizierung und Sektorenkopplung aus.

Die Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse der Verkehrsmittel zeigen den zukünftigen Vorteil vollelektrifizierter Antriebe auf. Dieser Vorteil entsteht insbesondere infolge der mittels des Lernkurvenansatzes berechneten Kostendegression der Komponenten elektrifizierter Antriebe. Des Weiteren nimmt die Differenz der Gesamtbetriebskosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen über den Betrachtungszeitraum ab. Dabei hängt der techno-ökonomische Vorteil nicht nur von der Fahrzeugklasse, sondern von den Anforderungen der Anwendungen hinsichtlich Fahrleistung, Reichweite und Energiebedarf ab. Der intermodale Vergleich verdeutlicht, dass die Elektrifizierung den energetischen Vorteil des öffentlichen Verkehrs reduziert, sodass die Relevanz der Auslastung verstärkt wird.

Die Analyse der Transformationspfade des Verkehrssektors unterstreicht die zukünftige Dominanz der Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge im Straßenverkehr. Wie zuvor in der Fahrzeuganalyse herausgestellt hängt die Wahl der vollelektrischen Antriebsoption von den Anforderungen der Verkehrsnachfrage ab. Im Kurzstreckenverkehr mit kleineren Fahrzeugen wird der batterieelektrische Antrieb priorisiert. Demgegenüber findet der Brennstoffzellenantrieb verstärkt im Schwerlastverkehr Anwendung. Die Elektrifizierung führt zu einem steigenden Wasserstoff- (85 TWh) und Strombedarf (122 TWh) des Verkehrssektors bis 2045. Im Gegenzug sinkt die Flüssigkraftstoffnachfrage stark. Trotz der vollständigen Elektrifizierung der Neuzulassungen macht die zeitverzögerte Bestandselektrifizierung den Einsatz synthetischer Kraftstoffe zur Defossilisierung des gesamten Verkehrssektors erforderlich. Darüber hinaus zeigen die szenariobasierten Analysen, dass die Kosten des Transformationspfades stärker vom sozialen als vom technologischen Wandel abhängen.

Schlagwörter: Verkehrssektor, Total Cost of Ownership, Systemanalyse, Elektrifizierung, Kraftstoffwechsel, Treibhausgasneutralität

Abstract

Options for Implementing Climate Protection Targets in the Transport Sector

Achieving the climate protection targets set by the German government requires complete decarbonization of the transport sector. Despite knowledge of possible options for implementing these targets, only a negligible reduction in greenhouse gas emissions has been achieved in the transport sector by 2021 compared to 1990. In addition, the debate continues as to which technology should be used in which fields of application. Consequently, the aim of this work is the development of model-based analyses, which on the one hand illuminate the techno-economy of the means of transport depending on relevant factors. On the other hand, model-based transformation pathways of the transport sector are developed complying with sector-specific greenhouse gas reduction targets.

The techno-economic analysis of the means of transport is carried out using a developed model for calculating the total cost of ownership. Compared to the literature, the model is characterized by its detailed determination of the three main cost types, manufacturing, maintenance, and fuel costs. The vehicle parameters calculated by the model are not only used for the drivetrain-specific analysis of the means of transport, but also serve as input for the developed optimization model for the analysis of possible transformation paths of the transport sector. The special features of this model are the high resolution of transport demand and the mapping of the effects of electrification and sector coupling.

The results of the techno-economic analysis of the means of transport show the future advantage of fully electrified drivetrains. This advantage arises in particular as a result of the cost depression of the components of electrified drivetrains calculated using the learning curve approach. In addition, the difference between the total costs of battery and fuel cell electric vehicles decreases over the period under consideration. Here, the techno-economic advantage depends not only on the vehicle class, but also on the requirements of the applications in terms of mileage, driving range and energy demand. The intermodal comparison shows that electrification reduces the energetic advantage of public transport, so that the relevance of load factor is increased.

The analysis of the transformation pathways of the transport sector underlines the future dominance of battery and fuel cell vehicles in road transport. As before in the vehicle analysis, the choice of all-electric drivetrain option depends on the requirements of transport demand. On the one hand, battery-electric drivetrain is prioritized in short-haul traffic with smaller vehicles. On the other hand, fuel cell drivetrain is increasingly used in heavy-duty traffic. Electrification leads to increasing hydrogen (85 TWh) and electricity (122 TWh) demand of the transport sector until 2045. In turn, liquid fuel demand decreases strongly. Despite the full electrification of new registrations, the delayed stock selection necessitates the use of synthetic fuels. Moreover, the scenario-based analyses show that the costs of the transformation path depend more on social change than on technological change.

Key Words: Transport Sector, Total Cost of Ownership, System Analysis, Electrification, Fuel Shift, Greenhouse Gas Neutrality

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	3
2 Grundlagen des Verkehrssektors.....	6
2.1 Struktur des Verkehrssektors.....	6
2.1.1 Verkehrsnachfrage.....	6
2.1.2 Verkehrsmittel.....	8
2.2 Eingliederung in das Energiesystem.....	15
2.2.1 Tankstellen- und Ladeinfrastruktur.....	16
2.2.2 Übertragungs- und Verteilnetz.....	19
2.2.3 Umwandlungsprozesse.....	20
2.2.4 Primärenergieträger.....	22
2.2.5 Sektorenkopplung.....	23
2.3 Trends im Verkehrssektor.....	23
2.3.1 Modaler Shift.....	23
2.3.2 Kraftstoffwechsel und Netzintegration von Batteriefahrzeugen.....	24
2.3.3 Shared Mobility.....	24
2.3.4 Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge.....	25
3 Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors.....	27
3.1 Verkehrsnachfragemodellierung.....	27
3.2 Energiebedarfsmodellierung der Verkehrsmittel.....	29
3.3 Techno-ökonomische Modellierung auf Verkehrsmitteln.....	31
3.3.1 Herstellungskosten.....	32
3.3.2 Wartungskosten.....	33
3.3.3 Kraftstoffkosten.....	34
3.3.4 Studien auf Fahrzeugebene.....	36
3.4 Modellierung auf sektoraler Ebene.....	41
3.4.1 ASIF-Methode.....	41
3.4.2 Modellklassen.....	42

3.4.3 Räumlich-zeitliche Eigenschaften der Modelle	43
3.4.4 Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe	46
3.4.5 Szenarien für den deutschen Verkehrssektor	50
3.5 Auswirkungen von Mobilitätstrends auf die Emissionsmodellierung	55
3.5.1 Modaler Shift	55
3.5.2 Kraftstoffwechsel	56
3.5.3 Shared Mobility	57
3.5.4 Automatisiertes Fahren und Vehicle-to-X	58
3.6 Einbezug der Mobilitätstrends in Modellen	59
3.6.1 Modaler Shift	60
3.6.2 Kraftstoffwechsel	61
3.6.3 Shared Mobility und automatisiertes Fahren	65
3.6.4 Vergleich der Trends	67
3.7 Erkenntnisse für diese Arbeit	68
4 Methodischer Ansatz	71
4.1 Fahrzeugebene	72
4.1.1 Segmentierung der Verkehrsmittel	73
4.1.2 Konfiguration der Verkehrsmittel	75
4.1.3 Berechnung des Energiebedarfs	80
4.1.4 Total Cost of Ownership	85
4.1.5 Validierung	92
4.2 Sektorebene	94
4.2.1 Allgemeiner Ansatz	94
4.2.2 Verkehrsnachfrage	97
4.2.3 Verkehrsmittel	105
4.2.4 Versorgungsinfrastruktur	107
4.2.5 Energieumwandlung und Primärenergieträger	112
4.2.6 Validierung	115
5 Szenarien	118
5.1 Fahrzeuganwendungen	118
5.1.1 Personenkraftwagen	118
5.1.2 Busse	119
5.1.3 Nutzfahrzeuge	120
5.2 Szenarien des Verkehrssektors	121
5.2.1 Sozio-ökonomische Szenarien	121
5.2.2 Techno-ökonomische Szenarien	123

6	Techno-ökonomische Analyse von Verkehrsmitteln	126
6.1	Personenkraftwagen	126
6.1.1	Durchschnittlicher Mittelklasse-Pkw	126
6.1.2	Stadtfahrzeug	129
6.1.3	Langstreckenfahrzeug	130
6.1.4	SUV inklusive Anhängerbetrieb	131
6.2	Busse	132
6.2.1	Stadtbus	132
6.2.2	Überlandbus	134
6.2.3	Reisebus	135
6.3	Nutzfahrzeuge	136
6.3.1	Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr	136
6.3.2	Urbanes Lieferfahrzeug	138
6.3.3	Abfallsammelfahrzeug	139
6.4	Intermodaler Vergleich	141
6.4.1	Energetischer Vergleich	142
6.4.2	Ökonomischer Vergleich	147
6.5	Einflussfaktoren der techno-ökonomischen Entwicklung	152
6.5.1	Weltmarkt	152
6.5.2	Lernrate	153
6.5.3	Komponentenkosten	154
6.5.4	Reichweite und Jahresfahrleistung	155
6.5.5	Entwicklung des Energiebedarfs	158
6.5.6	Ladeinfrastruktur	159
6.5.7	Kraftstoffkosten	160
6.6	Vergleich mit der Literatur	161
6.6.1	Personenkraftwagen	162
6.6.2	Sattelzugmaschinen	163
6.7	Fazit der Fahrzeuganalysen	164
7	Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors	169
7.1	Basisszenario <i>StatusQuo-Reference</i>	169
7.1.1	Verkehrsmittel	169
7.1.2	Endenergiebedarf des Verkehrssektors	189
7.1.3	Lade- und Tankstelleninfrastruktur	193
7.1.4	Herstellung der Energieträger	198
7.1.5	Primärenergiebedarf	198

7.1.6 Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel	200
7.1.7 Systemkosten	203
7.2 Vergleich der Szenarien	204
7.2.1 Verkehrsmittel	204
7.2.2 Endenergiebedarf des Verkehrssektors	211
7.2.3 Lade- und Tankstelleninfrastruktur	214
7.2.4 Herstellung der Energieträger	216
7.2.5 Primärenergiebedarf	217
7.2.6 Systemkosten	219
7.3 Sensitivitätsanalysen	220
7.3.1 Internationaler Luft- und Seeverkehr	221
7.3.2 Fahrzeugkosten	224
7.3.3 Vehicle-to-Grid	226
7.3.4 Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur	228
7.3.5 Verfügbarkeit der Energieträger	231
7.4 Vergleich mit der Literatur	233
7.4.1 Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand	234
7.4.2 Energiebedarf des Verkehrssektors	236
7.5 Fazit der Transformationsanalysen des Verkehrssektors	238
8 Diskussion	241
9 Zusammenfassung	244
Anhang	249
A Grundlagen des Verkehrssektors	249
B Grundlegende Datenquellen zum deutschen Verkehrssektor	250
C Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors	255
D Methodischer Ansatz	258
E Szenarioannahmen	276
F Techno-ökonomische Fahrzeuganalysen	279
G Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors	281
Abbildungsverzeichnis	289
Tabellenverzeichnis	301
Literaturverzeichnis	303

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BEV	Batterie-Elektrofahrzeug
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BM	Biomasse
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CAV	Connected Autonomous Vehicle
CNG	Compressed Natural Gas
DCDC	Gleichspannungswandler
DME	Dimethylether
EATS	Abgasnachbehandlungssystem
FAME	Fettsäuremethylester
FC	Brennstoffzelle
FCEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
HDV	Schweres Nutzfahrzeug
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HEV	Hybrid-Elektrofahrzeug
HWFET	Highway Fuel Economy Test
IAM	Integrated Assessment Model
ICCT	International Council on Clean Transportation
ICE	Internal Combustion Engine / Verbrennungsmotor
ICEV	Verbrennungsmotorfahrzeug
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
LBA	Luftfahrtbundesamt
LCV	Light Commercial Vehicle / Leichtes gewerbliches Fahrzeug
LDV	Light-Duty Vehicle / Leichtes Fahrzeug
LNG	Liquified Natural Gas / Flüssigerdgas
LPG	Liquified Petroleum Gas / Autogas
LR	Lernrate
MiD	Mobilität in Deutschland

MIV	Motorisierter Individualverkehr
MNL	Multinomial Logit
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
NEFZ	Neue Europäische Fahrzyklus
NG	Natural Gas
NPM	Nationale Plattform Mobilität
NRTC	Neighborhood Refuse Truck Cycle
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PHEV	Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug
RB	Regionalbahn
RE	Regionalexpress
REEV	Range-Extender-Elektrofahrzeug
SOC	State of Charge / Ladezustand
SNG	Synthetic Natural Gas / Synthetisches Erdgas
SUV	Sport Utility Vehicle
TAC	Total Annual Cost / Annualisierte Gesamtkosten
TCO	Total Cost of Ownership / Gesamtbetriebskosten
THG/GHG	Treibhausgase
TRL	Technologiereifegrad
TTW	Tank-to-Wheel
UBA	Umweltbundesamt
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
V2G	Vehicle-to-Grid
V2H	Vehicle-to-Household
V2X	Vehicle-to-X
V2V	Vehicle-to-Vehicle
ViZ	Verkehr in Zahlen
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WTT	Well-to-Tank

Abkürzungsverzeichnis

WTW Well-to-Wheel

1 Einleitung

Infolge des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels werden weltweit auf verschiedenen Ebenen von Staaten, Regionen, Unternehmen oder anderen Organisationen Klimaschutzziele gesetzt. Das aktuelle zentrale Ziel der deutschen Bundesregierung ist die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 [1]. Als Teil dieses übergeordneten Ziels sind Zwischenziele sowie die Aufteilung auf die einzelnen Sektoren des Energiesystems festgelegt. Dies umfasst folglich ebenso den Verkehrssektor, durch welchen im Jahr 2019 mehr als 20 % der deutschen Treibhausgasemissionen verursacht worden sind [2]. Während in den weiteren Sektoren des Energiesystems die Treibhausgasemissionen gegenüber dem Referenzjahr 1990 bereits reduziert werden konnten, befinden sich die Emissionen des Verkehrssektors auf nahezu unverändertem Niveau. Somit bedarf es weiterer Maßnahmen, um die gesteckten Ziele zu erreichen (vgl. Abbildung 1.1).

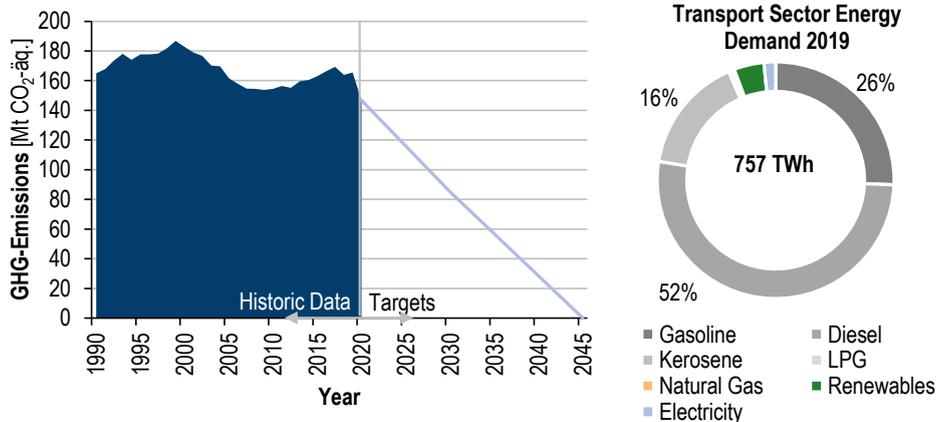


Abbildung 1.1: Historische Emissionen des deutschen Verkehrssektors von 1990 bis 2020 und sektorspezifische Ziele der Bundesregierung (links) [1], [2]. Anteile der Kraftstoffe am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2019 (rechts) [3]. GHG: Treibhausgas, LPG: Autogas.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die hohe Abhängigkeit des Verkehrssektors von rohhöl-basierten Flüssigkraftstoffen. Insbesondere vor dem Hintergrund des Ukrainekriegs ist die geringe Diversifizierung der Energieversorgung verstärkt in den Vordergrund gerückt [4]–[6].

Die Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor sind vielfältig und bereits seit Jahren bekannt. Zudem gehen diese mit einer Reduktion der Abhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern einher. Die Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors lassen sich in die Verkehrsvermeidung, -verlagerung und -verbesserung einteilen [7], [8]. Eine geringere Verkehrsnachfrage wird beispielsweise durch die erhöhte Nutzung des Homeoffice erreicht. Die Verkehrsverlagerung auf andere Verkehrsmittel, auch modaler Shift genannt, zielt auf die Nutzung effizienterer Verkehrsmittel ab. Beispielhaft hierfür ist der Umstieg vom Individualverkehr auf den öffentlichen Verkehr. Die notwendige Verhaltensänderung kann mittels einer gesteigerten Attraktivität der öffentlichen Verkehrsmittel gefördert werden. Verbesserungsmaßnahmen sind vielfältig und reichen von Optimierungen der Aerodynamik über Leichtbaumaßnahmen bis hin zu einem Wechsel des Antriebsstrangs.

Trotz der Kenntnis der möglichen Optionen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sind diese bisher nicht nachhaltig gesunken [2]. Zudem sind die Maßnahmen vielschichtig und führen aufgrund ihrer Verknüpfungen zu komplexen Wechselwirkungen. Aus diesem Grund sind modellgestützte techno-ökonomische Analysen dieser Wechselwirkungen erforderlich, um daraus geeignete Strategien zur Erreichung der Klimaschutzziele abzuleiten. Daher ist es das Ziel dieser Arbeit ein solches Modell zur Analyse der Optionen zur Defossilisierung des Verkehrssektors zu entwickeln und mit Hilfe dessen Transformationspfade des Verkehrssektors aufzuzeigen.

1.1 Motivation

In der Literatur liegt eine Vielzahl verschiedener Modelle vor, welche zur Analyse der zuvor beschriebenen Entwicklungen im Verkehrssektor dienen. Die Modelle zeichnen sich durch unterschiedliche räumliche und zeitliche Betrachtungshorizonte aus. Zudem bieten sie zu meist eine breite Abdeckung des Verkehrssektors hinsichtlich Verkehrsmittel, Antriebsarten und Kraftstoffen. Dennoch zeigt sich eine Präferenz den batterieelektrischen Antrieb sowie den Pkw als bedeutsamstes Verkehrsmittel im Personenverkehr zu betrachten. Insbesondere sind Range-Extender Fahrzeuge und synthetische Kraftstoffe weniger in den vorliegenden Analysen repräsentiert. Für eine ganzheitliche Betrachtung des Verkehrssektors in Bezug auf die Erreichung der Klimaschutzziele ist es jedoch entscheidend alle relevanten Optionen gemeinsam zu untersuchen.

Zudem ist es erforderlich die notwendige Detailtiefe des zu entwickelnden Modells und eine hohe Qualität der genutzten Eingangsdaten zu gewährleisten. Letzteres umfasst insbesondere die techno-ökonomische Entwicklung von Zukunftstechnologien. Dazu gehört allen voran die Berechnung der Kosten und der Energiebedarfe der betrachteten Verkehrsmittel und Antriebsarten. Deren Qualität ist entscheidend für die zukünftige Entwicklung der Neuzulassungen, des Verkehrsmittelbestands sowie des Energiebedarfs des Verkehrssektors. Dennoch sind die genannten Parameter in der Literatur zumeist exogene Annahmen, welche unzureichend fundiert bestimmt werden.

Des Weiteren gilt es sowohl hinsichtlich des Energiebedarfs als auch der Antriebswahl die detaillierte Ausprägung der Verkehrsnachfrage modellseitig einzubeziehen. Dazu gehört eine hohe zeitliche Auflösung, welche insbesondere im Zuge der Elektrifizierung an Bedeutung gewinnt. Nur mittels der notwendigen Detailtiefe können die entstehenden Effekte der Sektorenkopplung zum Energiesektor abgebildet und analysiert werden.

Im Zusammenhang der Sektorenkopplung ist es ebenso relevant die weiteren Sektoren des Energiesystems innerhalb der Analysen zu berücksichtigen und keinesfalls den Verkehrssektor losgelöst zu betrachten. Insbesondere der Kraftstoffwechsel führt zu notwendigen Veränderungen des Energiesektors, welche Auswirkungen auf die Entwicklung des Verkehrssektors haben. Hier sind die erforderliche Infrastruktur und Herstellung der nachgefragten Energieträger zu nennen. Darüber hinaus besteht eine Nutzungskonkurrenz zwischen dem Verkehrssektor und den weiteren Nachfragesektoren um begrenzte Primärenergieträger. Ein Beispiel ist der Einsatz von Biomasse zur Biokraftstoffproduktion oder zur Wärmebereitstellung in der Industrie.

Die geschilderten Defizite der vorhandenen Modelle und Analysen begründen die Motivation ein neues ganzheitliches Verkehrssektormodell im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickeln und anzuwenden.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung eines Verkehrssektormodells, welches die bestehenden Lücken vorhandener Modelle und Analysen schließt. Die Analysen sollen aufzeigen, wie durch den Einsatz der Optionen zur Defossilisierung die gesetzten Klimaschutzziele im deutschen Verkehrssektor erreicht werden können, allen voran die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045. Aufgrund der hohen Bedeutung der verkehrsmittelbezogenen Eingangsparameter werden diese auf Basis einer detaillierten techno-ökonomischen Modellierung bestimmt und bewertet. Zudem sollen die Effekte des modalen Shifts mittels eines techno-ökonomischen intermodalen Vergleichs analysiert werden.

Szenariobasierte Transformationspfade des deutschen Verkehrssektors hin zu einem treibhausgasneutralen System im Jahr 2045 zu erarbeiten ist ein zentrales Ziel dieser Arbeit. Dies beinhaltet bedeutsame Größen des Verkehrssektors wie die Neuzulassungen und Bestandsentwicklung. Zudem wird die entstehende End- und Primärenergienachfrage bestimmt, um Auswirkungen auf das weitere Energiesystem bewerten zu können. Diese umfassen ebenso den resultierenden Lade- und Tankstelleninfrastrukturbedarf infolge des Markthochlaufs alternativer Antriebe.

Der Status Quo des Verkehrssektors muss berücksichtigt werden, wenn Transformationspfade erstellt werden. Dazu wird in **Kapitel 2** ein Überblick über die historische Struktur des Verkehrssektors gegeben. Dies beinhaltet insbesondere die Verkehrsnachfrage und die Verkehrsmittel. Darüber hinaus wird beleuchtet, wie sich der Verkehrssektor in das Energiesystem eingliedert. Des Weiteren werden bereits absehbare Trends im Verkehrssektor herausgestellt, um zukünftige Entwicklungen ableiten zu können. Dies umfasst den modalen Shift, den Kraftstoffwechsel inklusive der Netzintegration batterieelektrischer Fahrzeuge, die Shared Mobility sowie das automatisierte und vernetzte Fahren.

In **Kapitel 3** werden bestehende Modellierungskonzepte und Analysen auf verschiedenen Ebenen des Verkehrssektors vorgestellt. Dies beinhaltet zum einen die techno-ökonomische Analyse von Verkehrsmitteln inklusive der Berechnung der Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Zum anderen werden die Modellierungskonzepte auf Sektorebene eingeführt. Dabei wird unter anderem auf die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften vorhandener Modelle eingegangen sowie herausgestellt wie relevante Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe in diesen einbezogen werden. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden die Auswirkungen der zuvor genannten Trends auf die Modellierung und die Berücksichtigung derer in bestehenden Modellen erläutert.

Der methodische Ansatz der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle wird in **Kapitel 4** beschrieben. Zunächst wird hierzu dargelegt, welche Verkehrsmittel und Antriebsarten in den Analysen einbezogen werden und wie diese systematisch segmentiert und konfiguriert werden. Anschließend wird erläutert, wie der Energiebedarf der Verkehrsmittel mittels Fahrzyklussimulationen errechnet wird. Die endogene Kalkulation der Kostenbestandteile der Total Cost of Ownership Analyse wird ebenfalls vorgestellt. Dazu zählt insbesondere der Lernkurvenansatz, mit welchem die Komponentenkosten berechnet werden. Die

berechneten Fahrzeugparameter fließen in die Sektormodellierung ein. Zudem wird die Modellierungstiefe der Verkehrsnachfrage im Verkehrssektormodell *FINE.Transport* aufgezeigt. Darüber hinaus wird die endogene Modellierung des Energiesektors inklusive der Kopplung an ein Gesamtenergiesystemmodell dargelegt. Eine Validierung der entwickelten Modelle ist ebenfalls Bestandteil des Kapitels.

Die analysierten Szenarien werden in **Kapitel 5** definiert. Zum einen sind dies die betrachteten typischen Anwendungsfälle von Straßenfahrzeugen. Zum anderen die Szenarien des gesamten Verkehrssektors, welche sich aus zwei sozio- und drei techno-ökonomischen Szenarien zusammensetzen. Aus deren Kombination resultieren insgesamt sechs Szenarien.

In **Kapitel 6** werden die Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse der Verkehrsmittel ausgewertet. Dazu wird insbesondere die antriebsspezifische Entwicklung der Total Cost of Ownership und der Herstellungskosten der zuvor definierten Fahrzeuganwendungen bis zum Jahr 2050 erläutert. Zudem beinhaltet die Analyse einen intermodalen Vergleich, welcher sowohl energetische als auch ökonomische Eigenschaften unter dem Einfluss der Auslastung der Verkehrsmittel behandelt. Die Auswirkungen ausgewählter Parameter auf die techno-ökonomischen Eigenschaften der Verkehrsmittel werden im Anschluss im Rahmen von Sensitivitätsanalysen dargelegt.

Die entwickelten modellgestützten Transformationspfade des deutschen Verkehrssektors werden in **Kapitel 7** erläutert. Zunächst werden die Ergebnisse des Basisszenarios auf verschiedenen Ebenen ausgewertet. Die Analyse beinhaltet die Entwicklung der Neuzulassungen und des Verkehrsmittelbestands, den Endenergiebedarf des Verkehrssektors, die Auswirkungen auf den Energiesektor, die resultierenden Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel sowie die berechneten Systemkosten. Im Anschluss an die Vorstellung des Basisszenarios werden die Resultate aller betrachteten Szenarien verglichen. Zudem werden Sensitivitätsanalysen bedeutsamer Einflussfaktoren durchgeführt. Zuletzt werden die Ergebnisse der Untersuchungen in die Literatur eingeordnet.

Die beiden letzten Kapitel diskutieren die Erkenntnisse der erarbeiteten Analysen und fassen die Schlussfolgerungen der einzelnen Kapitel zusammen.

Die nachfolgende Abbildung 1.2 zeigt die beschriebene Struktur der Arbeit in grafischer Form.

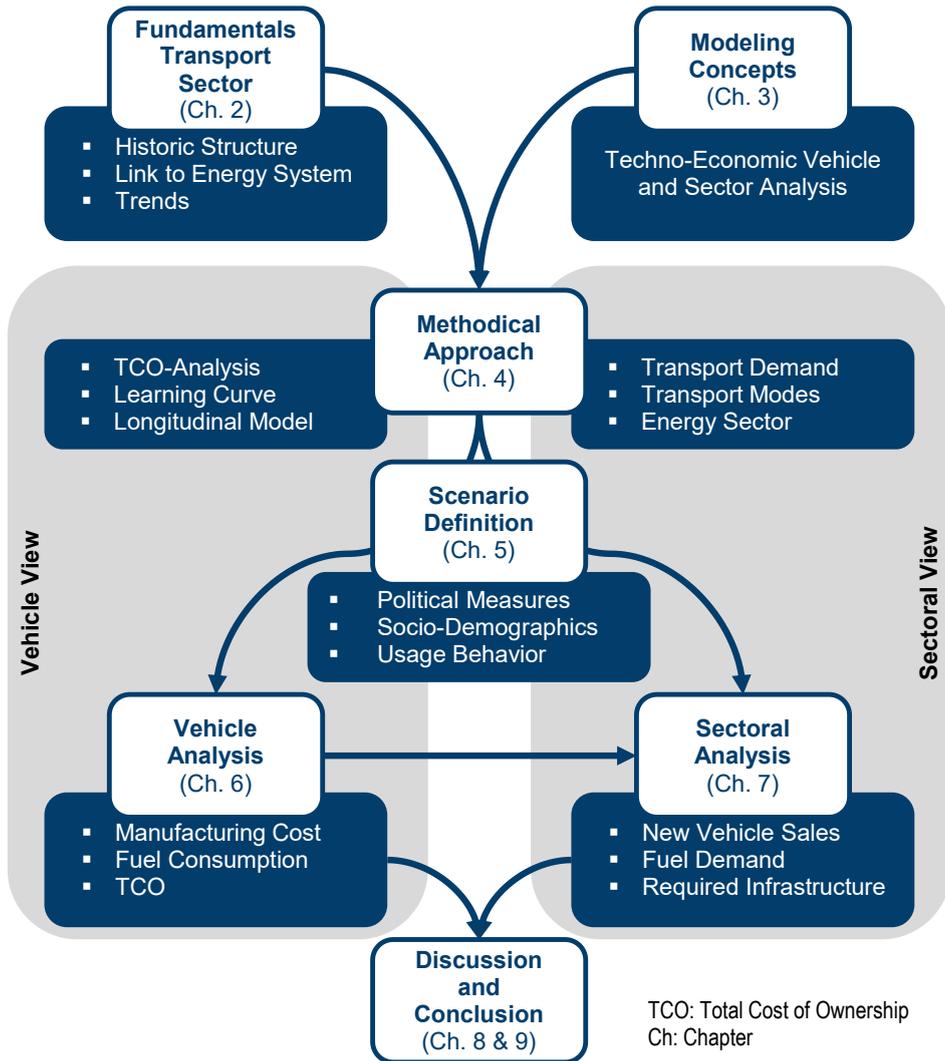


Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit (Kapitelnummer in Klammern).

2 Grundlagen des Verkehrssektors

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Verkehrssektors behandelt, um ein Grundverständnis für die nachfolgenden Kapitel zu schaffen. Dies umfasst neben der Struktur des Verkehrssektors die energetische Eingliederung dessen in das gesamte Energiesystem sowie grundlegende Trends innerhalb des Verkehrssystems. Auf Basis dessen können im weiteren Verlauf der Arbeit die Transformationspfade sowie die dazu notwendigen Szenarien entwickelt werden.

2.1 Struktur des Verkehrssektors

Im Allgemeinen ist Verkehr definiert als die

*„Beförderung, Bewegung von Fahrzeugen, Personen, Gütern,
Nachrichten auf dafür vorgesehenen Wegen.“ [9]*

Diese Definition beinhaltet drei wesentliche Aspekte des Verkehrs. Die Begriffe *Beförderung* und *Bewegung* stellen heraus, dass eine räumliche Ortsveränderung vorliegt. Darüber hinaus können verschiedene Verkehrsobjekte wie z. B. *Personen* und *Güter*, aber auch *Nachrichten* eine räumliche Ortsveränderung erfahren. Der letzte Aspekt der Definition betrifft die Verkehrsnetze (*Wege*), welche für den Verkehr genutzt werden können. Die Verkehrsnetze bestehen aus verschiedenen Verkehrsmitteln (z. B. Fahrzeuge), welche die verfügbaren Verkehrsmedien Land-, Wasser-, Luft- und Weltraum sowie Rohrleitungen nutzen. In der vorliegenden Arbeit werden die beiden Verkehrsobjekte Personen und Güter behandelt. Hinsichtlich der Verkehrsmittel und -medien wird in Sektion 4.1.1 eine Auswahl der im Hinblick auf den Energiebedarf des Verkehrssektors relevantesten Verkehrsmittel und -medien getroffen.

Neben der genannten Einteilung nach Verkehrsobjekt, -mittel und -medium lässt sich der Verkehr in weitere Verkehrsarten gliedern. In der Literatur häufig verwendete Kriterien sind dabei [10]

- die Zugänglichkeit (öffentlich/nicht öffentlich),
- der Verkehrszweck (z. B. Freizeit-, Berufs-, Einkaufsverkehr),
- die räumliche Entfernung zwischen Quelle und Senke (Nah-/Fernverkehr),
- die Raumschließungsfunktion (Binnen-, Transit-, grenzüberschreitender Verkehr)
- oder die Anzahl der beteiligten Verkehrswege (uni-/multi-/intermodaler Verkehr).

Die aufgelisteten Einteilungen dienen der strukturierten Analyse des Verkehrssystems und werden im weiteren Verlauf der Arbeit zur Differenzierung des Verkehrs aufgegriffen.

2.1.1 Verkehrsnachfrage

Der Verkehrssektor wird, wie zuvor beschrieben, in verschiedene Bestandteile gegliedert. Ausgangspunkt ist die Verkehrsnachfrage. Diese resultiert aus dem Bedürfnis Personen oder Güter (*Verkehrsobjekte*) zwischen räumlich entfernten Orten zu bewegen. Zum einen verlangen Personen danach verschiedenen Aktivitäten nachzugehen, welche an unterschiedlichen Orten stattfinden [10]. Zum anderen befinden sich Erzeuger und Verbraucher von Gütern an räumlich entfernten Orten. Somit entsteht in beiden Fällen ein Bedarf, Verkehrsobjekte von einem zu einem anderen Ort zu transportieren. Nach der

Bedürfnispyramide nach Maslow findet im Anschluss an den zuvor beschriebenen Verkehrsbedarf ein Abgleich mit dem vorhandenen Verkehrsangebot statt. Erfüllt dieses den Bedarf so entsteht die Verkehrsnachfrage [10].

Zur quantitativen Darstellung der gesamten Verkehrsnachfrage wird häufig das Verkehrsaufkommen oder die Verkehrsleistung herangezogen. Während das Verkehrsaufkommen lediglich die transportierte Menge (Personen oder Tonnen) aufweist, kombiniert die Verkehrsleistung das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsweite¹. Abbildung 2.1 zeigt den historischen Verlauf der nach Verkehrsmittel aufgeteilten Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr seit dem Jahr 2000 (Personen-/Tonnen-kilometer). Aufgrund der geringen Verkehrsleistung wird die Binnenschifffahrt im Personenverkehr vernachlässigt. Insgesamt ist die Personenverkehrsleistung von 2000 bis 2020 um 20 % gestiegen. Im Güterverkehr hat sich die Verkehrsleistung im gleichen Zeitraum sogar um fast 50 % erhöht. Da das Verkehrsaufkommen in einem geringeren Ausmaß (2 % im Personen-, 14 % im Güterverkehr) gewachsen ist, ist der Großteil des Anstiegs auf höhere Verkehrsweiten zurückzuführen. Im rechten Diagramm sind die Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise auf die Güterverkehrsleistungen durch einen Einbruch im Jahr 2009 deutlich zu erkennen. Ebenso zeigen sich die Folgen der Coronapandemie in sinkenden Personenverkehrsleistungen im Jahr 2020. Der sprunghafte Rückgang der Personenverkehrsleistung im Jahr 2017 ist auf eine veränderte Berechnungsmethodik zurückzuführen [12].

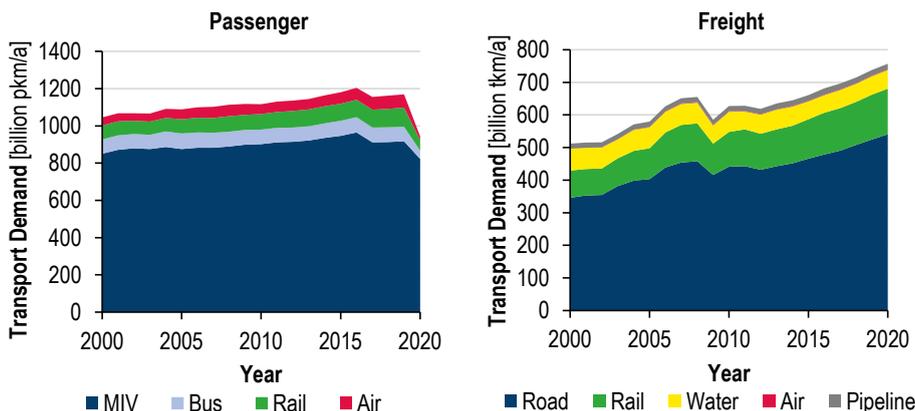


Abbildung 2.1: Historische Entwicklung der Personen- (links) und Güterverkehrsleistung (rechts) in Deutschland von 2000 bis 2020, angelehnt an [12]. MIV: Motorisierter Individualverkehr.

Sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr hat der Straßenverkehr den größten Anteil an der Verkehrsleistung. Insbesondere der motorisierte Individualverkehr (MIV) dominiert den Personenverkehr mit einem über die Zeit nahezu konstanten Anteil von 80 %. Den stärksten Anstieg im betrachteten Zeitraum verzeichnet der Luftverkehr um über 70 % auf 73 Mrd. pkm im Jahr 2019. Die wachsende Verkehrsleistung im Güterverkehr findet vor allem auf dem Straßen- und Schienennetz statt. Alles in allem hat sich der modale Split von 2000 bis 2020 nur in geringem Maß geändert.

¹ Definition Verkehrsweite: „Entfernung, über die ein Verkehrsobjekt örtlich verändert, also transportiert wird.“ [11]

2.1.2 Verkehrsmittel

Der Verkehr kann, wie zuvor beschrieben, in den Verkehrsnetzen Straße, Schiene, Wasser, Luft sowie Rohrfernleitungen erfolgen. Je nach Verkehrsnetz sowie weiterer Anforderungen des Verkehrsbedarfs werden verschiedene Fahrzeuge eingesetzt. Diese wiederum können mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet werden. Innerhalb dieser Sektion wird auf die beiden genannten Aspekte der Fahrzeuge sowie deren Antriebe eingegangen.

Die Verkehrsmittel lassen sich zunächst nach dem genutzten Verkehrsnetz sowie der Verkehrsart einteilen. Insbesondere im Straßenverkehr existiert eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugarten. Diese werden vom Kraftfahrtbundesamt nach Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments klassifiziert [13]. Fahrzeuge, die zur Personen- oder Güterbeförderung ausgelegt sind, werden den Klassen L, M und N zugeordnet. Innerhalb der Klassen bestehen Abstufungen, welche hinsichtlich Radanzahl, Fahrzeuggewicht sowie Beförderungsart differenzieren. Zwei- oder dreirädrige Kraftfahrzeuge sowie leichte 4-rädrige Kraftfahrzeuge werden der Klasse L zugeordnet. Fahrzeuge, die zur Personenbeförderung ausgelegt und mit mindestens vier Rädern ausgestattet sind, entfallen auf die Klasse M. Sind vier- oder mehrrädrige Fahrzeuge zur Güterbeförderung ausgelegt, gehören sie der Klasse N an. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht zu der beschriebenen Klassifizierung.

Tabelle 2.1: Klassifizierung von Straßenkraftfahrzeugen gemäß Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 [13].

Fahrzeugklasse	M1	M2	M3	N1	N2	N3
Anzahl Räder	≥ 4					
Beförderungsobjekt	Personen			Güter		
Anzahl Sitze	≤ 9	> 9		-		
Max. zulässige Gesamtmasse	> 400 kg	≤ 5 t	> 5 t	≤ 3,5 t	3,5 – 12 t	> 12 t

Personenkraftwagen (Fahrzeugklasse M1)

In der Fahrzeugklasse M1 sind auch die im Allgemeinen als Pkw bekannten Fahrzeuge inbegriffen. Darüber hinaus beinhaltet die Klasse M1 Fahrzeuge mit zweckbestimmten Aufbauarten, wie z. B. Wohnmobile oder Krankenwagen. Diese (*Wohnmobile, Sonstige*) werden im Folgenden nicht betrachtet, da sie nicht zu den Pkw zählen und nur einen geringen Anteil (<4 % im Jahr 2020) ausmachen.

Der Bestand der Pkw ist in Deutschland von 2010 bis 2020 stetig auf fast 46 Millionen Fahrzeuge gewachsen, wie im linken Diagramm der Abbildung 2.2 dargestellt. Die jährliche Zuwachsrate lag über das betrachtete Jahrzehnt im Mittel bei 1,4 %. Auch die Neuzulassungszahlen der Pkw sind von 2013 bis 2019 stetig auf jährlich mehr als 3,5 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2019 gestiegen. Infolge der Coronapandemie ist jedoch für 2020 ein Einbruch der Neuzulassungen auf 2,8 Millionen Fahrzeuge zu identifizieren.

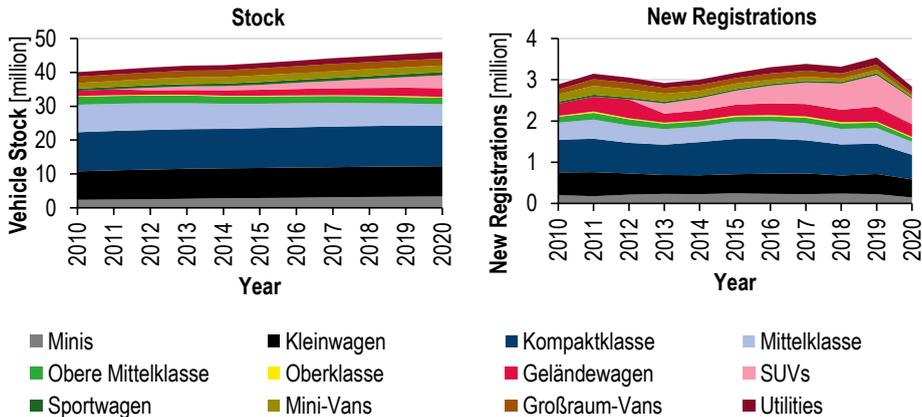


Abbildung 2.2: Historische Entwicklung des Bestands (links) und der Neuzulassungen (rechts) von Fahrzeugen der Klasse M1, auf Basis von [14], [15].

Eine Betrachtung des Bestands sowie der Neuzulassungen aufgeschlüsselt nach Segmenten liefert weitere Informationen. So weisen die Daten auf der einen Seite einen stark wachsenden Anteil der SUV auf. Auf der anderen Seite sinkt der Anteil der Kompakt-, der Mittel- und der oberen Mittelklasse. Infolgedessen haben SUV die Kompaktklasse seit 2019 als volumenstärkstes Fahrzeugsegment hinsichtlich der Neuzulassungen abgelöst. Als Resultat ist eine ähnliche Entwicklung in zeitverzögerter Form in Bezug auf den Fahrzeugbestand festzustellen.

Da SUV insbesondere aufgrund größerer Frontflächen und höherer Fahrzeugmassen einen höheren spezifischen Energiebedarf haben, wird die beschriebene Entwicklung in den letzten Jahren kontrovers in der Öffentlichkeit und der Politik diskutiert ¹ [16], [17]. Bisher ist jedoch, wie in Abbildung 2.2 zu sehen, keine Umkehr des Trends auszumachen.

Busse (Fahrzeugklasse M2, M3)

Fahrzeuge der Klassen M2 und M3 sind im Allgemeinen bekannt als Busse. Diese lassen sich nach ihrem Einsatzgebiet unterteilen. Sie können sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr eingesetzt werden. Zudem besteht die Einsatzmöglichkeit im Linien- oder Gelegenheitsverkehr. Vor allem im Fern- und Gelegenheitsverkehr werden Reisebusse genutzt, welche sich unter anderem hinsichtlich des Komforts sowie der Möglichkeit der Gepäckmitnahme von Linienbussen unterscheiden. Darüber hinaus ist die durchschnittliche Auslastung der Busse im Nah- und Fernverkehr unterschiedlich. Im Fernverkehr liegt diese mit 57 % deutlich über der im Nahverkehr (21 %) [18], [19].

Ein Indikator der Beförderungskapazität ist die Sitzplatzanzahl. Abbildung 2.3 zeigt die historische Entwicklung des Bestands sowie der Neuzulassungen von Bussen gegliedert nach deren Sitzplatzanzahl in den Jahren 2011 bis 2020.

¹ Neben dem genannten höheren spezifischen Energiebedarf gilt der erhöhte Materialbedarf als weiterer kritischer Aspekt in Bezug auf die Ökobilanz der Fahrzeuge.

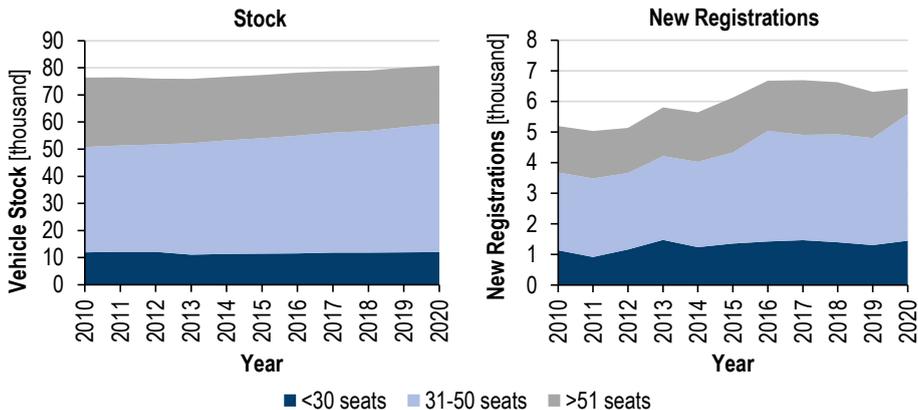


Abbildung 2.3: Historische Entwicklung des Bestands (links) und der Neuzulassungen (rechts) von Fahrzeugen der Klasse M2 und M3, auf Basis von [20], [21].

Da der öffentliche Verkehr gegenüber Pkw Vorteile im Hinblick auf Verkehrs- und Umweltbelastungen besitzt, ist die Politik darauf bedacht dessen Angebot auszubauen [22], [23]. Dies spiegelt sich in den steigenden Neuzulassungszahlen der Fahrzeuge wieder. Während im Jahr 2010 noch 5194 Busse neu zugelassen wurden, waren es in den Jahren 2016 bis 2019 jährlich durchschnittlich mehr als 6.500. Die Aufteilung nach Sitzplatzanzahl stellt heraus, dass der Zuwachs der Neuzulassungen vor allem im Bereich der mittleren Kategorie erfolgt. Darüber hinaus haben sich die Neuzulassungen der Busse mit weniger als 30 Sitzen von 2010 bis 2020 um fast 30 % erhöht. Lediglich die Neuzulassungen der Busse mit mehr als 51 Sitzen stagnierten zwischen 2010 und 2019 bevor sie im Jahr 2020 um fast 50 % eingebrochen sind. Insgesamt ist deren Anteil an den gesamten Neuzulassungen im gezeigten Zeitraum von über 30 % auf unter 14 % gesunken. Ein ähnliches Bild ergibt sich folglich für den Bestand der Busflotte in Deutschland. Auch hier ist der Anteil der Busse mit mehr als 51 Sitzen von einem Drittel auf 26 % gefallen. Demgegenüber steht ein Wachstum der Busse mit 31-50 Sitzen, um mehr als 8.400 Fahrzeuge. In Summe ist der gesamte Busbestand von 2011 bis 2020 von 76.000 auf fast 81.000 angestiegen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass innerhalb der steigenden Neuzulassungen und des Bestands ein Trend hin zur verstärkten Nutzung von kleinen bis mittelgroßen Bussen zu erkennen ist.

Nutzfahrzeuge (Fahrzeugklasse N1, N2, N3)

Fahrzeuge mit mindestens vier Rädern, die vorwiegend für die Güterbeförderung ausgelegt und gebaut sind, werden in die Klassen N1 bis N3 eingeteilt. Die jeweilige Zuordnung erfolgt anhand des zulässigen Gesamtgewichts, wie in Tabelle 2.1 gezeigt. Häufig werden Sattelzugmaschinen aufgrund ihrer großen Bedeutung separat aufgeführt, auch wenn sie in der amtlichen Fahrzeugklassifizierung den oben genannten Klassen zugeteilt werden.

Der Bestand der Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung ist von 2010 bis 2020 um ein Drittel auf mehr als 3,6 Millionen Fahrzeuge angestiegen. Mehr als 77 % des Bestands entfallen dabei mit steigender Tendenz auf die Klasse N1, was unter anderem aus dem

zunehmenden Onlinehandel und den damit einhergehend steigenden Pakettlieferungszahlen¹ resultiert. Der Bestand schwerer Nutzfahrzeuge und von Sattelzugmaschinen ist ebenfalls gewachsen, jedoch nicht so stark wie der Bestand der leichten Nutzfahrzeuge. Der Fahrzeugbestand der Klasse N2 war innerhalb des letzten Jahrzehnts entgegen dem Gesamttrend rückläufig. Vergleichbar zum Bestand haben sich auch die Neuzulassungen der jeweiligen Fahrzeugklassen entwickelt. Im Unterschied zum Bestand sind jedoch zu Beginn des Jahrzehnts aufgrund der vorangegangenen Weltwirtschaftskrise die Neuzulassungszahlen gefallen. Dieser Trend hat sich im Jahr 2013 umgekehrt. Von 2013 bis 2019 haben die Neuzulassungen jährlich stetig zugenommen. Im Jahr 2020 sind die Neuzulassungen infolge der Coronapandemie gegenüber dem Vorjahr gesunken.

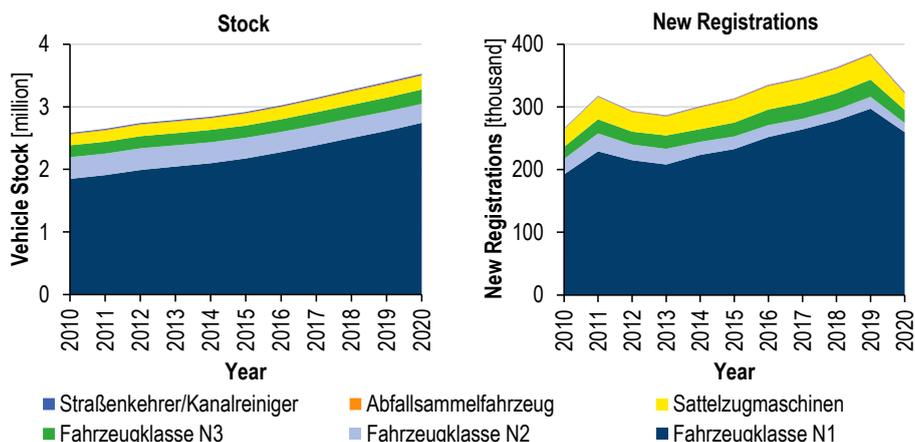


Abbildung 2.4: Historische Entwicklung des Bestands und der Neuzulassungen von Fahrzeugen der Klassen N1-N3, auf Basis von [20], [21].

Während nur etwa jedes 16. Fahrzeug des Nutzfahrzeugbestands im Jahr 2019 eine Sattelzugmaschine war, war es hinsichtlich der Neuzulassungen jedes zehnte Fahrzeug. Dieses Verhältnis deutet auf die unterschiedliche Nutzung und insbesondere deren Lebensdauer² hin. Da sowohl die jährliche Fahrleistung als auch die Nutzlast der Sattelzugmaschinen insbesondere die der leichten Nutzfahrzeuge um ein Vielfaches übersteigt [26], erbringen diese den größten Anteil der in Sektion 2.1.1 aufgezeigten Güterverkehrsleistung auf der Straße.

Um infolge der erhöhten Masse der elektrifizierten Antriebe keine Nutzlastverluste in Kauf nehmen zu müssen, hat die EU die Bestimmungen zum zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeuge im Jahr 2019 angepasst. Die EU-Richtlinie 96/53/EG legt fest, dass „bei Fahrzeugkombinationen, die Fahrzeuge mit alternativem Antrieb oder emissionsfreie Fahrzeuge umfassen, [...] die [...] vorgesehenen höchstzulässigen Gewichte um das zusätzliche

¹ Die Anzahl der beförderten Pakete in Deutschland durch die Deutsche Post, welche der größte Paketdienst in Deutschland ist, ist von 2016 bis 2020 von 1.227.000 auf 1.614.000 (+31,5 %) gestiegen. [24]

² Die durchschnittliche Lebensdauer von Sattelzugmaschinen beträgt in Deutschland 5 Jahre. Demgegenüber ist die Lebensdauer der weiteren Lkw mit 10 Jahren doppelt so hoch. Abbildung 4.26 zeigt die Lebensdauerkurven verschiedener Straßenfahrzeugarten in Deutschland. [25]

Gewicht der alternativen Kraftstoffe oder der emissionsfreien Technologie, höchstens jedoch um 1 bzw. 2 t, zu erhöhen“ sind. [27]

Insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen und Sattelzugmaschinen wird ein Teil der in Sektion 2.1.1 dargestellten Verkehrsleistung in Deutschland von Fahrzeugen, welche im Ausland gemeldet sind, erbracht. Bei Fahrzeugen der Klasse N2 und N3 beträgt der Anteil 15,9 % und bei Sattelzugmaschinen 27 % [28]. Die Fahrzeuge stammen insbesondere aus Polen, den Niederlanden, Tschechien sowie weiteren osteuropäischen Ländern [28]. Unter Berücksichtigung der länderspezifischen Fahrzeuglebensdauern verlängert sich die Lebensdauer der Fahrzeuge, welche in Deutschland verkehren, um 12 % gegenüber der Lebensdauer der Fahrzeuge, welche in Deutschland gemeldet sind [28], [29].

Nicht straßengebundene Verkehrsmittel

Neben den zuvor beschriebenen Straßenverkehrsmitteln gibt es weitere nicht straßengebundene Verkehrsmittel. Als erstes sind hier Züge zu nennen. Diese werden sowohl zum Personen-, als auch zum Gütertransport eingesetzt. Im Personenverkehr ist weiterhin zwischen Nah- (<50 km) und Fernverkehr (>50 km) zu unterscheiden [30]. Die Züge der beiden Verkehrsarten unterscheiden sich hinsichtlich diverser Eigenschaften, wie z. B. Geschwindigkeit und Beförderungskapazität. Während der Schienenfernverkehr in Deutschland ausschließlich oberleitungsgebunden erfolgt, wird im Nahverkehr ebenso die Dieselmotortechnologie eingesetzt [31], [32]. Weitere Möglichkeiten des Bahnbetriebs fernab der Oberleitungen sind der batterieelektrische sowie der Brennstoffzellenantrieb. So fährt seit 2018 bereits der erste Wasserstoffzug im Linienbetrieb in Niedersachsen [33]. Für weitere Linien ist der Einsatz von batterieelektrischen oder Wasserstoffzügen ebenfalls in Planung [31].

Das deutsche Wasserstraßennetz, welches für die Binnengüterschifffahrt genutzt wird, weist eine Länge von 7.476 km auf. Davon entfallen fast 70 % auf die vier größten Teilgebiete - den Rhein und seine Nebenflüsse, das Elbegebiet, die Wasserstraßen zwischen Rhein und Elbe sowie die zwischen Elbe und Oder. Mehr als 73 % des Güterverkehrsaufkommens entfallen auf das Rheingebiet. Die deutsche Binnengüterschiff flotte bestand im Jahr 2020 aus insgesamt 1.949 Schiffen, zu welchen Motorgüterschiffe für trockene Ladung und Tankmotorschiffe für flüssige oder gasförmige Ladung gehören [34]. Zur Dekarbonisierung der Binnengüterschifffahrt wird im Rahmen von Projekten die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff untersucht [35].

Als weiteres nicht straßengebundenes Verkehrsmittel verkehren Flugzeuge auf nationalen und internationalen Flugstrecken. Darüber hinaus wird vielfach zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckenflügen differenziert. Zu diesen existiert keine allgemeingültige Definition. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Grenzen in Anlehnung an die Fluggastrechte-Verordnung [36] zurückgegriffen. Zudem bieten diese Grenzen eine sinnvolle Möglichkeit zur Klassifizierung der Flugzeuge, deren grundlegende Parameter abhängig vom Einsatzgebiet sind. Abbildung 2.5 zeigt die Verkehrsleistung und Anzahl der aus Deutschland abgehenden internationalen Flüge im Jahr 2019 [37].

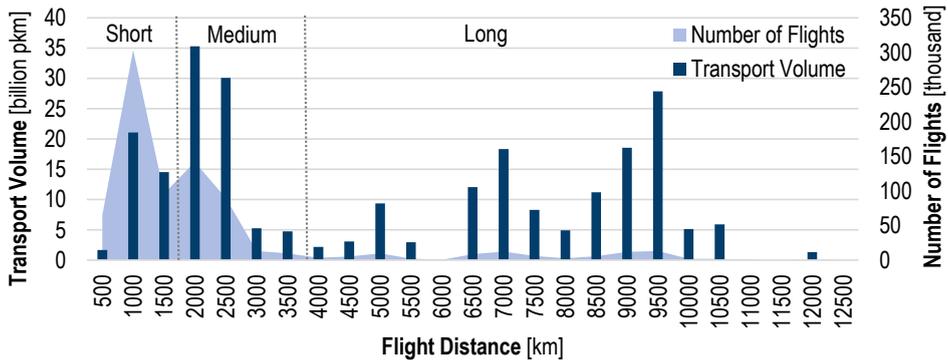


Abbildung 2.5: Verkehrsleistung und Fluganzahl internationaler Flüge in Abhängigkeit der Flugdistanz [37].

Darin wird ersichtlich, dass die Anteile der drei Distanzklassen an den beiden Verkehrsgrößen, Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung, infolge der unterschiedlichen Flugdistanzen verschieden sind. So entfallen 58 % der Flüge auf den Kurzstreckenflugverkehr, welche jedoch lediglich 15 % der Verkehrsleistung des Flugverkehrs ausmachen. Demgegenüber sind 11 % der Flüge im Langstreckenbereich angesiedelt. Diese entsprechen allerdings über 53 % der Verkehrsleistung. Im Mittelstreckenflugverkehr ist der Anteil an beiden Größen mit jeweils 31 % ausgeglichen [37].

Aktuell werden Flugzeuge zumeist von Turbinen-Strahltriebwerken angetrieben, welche mittels Jet-A1-Flugturbinenkraftstoff (Kerosin) befeuert werden. Zur Defossilisierung ist es möglich diesen auf Basis von erneuerbaren Energien herzustellen. Darüber hinaus wird der Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen diskutiert, welcher im Kurzstreckenbereich eine aussichtsreiche Alternative bietet [38].

Antriebstechnologien

Die einzelnen Verkehrsmittel können, wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, mit unterschiedlichen Antriebstechnologien ausgestattet werden. Historisch gesehen werden nahezu alle Verkehrsmittel mit fossilen Flüssigkraftstoffen und Otto- bzw. Dieselmotoren betrieben. Ausnahme bildet hierbei der Schienenverkehr, welcher bereits heute in großen Teilen mittels Oberleitungen elektrifiziert ist [39].

Insbesondere für Straßenfahrzeuge existiert eine Vielzahl alternativer Antriebskonzepte. Abbildung 2.6 skizziert den Aufbau der meistdiskutierten Alternativen. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der beiden zentralen Komponenten der Antriebe, dem Energiespeicher und dem Energiewandler.

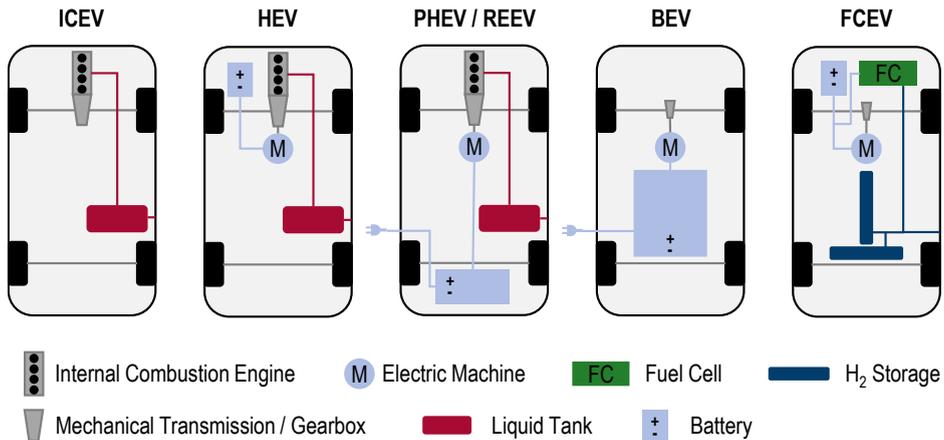


Abbildung 2.6: Aufbau verschiedener Antriebstechnologien. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Elektrifizierte Antriebe zeichnen sich durch den Einsatz von Elektromaschinen aus. Zudem wird der Flüssigtank durch eine Batterie ersetzt. Sind zwei Energiespeicher und -wandler verbaut, so handelt es sich um ein Hybridfahrzeug [13]. Bei Plug-In Hybriden als Sonderform der Hybridfahrzeuge ist eine externe Aufladung der Fahrzeugbatterie möglich. In der Regel werden Brennstoffzellenfahrzeuge zur Optimierung des Brennstoffzellenbetriebs und zur Rekuperation ebenfalls mit einer Batterie ausgestattet, weshalb sie in einem solchen Fall ebenfalls zu den Hybridfahrzeugen zählen. Die Dimensionierung der Fahrzeugbatterie entscheidet über die letztliche Nutzung der Energieträger bei Hybridfahrzeugen. In den letzten Jahren ist ein Trend hin zu größeren Batteriekapazitäten bei Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen zu erkennen. Beim Konzept der Range-Extender-Elektrofahrzeuge ist die Fahrzeugbatterie so dimensioniert, dass nur bei sehr langen Fahrten der sekundäre Energiewandler und -speicher benötigt wird, um eine hohe Reichweite des Fahrzeugs ohne externe Zwischenladung zu realisieren.

Weiterhin macht die vollständige Elektrifizierung des Antriebsstrangs den Entfall des Schaltgetriebes möglich. Demgegenüber erfordern unterschiedliche Spannungsniveaus sowie Stromformen der elektrischen Komponenten den Einsatz leistungselektronischer Komponenten.

Bei Bussen und schweren Nutzfahrzeugen ist neben den in der Abbildung inkludierten Alternativen auch der Einsatz von Oberleitungshybriden möglich [40]. Die Energieversorgung erfolgt bei diesen Konzepten in Teilen der Fahrt über einen Pantographen und Oberleitungen vergleichbar zu Oberleitungszügen. Die Fahrt fernab der Oberleitungen wird von einem oder zwei Energiespeichern an Bord sichergestellt. Je nach Energiespeicher ist ein zum Energieträger passender weiterer Energiewandler notwendig.

Die Entwicklung des Pkw-Neufahrzeugmarktes in Deutschland hat seit Anfang 2020 eine neue Dynamik hinsichtlich der zuvor erläuterten Antriebsalternativen erreicht. Während bis Ende 2019 wie in den vorherigen Jahren und Jahrzehnten die konventionellen Antriebe mit Otto- oder Dieselmotor in mehr als 90 % der Neufahrzeuge verbaut war, sinkt deren Anteil

seitdem kontinuierlich. Im Gegenzug steigt der Anteil der (Plug-In-)Hybride und der Batterie-Elektrofahrzeuge, welche seit November 2020 zusammengenommen mehr als jedes dritte Neufahrzeug antreiben.

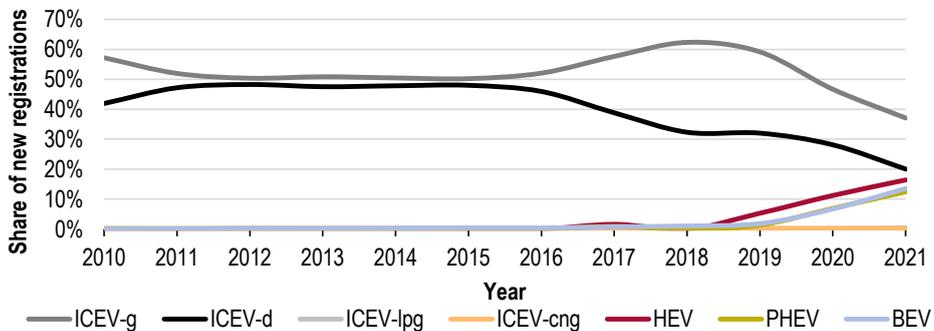


Abbildung 2.7: Anteile relevanter Antriebstechnologien an den Pkw-Neuzulassungen in Deutschland von 2010 bis 2021, auf Basis von [41]. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -lpg: Autogas, -cng: Erdgas.

Eine vergleichbare Entwicklung wie auf dem deutschen Neufahrzeugmarkt ist auch auf internationaler Ebene zu beobachten. Im europäischen Vergleich befand sich der Anteil des batterieelektrischen Antriebs im zweiten Quartal 2022 in Deutschland (13,7 %) leicht über dem Durchschnitt (11,3 %). Die höchsten Anteile erreichen batterieelektrische Pkw in Norwegen (75,7 %), Schweden (26,9 %) und den Niederlanden (22,8 %) [42]. In weiteren volumenstarken asiatischen und amerikanischen Neufahrzeugmärkten weist der Trend einen ähnlichen Aufschwung der elektrifizierten Antriebsalternativen auf [43], [44].

In abgeschwächter Form verglichen mit Pkw verschieben sich auch im Bereich der Nutzfahrzeuge sowie der Busse zunehmend die Anteile weg von der konventionellen Diesels-technologie hin zu Hybriden sowie batterieelektrischen Antrieben. Hinzu kommt vor allem bei Bussen und schweren Nutzfahrzeugen der Brennstoffzellenantrieb, welcher in anderen Fahrzeugklassen bisher eine untergeordnete Rolle spielt. Jedoch ist auch hier aufgrund zunehmender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den nächsten Jahren ein wachsender Markt zu erwarten. Die zukünftige Marktentwicklung der Antriebsformen ist Teil diverser Studien [45]–[47] und wird auch in Kapitel 7 analysiert. Infolge der Elektrifizierung rückt der dadurch veränderte Rohstoffbedarf zur Produktion der notwendigen Komponenten und daraus resultierende mögliche Knappheiten in den Fokus von Analysen [48].

2.2 Eingliederung in das Energiesystem

Durch die in Sektion 2.1.1 beschriebene Verkehrsnachfrage und deren Bereitstellung mittels der in Sektion 2.1.2 dargestellten Verkehrsmittel entsteht eine Energienachfrage nach verschiedenen Energieträgern. Somit bildet der Verkehrssektor einen Teil des Energiesystems. Historisch ist die Energienachfrage vor allem auf Flüssigkraftstoffe wie Benzin, Diesel oder Kerosin konzentriert. Diese machten im Jahr 2019, wie in Tabelle 2.2 zu sehen, 94 % der gesamten Energienachfrage des Verkehrs aus. Lediglich im Straßen- und Schienenverkehr wurden weitere Energieträger nachgefragt. Durch den oberleitungsgebundenen Schienenverkehr entsteht eine Stromnachfrage. Im Straßenverkehr umfassen die unter

Sonstige zusammengefassten Energieträger die Kraftstoffe Flüssiggas, Erdgas und Strom. Die Nachfrage nach diesen Energieträgern entstand vor allem im motorisierten Individualverkehr. Im Gegensatz dazu war die Nachfrage des öffentlichen Personenverkehrs sowie des Güterverkehrs auf der Straße von Dieselmotoren dominiert.

Tabelle 2.2: Energienachfrage des Verkehrssektors nach Verkehrsart und Kraftstoffart in Deutschland im Jahr 2019 [3].

Verkehrsbereich	Energieträger in TWh				
	Otto-kraft-stoffe	Flug-turbinen-kraftstoff	Diesel-kraft-stoff	Sonstige	Summe
Schienerverkehr	0	0	3	12	15
Straßenverkehr	207	0	387	37	631
Luftverkehr	0	121	0	0	121
Küsten- und Binnenschifffahrt	0	0	3	0	3
Summe	207	121	393	49	770

Die beschriebene Nachfrage nach den verschiedenen Energieträgern wird vom Energiesektor bereitgestellt. Dieser umfasst sowohl die dafür notwendigen Versorgungsinfrastrukturen als auch die eigentliche Herstellung der Sekundärenergieträger, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

2.2.1 Tankstellen- und Ladeinfrastruktur

Mittels der Tankstelleninfrastruktur werden die einzelnen Verkehrsmittel mit den nachgefragten Sekundärenergieträgern versorgt. Daher ist die Infrastruktur je nach Verkehrsmittel und Sekundärenergieträger aufgrund unterschiedlicher Anforderungen zu differenzieren.

Konventionelle Tankstellen

Zur Versorgung des Straßenverkehrs mit Flüssigkraftstoffen wie Benzin oder Diesel standen in Deutschland im Jahr 2021 ca. 14.500 Tankstellen zur Verfügung. Die Anzahl der Tankstellen ist in den letzten Jahren marginal gesunken [49]. Die Kosten der Tankstellen liegen mit unter 1 ct€/l auf einem im Vergleich zu den weiteren Kosten vernachlässigbar niedrigem Niveau [50].

Wasserstofftankstellen

Die Bereitstellung von Wasserstoff für den Verkehrssektor erfolgt ebenfalls mittels Tankstellen. Aufgrund des frühen Marktstadiums der Wasserstoffnutzung im Verkehrssektor ist das Tankstellennetz gegenüber dem konventionellen Tankstellennetz deutlich weniger ausgebaut. So sind im Mai 2022 deutschlandweit 94 öffentliche Tankstellen für den Straßenverkehr eröffnet [51]. In Abhängigkeit des Fahrzeugkonzepts müssen unterschiedliche Drücke bzw. Aggregatzustände an den Tankstellen bereitgestellt werden. Während aktuelle Brennstoffzellen-Pkw mit einem Tankdruck von 700 bar arbeiten liegt dieser bei Bussen und Nutzfahrzeugen zumeist niedriger bei 350 bar [52]–[54]. Zudem wird im Nutzfahrzeugbereich von verschiedenen Unternehmen die Nutzung von Flüssigwasserstoff angestrebt [55]. Die Betankung von Nutzfahrzeugen ist aktuell an acht Wasserstoffstationen des Joint Ventures H₂Mobility möglich [51]. In der nächsten Zeit soll vor allem der Aufbau zusätzlicher Nutzfahrzeugtankstellen an Orten potenzieller Nachfrage fokussiert werden. Für Züge sind in Deutschland ebenfalls weitere Wasserstofftankstellen im Rahmen von

Pilotprojekten geplant [56]. Denkbar sind auch hybride Tankstellen, welche mindestens zwei Anwendungsfälle bedienen können [57].

Elektrische Ladepunkte

Batterieelektrische Fahrzeuge erfordern eine Versorgung mit elektrischer Energie. Dies kann sowohl mittels konduktiver, als auch induktiver Ladetechnik erfolgen. Im Gegensatz zum konduktiven Laden ist beim induktiven Laden kein mechanischer Kontakt zwischen dem Ladesystem und dem Fahrzeug erforderlich [58]. Aktuell ist ein Fokus auf konduktive Ladesysteme zu erkennen, da dieses System ökonomische Vorteile bietet [58]. Für Busse und schwere Nutzfahrzeuge werden neben der kabelgebundenen Ladung weitere konduktive Ladungsformen diskutiert. Dies sind insbesondere Oberleitungen und Pantographen, welche die Bereitstellung elektrischer Energie während der Fahrt ermöglichen [59], [60]. Zudem stellt die Ladung mittels Pantographen eine geeignete Lösung zur Ladung von Bussen während des Standes an Haltestellen dar. Somit sinken die Anforderungen an die Fahrzeugreichweite und infolgedessen die erforderliche Batteriekapazität.

Neben der genannten Differenzierung kann zwischen Wechsel- und Gleichstromladung differenziert werden. In Abhängigkeit der Phasenanzahl können in Deutschland bei der Wechselstromladung entweder mit bis zu 3,7 kW (eine Phase) oder bis zu 22 kW (drei Phasen) geladen werden. Die Gleichstromladung bietet höhere Ladeleistungen, im Pkw-Bereich aktuell zwischen 50 und 350 kW, sodass kürzere Ladezeiten erzielt werden können. Daher wird diese Art der Ladung im Allgemeinen oft als Schnellladung bezeichnet. Im Nutzfahrzeugbereich sind noch höhere Ladeleistungen (>750 kW) angedacht, um die erforderliche Energie in zufriedenstellender Zeit bereitstellen zu können.

Die Ladesäulen können sowohl privat als auch öffentlich zugänglich sein. Insgesamt teilt die Nationale Plattform Mobilität die Ladesäulen in sieben Kategorien (vgl. Abbildung 2.8) ein, welche sich vor allem durch den Ladeort definieren [61].

Verteilung Ladevorgänge	Privater Aufstellort 60-85 %			Öffentlich zugänglicher Aufstellort 15-40 %			
Typische Standorte für Ladeinfrastruktur							
	Garage bzw. Stellplatz beim Eigenheim	Parkplätze (z.B. Tiefgarage von Wohnanlagen, Mehrfamilienhäusern, Wohnblocks)	Firmenparkplätze auf eigenem Gelände	Ladestation / Lade-Hub Innerorts	Ladestation / Lade-Hub an Achsen (z.B. Autobahn, Bundesstraße)	Kundenparkplätze bzw. Parkhäuser (z.B. Einkaufszentren)	Straßenrand, öffentliche Parkplätze
	regelmäßige oder Nachtladung			Schnellladung		Zwischendurchladen	

Abbildung 2.8: Einteilung der elektrischen Ladeinfrastruktur für Pkw nach [61].

Es wird erwartet, dass die meisten Ladevorgänge im privaten Bereich stattfinden. Diese regelmäßigen Ladungen können sowohl auf Stellplätzen von Ein- oder Mehrfamilienhäusern sowie auf Firmenparkplätzen geschehen. Die Verfügbarkeit eines privaten Stellplatzes ist stark regionsabhängig und unterscheidet sich insbesondere zwischen dem städtischen und ländlichen Raum [62]. Im öffentlichen Bereich erfolgt die Klassifizierung nach der Ladeleistung. Die Schnellladung kann sowohl innerorts als auch entlang der

Hauptverkehrsachsen erfolgen. Das Zwischendurchladen mit geringeren Ladeleistungen bis zu 22 kW ist im öffentlich zugänglichen Raum am Straßenrand und auf öffentlichen oder Kundenparkplätzen möglich [61].

Im Bereich der privaten Ladeinfrastruktur ist in den letzten Jahren ein deutlicher Anstieg der Ladepunkte zu erkennen. Ein Anhaltspunkt dafür sind die über 300.000 beim Bundesverkehrsministerium gestellten Förderanträge für private Wallboxen seit Ende 2020. Für den (teil-)öffentlichen Bereich wurden im März 2021 rund 40.000 Ladepunkte im zentralen Ladesäulenregister erfasst. Dabei handelte es sich bei etwa jedem siebten Ladepunkt um einen DC-Schnelllader [63]. Die Nationale Plattform Mobilität hat vier Szenarien zum Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Deutschland bis zum Jahr 2030 erstellt, welche verschiedene Anteile der Ladearten unterstellt. Der berechnete Ladeinfrastrukturbedarf reicht von 180.000 bis zu 950.000 Ladepunkten im Jahr 2030. Der geringste Bedarf entsteht bei einem hohen Anteil des privaten Ladens (85 %) und einem hohen Anteil der Schnelllader (DC) in Höhe von 33 % an allen öffentlichen Ladepunkten [64]. Im Rahmen des „Klimaschutzprogramm 2030“ hat das Bundeskabinett am 9. Oktober 2019 das Ziel von einer Million öffentlich-zugänglichen Ladepunkten bis 2030 ausgegeben [65], was am oberen Ende der zuvor genannten Szenarien der Nationalen Plattform Mobilität liegt.

Zur Erreichung dieses Ziels und der Beschleunigung einer gebäudeintegrierten Lade- und Leitungsinfrastruktur für die Elektromobilität ist seit dem 25. März 2021 das Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz in Kraft. Darin werden Mindestanforderungen bezüglich der Leitungs- und Ladeinfrastruktur für neue und Bestandsgebäude geregelt. So muss z. B. jedes Nichtwohngebäude mit mehr als 20 Stellplätzen ab dem 1. Januar 2025 mit mindestens einem Ladepunkt ausgestattet werden. [66]

Oberleitungen

Aufgrund des hohen Fahrzeuggewichts und der hohen täglichen Fahrleistungen ergeben sich Herausforderungen in Bezug auf die Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen mittels des batterieelektrischen Antriebes. Um auch diesen Bereich zu elektrifizieren, untersuchen vermehrt Studien und Projekte die Machbarkeit von oberleitungsgebundenen schweren Nutzfahrzeugen [40], [67]. Im Rahmen des Projekts *StratON* werden dazu drei verschiedene Ausbaustufen der Infrastruktur entlang vielbefahrener Autobahnen analysiert. Für den finalen Ausbau von 4.000 km für bis zu 120.000 Fahrzeuge werden die Kosten auf insgesamt 12,2 Milliarden € geschätzt [40]. Neben den hohen Kosten stehen der Technologie nach Gnann et al. weitere kritische Aspekte entgegen [68]. So ist immer eine Hybridtechnologie mit Batterie, Dieselmotor oder Brennstoffzelle erforderlich, um auch fernab der Oberleitungen fahren zu können. Da diese nur eine begrenzte Reichweite erlauben, besitzen die Fahrzeuge einen eingeschränkten Einsatzbereich. Durch die nahezu unflexible Last können sich weiterhin lokale Lastspitzen um bis zu 75 % erhöhen. Da der Fernlastverkehr international geprägt ist, sollte der Aufbau der Infrastruktur international angegangen werden, um keinen Tausch der Zugmaschine an Staatsgrenzen erforderlich zu machen. Auf der internationalen Ebene wird aktuell jedoch seitens der EU mehr der modale Shift auf die Schiene fokussiert [68].

Im Schienenverkehr erfolgt bereits heute ein Großteil der Energieversorgung mittels Oberleitungsinfrastruktur. Dazu sind in Deutschland 20.726 der 38.466 km des Schienennetzes mit elektrischen Oberleitungen ausgestattet [39]. Diese sind in ein deutschlandweites

Bahnstromnetz integriert, welches mit einer vom restlichen Stromnetz abweichenden Frequenz von 16,7 Hz betrieben wird.

Der Ausbau der in dieser Sektion beschriebenen Versorgungsinfrastruktur stellt einen kritischen Aspekt der alternativen Antriebe dar. Auf der einen Seite kann die Infrastruktur bei geringer Auslastung aufgrund niedriger Marktanteile der Fahrzeuge nicht wirtschaftlich betrieben werden. Auf der anderen Seite ist eine Startinfrastruktur für Markteinführung und -hochlauf der Fahrzeuge mit alternativem Antrieb notwendig. Daher wird dieser Zusammenhang häufig als „Henne-Ei-Problem“ bezeichnet.

2.2.2 Übertragungs- und Verteilnetz

Die Verbindung der Tankstellen- und Ladeinfrastruktur (Ort der Nachfrage) mit den Herstellungsorten der Energieträger (Ort der Erzeugung) erfolgt mittels Übertragungs- und Verteilnetzen. Während auf der Übertragungsnetzebene längere Distanzen überbrückt werden, transportieren Verteilnetze die Energieträger auf lokaler Ebene. Die Infrastruktur ist unter anderem abhängig vom transportierten Energieträger. Diese Sektion gibt eine Übersicht zu diesen Infrastrukturen in Deutschland.

Elektrischer Strom

Das deutsche Stromnetz besteht, wie zuvor beschrieben, aus der Übertragungs- und Verteilnetzebene. Da verschiedene Spannungsebenen aufgrund der spannungsabhängigen entfernungs-spezifischen Leitungsverluste einen möglichst effizienten Transport des elektrischen Stroms bieten, besteht das deutsche Stromnetz insgesamt aus sieben Netzebenen. Das über 36.000 km lange Höchstspannungsnetz bildet das Übertragungsnetz. Das über 1,8 Millionen km lange Verteilnetz besteht aus dem Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz sowie den Transformationsebenen, welche einen Austausch zwischen den Spannungsebenen ermöglichen [69]. Die wettbewerbsrechtliche Aufsicht des Stromnetzes obliegt der Bundesnetzagentur, welche in ihrem jährlichen Monitoringbericht grundlegende techno-ökonomische Parameter (z. B. Netzverluste, Netzentgelte, Netzkosten) ausweist [70]. Insgesamt ist das deutsche Stromnetz direkt über Kuppelleitungen mit elf europäischen Ländern verknüpft und Teil des europäischen elektrischen Verbundnetzes. Der Ten-Year Network Development Plan sieht infolge des Anstiegs des internationalen Strom-austausches einen Ausbau der Kuppelleistungen vor [71].

Nicht nur auf der Übertragungsnetzebene bedarf es eines Ausbaus des Stromnetzes. Aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien, welche dezentral auf niedrigeren Spannungsebenen in das Netz einspeisen, entstehen zunehmend bidirektionale Leistungsflüsse. Des Weiteren verändert sich die räumliche Verteilung der Stromerzeugung, sodass ein weiterer Transport zu den Verbrauchsschwerpunkten erforderlich wird. Zudem hat die zunehmende Elektromobilität höhere Anschlussleistungen im Verteilnetz zur Folge. Die beschriebenen Entwicklungen erfordern eine angepasste Auslegung des Stromnetzes und führen zu einem Stromnetzausbaubedarf in den verschiedenen Spannungsebenen. [72], [73]

Erdgas

Ebenso wie das Strom- ist auch das Erdgasnetz in eine Übertragungs- und eine Verteilnetzebene unterteilt. Die einzelnen Ebenen unterscheiden sich in diesem Fall insbesondere durch unterschiedliche Betriebsdrücke. Mittels des Erdgastransportnetzes wird das

importierte Erdgas in die Nähe der großen Verbrauchszentren gefördert. Zudem erfolgt auf dieser Netzebene der Transittransport in Nachbarländer. Großabnehmer sind direkt an diese Ebene angeschlossen, alle restlichen Endverbraucher sind über das Verteilnetz angebunden [74]. Vergleichbar zum Stromnetz sind im Monitoringbericht der Bundesnetzagentur ebenfalls grundlegende Informationen zum deutschen Erdgasnetz enthalten [70].

Wasserstoff

Für die Wasserstoffversorgung der Endverbraucher, wozu auch der Verkehrssektor zählt, ist der Aufbau einer Versorgungsinfrastruktur erforderlich, sofern keine Vor-Ort-Erzeugung erfolgt. Der Wasserstofftransport ist in verschiedenen Aggregatzuständen sowie mittels verschiedener Infrastrukturen realisierbar. Sowohl der Transport im gasförmigen Zustand bei hohem Druck als auch der Transport im flüssigen Zustand bei Temperaturen unter -253 °C ist möglich. Im gasförmigen und flüssigen Zustand steht der Transport in Speichern mittels Verkehrsmitteln wie Lkw, Bahn oder Schiff als Option zur Verfügung. Darüber hinaus kann der gasförmige Transport ebenso via Pipeline erfolgen. Diese Option ist aus techno-ökonomischer Sicht insbesondere für den Transport größerer Mengen über längere Strecken vorteilhaft [57]. Daher stellen Robinius et al. [75] eine Transmission mittels Pipelinennetz sowie eine Distribution mittels Lkw als kostengünstigste Option für den innerdeutschen Wasserstofftransport heraus. Dabei ist es ebenso denkbar und aus techno-ökonomischer Sicht von Vorteil keine neuen Wasserstoffpipelines zu errichten, sondern bestehende Erdgaspipelines umzuwidmen [57], [76].

Die aktuell ausgebaute Wasserstoffpipelineinfrastruktur beschränkt sich auf zwei Pipelinesysteme mit jeweils mehr als 100 km Leitungen. Da im Vergleich zum heutigen Bedarf jedoch eine stark steigende Nachfrage prognostiziert wird, gibt es bereits Ankündigungen zu neuen Pipelineprojekten [77], [78].

2.2.3 Umwandlungsprozesse

Die zu Beginn des Abschnitts beschriebene Nachfrage des Verkehrssektors nach Sekundärenergieträgern wird vom Energiesektor bedient. Dazu werden Primär- in Sekundärenergieträger umgewandelt. Abbildung 2.9 gibt eine Übersicht potenzieller Umwandlungsprozesse zur Herstellung der potenziell vom Verkehrssektor nachgefragten Sekundärenergieträger. Nicht alle ausgewiesenen Optionen stehen in Deutschland uneingeschränkt zur Verfügung. So ist das Ende der Kernenergie und Kohleverstromung politisch reguliert [79], [80].

Die nachgefragten Sekundärenergieträger lassen sich, wie auf der rechten Seite der Abbildung farblich gekennzeichnet, in sechs Cluster einteilen. Historisch konzentriert sich die Endenergienachfrage des Verkehrssektors auf die erdölbasierten Kraftstoffe, wie zu Beginn des Abschnitts gezeigt. Eine zunehmende Elektrifizierung der Verkehrsmittel führt zu einer Stromnachfrage durch den Verkehrssektor. Für Brennstoffzellenantriebe ist die Nutzung von Wasserstoff als weiteren Sekundärenergieträger zu erwarten. Neben den genannten Alternativen sind Methan sowie verschiedene Flüssigkraftstoffe potenzielle zukünftige Energieträger im Verkehrssektor.

In Teilen ist auch eine Mischung verschiedener Flüssigkraftstoffe möglich. Marktüblicher Otto- und Dieselmotorkraftstoff enthält in Deutschland einen biogenen Anteil. Dieser Anteil unterliegt Normen¹, um technische Randbedingungen der Fahrzeugantriebe zu berücksichtigen.

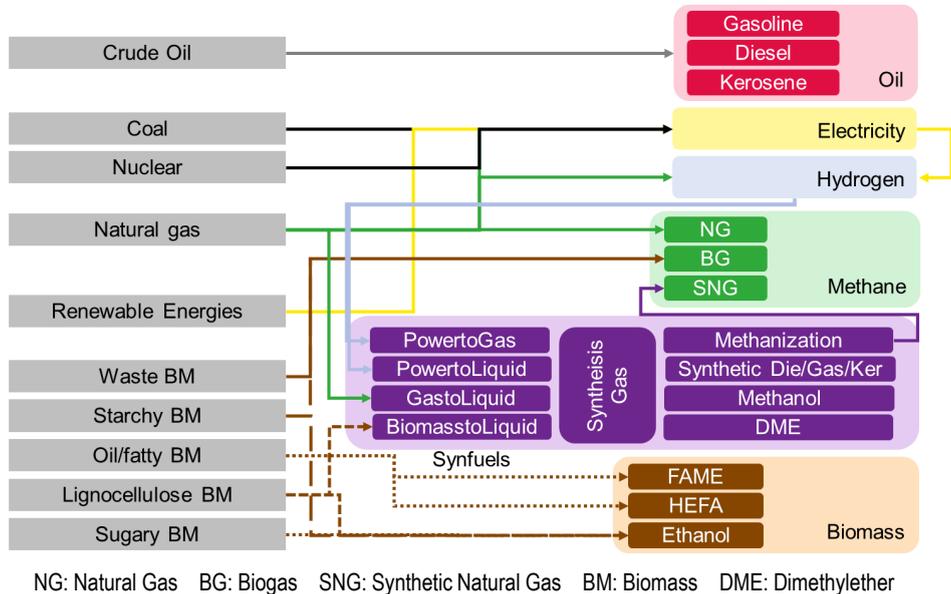


Abbildung 2.9: Umwandlungsprozesse zur Herstellung potenzieller Sekundärenergieträger für den Verkehrssektor. Eigene Darstellung nach [81].

Die einzelnen Sekundärenergieträger unterscheiden sich vor allem hinsichtlich deren volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte in gespeicherter Form [84]. Da diese Eigenschaften aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit an Volumen und Masse entscheidende Faktoren bei der Wahl als Energiequellen der Verkehrsmittelantriebe darstellen, ist die Wahl des Energieträgers abhängig vom Verkehrsmittel.

Treibhausgasemissionen können sowohl während des Einsatzes im Verkehrsmittel (TTW), als auch während der Herstellung der Sekundärenergieträger (WTT) emittiert werden. Dabei besteht eine Abhängigkeit vom genutzten Herstellungspfad. Insbesondere für die alternativen Energieträger im Verkehrssektor besteht eine große Abhängigkeit der Umweltauswirkung vom Well-to-Tank-Pfad [85]. Obwohl während des Verbrennungsprozesses biomassebasierter Kraftstoffe im Fahrbetrieb Treibhausgasemissionen entstehen, haben diese gegenüber fossil basierten Kraftstoffen in den meisten Fällen eine bessere Treibhausgasbilanz. Dies resultiert aus der Bilanzierung des während des Wachstumsprozesses gebundenen Kohlendioxid als negative Emissionen².

¹ DIN EN 590 erlaubt einen maximalen Anteil von 7 % Biodiesel in B7-Kraftstoff [82]. DIN EN 228 reguliert den maximalen Anteil von Ethanol zu 5 bzw. 10 % in E5- bzw. E10-Kraftstoff [83].

² Negative Emissionen entstehen durch den Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre. Wird bei der weiteren Nutzung eines Stoffs weniger CO₂-äq. emittiert als bei dessen Herstellung der Atmosphäre entzogen wurde, entsteht insgesamt eine negative Treibhausgasbilanz.

Neben den genannten Unterschieden in Bezug auf die Treibhausgasemissionen sind auch die Herstellungskosten der Sekundärenergieträger maßgeblich abhängig vom Herstellungsprozess. Daher muss in Analysen genau beachtet werden, welche Annahmen hinsichtlich der Herstellungsprozesse getroffen werden. Im Bereich der Biokraftstoffproduktion geben Naumann et al. einen Überblick über den Status Quo in Deutschland sowie deren techno-ökonomischen Parametern [86].

2.2.4 Primärenergieträger

Primärenergieträger können in fossile und regenerative Energieträger, wie z.B. Solar- und Windenergie, unterteilt werden. Die Verfügbarkeit der Primärenergieträger unterscheidet sich in Bezug auf deren Potenzial. Zudem führt die Wetterabhängigkeit der Wind- und Solarenergie zu einer volatilen Verfügbarkeit dieser Energieträger.

Die Endlichkeit fossiler Primärenergieträger war in den letzten Jahrzehnten immer wieder Inhalt öffentlicher Diskussionen. Dennoch ist keine technische Begrenzung dieser bis zum Jahr 2050 zu erwarten. Biomasse, welche sich in Anbaubiomasse und Abfall- bzw. Reststoffe einteilen lässt, ist hingegen durch unterschiedliche Faktoren limitiert. Anbaubiomasse ist durch die dafür zur Verfügung stehende landwirtschaftlich nutzbare Fläche eingeschränkt verfügbar. Dabei ist vor allem die Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau kritisch zu betrachten. Majer et al. bestimmen in ihrem Basisszenario mit erhöhten Umweltrestriktionen zu Biomassepotenzialen ein Ackerlandpotenzial von 3 Millionen Hektar und zusätzlich ein Grünlandpotenzial von 1,7 Millionen Hektar zum Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland im Jahr 2030 [87]. Dies entspricht 30 % der insgesamt ausgewiesenen Acker- und Grünlandflächen.

Das Potenzial der erneuerbaren Energien ist ebenfalls durch die dafür zur Verfügung stehenden Flächen begrenzt. Risch et al. weisen für Photovoltaik ein technisches Potenzial von 840 GW in Deutschland aus [88]. Dieses steht zu 59 % in Form von Dachflächenphotovoltaik zur Verfügung, der Rest ist Freiflächenphotovoltaik. Das technische Potenzial der Windenergie ist hinsichtlich der installierbaren Leistung für Deutschland zu 84 % an Land. Insgesamt beläuft es sich auf 482 GW. Das technische Potenzial der Laufwasserkraftwerke ist durch die heute installierte Leistung von ca. 5,6 GW_{el} bereits erschöpft [89].

Die für Photovoltaik und Windenergie ausgewiesenen technischen Potenziale sind verglichen mit anderen erneuerbaren Energien sehr groß. Jedoch ist die Stromerzeugung mit diesen Technologien nur volatil möglich, da sie stark von der solaren Einstrahlung bzw. dem Windaufkommen abhängig sind. Dadurch entsteht zudem eine räumliche Differenz der Volllaststunden. Im Jahr 2013 betragen diese für Onshore-Windkraftanlagen durchschnittlich etwa 1.600 Stunden. Aufgrund aktueller Trends der Windturbinentechnik ist nach Ryberg [90] bis zum Jahr 2050 ein regionsabhängiger Anstieg auf über 2.900 Volllaststunden zu erwarten. Die solare Einstrahlung ist stark jahres- und tageszeitspezifisch. Insgesamt ergeben sich daher 1.000 bis 1.200 Volllaststunden für die Photovoltaiktechnologien [90].

Neben den genannten technischen Potenzialen der einzelnen Primärenergieträger steht zunehmend auch die Abhängigkeit des deutschen Energiesystems von Energieimporten im Fokus. Zur Reduktion dieser Importabhängigkeit wird ein verstärkter Ausbau der erneuerbaren Energien fokussiert [91].

2.2.5 Sektorenkopplung

Die Interaktion der Sektoren des Energiesystems nimmt durch den Wandel zu einem defossilisierten System zu. Dies resultiert unter anderem aus dem beschriebenen begrenzten Potenzial verschiedener Primärenergieträger. So besteht auf der einen Seite die Möglichkeit, die beschränkt verfügbare Biomasse zur Erzeugung diverser gasförmiger oder flüssiger Kraftstoffe zu nutzen. Auf der anderen Seite kann sie zur Strom- oder Wärmeerzeugung für die anderen Nachfragesektoren eingesetzt werden. Dies führt zu einer Nutzungskonkurrenz zwischen den Sektoren, welche auch von weiteren Dekarbonisierungsoptionen abhängt.

Darüber hinaus spielt die zeitliche Volatilität der Wind- und Solarenergie eine wesentliche Rolle bei der Sektorenkopplung. Durch den Einsatz kostengünstig speicherbarer Energieträger kann die zeitliche Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch ausgeglichen werden. Überschüssiges Potenzial, welches in Zeiten eines hohen Erzeugungspotenzials, aber geringer Nachfrage entsteht, kann so ebenfalls nutzbar gemacht werden. Batterien elektrifizierter Fahrzeuge können vor diesem Hintergrund ebenso mittels Vehicle-to-Grid Technologie systemdienlich eingesetzt werden. Auf diesen Aspekt wird in Sektion 2.3.2 tiefer eingegangen.

2.3 Trends im Verkehrssektor

Die Analyse zukünftiger Systeme unterliegt teils großen Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten können Entwicklungen auf gesellschaftlicher, technischer oder auch politischer Ebene sein. Neben unvorhersehbaren Entwicklungen gibt es ebenfalls Trends, welche bereits heute erkennbar sind. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über solche bereits heute erkennbaren Trends im Verkehrssektor.

2.3.1 Modaler Shift

Einer dieser Trends im Verkehrssektor ist der modale Shift. Dieser stellt eine Möglichkeit dar, die gesamten Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem die Verkehrsnachfrage von energieintensiven auf weniger intensive Verkehrsmittel verlagert wird. Da sich der Anschluss an diese weniger energieintensiven Verkehrsmittel, wie z. B. den Zugverkehr, häufig nicht in unmittelbarer Nähe zum Start- oder Endpunkt eines Weges befindet, sind mehrere Verkehrsmittel für einen Weg notwendig. Somit ergibt sich ein höherer Anteil des multimodalen Verkehrs.

Neben der Verschiebung auf bereits heute bestehende Verkehrsmittel ist ebenfalls eine Verlagerung auf neu entwickelte Verkehrsmittel denkbar. So gehören seit wenigen Jahren batterieelektrisch unterstützte Fahrräder oder Lastenräder zum Alltag von immer mehr Menschen [92]. Im Bereich des Personenverkehrs finden zudem Entwicklungen von sogenannten „Air Taxis“ und „People Movern“ statt [93]–[95]. Während „Air Taxis“ den Kurzstreckenluftverkehr revolutionieren sollen, können autonome Kleinbusse sowohl in städtischen als auch ländlichen Regionen mit festen Fahrplänen oder auf Abruf (Mobility on Demand) eingesetzt werden.

Unter anderem getrieben durch den zunehmenden Onlinehandel werden für den Güterverkehr vor allem für die heutzutage kostenintensive „letzte Meile“ neue Verkehrsmittel entwickelt. Auch hier gibt es Bestrebungen, Drohnen zum Transport von Paketen zum Kunden

einzusetzen [96]. Weiterhin befinden sich verschiedene Ausführungen von „Autonomous Ground Vehicles“ im Prototypenstatus [96]. Gemein ist ihnen die Möglichkeit unabhängig von Menschen Pakete vorbei an Staus auf den Straßen im urbanen Raum zum Konsumenten zu befördern.

2.3.2 Kraftstoffwechsel und Netzintegration von Batteriefahrzeugen

Ein weiterer Trend im Verkehrssektor ist der Kraftstoffwechsel. Dies bedeutet nicht nur einen Wechsel des Kraftstoffs, sondern impliziert in den meisten Fällen auch einen Wechsel des Antriebsstrangs. Der Wechsel des Antriebsstrangs wird oft als Elektrifizierungstrend bezeichnet. Dies vernachlässigt jedoch die Möglichkeit, in konventionellen Antrieben synthetische oder biobasierte statt fossile Flüssigkraftstoffe zu verwenden. Dies stellt insbesondere eine Möglichkeit dar schwere Verkehrsmittel sowie den Fahrzeugbestand zu defossilisieren.

Im Zusammenhang mit der batterieelektrischen Elektrifizierung der Fahrzeuge entsteht die Problematik der Integration der Fahrzeuge in das Stromnetz. Diese kann auf verschiedene Arten erfolgen. Der Trend führt dabei in Richtung des *Vehicle-to-Grid* (V2G). An dieser Stelle sollen die fünf möglichen Level der Netzintegration in Anlehnung an Fendt [97] aufgezeigt werden. Die Basis (Level 0) stellt das unmittelbare und ungesteuerte Laden nach Anschluss des Fahrzeugs an das Netz dar. Als erster möglicher Entwicklungsschritt steht das kontrollierte Laden (Level 1). Dabei kann die Ladeleistung des Fahrzeugs netzdienlich reguliert werden. Dies erfolgt im Einklang mit möglichen zeitlichen Randbedingungen zum minimalen Ladezustand (SOC). Wird die Ladeleistung nicht nur netzdienlich, sondern auch aus Nutzersicht kostensensitiv gesteuert, so handelt es sich um kooperatives Laden (Level 2). Der Mechanismus erfolgt dabei aggregiert je Ladepunkt. Das bidirektionale Laden auf lokaler Ebene bildet das Level 3. Hierbei besteht die Möglichkeit des bidirektionalen Energieflusses zwischen Fahrzeugbatterie und Hausnetz. Dies führt zu der Bezeichnung *Vehicle-to-Household* (V2H). Dieses Level ermöglicht die Nutzung der Fahrzeugbatterie als lokalen Pufferspeicher, z. B. zur optimalen Ausnutzung lokaler Stromerzeugungstechnologien wie Photovoltaik auf dem Hausdach. Der letzte Entwicklungsschritt zum *Vehicle-to-Grid* (Level 4) besteht in der Aggregation mehrerer Ladepunkte über das lokale Hausnetz hinaus. Die einzelnen Level von dem ungesteuerten Netzanschluss bis hin zu dem aggregierten Schwarm Speicher erfordern unterschiedliche Modifikationen hinsichtlich Soft- und Hardware der Fahrzeuge, der Ladepunkte sowie dem Stromnetz. [97]

2.3.3 Shared Mobility

Der sich abzeichnende Trend zur Shared Mobility könnte ebenfalls zu großen Veränderungen im Verkehrssektor führen. Im Folgenden wird eine kurze Unterscheidung zwischen verschiedenen Shared-Mobility-Konzepten in Anlehnung an die Arbeit von Machado et al. vorgenommen [98].

Sie klassifizieren fünf Hauptkonzepte der geteilten Mobilität [98]:

- Carsharing
- Persönliches Carsharing
- Ridesharing
- On-demand Fahrdienste / Fahrdienste auf Abruf
- Bikesharing

Carsharing wird als eine Verkehrsart klassifiziert, bei der ein einzelnes Fahrzeug von mehreren Personen genutzt wird [99]. Es kann stationsbasiert oder free-floating organisiert werden. In einem stationsbasierten System müssen die Fahrzeuge an definierten Stationen zurückgegeben werden. Im Gegensatz dazu können sie in einem Free-Floating-System an einem beliebigen Ort innerhalb einer festgelegten Zone zurückgegeben werden. Persönliches Carsharing ähnelt dem Carsharing, wobei der Hauptunterschied in der Art des Fahrzeugbesitzers besteht. Beim persönlichen Carsharing ist das Fahrzeug im Besitz einer oder mehrerer Personen, während die Fahrzeuge beim Carsharing in kommerziellem Besitz sind. Ein weiteres Konzept der Shared Mobility ist das Ridesharing, bei dem nach Wegen und Abfahrtszeiten ähnliche Fahrten von mehreren Reisenden mit demselben Fahrzeug kombiniert werden. Solche Fahrgemeinschaften können regelmäßig oder spontan sein. Ein klassisches Beispiel ist die Mitfahrgelegenheit von Kollegen zwischen Wohnung und Arbeitsstätte. Durch neue technologische Möglichkeiten ist es einfacher geworden, ebenso Fahrten von sich fremden Personen zusammenzulegen. Fahrdienste auf Abruf zeichnen sich dadurch aus, dass sie von Tür zu Tür fahren. Fahrzeugbesitzer werden dafür bezahlt, Fahrten für andere Personen zu leisten, die ihre Fahrten über Smartphones buchen und bezahlen. Dieser Service ist personalisiert und hochflexibel [100]. Neben den skizzierten Konzepten, die sich auf Autos als gemeinsam genutzte Fahrzeuge beziehen, ist Bikesharing eine weitere Shared-Mobility-Option, die mit Carsharing vergleichbar ist. Die letztendlichen Auswirkungen der Shared Mobility hinsichtlich Fahrleistung und Auslastung sind stark abhängig von der Form dessen. [98]

2.3.4 Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge

Der letzte betrachtete Mobilitätstrend ist das automatisierte Fahren. Nach der SAE [101] wird der Grad der Fahrzeugautomatisierung in sechs Stufen (0-5) eingeteilt, die von keiner Automatisierung (Stufe 0) bis zur Vollautomatisierung (Stufe 5) reichen. Die Einteilung basiert auf der Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Fahrzeug. Da ab Stufe 3 die gesamte fahrdynamische Aufgabe vom System übernommen wird, wird an dieser Stelle eine wesentliche Unterscheidung zwischen den Stufen vorgenommen. Neben der Aufgabenverteilung ist es wichtig zu betrachten, in welchen Fahrmodi das System seine Funktionen ausführen kann. Nur die Vollautomatisierung (Stufe 5) erlaubt dies in allen Fahrmodi. Wenn von selbstfahrenden oder autonomen Fahrzeugen die Rede ist, sind in der Regel solche mit Stufe 5 gemeint.

Abbildung 2.10 zeigt die Projektionen von Litman et al. bezüglich der Verbreitung von autonomen Pkw [102]. Sie prognostizieren, dass im Jahr 2050 jedes zweite Fahrzeug autonom sein wird. Die kontinuierliche Verbreitung der Technologie ab 2030 wird nach ihren Prognosen zu ~30 % Flotten- und 40 % Fahranteil im Jahr 2050 führen [102]. Andere Studien bieten ähnliche Prognosen für die Verbreitung von vernetzten und autonomen Fahrzeugen [103], [104]. Daher sollte dieser Trend in der langfristigen Verkehrssektormodellierung nicht vernachlässigt werden.

Oftmals steht die Konnektivität von Fahrzeugen im Zusammenhang mit der Automatisierung der Fahraufgabe. Einerseits können Fahrzeuge selbst vernetzt werden und Informationen über Parameter wie Geschwindigkeit oder über die vorherrschende Verkehrslage austauschen (Vehicle-to-Vehicle, V2V). Andererseits können Fahrzeuge mit Infrastrukturelementen wie Ampeln verbunden werden (Vehicle-to-Infrastructure, V2I). Eine weitere

Verbindung zu anderen Elementen wie Fußgängern (per Smartphone) und Netzwerken ist ebenfalls denkbar (Vehicle-to-X, V2X) [105].

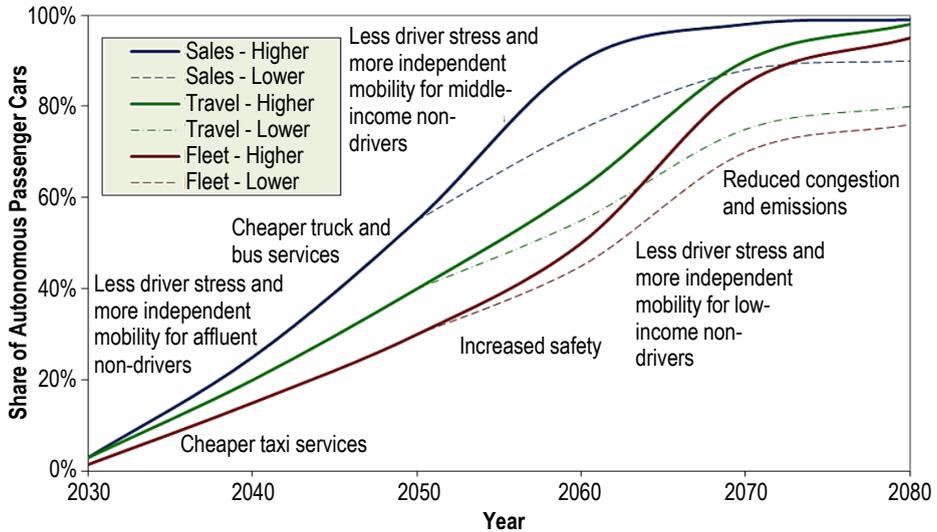


Abbildung 2.10: Projizierte Neuzulassungen, Fahrzeugflotte und Verkehrsleistung autonomer Pkw von 2030 bis 2080 nach Litman et al. [102].

Die beschriebenen Trends bringen Auswirkungen auf verschiedene der in den Abschnitten 2.1 und 2.2 dargestellten Bestandteile des Verkehrs- und Energiesektors mit sich. Diese möglichen Auswirkungen sowie deren Berücksichtigung in Modellen sind Bestandteil der Abschnitte 3.5 und 3.6.

3 Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors

Die modellgestützte Analyse der Entwicklungen im Verkehrssektor kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Neben der Modellierung auf Fahrzeugebene können die Modelle den Verkehrssektor als Ganzes abbilden. In diesem Kapitel werden hierfür bestehende Modellierungskonzepte aus der Literatur aufgezeigt. Zunächst werden die Verkehrsnachfrage- (3.1) und Energiebedarfsmodellierung (3.2) als voraussetzende Elemente zur techno-ökonomischen Modellierung auf Fahrzeug- (3.3) und Sektorebene (3.4) vorgestellt. Abschließend werden die modelltechnischen Auswirkungen der Trends im Verkehrssektor (vgl. Abschnitt 2.3) sowie deren Einbezug in der Literatur erläutert (3.5 und 3.6). Die Abschnitte 3.4 bis 3.7 sind bereits in einem wissenschaftlichen Beitrag publiziert worden [106].

3.1 Verkehrsnachfragemodellierung

Die Verkehrsnachfrage ist, wie in Sektion 2.1.1 eingeführt, ein grundlegender Bestandteil des Verkehrssektors. In diesem Abschnitt wird deren Modellierung erläutert. Vor jeder Analyse muss zunächst festgelegt werden, welches Gebiet untersucht und welcher Verkehr einbezogen werden soll. Das betrachtete Gebiet wird anschließend in Verkehrszellen eingeteilt, sodass eine räumliche Verteilung der Verkehrsnachfrage berücksichtigt werden kann. Innerhalb des betrachteten Gebiets wird zumeist das Territorialprinzip angewendet, d. h. es wird der gesamte Verkehr innerhalb des Gebiets unabhängig von der Herkunft des Fahrzeugs oder des Fahrenden in die Analysen eingeschlossen.

Wenngleich sich der Verkehr insbesondere in den Personen- und den Güterverkehr einteilen lässt, werden beide Verkehrsarten historisch mittels des gleichen modelltechnischen Ansatzes abgebildet: dem Vier-Stufen-Modell [107]. Das Vier-Stufen-Modell besteht aus den vier Stufen der Verkehrserzeugung, -verteilung, -mittelwahl und -umlegung. In klassischen Modellen werden die vier Stufen sequenziell in der aufgeführten Reihenfolge modelliert. Ein solches Vier-Stufen-Modell des Güterverkehrs wird im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [108] umgesetzt.

Innerhalb der Verkehrserzeugung wird das verkehrsmittelübergreifende Verkehrsaufkommen je Verkehrszelle bestimmt. Die Verkehrserzeugung erfolgt auf Basis von empirischen Daten [109]. In Deutschland sind hier im Personenverkehr insbesondere die Datenerhebungen *Mobilität in Deutschland* (MiD) [110] und das *Deutsche Mobilitätspanel* (MOP) [111] zu nennen. Im Güterverkehr bildet die Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* (KiD) [112] eine geeignete Datenbasis. Zudem ist die wirtschaftliche Entwicklung ein entscheidender Faktor für die Modellierung des Güterverkehrsaufkommens. Im Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose wurde eine Strukturdatenprognose erstellt [113], welche gütergruppenspezifische Wirtschaftsentwicklungen ausweist [114]. In Anhang B werden die genannten sowie weitere Datenquellen zum Verkehr in Deutschland tiefergehend beschrieben.

Das Ziel der Verkehrsverteilung ist die Bestimmung der sogenannten Quelle-Ziel-Matrizen. Das in der Verkehrserzeugung bestimmte Verkehrsaufkommen wird in diesem Schritt als Fluss zwischen den betrachteten Verkehrszellen verteilt und folglich zu einer Verkehrsleistung. Die Verkehrsverteilung wird klassisch mittels des Gravitationsmodells modelliert. Grundlage des Ansatzes bildet die anziehende Kraft zweier Verkehrszellen analog zum

Newton'schen Gravitationsgesetz. Die Gewichtung der einzelnen Verkehrszellen kann mittels unterschiedlicher Parameter (Bevölkerung, Anzahl von Fahrten etc.) bestimmt werden. Weiterführende Erläuterungen finden sich in [115].

Der dritte Schritt, die Verkehrsmittelwahl, verteilt die zuvor bestimmte Verkehrsleistung auf die verschiedenen Verkehrsmittel. Diese Modalwahl, ein entscheidender Aspekt hinsichtlich des modalen Shifts (vgl. Sektion 2.3.1), wird mittels Entscheidungsmodellen abgebildet. Hierzu werden zumeist *Discrete Choice Modelle* eingesetzt. Die Gesamtheit der bei der Entscheidung zugrundeliegenden Wahlalternativen wird als *Choice Set* bezeichnet. In Discrete Choice Modellen wird der Nutzen der Anwender maximiert. Der Nutzen (U) einer jeden Wahlalternative (j) für einen Entscheidungsträger (n) besteht in den Modellen aus einer deterministischen (V) und einer stochastischen Komponente (ε). Die deterministische Komponente bildet alle zu beobachtenden Faktoren (z. B. Kosten, Zeit) ab. Die stochastische Komponente ist hingegen eine Sammelkomponente aller nicht zu beobachtenden Faktoren (z. B. Komfort) [116]:

$$U_{n,j} = V_{n,j} + \varepsilon_{n,j} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Je höher der Nutzen einer Alternative ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese gewählt wird.

Der letzte Schritt des Vier-Stufen-Modells, die Verkehrsumlegung, verteilt die modale Verkehrsleistung auf die existierende Verkehrsinfrastruktur innerhalb der betrachteten Regionen. An dieser Stelle wird auf die weitere Literatur verwiesen, da keine Relevanz für diese Arbeit besteht. [117]

Mittels des klassischen Vier-Stufen-Modells wird kein individuelles Mobilitätsverhalten abgebildet [118]. Daher wurde im Bereich der Personenverkehrsnachfragemodellierung der aktivitätsbasierte Ansatz entwickelt, welcher den Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Aktivitätsbedarf sowie das Entscheidungsverhalten der Verkehrsteilnehmer in den Vordergrund stellt [119]. Dies beinhaltet insbesondere auch die Verkehrserzeugung und -verteilung.

Zur Abbildung der gesellschaftlichen Heterogenität bezüglich des Verkehrsverhaltens erfolgt die Modellierung der Verkehrsnachfrage differenziert nach sozio-ökonomischen Gruppen [109]. Neben Parametern wie Einkommen, Alter und Pkw-Verfügbarkeit beeinflusst ebenso der Wohnort die Verkehrsnachfrage von Personen. Da nicht für jeden Ort geeignete Daten vorliegen, hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehrs (BMDV) eine regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR) entwickelt [120].

Die Entwicklung der Verkehrsnachfrage stellt einen wesentlichen Einflussfaktor auf den gesamten Verkehrssektor dar. Die Personenverkehrsnachfrage wird wie zuvor erläutert maßgeblich durch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bestimmt. Zur Modellierung der zukünftigen Verkehrsnachfrage ist es erforderlich, die Verhaltensveränderungen der Verkehrsteilnehmer abzubilden. Reul [121] nutzt das Konzept der Mobilitätskultur nach Stephenson et al. [122], um zukünftiges Verkehrsverhalten in den Dimensionen der kognitiven Normen und habitualisierten Praktiken sowie der materiellen Kultur zu beschreiben.

Die erste Dimension des Verhaltens bilden die erwähnten kognitiven Normen und gewohnten Praktiken. Diese umfassen Angaben zu veränderten Präferenzen bezüglich Autobesitz

und neuen Arbeitsformen wie der des Homeoffice. Die zweite Dimension, die materielle Kultur, beinhaltet Dynamiken in Bezug auf geteilte multioptionale Verkehrssysteme sowie mögliche Zugangsbeschränkungen von Pkw. Die Entwicklung der modalen Anteile im Güterverkehr ist ebenfalls ein Teil dieser Dimension.

Das zweidimensionale Konzept bildet die Grundlage der in Sektion 5.2.1 definierten sozio-ökonomischen Szenarien zur Bestimmung der zukünftigen Verkehrsnachfrage.

3.2 Energiebedarfsmodellierung der Verkehrsmittel

Die modellbasierte Bestimmung des Energiebedarfs eines Straßenfahrzeugs erfolgt in der Literatur zumeist mittels des Längsdynamikmodells [123], [124]. Ein solches Modell wird im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [125] umgesetzt. Sämtliche Querdynamik wird innerhalb dieses Modells vernachlässigt, da sie für den Energiebedarf eine untergeordnete Rolle spielt. Entscheidend für den benötigten mechanischen Energiebedarf ist unter anderem die am Reifen erforderliche Traktionskraft (F_{trac}). Der zu Grunde liegende physikalische Zusammenhang zwischen dieser und den das Fahrzeug angreifenden Widerstandskräften kann mittels der folgenden Differentialgleichung beschrieben werden [126]:

$$m_{e,v} \frac{d}{dt} v(t) = F_{trac}(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)) \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$F_a(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_a \cdot v^2 \quad \text{Gl. 3.3}$$

$$F_r = c_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Gl. 3.4}$$

$$F_g(\alpha) = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Gl. 3.5}$$

mit:	$m_{e,v}$:	Äquivalente Masse des Fahrzeugs und seiner Insassen		
	F_{trac} :	Traktionskraft am Rad	F_a :	Aerodynamische Widerstandskraft
	F_r :	Rollreibung	F_g :	Schwerkraft
	F_d :	Störkräfte	ρ_a :	Luftdichte
	A_f :	Frontfläche	c_a :	Luftwiderstandsbeiwert
	c_r :	Rollwiderstandsbeiwert	v :	Geschwindigkeit
	t :	Zeitpunkt	g :	Gravitationskonstante
	α :	Steigungswinkel		

Gl. 3.3 bis Gl. 3.5 bilden die Grundlage zur Berechnung der Widerstandskräfte. Aus den Gleichungen wird ersichtlich, dass verschiedene Fahrzeugeigenschaften den Energiebedarf beeinflussen. Hierzu zählt insbesondere die Fahrzeugmasse, welche auf Basis von Literaturwerten zu Leistungs- und Energiedichten komponentenbasiert bestimmt werden kann [127]–[130]. Die EU-Klassifizierung von Reifen gibt Auskunft über Rollreibungskoeffizienten von Nutzfahrzeugen [131]. Weiterhin sind Informationen über die Fahrsituation in Form der Fahrgeschwindigkeit, der Beschleunigung sowie der Straßensteigung notwendig. Diese Informationen werden zur Vergleichbarkeit von standardisierten Fahrzyklen bereitgestellt. Je nach Fahrzeugtyp werden verschiedene Fahrzyklen genutzt, um deren tatsächlicher Nutzung so nah wie möglich zu kommen [132]–[134]. Darüber hinaus unterscheiden sich die verwendeten Fahrzyklen zur Energiebedarfsbestimmung der gesetzlichen

Typgenehmigung. Abbildung 3.1 zeigt den *Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle-3b* (WLTC-3b), welcher Teil des *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* (WLTP) ist.

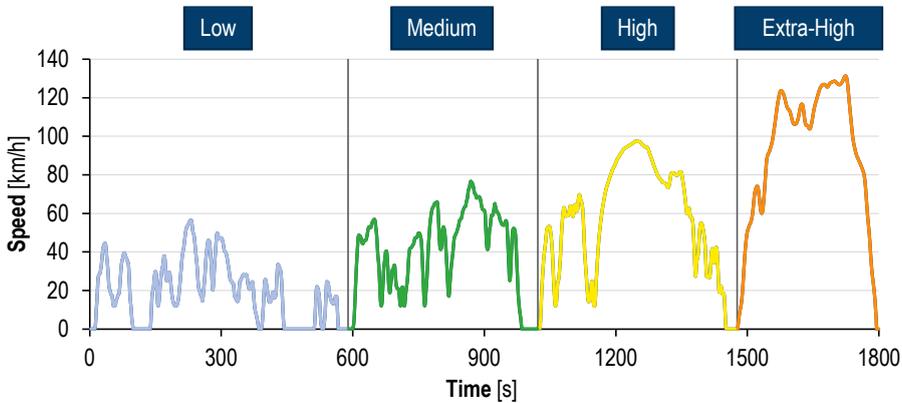


Abbildung 3.1: Fahrprofil des Fahrzyklus WLTC-3b nach [135].
WLTC: Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles.

Das *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* ist der aktuell in der EU und weiteren Ländern der Welt gültige Testprozess für Fahrzeugtypgenehmigungen in der Klasse M1. Der Fahrzyklus setzt sich aus vier unterschiedlichen Abschnitten zusammen, welche verschiedene typische Fahrsituationen, wie z. B. Stadt- oder Autobahnfahrten, abbilden [135].

Mittels der Wirkungsgrade der Komponenten, welche der Literatur entnommen werden können [136]–[142], kann vereinfacht ein durchschnittlicher Antriebsstrangwirkungsgrad bestimmt werden. Über diesen und einen angenommenen Energiebedarf durch Nebenverbraucher wird der gesamte Energiebedarf des Fahrzeugs berechnet. Hinsichtlich des energieträgerspezifischen Verbrauchs von Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen ist das Fahr- und Ladeverhalten der Nutzer entscheidend. Plötz et al. stellen heraus, dass der Realverbrauch signifikant von den Herstellerangaben abweicht [143].

Bei elektrifizierten Antrieben gilt es über die zuvor geschilderten physikalischen Zusammenhänge hinaus das regenerative Bremsen zu berücksichtigen. Dieses ermöglicht die teilweise Einspeisung der kinetischen Energie des Fahrzeugs in die Fahrzeugbatterie an Stelle der Dissipation über die Bremsen. Dazu wird die Elektromaschine als Generator eingesetzt und resultierend die in Summe bereitzustellende Energiemenge reduziert.

Hinsichtlich des Energiebedarfs weiterer nicht straßengebundener Verkehrsmittel liegen in der Literatur ebenfalls Daten vor [144]. Diese werden jedoch zumeist nicht modelltechnisch bestimmt, sondern sind von Annahmen getrieben. Im Fall von Regionalbahnen stellen Klebsch et al. eine Ausnahme dessen dar, da sie den Energiebedarf der Züge beispielhaft für das *Netz Düren* simulativ bestimmen, welches aus den Linien RB 21 und RB 28 besteht [145].

3.3 Techno-ökonomische Modellierung auf Verkehrsmitteln

Die techno-ökonomische Modellierung auf Fahrzeugebene kann verschiedene Aspekte der Fahrzeugeigenschaften umfassen. Dabei zielen die Analysen vor allem auf den Vergleich möglicher Antriebsalternativen ab.

Das Konzept der *Total Cost of Ownership* (TCO) wurde 1987 von der Gartner Group entwickelt, um einen besseren Vergleich verschiedener Optionen zu ermöglichen [146]. Dieses methodische Werkzeug wird von Ellram [147] als ein Konzept beschrieben, deren Zweck es ist, die „wahren“ Kosten einer Option zu ermitteln. Das Gesamtbetriebskostenkonzept ist häufig auf Fahrzeuge angewandt worden. In Analysen wird zwischen verbraucher- und gesellschaftsorientierter Sichtweise unterschieden [148]. Abbildung 3.2 gibt einen Überblick über eine verbraucherorientierte Berechnung der Gesamtbetriebskosten.

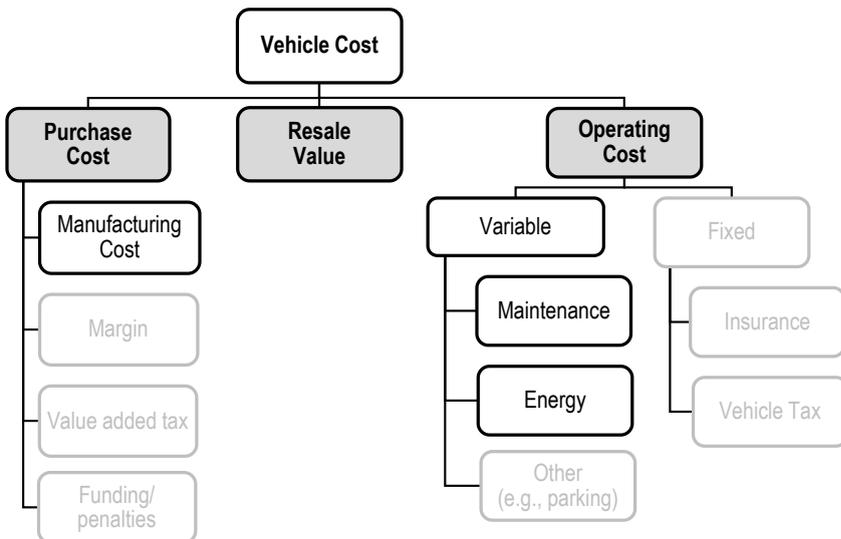


Abbildung 3.2: Kostenarten einer verbraucherorientierten Total-Cost-of-Ownership Analyse von Verkehrsmitteln [149].

Die verschiedenen Kostenarten sind in der folgenden Gleichung zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten pro Kilometer nach Wu et al. [150] zu sehen:

$$\frac{TCO}{km} = \frac{(PP - RV * PVF) * CRF + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{AOC}{(1+i)^n}}{AKT} \quad \text{Gl. 3.6}$$

Die TCO/km sind die Gesamtbetriebskosten pro Kilometer [EUR/km], *PP* ist der Kaufpreis des Fahrzeugs [€], *RV* ist der Wiederverkaufswert [€], *PVF* ist der Barwertfaktor, *CRF* ist der Kapitalrückgewinnungsfaktor, *N* ist die Haltedauer des Fahrzeugs [a], *AOC* sind die jährlichen Betriebskosten [€], *i* ist der Zinssatz und *AKT* sind die jährlich gefahrenen Kilometer [km].

Die Kosten eines Fahrzeugs lassen sich in unterschiedliche Arten einteilen, wie Abbildung 3.2 herausstellt. Zunächst ist zu Beginn der Nutzung ein Kaufpreis zu entrichten. Dieser setzt sich aus den Herstellungskosten, der Unternehmensmarge, der Mehrwertsteuer sowie möglicher Förderungs- oder Strafzahlungen zusammen. Während des Betriebs

entstehen variable und fixe Betriebskosten. Zu den variablen Betriebskosten zählen insbesondere Wartungs- und Kraftstoffkosten. Darüber hinaus entstehen weitere Kosten, zu denen unter anderem Park- oder Pflegekosten gerechnet werden. Versicherungsbeiträge und Fahrzeugsteuern bilden die fixen Betriebskosten. Am Ende der Fahrzeugnutzung besteht je nachdem die Möglichkeit einen Wiederverkaufswert zu realisieren, welcher unter anderem stark von der vorherigen Nutzung sowie dem Fahrzeugalter abhängt.

Es ist ersichtlich, dass einige der genannten Kostenarten abhängig von (unternehmens-) politischen Entscheidungen sind. Für einen neutralen technologischen Vergleich verschiedener Alternativen sollten diese Kostenarten außer Betracht gelassen werden. Wird der Vergleich zudem über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs durchgeführt, ist weiterhin der Wiederverkaufswert zu vernachlässigen [151]. Somit sind in diesem Fall lediglich die Kosten der Herstellung, der Wartung sowie die des Kraftstoffs zu berücksichtigen.

3.3.1 Herstellungskosten

Als top-down-Methode der Bestimmung der zukünftigen Herstellungskosten wird in der Literatur häufig auf den Lernkurvenansatz zurückgegriffen. Die Boston Consulting Group entwickelte 1966 den Lernkurvenansatz, der die Produktionskosten mit dem kumulierten Produktionsvolumen, allgemein als "Erfahrung" bezeichnet, durch Lernraten korreliert [152]. Die Lernrate wird aus der Analyse historischer Kostenentwicklungen abgeleitet und gibt den Rückgang der Produktionskosten für jede Verdoppelung der Produktionsmenge an. Die mathematische Beschreibung des Lernkurvenansatzes wird durch folgende Gleichungen gegeben [153]:

$$C_Q = C_0 * \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^b = C_0 * Q^b \quad \text{Gl. 3.7}$$

$$b = \frac{\ln(1 - LR)}{\ln(2)} \quad \text{Gl. 3.8}$$

Gl. 3.7 drückt das Verhältnis der Produktionskosten für das gegebene Produktionsvolumen (C_Q) zu den Produktionskosten für ein früheres Referenzproduktionsvolumen (C_0) mittels des Verhältnisses der Produktionsvolumina (Q/Q_0) und einem Exponentialfaktor (b) aus, der das „Lernen“ charakterisiert. Die Lernrate (LR) ist implizit durch Gl. 3.8 gegeben.

Der Lernkurvenansatz wird heute in zahlreichen Studien zur Analyse zukünftiger Bauteilkostenentwicklungen verwendet. Tsiropoulos et al. prognostizieren die Kosten von Lithium-Ionen-Batterien für mobile und stationäre Speicheranwendungen bis zum Jahr 2040 und gehen dabei von einer Lernrate für Elektrofahrzeugbatterien von 16 % aus [154]. Sie leiten diese Lernrate aus einer umfangreichen Studie von Schmidt et al. ab, die Lernraten für verschiedene elektrische Energiespeichertechnologien analysieren [155]. Schmidt et al. stellen Lernraten für Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge im Bereich von 16 ± 4 % fest. Das U.S. Department of Energy (DOE) wendet den Lernkurvenansatz zur Abschätzung der Kosten von Brennstoffzellensystemen an, korreliert mit der jährlichen Produktionsmenge [156], [157]. Ruffini et al. übertragen den Lernkurvenansatz auf eine Bewertung der Kostenentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit zugrundeliegenden Annahmen

für den Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen, um ein Erfahrungsmaß abzuleiten [158]. Sie verwenden eine Lernrate von 18 % für Brennstoffzellenfahrzeuge.

Um mit dem Lernkurvenansatz Kostenprojektionen für die einzelnen Fahrzeugkomponenten durchführen zu können, müssen die Lernrate, die Referenzproduktionskosten und das Verhältnis der Produktionszahlen für den analysierten Zeitraum definiert werden. Die Lernraten werden aus den historischen Kostenentwicklungen der jeweiligen Komponenten abgeleitet. Für Brennstoffzellen zeigen Alaswad et al. die historische Kostenentwicklung im Zeitraum von 1998 bis 2014 auf [159]. Die Lernrate variiert über die betrachteten Fahrzeugkomponenten, da das Lernen von mehreren markt- und technologiespezifischen Merkmalen, wie z. B. Wettbewerb oder Ressourcenbeschränkungen, beeinflusst wird. Das Vorgehen in dieser Arbeit wird in Sektion 4.1.4 erläutert.

3.3.2 Wartungskosten

Neben den Herstellungskosten stellen die Wartungskosten einen weiteren relevanten Bestandteil der Kostenanalyse von Fahrzeugen dar. In Abbildung 3.3 sind die in verschiedenen Analysen erwarteten Wartungskosten für diverse Pkw-Antriebsarten in Relation zum ottomotorischen Antrieb veranschaulicht. Insgesamt erwartet die Literatur bei zunehmender Elektrifizierung sinkende Wartungskosten aufgrund von weniger beweglichen Teilen und weniger Betriebsflüssigkeiten, die gewechselt werden müssen [160]. In nahezu allen Studien basieren die Annahmen allerdings auf Expertenschätzungen.

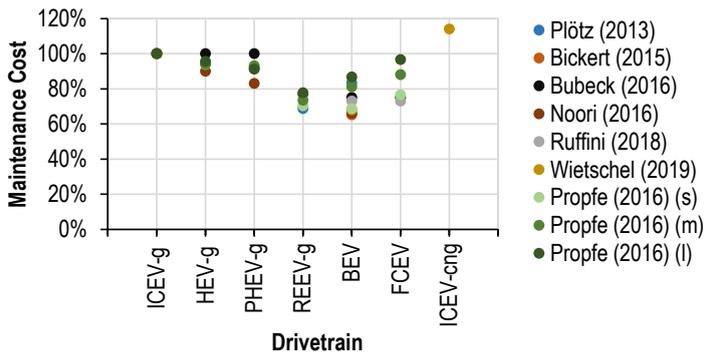


Abbildung 3.3: Wartungskosten verschiedener Pkw-Antriebsalternativen nach [45], [158], [160]–[164].
 ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahzeug, BEV: Batterie-Elektrofahzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahzeug, -g: Benzin, -cng: Erdgas, (s): kleine, (m): mittlere, (l) große Batteriekapazität.

Bubeck et al. erwarten gleiche Wartungskosten für Verbrennungsmotor- und Hybrid-Elektrofahzeuge und eine Reduktion von 25 % für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahzeuge [161]. Eine ähnliche Reduktion für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahzeuge (27 %) wird von Ruffini [158] angenommen. Die Annahmen von Noori und Tatarsi zeigen, dass sinkende Wartungskosten bei zunehmender Elektrifizierung zu einer Reduktion von 34 % für Batterie-Elektrofahzeuge führen [163]. Bickert geht von einer Reduktion für Batterie-Elektrofahzeuge aus, die auf einem ähnlichen Niveau (35 %) liegt [162]. Für Erdgas-Fahrzeuge wird der einzige Wert von Wietschel et al. angegeben.

Aufgrund der wartungsintensiveren Erdgas-Tanks und -Leitungen nehmen sie 15 % höhere Wartungskosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen an [160].

Die detaillierteste Analyse der Wartungskosten wird von Propfe [164] durchgeführt. Er bestimmt komponentenbasiert die Wartungskosten je Kilometer in Abhängigkeit der Ersatzteilkosten ($C_{SparePart}$ in €), der Lebensdauer (λ in km) sowie den Personalkosten. Letztere ergeben sich aus der Dauer des Komponentenaustauschs und den stündlichen Personalkosten ($C_{personnel}$ in €/h). Insgesamt ergibt sich die folgende mathematische Bestimmung:

$$C_{M\&R} = \lambda * (C_{SparePart} + T_{Replace} * C_{personnel}) \quad \text{Gl. 3.9}$$

Die Lebensdauer für Brennstoffzellen (400.000 km) und Wasserstofftanks (483.000 km) wird von Propfe angegeben. Darüber hinaus beziffert er die stündlichen Personalkosten zu 70 €/h. Weitere Annahmen zu den Komponenten werden in der Dissertation nicht ausgewiesen. [164]

Insgesamt sind die Relationen der Wartungskosten in Abhängigkeit des Antriebs von Propfe vergleichbar mit den anderen in Abbildung 3.3 dargestellten Werten anderer Studien. Auffällig ist jedoch, dass Propfe eine geringere Reduktion der Wartungskosten aufgrund zunehmender Elektrifizierung für größere Pkw erwartet. Vergleichswerte der Wartungskosten von heute verfügbaren konventionellen Nutzfahrzeugen finden sich im *lastauto omnibus* Katalog [165].

3.3.3 Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten werden aus dem Produkt des fahrzeugspezifischen Energiebedarfs sowie den spezifischen Kosten des jeweiligen Energieträgers berechnet. Die Bestimmung des Energiebedarfs wird in Abschnitt 3.2 erläutert. Im Folgenden wird die Studienlage zu den Bereitstellungskosten der Energieträger vorgestellt. Die Bereitstellungskosten setzen sich aus den Herstellungs- und den Infrastrukturkosten zusammen.

Die Herstellungskosten der konventionellen Kraftstoffe werden nach Gebert et al. [166] in Anlehnung an die Ölpreisentwicklung des *World Energy Outlook* der IEA [167] ausgewiesen. Zunächst wird bis 2030 ein Anstieg der fossilen Kraftstoffkosten um 15 % bei Diesel und 12,5 % bei Ottokraftstoff und Kerosin gegenüber 2020 erwartet. Anschließend sinken die spezifischen Kosten der konventionellen Kraftstoffe infolge des erwarteten Nachfragerückgangs bis 2040 auf das heutige Niveau und fallen bis 2050 weiter ab [166]. Da zur Defossilierung der verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuge synthetische Kraftstoffe erforderlich sind, gilt es zukünftig deren Kosten zu beachten. Hierüber geben globale Analysen nach Heuser et al. [168] Aufschluss. Aufgrund der sinkenden Kosten der notwendigen Technologien, allen voran der erneuerbaren Energien und der Elektrolyseure, werden sinkende Kosten der synthetischen Flüssigkraftstoffe mit einem Wert von 15,2 ct€/kWh im Jahr 2050 erwartet [168]. Dies übersteigt die heutigen Kosten der fossilen Flüssigkraftstoffe um mehr als das Dreifache.

Neben den Herstellungskosten müssen ebenso die Infrastrukturkosten berücksichtigt werden. Ausbaupfade der deutschen Lade- und Wasserstofftankstelleninfrastruktur für Pkw inklusive deren Kosten werden von Robinius et al. bestimmt [75]. In ihren Analysen weisen sie einen Kostenvorteil der Wasserstoffinfrastruktur insbesondere bei hohen

Marktdurchdringungen aus. Cerniauskas berechnet mittels eines entwickelten Modells die Kosten verschiedener Tankstellenkonzepte in Abhängigkeit der Anwendung [57]. Er stellt heraus, dass steigende Tagesbedarfe zu niedrigeren spezifischen Kosten führen. Darüber hinaus sind Tankstellen zur Betankung von Flüssigwasserstoff aufgrund des niedrigeren Energiebedarfs günstiger. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass aufgrund der Verflüssigung zuvor ein Mehrenergiebedarf besteht. Dieser kann je nach Energiekosten zu insgesamt höheren Anlieferungskosten gegenüber der gasförmigen Alternative führen.

Die Nationale Plattform Mobilität (NPM) weist Kosten von Gleichstromladesäulen für Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit der Ladeleistung aus, welche in Abbildung 3.4 veranschaulicht sind [169]. Insbesondere bei sehr hohen Ladeleistungen (750 kW) wird eine deutliche Kostenreduktion um fast 30 % bis 2030 erwartet. Bei niedrigeren Ladeleistungen (50 und 150 kW) fällt die Kostenreduktion mit etwa 10 % deutlich geringer aus. Knote et al. weisen in ihren Analysen zu batterieelektrischen Bussen für DC-Ladesäulen im Jahr 2020 Kosten in Höhe von 250.000 € (250 kW) und 350.000 € (350 kW) aus und liegen somit oberhalb der von der Nationale Plattform Mobilität ausgewiesenen Kosten [59]. Kühnel et al. liegen ebenfalls mit 80.000 € für eine Ladestation mit einer Leistung von 150 kW im Jahr 2025 leicht oberhalb den von der Nationale Plattform Mobilität ausgewiesenen 75.400 € [170]. Die Kosten der Megacharger (1,2 MW Ladeleistung) nach Kühnel et al. im Jahr 2025 sind mit 420.000 € hingegen optimistisch, da sie den Kosten der 750 kW-Lader im Jahr 2020 nach der Nationale Plattform Mobilität entsprechen.

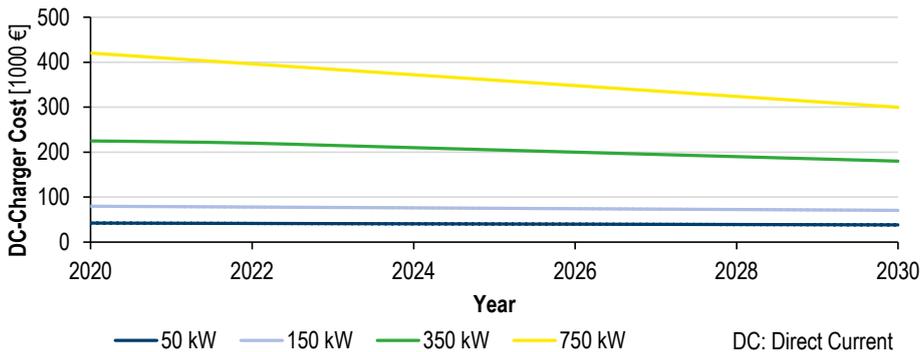


Abbildung 3.4: Kosten von Gleichstromladern in Abhängigkeit der Ladeleistung im Zeitraum von 2020 bis 2030 nach [169].

Die höheren Kosten nach Knote et al. und Kühnel et al. bei niedrigeren Ladeleistungen lassen sich durch die schnelle Entwicklung der Technologie begründen, da die Veröffentlichung der Ladestationskosten durch die Nationale Plattform Mobilität zwei Jahre später erfolgt ist. Insgesamt sind die beschriebenen Kostendaten auf vergleichbarem Niveau.

Die spezifischen Kosten der Energieträger sind bei der Modellierung auf Fahrzeugebene exogen angenommene Parameter. Diese Kosten beinhalten alle Kosten vom Primärenergieträger bis hin zur Versorgungsinfrastruktur. Aufgrund der großen Unsicherheit und der bereits erwähnten schnelllebigem Entwicklung dieser Kosten sind sie häufig Teil von Sensitivitätsanalysen.

3.3.4 Studien auf Fahrzeugebene

In der Literatur existiert international und national bereits eine Vielzahl techno-ökonomischer Studien auf Fahrzeugebene. Nachfolgend wird erläutert wie diese methodisch aufgestellt sind und welche Ergebnisse sie liefern. Die Übersicht beschränkt sich aufgrund der Vielzahl der Studien auf die als wesentlich erachteten Analysen seit 2015. Zudem werden nur Studien betrachtet, welche mehr als zwei alternative Antriebe miteinander vergleichen.

Hülsmann et al., Öko-Institut e.V., 2014

Im Rahmen des Projekts *eMobil2050* [46] wurde eine Technologiedatenbank für Pkw und Nutzfahrzeuge erstellt. Da diese Technologiedatenbank die Grundlage verschiedener Studien für den deutschen Verkehrssektor darstellt, wird die Veröffentlichung trotz des Erscheinungsjahres 2014 mit in die Studienübersicht aufgenommen. Auf Basis der Datenbank haben Hülsmann et al. Investitionskosten und Energieverbräuche verschiedener Antriebsoptionen von 2010 bis 2050 in 10-Jahres-Schritten analysiert.

Trotz einer mit 150 km sehr geringen Reichweite für einen mittleren Pkw erreichen Batterie-Elektrofahrzeuge in den Untersuchungen erst nach 2040 und nur im progressiven Szenario die Kostenparität mit den konventionellen Antriebsformen. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge weisen im gesamten betrachteten Zeithorizont die höchsten Investitionskosten auf. Im Bereich der Nutzfahrzeuge betrachten Hülsmann et al. sechs verschiedene Fahrzeugtypen, zu denen neben Lkw verschiedener Gewichtsklassen auch Linien- und Reisebusse zählen. Ähnlich zum Pkw-Bereich liegen die unterstellten elektrischen Reichweiten für Plug-In Hybrid- und Batterie-Elektrobusse mit maximal 150 km eher im niedrigen Bereich. Für schwere Lkw und Reisebusse werden keine Batterie-Elektrofahrzeuge mit in die Analysen einbezogen. Die Ergebnisse weisen zwischen 2020 und 2030 eine starke Kostendegression der brennstoffzellenbetriebenen Varianten für alle Nutzfahrzeugkategorien auf. Insgesamt erreicht die Technologie bei Lkw mit 3,5 bis 7,5 t Gesamtgewicht und Linienbussen im Jahr 2050 Kostenparität mit der Dieselvariante. Eine noch stärkere Degression wird für Sattelzugmaschinen bis 40 t Gesamtgewicht prognostiziert. Da der Unterschied im Basisjahr 2010 jedoch größer ausfällt, bleibt die Dieseltechnologie bis 2050 trotz steigender Kosten die günstigste Antriebstechnologie. Alle anderen Antriebsformen befinden sich im Jahr 2050 auf einem ähnlichen Kostenniveau zueinander. Zusammenfassend stellen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Nutzfahrzeugbereich im Jahr 2050 entweder die günstigste Alternative zum Dieselantrieb dar oder befinden sich sogar auf einem Niveau mit dieser. [171]

Wu et al., ETH Zürich, 2015

Wissenschaftler der ETH Zürich veröffentlichen im Jahr 2015 ihre Analysen der Gesamtbetriebskosten zu elektrifizierten Pkw-Antrieben im Vergleich zu Konventionellen. In ihren Untersuchungen aggregieren Wu et al. die fünf volumenstärksten Segmente des deutschen Pkw-Markts in drei Fahrzeugklassen. Um ebenfalls unterschiedliches Nutzerverhalten zu inkludieren, definieren sie drei verschiedene Nutzungsfälle. Diese sind hinsichtlich der täglichen und jährlichen Fahrdistanz auf Basis der Studie *Mobilität in Deutschland 2008* [172] differenziert. Die in den Analysen angenommenen Kaufpreise von konventionellen Pkw basieren auf Listenpreisen. Die der elektrifizierten Alternativen werden bottom-up berechnet. Die kapazitätsabhängigen spezifischen Kosten der Fahrzeugbatterie werden dazu der Literatur entnommen. Ebenso fließen Literaturwerte zum Kraftstoffverbrauch und dessen

Kosten in die Berechnungen ein. Weitere Kosten, wie z. B. Steuern, Wartung und Versicherung, werden unter dem Punkt *andere Kosten* zusammengefasst mit 2.000 bis 3.000 € pro Jahr addiert. Um der Unsicherheit der Eingabeparameter gerecht zu werden führen Wu et al. eine Monte-Carlo-Simulation durch. Anschließend analysieren sie die Wahrscheinlichkeiten der Technologien in den untersuchten Nutzungsfällen die günstigste Alternative zu sein. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Batterie-Elektrofahrzeuge im Jahr 2025 für hohe Fahrleistungen und kleine Fahrzeuge einen ökonomischen Vorteil gegenüber den Antriebsalternativen mit sich bringen. Als kritisch ist dabei jedoch die konstant zu 160 km angenommene Reichweite der Batteriefahrzeuge zu erachten. [150]

Rousseau et al., Internationaler Verbund, 2015

Eine Gruppe internationaler Wissenschaftler verschiedener Forschungseinrichtungen stellt 2015 auf einer Konferenz in Südkorea Untersuchungen zu den „Relevant Cost of Ownership“ von Plug-in elektrischen Pkw im Jahr 2020 vor. Diese Abwandlung der Total Cost of Ownership Analyse bezieht alle für den Nutzer relevanten Kostenarten ein. Dies gilt insbesondere für politische Rahmenbedingungen hinsichtlich verschiedener Steuern oder Bonus-/Malus-Systeme, welche den Lebenszyklus eines Fahrzeugs betreffen. Zudem werden länderspezifische Unterschiede in Bezug auf den geltenden Zulassungsprozess und die zugehörigen Fahrzyklen berücksichtigt. Da die Analysen für Deutschland, Frankreich und die USA durchgeführt werden, nutzen Rousseau et al. in ihren Fahrzyklussimulationen den NEFZ für den europäischen Markt und den UDDS bzw. HWFET für die USA. Neben den resultierenden spezifischen Energieverbräuchen der Fahrzeuge unterscheiden sich die Energiepreise in den Ländern. Die ermittelten Auswirkungen der differenzierten Rahmenbedingungen auf die relevanten Lebenszykluskosten sind vielfältig. Die beiden wesentlichen Unterschiede sind zum einen die allgemein niedrigeren Kosten der Fahrzeuge in den USA unabhängig der betrachteten Technologie. Dies resultiert aus den niedrigeren Anschaffungs- und Energiekosten. Zum anderen führen die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen in Deutschland erst bei höheren Fahrleistungen zu einem Vorteil für elektrifizierte Antriebe. In Frankreich und den USA ist der Vorteil auch bei niedrigeren Fahrleistungen vorhanden. Rousseau et al. unterstreichen mit ihrer Analyse die Bedeutung der Rahmenbedingungen für eine nutzerorientierte Lebenszykluskostenbewertung verschiedener technologischer Optionen. [173]

Bubeck et al., IER Stuttgart, 2016

Im Vergleich zu vielen anderen Studien auf Fahrzeugebene erweitern Bubeck et al. den betrachteten Zeithorizont bis 2050. Zudem beschränken sich die elektrifizierten Alternativen nicht nur auf batterieelektrische Antriebe, sondern beziehen auch den Brennstoffzellenantrieb mit ein. Ähnlich zu Wu et al. erfolgen die Analysen für verschiedene Fahrzeugsegmente und Nutzertypen. Neben der Variation der Fahrleistung inkludieren die drei von Bubeck et al. definierten Nutzertypen auch eine räumliche Differenzierung in städtisches und ländliches Gebiet. Vor dem Hintergrund dieser Annahme variieren folglich die auf Basis von Herstellerangaben zugrunde gelegten Verbrauchswerte der konventionellen Fahrzeuge. Die Verbrauchswerte der elektrifizierten Antriebe werden literaturbasiert im Verhältnis zum benzinbetriebenen Fahrzeug berechnet. Des Weiteren sinken die angenommenen elektrischen Fahranteile bei Range-Extender-Elektrofahrzeugen mit zunehmender Fahrleistung. Die Kaufpreise der Fahrzeuge werden komponentenbasiert berechnet. Die

spezifischen Kosten der Komponenten entstammen dabei einem Literaturvergleich. Die Dimensionierung der Energiewandler erfolgt nach einem definierten Schema in Bezug auf die Leistung des Verbrennungsmotors bei einem konventionellen Antrieb. Die Batterie- und Wasserstofftankkapazitäten werden auf Basis definierter Reichweiten bestimmt. Dazu werden 100 km für Range-Extender-, 200 km für Batterie- und 500 km für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge als Reichweite angegeben. Die Wartungskosten werden für alle Antriebe mit Ausnahme von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen zu 4,8 ct€/km gesetzt. Bei Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen werden niedrigere Wartungskosten in Höhe von 3,6 ct€/km angerechnet. Der Vergleich der Differenzkosten weist für das Jahr 2030 in den meisten Fällen einen Vorteil der Mild-Hybridtechnologie auf. In einzelnen Fällen mittlerer bis höherer Fahrleistung im mittleren Fahrzeugsegment sind bereits positive Bilanzen für Batterie-Elektrofahrzeuge zu erkennen. Im Jahr 2050 stellen Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in allen Fällen die günstigsten Optionen dar. Ein Vorteil der Brennstoffzellen- gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen liegt dabei vor allem bei höheren Fahrleistungen sowie größeren, aber auch sehr kleinen Fahrzeugen vor. [161]

Kühnel et al., Öko-Institut e.V., 2018

Im vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) geförderten Forschungsvorhaben *StratON* befassen sich Kühnel et al. mit der Bewertung von oberleitungsgebundenen schweren Nutzfahrzeugen und Einführungsstrategien für diese. Im Zuge des Projekts veröffentlichen Kühnel et al. 2018 einen Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich der oberleitungsgebundenen Lkw mit anderen Antriebsoptionen. Die Analysen beziehen sich auf die Jahre 2015, 2025 und 2030. Dabei werden Nettopreise ohne Mehrwertsteuer ausgewiesen. Für die oberleitungsgebundene (100/250 km) und die batterieelektrische (400/800 km) Antriebsform werden zwei Varianten mit unterschiedlichen Reichweiten angenommen. Die Herstellungskosten der Dieselvariante fallen auch im Jahr 2025 am geringsten aus. Durch hohe Batteriekosten übersteigt vor allem die batterieelektrische Variante mit hoher Reichweite den Dieselfahrzeugpreis um mehr als das Doppelte. Der Oberleitungs-Lkw mit kleiner batterieelektrischer Reichweite stellt mit 133.000 € die günstigste Elektrifizierungsoption dar. Alle weiteren Fahrzeuge kosten zwischen 153.000 und 161.000 €. Die Wartungskosten werden von Wietschel et al. [67] übernommen. Durch den Vorteil hinsichtlich dieser Kostenart und der Energiekosten sind die Gesamtbetriebskosten über fünf Jahre von oberleitungsgebundenen und batterieelektrischen Lkw im Jahr 2025 auf einem Niveau mit der konventionellen Dieselvariante. Brennstoffzellen-Lkw sind hingegen 40 % teurer, was vor allem auf höhere Energiekosten zurückzuführen ist. Bei der Betrachtung der Gesamtbetriebskosten wird unabhängig von der Antriebstechnologie ein Restwert in Höhe von 24,9 % des Fahrzeugpreises ohne Batterie angerechnet. [170]

Wietschel et al., Fraunhofer ISI, 2019

Unter der Leitung von Martin Wietschel ist im September 2019 eine Studie zu *Klimabilanz, Kosten und Potenziale[n] verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw* erschienen. Im Vordergrund der Studie steht dabei Biomethan, welches in anderen Studien häufig nicht in die Untersuchungen eingeschlossen wird. Die Analysen von Wietschel et al. befassen sich mit den Treibhausgasemissionen und Kosten von Mittel- und Oberklassefahrzeugen sowie schweren Sattelzugmaschinen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t. Brennstoffzellenfahrzeuge werden aufgrund der Kostenunsicherheit

nur hinsichtlich der Treibhausgasemissionen bewertet. Basis- und Wartungskosten der Fahrzeuge werden aus dem Marktdiffusionsmodell *ALADIN* abgeleitet. Die Kosten der Fahrzeugbatterie werden über exogene Annahmen hinsichtlich Kapazität und spezifischer Kosten in den Betrachtungsjahren 2018 und 2030 berechnet. Für Erdgas-Pkw werden aufgrund der wartungsintensiveren Erdgas-Tanks und -Leitungen 15 % höhere Kosten gegenüber Benzin-Pkw ausgewiesen. Alle Kosten werden exklusive Steuern oder sonstigen äußeren politischen Einflüssen betrachtet. Die Gesamtbetriebskostenergebnisse für einen Mittelklassewagen weisen für Erdgas den geringsten Wert aus. Jedoch schrumpft der Vorteil gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 auf 2.000 €, was weniger als 5 % entspricht. Dies resultiert vor allem aus den sinkenden Anschaffungskosten der Batterie-Elektrofahrzeuge. Ein ähnliches Bild ergibt sich für Oberklassefahrzeuge. Die Analyse der Sattelzugmaschinen beschränkt sich auf den konventionellen Dieseldieselkraftstoff sowie drei verschiedene Flüssigerdgas-Varianten, die sich in ihrer Herstellungsform unterscheiden. Dies sind fossiles Erdgas, Biomethan sowie synthetisches Methan. Letztere Option ist nach Wietschel et al. aufgrund der hohen Energiekosten die teuerste Variante. [160]

Islam et al, ANL, 2020

Im Jahr 2020 haben Forscher des Argonne National Laboratory (USA) die fünfte Überarbeitung einer im Jahr 2011 gestarteten kontinuierlichen Studienreihe des U.S. Department of Energy veröffentlicht. Im Rahmen dieser Studie werden mit Hilfe des Modells *Autonomie* Pkw fünf verschiedener Fahrzeugklassen, mehrerer Antriebstechnologien und Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Herstellungskosten und Kraftstoffverbräuche analysiert. Islam et al. bestimmen nicht nur die Herstellungskosten komponentenbasiert, sondern auch die Fahrzeugmasse. Die Fahrzeugmasse dient als Eingangsparameter der durchgeführten Fahrzyklussimulationen. Die Dimensionierung des Antriebsstrangs erfolgt auf der einen Seite über definierte Anforderungen zu Beschleunigungswerten von 0-60 mph. So führt eine höhere Fahrzeugmasse zu höheren erforderlichen Antriebsleistungen. Auf der anderen Seite wird die Batteriekapazität über die Reichweite bestimmt, welche in den Untersuchungen zwischen 200, 300 und 400 Meilen variiert. Auch hier spielt die Fahrzeugmasse eine entscheidende Rolle. Im Vergleich zu den anderen vorgestellten Studien ist die Detailtiefe hinsichtlich der Verbrauchsberechnung einzigartig. Es werden Kennfelder realer Komponenten sowie Entwicklungen fahrzeugspezifischer Eigenschaften wie die des Roll- oder des aerodynamischen Widerstandsbeiwerts in den Simulationen einbezogen. Kosten der Kraftstoffe oder der Wartung sind nicht Teil der Analysen. Sowohl in den Ergebnissen der Herstellungskosten als auch des Energiebedarfs wird die Bedeutung der Reichweite im Fall von Batterie-Elektrofahrzeugen deutlich. Ebenso entscheidend ist die Reichweite beim Vergleich von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Bei 200 Meilen Reichweite fallen die Herstellungskosten von Batterie-Elektrofahrzeugen geringer, bei 300 Meilen jedoch höher als die von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen aus. Ergänzend zu schriftlichen Ausführungen wird ein ausführlicher Datensatz zu den Analysen bereitgestellt. [174]

Ein ähnliches Vorgehen wie von Islam et al. für Pkw führen Vijayagopal et al. [175] für 26 Nutzfahrzeugtypen in den USA durch. Dabei werden ebenfalls Herstellungskosten und Kraftstoffverbräuche verschiedener Antriebsarten mit Hilfe des Modells *Autonomie* analysiert. Wie zuvor für Pkw beschrieben, ist das Verhältnis der Herstellungskosten zwischen Brennstoffzellen- und Batterie-Elektrofahrzeugen maßgeblich von der batterieelektrischen Reichweite abhängig.

F. Unterlohner, Transport & Environment, 2021

Eine In-house Analyse von Transport & Environment befasst sich mit der Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland. Die bis 2050 reichenden Analysen beinhalten diverse Antriebsarten. Die von Annahmen gestützten Analysen basieren vollständig auf Literaturwerten. Die Herstellungskosten werden bottom-up in Abhängigkeit der Batterie- und Brennstoffzellensystemkosten bestimmt. Die Batteriekosten entstammen Untersuchungen von BloombergNEF zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen [177]. Die Brennstoffzellenkosten entnimmt Unterlohner den Werten des U.S. DOE für ein jährliches Produktionsvolumen von 10.000 Einheiten pro Jahr [156]. Hinsichtlich der Wartungs- und Infrastrukturkosten sowie der Restwertberechnung wird verstärkt auf die Analysen von Kühnel et al. [170] zurückgegriffen. Die Gestehungskosten der verschiedenen Kraftstoffe basieren auf dem Power-to-Gas-/Power-to-Liquid -Rechner von Agora Energiewende [178]. Innerhalb einer Sensitivitätsanalyse werden die Herstellungskosten strombasierter Kraftstoffe aus einer möglichen Erzeugung in Nordafrika und deren Import untersucht. Die Analyse der Gesamtbetriebskosten sieht trotz der günstigeren Kraftstoffkosten (z. B. 5,20€/kg_{H2} in 2030) über den gesamten Zeitraum die oberleitungsgebundene oder batterieelektrische Variante im Vorteil gegenüber Brennstoffzellen- oder Verbrennungsmotorfahrzeugen mit Power-to-Liquid- oder Power-to-Gas-Kraftstoffen. [176]

Zusammenfassung

Abschließend werden kritische Aspekte der zuvor beschriebenen Studien hervorgehoben. Zunächst ist anzumerken, dass die Studien häufig diverse Parameter der Fahrzeuge auf Literaturbasis abschätzen. Dies reicht von Komponentenkosten bis hin zum Kraftstoffverbrauch. Die Leistungskonfiguration der Fahrzeuge erfolgt lediglich in Islam et al. [174] und Vijayagopal et al. [175] auf Basis von Anforderungen hinsichtlich der Beschleunigung. Die Batteriekapazität elektrifizierter Fahrzeuge wird zumeist über die angenommene Reichweite bestimmt. Dabei wird jedoch im Vergleich zur heutigen Entwicklung häufig eine geringe Reichweite von 150 oder 300 km unterstellt [150], [160], [161], [171]. Hinzu kommt, dass Verbrauchsentwicklungen ebenfalls in vielen Studien auf Literaturbasis abgeschätzt werden. Im Gegensatz dazu führen Islam et al., Vijayagopal et al. sowie Rousseau et al. Fahrzyklussimulationen zur Bestimmung der Verbrauchswerte durch [173]–[175]. Keine der hier beschriebenen Studien nutzt einen methodisch fundierten Ansatz zur Berechnung der Wartungskosten, welche einen nicht vernachlässigbaren Anteil der Gesamtbetriebskosten darstellen. Komponentenkosten werden Expertenschätzungen oder anderweitiger Literatur entnommen. Die Abhängigkeit der Komponentenkosten von der Marktdurchdringung wird ebenfalls in keiner Studie analysiert, obwohl dieser Zusammenhang in der Literatur empirisch bestätigt wird [179]. Zudem werden die verschiedenen Verkehrsmittel lediglich von Hülsmann et al. und Wietschel et al. in einer Studie gemeinsam betrachtet [160], [171]. Die methodische Berechnung der techno-ökonomischen Parameter der Verkehrsmittel erfolgt jedoch losgelöst voneinander. Neben den genannten methodischen Aspekten fällt vor allem bei älteren Studien auf, dass die bis heute erkennbare Kostendegression der Komponenten alternativer Antriebe wie der Fahrzeugbatterie unterschätzt worden ist.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell macht vor allem hinsichtlich der Fahrzeugeigenschaften methodisch fundierte Analysen möglich. Dabei wird die Berechnung der Fahrzeugeigenschaften diverser Straßenfahrzeuge methodisch verknüpft, was

insbesondere die Komponentenkostenentwicklung inklusive deren Abhängigkeit von der Marktentwicklung betrifft. Zudem werden aktuelle Entwicklungen in Bezug auf die Reichweitenanforderungen batterieelektrischer Fahrzeuge einbezogen und die Wartungskosten endogen berechnet.

3.4 Modellierung auf sektoraler Ebene

Neben der Modellierung auf Fahrzeugebene können Modelle auch den Verbund aller Fahrzeuge abbilden. Diese sektorale Betrachtung umfasst mehrere Fahrzeugklassen sowie die Gesamtheit der jeweiligen Fahrzeugflotte. Auf diese Weise können beispielsweise die Interaktion der betrachteten Verkehrsmittel sowie die Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem hinsichtlich der Entwicklung von Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und Kosten in die Modellierung einbezogen werden. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel die Defossilisierung des deutschen Verkehrssektors bis 2045 modelltechnisch zu analysieren. Dazu wird im weiteren Verlauf des Abschnitts die in diesem Zusammenhang relevante Literatur analysiert und untersucht inwiefern vorhandene Modelle die in Abschnitt 2.3 dargelegten Trends des Verkehrssektors abbilden. Auf Basis der Analysen werden anschließend Erkenntnisse für diese Arbeit abgeleitet.

3.4.1 ASIF-Methode

Die ASIF-Methode wurde 1999 von Schipper und Marie-Lilliu eingeführt, um die Auswirkungen des Verkehrssektors auf die Treibhausgasemissionen abzugrenzen [180]. Die Methode zerlegt die Berechnung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in vier Hauptbestandteile. Es dient zum einen der strukturierten Analyse bestehender Modelle und zum anderen dem Aufbau des in dieser Arbeit entwickelten Modells. Diese Teile werden in der folgenden mathematischen Gleichung deutlich:

$$G = \sum_{i,j} A \cdot S_i \cdot I_i \cdot F_{ij} \quad \text{Gl. 3.10}$$

Die resultierenden Treibhausgasemissionen (G) sind abhängig von der Aktivität (A), dem modalen Anteil (S_i), der Energieintensität (I_i) und der Treibhausgasintensität des Kraftstoffs (F_{ij}). Die Aktivität beschreibt die gesamte Verkehrsleistung in Personen- oder Tonnenkilometern (pkm oder tkm). Der modale Anteil gibt an, wie viel der gesamten Verkehrsnachfrage von jedem Verkehrsmittel abgedeckt wird (%). Die Energieintensität enthält Informationen über den verkehrsmittelabhängigen Kraftstoffverbrauch bezogen auf die erbrachte Verkehrsleistung (MJ/pkm oder MJ/tkm). Die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs berücksichtigt die emittierte Menge an Treibhausgasemissionen des verwendeten Kraftstoffs ($g_{\text{CO}_2\text{-äq.}}/\text{MJ}$). Darüber hinaus bestimmen Schipper und Marie-Lilliu die modale Energieintensität anhand von drei Komponenten [180]:

$$I_i = f(E_i, C_i, U_i) \quad \text{Gl. 3.11}$$

Zunächst wird der technische Wirkungsgrad (E) betrachtet, der von der Art des Antriebsstrangs und des verwendeten Kraftstoffs beeinflusst wird. Des Weiteren werden die Fahrzeugeigenschaften im Faktor (C) zusammengefasst. Diese umfassen Eigenschaften wie die Fahrzeugmasse oder Luftwiderstandsbeiwerte, die den mechanischen Energiebedarf des Fahrzeugs maßgeblich beeinflussen. Die Auslastung unter Berücksichtigung des

verkehrsmittelspezifischen statistischen Mittels der Last- bzw. Fahrgastauslastung ist die letzte Komponente (U).

Die aufgezeigte Methodik findet sich in nahezu allen Modellen als Grundlage zur Berechnung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors wieder. Zudem hilft sie die Auswirkungen verschiedener Veränderungen innerhalb des Sektors einzuteilen.

3.4.2 Modellklassen

Modelle zur Analyse der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors lassen sich in verschiedene Klassen einteilen. In Abbildung 3.5 sind die Modellierungstechniken grafisch eingeordnet, die zur Berechnung der vom Verkehrssektor emittierten Treibhausgasemissionen nach Linton et al. [181] und Creutzig [182] möglich sind. Diese Techniken werden auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen eingesetzt. Die räumlich-zeitlichen Einstellungen der Modelle innerhalb eines Typs sind nicht genau festgelegt, sondern können untereinander variieren. Dennoch kann die Beziehung zwischen den Modelltypen wie in der Abbildung dargestellt werden.

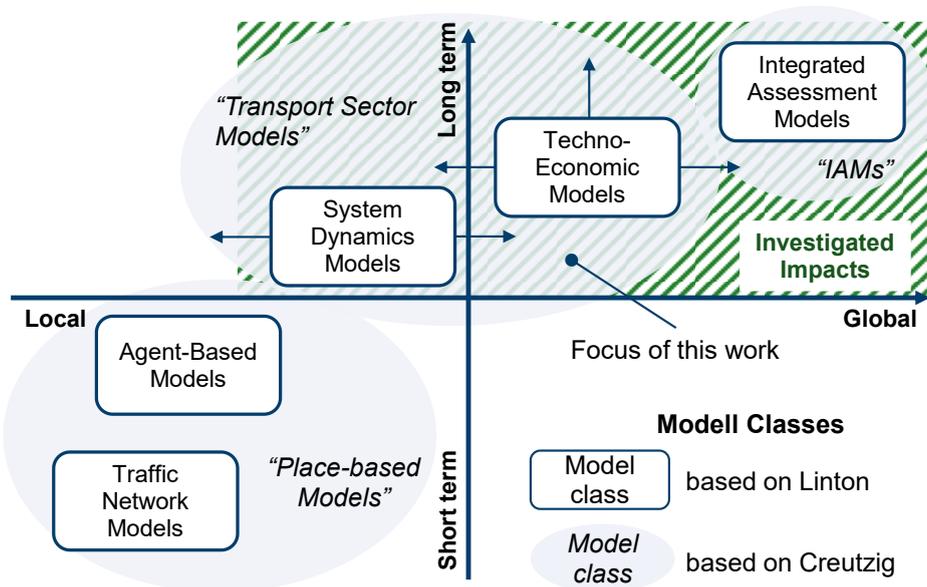


Abbildung 3.5: Modellierungstechniken zur Berechnung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Anlehnung an Linton und Creutzig [181], [182].

Einerseits werden Verkehrsnetzmodelle für kleinräumige Simulationen auf lokaler und kurzfristiger Basis verwendet [183], [184]. Andererseits werden integrierte Bewertungsmodelle für langfristige Projektionen auf nationaler oder sogar globaler Ebene eingesetzt [185], [186]. Agentenbasierte Modelle wie *MATSIM* konzentrieren sich auf das Verhalten und die Motivationen einer Reihe von Agenten [187]. Im Vergleich zu systemdynamischen und techno-ökonomischen Modellen liegt der Schwerpunkt bei diesen Modellen auf einer eher regionalen Ebene. Die von Creutzig [182] definierten Modellklassen können zum Teil als Gruppierungen der Modellklassen nach Linton verstanden werden. Die verkehrsnetz- und agentenbasierten Modelle entsprechen den ortsbezogenen Modellen von Creutzig, die auf

der lokalen Ebene operieren. Zwischen den ortsbezogenen Modellen und den Integrated Assessment Modellen definiert Creutzig die Verkehrssektormodelle, zu denen auch die systemdynamischen und techno-ökonomischen Modelle von Linton gehören. Zur erleichterten Erstellung von techno-ökonomischen Energiesystemmodellen bestehen Frameworks, wie das am IEK-3 entwickelte *Framework for Integrated Energy System Assessment (FINE)* [188], [189].

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel die Defossilisierung des deutschen Verkehrssektors bis 2045 modellbasiert zu analysieren. Da sich die Transformation des Verkehrssystems zur vollständigen Dekarbonisierung über einen langen Zeitraum entwickelt, sollte das Modell in der Lage sein, solche Zeiträume abzubilden. Außerdem sollte das Modell die Auswirkungen zumindest auf nationaler Ebene berücksichtigen, um die Einhaltung nationaler Klimaschutzziele abbilden zu können. Die Anwendung der definierten räumlich-zeitlichen Kriterien für die Modellauswahl in dieser Arbeit führt zu der grün schraffierten Zone in Abbildung 3.5. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Verkehrssektor liegt, werden integrierte Bewertungsmodelle bei der Modellauswahl, welche das gesamte Energiesystem abbilden, vernachlässigt. Daher werden im Folgenden Verkehrssektormodelle nach Creutzig [182] bzw. systemdynamische und techno-ökonomische Modelle nach Linton et al. [181] betrachtet.

Die Modellauswahl erfolgt mit Hilfe einer umfangreichen Literaturrecherche in bekannten Datenbanken (z. B. ScienceDirect, SCOPUS, Google Scholar, Wiley, Taylor & Francis, SpringerLink) sowie auf den Internetauftritten verschiedener Institute im Bereich der Energiesystemanalyse (z. B. IEA, ICCT, US National Laboratories). Darüber hinaus wird ein Schneeballsystem angewandt, um möglichst viele relevante Modelle einzubeziehen. Die Literatur wurde im Zeitraum von Oktober 2019 bis Ende 2020 gesammelt. Um nur aktuelle Modelle zu berücksichtigen, muss die letzte Veröffentlichung zu dem Modell nach 2010 erfolgt sein. Darüber hinaus werden nur Analysen berücksichtigt, die mindestens einen der in Abschnitt 2.3 definierten Trends berücksichtigen. Tabelle C.1 in Anhang C enthält Informationen zu den 41 untersuchten Modellen und deren Eigenschaften.

Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer räumlich-zeitlichen Eigenschaften und der Abbildung verschiedener Verkehrsmittel, Antriebs- und Kraftstoffoptionen. Die genannten Modelleigenschaften sind Bestandteil der nachfolgenden Analysen.

3.4.3 Räumlich-zeitliche Eigenschaften der Modelle

Da die Modelle für die Beantwortung unterschiedlicher Forschungsfragen entwickelt wurden, unterscheiden sich die durch die Randbedingungen charakterisierten Modellansätze. Dies kann z. B. die zeitlichen und räumlichen Aspekte umfassen. Die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften lassen sich in den Betrachtungshorizont und die Auflösung unterteilen.

Werden mittels Optimierungsmodellen Betrachtungshorizonte von mehreren Jahren abgebildet ist dies mittels unterschiedlicher Methoden möglich. Auf der einen Seite wird der Zeitraum beim *myopischen Ansatz* in Zeitschritte zerlegt. Diese werden unter Kenntnis der vorausgehenden, jedoch ohne Informationen über zukünftige Zeitschritte optimiert. Auf der anderen Seite erfolgt beim *perfect foresight Ansatz* die Optimierung des gesamten Betrachtungszeitraums in einem Schritt, sodass alle Informationen gleichzeitig zur Verfügung stehen. Nachteilig ist dabei insbesondere die erhöhte Modellkomplexität, welche eine hohe Rechenleistung benötigt und zu längeren Rechenzeiten führt. [190], [191]

Der Zeithorizont der analysierten Modelle wird durch das Jahr 2050 dominiert, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist. Dies liegt daran, dass die meisten Modelle mögliche Dekarbonisierungspfade untersuchen, die sich auf die Klimaziele nach dem Kyoto-Protokoll [192] beziehen. Ein kleiner Teil der Modelle betrachtet jedoch einen kürzeren Zeithorizont. Andere beginnen bereits, mögliche Entwicklungen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu inkludieren. Dies gilt insbesondere für globale Modelle.

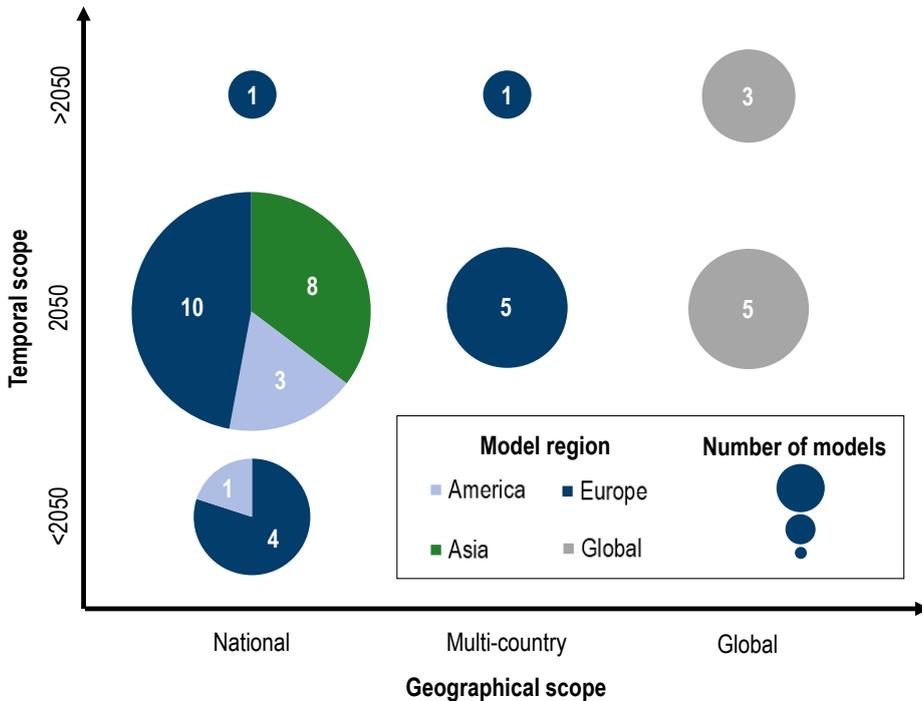


Abbildung 3.6: Zeitlicher und räumlicher Horizont der analysierten Verkehrssektormodelle.
National: <2050: [193]–[197]; bis 2050: [46], [47], [198]–[216]; > 2050: [217];
Multi-country: bis 2050: [198], [218]–[221]; > 2050: [222];
Global: bis 2050: [223]–[227]; > 2050: [228]–[230].

Neben dem beschriebenen zeitlichen kann sich auch der geografische Betrachtungshorizont unterscheiden. Zwei Drittel der Modelle analysieren den Verkehrssektor innerhalb nationaler Grenzen (Abbildung 3.6). Demgegenüber betrachten acht der Modelle die globale Entwicklung. Zusätzlich analysieren einige multinationale Modelle den europäischen Verkehrssektor. Im Vergleich zu anderen Mehrländermodellen deckt *TE3*, ein von Gómez Vilchez entwickeltes Systemdynamikmodell, den Verkehrssektor weder global noch auf EU-Ebene ab. Stattdessen umfasst es mit Deutschland, Frankreich, Indien, Japan, China und den USA sechs der relevantesten Pkw-Märkte der Welt [219]. Die Berücksichtigung größerer Teile der Welt hilft bei der Kalkulation der Kosten von Zukunftstechnologien [219]. Dies liegt daran, dass ihre Kosten, wie in Sektion 3.3.1 beschrieben, weitgehend von der Lernrate und der kumulierten Produktion beeinflusst werden, die vom globalen und nicht von nationalen Märkten abhängen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit, wie in Sektion 4.1.4

erläutert, ebenfalls der Weltmarkt bei der Bestimmung der kumulierten Produktionsmenge zur Ableitung der Komponentenkosten betrachtet.

Die zeitliche Auflösung gibt Einblick in die Berücksichtigung zeitabhängiger Effekte. Diese werden für den Verkehrssektor vor allem in Bezug auf die Stromnachfrage relevant. Während Tankstellen für andere Energieträger untertägige Schwankungen durch standardmäßig installierte Vor-Ort-Speicher ausgleichen, verfügen Ladestationen für Elektrofahrzeuge über keine vergleichbaren Speicher, da sie überwiegend direkt an das Stromnetz angeschlossen sind. Daher muss die elektrische Leistung entweder gleichzeitig erzeugt werden, um den Bedarf zu decken, oder durch integrierte Stromspeicher vorgehalten werden.

Mehr als die Hälfte der analysierten Modelle haben eine jährliche Auflösung, wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist. Somit können diese die durch das elektrische Laden verursachten untertägigen Strombedarfsspitzen nicht berücksichtigen. Nur sechs der 41 untersuchten Modelle sind so spezifiziert, dass sie eine höhere zeitliche Auflösung aufweisen. Trost verwendet drei Typtage, um den Effekt des elektrischen Ladens zu untersuchen. Diese drei typischen Tage umfassen einen Arbeitstag, welcher Montag bis Freitag repräsentiert, Samstag und Sonntag. Jeder dieser Tage ist in Tag- und Nachtzeiträume unterteilt, für die unterschiedliche Anteile elektrisch gekoppelter Fahrzeuge bei verschiedenen Ladeleistungen angenommen werden [200]. Pichlmaier et al. berücksichtigen ebenfalls in Abhängigkeit vom Energieträger differenzierte zeitliche Auflösungen. Während der Bedarf für elektrische Energie stündlich aufgelöst ist, ist er für Methan und Wasserstoff täglich und für flüssige Kraftstoffe jährlich aufgelöst [231]. Da eine hohe zeitliche Auflösung mit einer zunehmenden Modellkomplexität und deren Auswirkungen auf Rechendauer und -zeit einhergeht, werden Methoden zur Zeitreihenaggregation entwickelt [232]. Diese erlauben eine Reduktion der Modellkomplexität ohne signifikante Reduktion der Modellgenauigkeit.

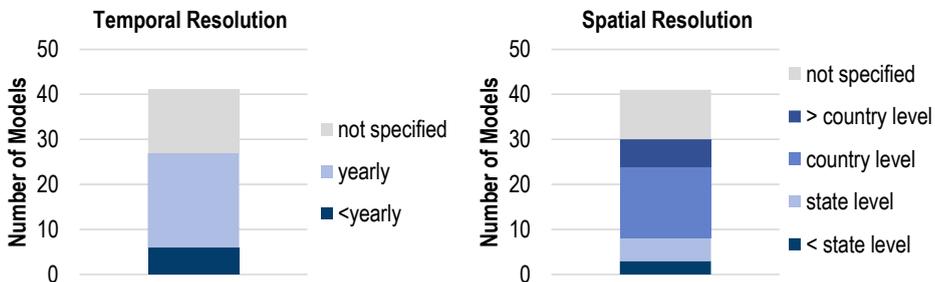


Abbildung 3.7: Zeitliche (a) und räumliche (b) Auflösung der untersuchten Verkehrssektormodelle.

Die Analyse der möglichen Auswirkungen auf Energieinfrastrukturen erfordert eine räumliche Auflösung. Diese Infrastrukturen spielen eine wichtige Rolle beim Übergang zu Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen, die als vielversprechende Dekarbonisierungsoptionen angesehen werden. Dieser Effekt kann durch Modelle mit höherer räumlicher Auflösung berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann eine hohe räumliche Auflösung helfen, die Unterschiede in der Verkehrsnachfrage sowie dem fahrzeugspezifischen Kraftstoffverbrauch in verschiedenen Regionen zu inkludieren.

Weiterhin veranschaulicht Abbildung 3.7, dass die meisten der untersuchten Modelle den Verkehrssektor auf Länderebene analysieren. Sechs der globalen Modelle fassen sogar

Staaten zu größeren Regionen zusammen. Da sie sich nicht auf infrastrukturelle Fragen konzentrieren, ist eine hohe räumliche Auflösung in diesem Fall nicht unbedingt erforderlich. Für China und die USA existieren Modelle, die den zukünftigen Energiebedarf des Verkehrssektors auf Länderebene simulieren [197], [210]. Peng et al. berücksichtigen dabei nicht den Einfluss der regionalen Energienachfrage auf die Übertragungsinfrastruktur der Energieträger [210]. Das Transportsektor-Nachfragemodul des National Energy Modeling System (NEMS), entwickelt von der U.S. Energy Information Administration, berechnet den zukünftigen Energiebedarf des Transportsektors in den USA ebenfalls auf Bundesstaatenebene [197]. Das Modell selbst kann nicht verwendet werden, um den Einfluss auf die Infrastruktur zu analysieren. Mit Hilfe einer Modellkopplung zu einem anderen NEMS-Modul können die Auswirkungen jedoch untersucht werden. Nur wenige Modelle berechnen die Verkehrsnachfrage auf regionaler Ebene, beispielsweise bis zur Kreisebene (NUTS 3), untersuchen aber die Energienachfrage auf nationaler Ebene [47], [198].

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass Verkehrssektormodelle typischerweise den Verkehrssektor auf nationaler Ebene bis 2050 analysieren. Dabei liegt die zeitliche Auflösung auf Jahresbasis und die räumliche Auflösung auf nationaler Ebene. Abschnitt 3.5 zeigt, dass zur Modellierung verschiedener Effekte, die sich aus den unterschiedlichen untersuchten Trends ergeben, höhere Auflösungen notwendig sind.

3.4.4 Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe

Die Nachfrage im Personen- und Güterverkehr kann durch den Einsatz verschiedener Kombinationen aus Verkehrsmitteln, Antrieben und Kraftstoffen gedeckt werden (vgl. Abschnitt 2.1). Um einen Überblick über die Abdeckung dieser zu erhalten, wird in der folgenden Sektion eine Analyse des Einbezugs verschiedener technologischer Möglichkeiten in den betrachteten Verkehrssektormodellen durchgeführt. In Bezug auf die Verkehrsmittel umfasst die Analyse alle relevanten Verkehrsmittel hinsichtlich der Verkehrsnachfrage und den sektoralen Treibhausgasemissionen. Die einbezogenen Antriebsarten und Kraftstoffoptionen beinhalten die heute bedeutsamsten sowie viel diskutierte Alternativen. Die Antriebe reichen folglich vom derzeit vorherrschenden Verbrennungsmotorfahrzeug über verschiedene Hybridisierungsstufen (HEV, PHEV, REEV) bis hin zu Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Die inkludierten Kraftstoffe sind ebenfalls breit gefächert und umfassen z. B. konventionelle, biobasierte- und synthetische Kraftstoffe. Um alle relevanten Optionen modelltechnisch vergleichend bewerten zu können, sollten die in Tabelle 3.1 aufgeführten Verkehrsmittel, Antriebsarten und Kraftstoffe im Modell abgebildet sein.

Tabelle 3.1: Betrachtete Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe innerhalb des Modellvergleichs.
 ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Modi	Antriebe	Kraftstoffe
Fahrrad	ICEV	Benzin
Motorrad	HEV	Diesel
Pkw	PHEV	Kerosin
Leichte Nfz	REEV	Erdgas
Schwere Nfz	BEV	Elektrizität
Bus	FCEV	Wasserstoff
Zug		Biokraftstoffe
Schiff		Synthetische Kraftstoffe
Flugzeug		

Abbildung 3.8 weist aus in wie vielen Modellen die verschiedenen Verkehrsmittel enthalten sind. Es ist zu erkennen, dass Pkw in allen ausgewählten Modellen enthalten sind. Der Grund dafür ist die große Bedeutung der Pkw in Bezug auf Verkehrsleistung und Energiebedarf. Einige der Modelle konzentrieren sich auf den Pkw und berücksichtigen keine weiteren Verkehrsmittel.

Fahrräder sind das am wenigsten berücksichtigte Verkehrsmittel. Hierfür könnte ihr geringer Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor ein Grund sein. Obwohl der aufkeimende Markt für Elektrofahräder für Personen und Güter zu einem steigenden Strombedarf für dieses Verkehrsmittel führt, macht dieser aufgrund des geringen spezifischen Energiebedarfs nur einen kleinen Anteil am Gesamtenergiebedarf des Verkehrs aus [233]. Motorräder werden generell in globalen Verkehrssektormodellen berücksichtigt, da sie in weniger entwickelten Ländern eine wichtige Rolle spielen.

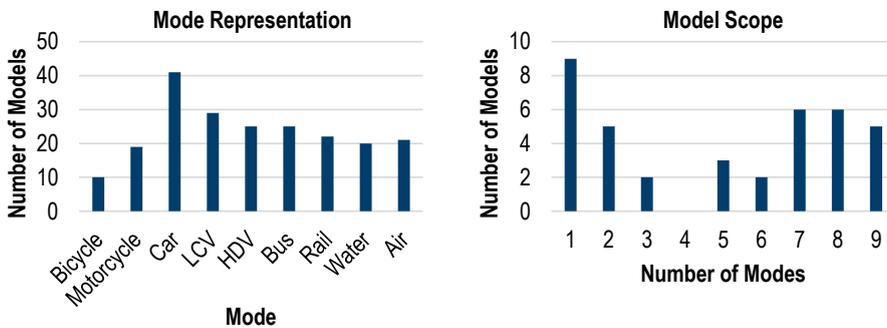


Abbildung 3.8: Einbezogene Verkehrsmittel in den untersuchten Verkehrssektormodellen.
 LCV: Leichte Nutzfahrzeuge, HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Gambhir et al. [214], Peng et al. [210] und Ou et al. [215] modellieren nur die Straßenverkehrsmittel, da diese die Haupttreiber für den steigenden Energiebedarf im chinesischen Verkehrssektor sind. Dies führt zu einer insgesamt geringeren Berücksichtigung des Schienen-, Wasser- und Luftverkehrs in den analysierten Modellen, wie in Abbildung 3.8 zu sehen ist.

Nur sechs der Modelle berücksichtigen alle betrachteten Verkehrsmittel (vgl. Tabelle 3.1). Acht weitere Modelle berücksichtigen alle Verkehrsmittel, mit Ausnahme des Fahrrads. Addiert man die vier Modelle, die nur Zweiräder unberücksichtigt lassen, erhält man 18 Modelle, die die relevantesten Verkehrsmittel hinsichtlich des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors berücksichtigen. Abschnitt 3.5 unterstreicht die Bedeutung der Modellierung mehrerer Verkehrsträger im Kontext von Dekarbonisierungspfaden.

Wie oben erwähnt, können die Verkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsarten ausgestattet sein. Aufgrund fehlender Angaben ist es nicht möglich, die betrachteten Antriebsarten je Modus zu analysieren. Daher ist in Abbildung 3.9 die Anzahl der Modelle dargestellt, die die untersuchten Antriebsarten für Pkw enthalten. Für drei der Modelle sind keine Informationen über die modellierten Antriebsarten verfügbar.

Alle analysierten Modelle, für die solche Informationen verfügbar sind, berücksichtigen Verbrennungsmotor- und Batterie-Elektrofahrzeuge. Peng et al. [210] und Palencia et al. [213] inkludieren keine Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge in ihren Analysen. Auch die weniger elektrifizierten Hybrid-Elektrofahrzeuge werden in fünf der Modelle nicht berücksichtigt. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge sind in der gleichen Anzahl von Modellen enthalten wie Hybrid-Elektrofahrzeuge. Range-Extender-Elektrofahrzeuge werden mit Abstand am wenigsten berücksichtigt. Insgesamt lässt sich eine leichte Präferenz für die Modellierung von Batterie-Elektrofahrzeugen als alternative Antriebstechnologie erkennen.

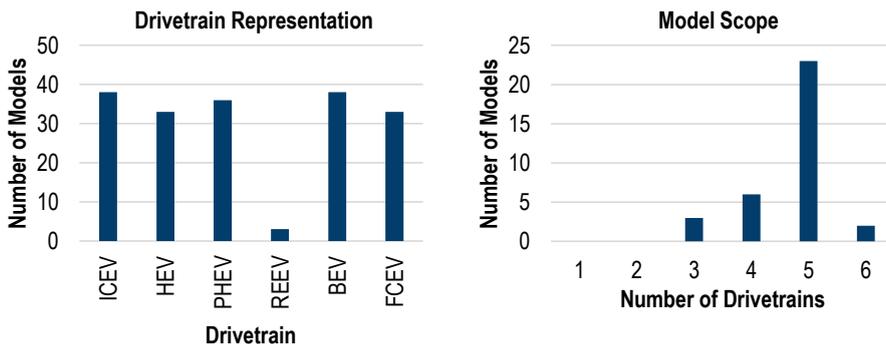


Abbildung 3.9: Repräsentation der Antriebsarten in den Verkehrssektormodellen.

ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Das rechte Diagramm der Abbildung 3.9 zeigt die Anzahl der berücksichtigten Antriebsarten in den untersuchten Modellen. Es ist ersichtlich, dass die meisten Modelle alle aufgeführten Antriebsarten mit Ausnahme von Range-Extender-Elektrofahrzeugen enthalten. In drei der Modelle werden nur drei verschiedene Antriebsarten berücksichtigt. Shepherd et al. [205] und Ou et al. [215] berücksichtigen Verbrennungsmotor-, Plug-In Hybrid- und Batterie-Elektrofahrzeuge. Im Gegensatz dazu berücksichtigen Peng et al. keine hybriden Antriebsstränge [210].

Es ist anzumerken, dass die Antriebsvielfalt insbesondere bei Hybridvarianten in den Modellen bei Pkw am höchsten zu erwarten ist, da diese oft nicht in anderen Verkehrsmitteln berücksichtigt werden.

Das letzte Merkmal der Modelle, das im Hinblick auf den sektoralen Detaillierungsgrad untersucht wird, sind die Kraftstoffe. Wie bei den Antriebssträngen werden nicht alle Kraftstoffe für alle Verkehrsmittel betrachtet.

Benzin und Strom werden in allen Modellen berücksichtigt, da sie, wie oben beschrieben, alle Verbrennungsmotorfahrzeuge und Batterie-Elektrofahrzeuge beinhalten. Darüber hinaus steht die Anzahl der Modelle, die Wasserstoff als möglichen Energieträger für den Verkehrssektor berücksichtigen, im Verhältnis zu der Anzahl der Modelle, die die Brennstoffzellen-Antriebstechnologie berücksichtigen. Erdgas ist ein weiterer alternativer Energieträger, der in den meisten der untersuchten Verkehrssektormodelle enthalten ist. Biokraftstoffe und insbesondere synthetische Kraftstoffe werden in vielen Publikationen nicht explizit erwähnt. Es könnte jedoch sein, dass die Modelle implizit von konventionellem Benzin und Diesel auf synthetische Varianten umschalten, ohne dies zu erwähnen.

Die Auswertungen zur Anzahl der berücksichtigten Kraftstoffe pro Modell zeigen, dass sechs oder mehr der ausgewählten Kraftstoffe in den meisten Modellen berücksichtigt werden. Nur fünf Modelle beinhalten weniger Kraftstoffe. Yabe et al. [216] und Shepherd et al. [205] lassen alle Kraftstoffe außer Benzin und Strom unberücksichtigt. Palencia et al. [213] untersuchen Benzin, Elektrizität und Wasserstoff in ihrer Analyse. Pfaffenbichler et al. [202] lassen Wasserstoff außer Acht.

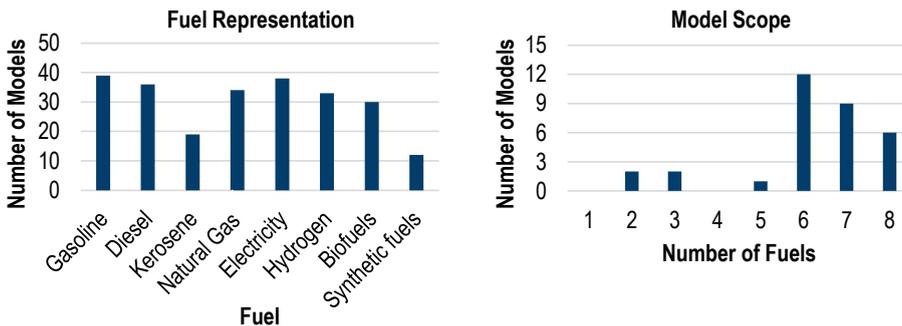


Abbildung 3.10: Berücksichtigte Kraftstoffe in den Verkehrssektormodellen.

Die Analyse in dieser Sektion hat die sektorspezifische Abdeckung der untersuchten Verkehrssektormodelle aufgezeigt. Die Modelle decken größtenteils alle wichtigen Verkehrsmittel in Bezug auf Energiebedarf und Treibhausgasemissionen ab. Außerdem umfassen sie die vielversprechendsten Antriebsarchitekturen. Dies gilt auch für die Energieträger, wobei synthetische Kraftstoffe, die einen Pfad der Dekarbonisierung für größere Verkehrsmittel darstellen könnten, unterrepräsentiert sind. Der Einbezug aller relevanten Verkehrsmittel ist eine Voraussetzung für die korrekte Modellierung der Auswirkungen des modalen Shift und des Antriebs- bzw. Kraftstoffwechsels. Gleiches gilt für die Antriebstechnologien und die verwendeten Energieträger.

3.4.5 Szenarien für den deutschen Verkehrssektor

In dieser Sektion werden Szenarien für den gesamten deutschen Verkehrssektor vorgestellt, welche in den letzten zehn Jahren entwickelt wurden. Daraus werden Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit abgeleitet. Die Studien wurden vor allem vom Öko-Institut im Rahmen verschiedener von Bundesministerien geförderten Projekten entwickelt. Darüber hinaus ist der Verkehrssektor auch Teil von Studien zum gesamten deutschen Energiesystem [234]–[239]. Diese werden an dieser Stelle nicht gesondert erläutert.

Hacker et al., Öko-Institut e.V., eMobil 2050, 2014 [46]

Als erstes wird auf die beiden Szenarien des *eMobil2050* Projekts eingegangen. Bei den Szenarioanalysen werden das Verkehrssektormodell *TEMPS* und das Strommarktmodell *PowerFlex* eingesetzt. Die Fahrzeugeigenschaften entstammen einer im Rahmen des Projekts entstandenen Technologiedatenbank, welche bereits in Sektion 3.3.4 eingeführt wird. Auf Basis von Einflussfaktoren und Trends bis 2050, welche in einem Expertenworkshop definiert werden, erfolgt die Szenariodefinition. Das *Grenzenlos eMobil* Szenario unterstellt ein Voranschreiten der Globalisierung, der Urbanisierung und einem weiter zunehmenden Onlinehandel. Zudem bleibt der Pkw das dominierende Verkehrsmittel in allen Altersgruppen. Diese Trends resultieren sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr in steigenden Verkehrsleistungen. Demgegenüber vollzieht die Gesellschaft im *Regional eMobil* Szenario einen Wertewandel. Dies äußert sich im achtsamen Umgang mit Produkten und der Besinnung auf regionale Vorzüge. Pkw-Besitz rückt in den Hintergrund, Dinge werden vermehrt geteilt. Insgesamt resultiert der Wertewandel in einem Rückgang der Verkehrsleistung und einem modalen Shift vom Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr und langsamen Verkehrsmitteln.

In beiden Szenarien werden Pkw und leichte Nutzfahrzeuge zunehmend elektrisch angetrieben, ab 2040 sind nahezu alle neu zugelassen Pkw Plug-In Hybride oder vollelektrisch. Für den Fernverkehr wird im *Grenzenlos* Szenario entlang der Autobahnen eine Oberleitungsinfrastruktur angenommen, sodass mehr als 80 % der Güterverkehrsleistung von Sattelzugmaschinen mit dieser Technologie erfolgt. Im *Regional* Szenario wird der abnehmende Straßengüterfernverkehr mit Erdgas-Fahrzeugen durchgeführt. Ähnlich zum Fernverkehr entwickeln sich die Antriebstechnologien der Busse. Insgesamt wird der Endenergiebedarf infolge steigender Effizienzen gegenüber 2010 im *Grenzenlos* Szenario um 66 % und im *Regional* Szenario um 77 % reduziert. Mehr als 60 % sind im *Grenzenlos* Szenario aufgrund der hohen Elektrifizierung in allen Bereichen des Straßenverkehrs elektrische Energie. Im *Regional* Szenario sind es hingegen nur 43 %, dafür zudem fast 30 % Erdgas. Der restliche Energiebedarf entfällt jeweils auf Diesel und Benzin, welche gegenüber 2010 deutlich reduziert repräsentiert sind. Anschließend an die Berechnungen der Endenergienachfrage werden mit *PowerFlex* Strommarktsimulationen durchgeführt. Dabei werden fixe kumulierte Nachfrageprofile genutzt, um die Stromnachfrage des Verkehrs zeitlich aufzulösen. Die Simulationen verdeutlichen die Bedeutung der Stromnachfrage des Verkehrssektors auf die Emissionen des Stromsektors, wenn viele Elektrofahrzeuge im Markt sind.

Zimmer et al., BMU Studie, Renewbility III, 2016 [47]

Das vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) geförderte Projekt *Renewbility* startete im Jahr 2009. Inhalt des Projekts sind Wirkungen verschiedener Maßnahmen auf den Verkehrssektor inklusive ökonomischer Effekte. In der ersten Phase des Projekts ist der Modellierungsansatz entwickelt worden, welcher auf einem Modellverbund aufbaut. Dabei wird die Angebots- und Nachfrageseite bis 2030 betrachtet. Die Analysen beinhalten direkte und indirekte Emissionen. In der zweiten Phase des Projekts werden die Modelle weiterentwickelt und weitere Szenarien erstellt. Diese zielen auf einen möglichst hohen Klimaschutzbeitrag des Verkehrssektors bis 2030 ab. In der dritten und bisher letzten Phase wird im Jahr 2016 eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2050 analysiert. Die drei definierten Szenarien zielen auf unterschiedliche technologische Entwicklungen hinsichtlich Antriebs- und Kraftstoffoptionen ab. Drei zusätzlich an die Szenarien angelehnte Szenarien untersuchen den Einfluss von Effizienzmaßnahmen, der Oberleitungstechnologie für Lkw sowie der Pkw-Maut. Es wird in sämtlichen Szenarien unterstellt, dass nur erneuerbare Energien zur Stromproduktion für den Verkehrssektor eingesetzt werden. Die Beimischung und Zusammensetzung der Biokraftstoffe werden jahresspezifisch exogen angenommen. Das Potenzial wird aufgrund Bedenken hinsichtlich der Nutzungskonkurrenz und Dezentralität der Rohstoffgewinnung auf unter 100 PJ gegenüber 250 PJ in Grundlagenstudien [87] abgesenkt. Aufgrund niedrigerer Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien im Ausland werden Power-to-X-Kraftstoffe vollständig importiert. Die Kosten dieser Kraftstoffe, welche Gestehung, Transport und Verteilung beinhalten, sinken von 2020 bis 2050 um ca. 50 %. Für Wasserstoff resultieren im Jahr 2050 Tankstellenpreise in Höhe von 9,35 €/kg_{H₂}. Der angenommene Strompreis zum Batterieladen beträgt zum gleichen Zeitpunkt 34,5 ct€/kWh. Dabei findet keine Differenzierung nach Fahrzeugklasse statt.

Für Pkw und Lkw wird der Bestand und die Neuzulassungen modelliert. Dementgegen sind die übrigen Verkehrsträger nur über Annahmen zu Antriebsanteilen und deren Effizienzentwicklungen je Personen- oder Tonnenkilometer im Modellverbund eingebunden. Die Modellierung der Pkw-Neuzulassungen erfolgt nutzerspezifisch. Die insgesamt 720 Nutzerprofile ergeben sich aus der Kombination der drei Fahrzeugklassen, zwei Haltergruppen, sechs Ortsgrößenklassen sowie jeweils 20 verschiedenen Profilen. Die Profile differenzieren sich hauptsächlich nach Jahresfahrleistungen. Die Anteile der in drei Größenklassen eingeteilten Fahrzeugsegmente werden exogen angenommen. Das Neuzulassungsmodell basiert auf einem Gesamtbetriebskosten- und einem Logit-Modell. Die Datenbasis des Gesamtbetriebskostenmodells bildet die in Sektion 3.3.4 beschriebene Technologiedatenbank des Öko-Instituts [171]. Zudem fließen hier die nutzerspezifischen Jahresfahrleistungen ein. Die Kaufentscheidung selbst wird mittels eines Logit-Modells bestimmt, welches auf Basis der Studie *Mobilität in Deutschland 2008* [172] für die verschiedenen Antriebe parametrisiert ist. Für elektrische Antriebe werden die Parameter mit der Zeit so verändert, dass unter den Rahmenbedingungen der Verkehrsprognose 2030 die dort hinterlegten Anteile von 6 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 erzielt werden. Zusätzlich besteht die Restriktion, dass maximal acht Fahrten pro Jahr länger als die Reichweite der batterieelektrischen Pkw sein dürfen. Die Anzahl der langen Fahrten wird dazu nutzerspezifisch auf Basis einer Poisson-Verteilung bestimmt, welche mittels der Studie *Mobilität in Deutschland 2008* ermittelt wird. Die Reichweite der Fahrzeuge steigt von 150 km in 2010 auf 300 km in 2030 an und wird danach konstant gehalten. Für Lkw erfolgt die

Neuzulassungsmodellierung rein kostengetrieben mittels des Gesamtbetriebskostenansatzes. Dabei wird nach vier gewichtsabhängigen Größenklassen differenziert, für die aus der Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* [112] jeweils 50 Nutzerprofile abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Szenarien weisen mit Ausnahme der Szenarien *Basis-* und *Fokus Kraftstoffe* mit ca. 80 % einen hohen Anteil elektrifizierter Pkw im Jahr 2050 auf. Diese teilen sich ungefähr zur Hälfte in Plug-In Hybrid- und Batterie-Elektrofahrzeuge auf. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge spielen mit weniger als einer Millionen Fahrzeuge nur eine untergeordnete Rolle. Die neu zugelassenen Fahrzeuge in 2050 sind in diesen Szenarien nahezu 100 % elektrifiziert. Lkw und leichte Nutzfahrzeuge sind in 2030 weiterhin fast vollständig dieselbetrieben. Für den Bestand leichter Nutzfahrzeuge im Jahr 2050 werden in den Szenarien bis zu 50 % Batterie-Elektrofahrzeuge angegeben. Der Rest ist mit einem Dieselmotor ausgestattet. In den vier Lkw-Klassen spielen lediglich Diesel-, Plug-In- und Oberleitungsfahrzeuge eine Rolle. Je leichter die Fahrzeuge, desto höher der Anteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen. Dieser erreicht mit 30 % seinen maximalen Wert im Szenario *Effizienz Plus*. Lediglich in den Szenarien *Effizienz-* und *Effizienz-Plus* kommen oberleitungsbetriebene Sattelzugmaschinen zu fast 80 % zum Einsatz. In den anderen Szenarien bleiben Sattelzugmaschinen vollständig Dieselfahrzeuge. Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors sinkt von 2010 bis 2050 zwischen 17 % im *Basisszenario* und 51 % im *Pkw-Maut-Szenario*. Dazu trägt sowohl die Elektrifizierung der Fahrzeuge als auch der modale Shift und die geringere Verkehrsleistung im Personenverkehr bei. Während im Jahr 2030 in allen Szenarien noch mehr als 90 % der Endenergie auf fossile Kraftstoffe entfällt, sind alle Szenarien mit Ausnahme des Basisszenarios in 2050 defossilisiert. Der Bioanteil verschwindet ebenfalls fast vollständig, sodass lediglich Strom oder strombasierte Kraftstoffe eingesetzt werden. Dabei liegt der Anteil der strombasierten Kraftstoffe immer über 50 %, was auf den hohen Dieselbedarf fernab von Pkw zurückzuführen ist. Wasserstoff wird in den Szenarien nicht berücksichtigt.

Kasten et al., UBA Studie, Energieversorgung Verkehr bis 2050, 2016 [240]

Mit dem Ziel des Vergleichs verschiedener Energieträgeroptionen für den Verkehr haben Kasten et al. im Jahr 2016 vier verschiedene Szenarien veröffentlicht. Diese umfassen den Zeithorizont von 2010 bis 2050 und sind alle im Zieljahr treibhausgasneutral. Die vier betrachteten Optionen der Energieversorgung sind Power-to-Liquid-Kraftstoffe, elektrische Energie sowie die beiden Power-to-Gas-Kraftstoffe Methan und Wasserstoff. Innerhalb der Szenarien variieren lediglich die Anteile der eingesetzten Kraftstoffe sowie damit einhergehend die Anteile der Antriebstechnologien. Verkehrsleistungen, Neuzulassungszahlen, Effizienz- und Kostenentwicklungen der einzelnen Technologien sind in allen Szenarien gleich.

Die einbezogenen Bereiche der Studie umfassen die Fahrzeuganschaffung, die Energieinfrastruktur sowie die Energieversorgung. Darüber hinaus werden Verkehrsleistungen zur Berechnung der Kosten in den Bereichen benötigt. Diese sind bis 2030 der Verkehrsverflechtungsprognose [109] entnommen. Für den anschließenden Zeitraum bis 2050 wird das *Grenzenlos eMobil Szenario* [46] zugrunde gelegt. Die Anteile der Antriebstechnologien werden exogen angenommen. Dabei werden szenarienspezifisch die zuvor genannten Energieträger fokussiert. So haben im *Szenario H₂+* Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in

2050 einen Pkw-Marktanteil von 50 %. Dementgegen sind die Neuzulassungen im *E+Szenario* auf Plug-In Hybrid- und zwei Batterie-Elektrofahrzeug-Optionen mit 150 bzw. 300 km Reichweite beschränkt. Methodisch vergleichbar werden die Technologieanteile auch für die anderen Straßenverkehrsmittel exogen gesetzt. Für die Schiene wird die Stromnutzung in allen Szenarien bis auf 96 % im Jahr 2050 angehoben. Bei Schiffen ist lediglich der Kraftstoffwechsel zu Methan oder Wasserstoff angenommen. Aufgrund niedriger Motorenwirkungsgrade und Nutzraumverlusten erhöht sich dadurch der verkehrsleistungsspezifische Endenergieverbrauch. Wie im Schienenverkehr sind die Szenarien auch im Flugverkehr einheitlich. Hier wird ein Wechsel hin zu Power-to-Liquid-Kerosin unterstellt. Die Fahrzeugeigenschaften wie Verbrauchs- und Kostenentwicklungen basieren auf der Technologie-datenbank nach Hülsmann et al. [171]. Der Endenergiebedarf sinkt bis 2050 in allen Szenarien gegenüber 2010 um mehr als 15 %. Im *E+Szenario* wird aufgrund der vor allem im Straßenverkehr stärkeren Elektrifizierung sogar eine Reduktion um mehr als 35 % erzielt.

Die Energieinfrastruktur umfasst verschiedene Ladesäulen- und Tankstellenarten sowie die Verteilung der betrachteten Energieträger. Für gasförmige und flüssige Kraftstoffe orientieren sich Kasten et al. stark an der heutigen Tankstelleninfrastruktur im öffentlichen Raum oder auf Betriebshöfen. Die Anzahl elektrischer Ladepunkte wird über einen Faktor bestimmt, welcher das Verhältnis aus Fahrzeugen je Ladepunkt widerspiegelt. Dieser wird aus der elektrischen Reichweite und möglichen Ladungen pro Tag abgeleitet. Alle Power-to-X-Kraftstoffe werden vollständig als Import angenommen. Wasserstoff wird im kryogenen Zustand per Schiff nach Deutschland importiert. Aus diesem Grund wird der weitere Transport ebenfalls kryogen mittels Lkw oder Binnenschiff unterstellt. Die Möglichkeit einer gasförmigen Pipelineinfrastruktur für Wasserstoff wird in den Szenarien nicht betrachtet. Die Kosten der Energiebereitstellung der Power-to-X-Kraftstoffe bis zur Tankstelle halbieren sich in allen Fällen ungefähr von 2020 bis 2050. Für Wasserstoff ergeben sich exklusive der Tankstellen in 2050 Kosten in Höhe von 6,66 €/kg_{H₂}. Die Stromgestehungskosten in Deutschland steigen von 4,7 ct€/kWh in 2010 auf 8,3 ct€/kWh in 2050. Das Netzentgelt der Elektromobilität wird als Mittelwert steigender Netzentgelte für Haushalte und Industrie bestimmt. Insgesamt werden die Stromkosten für die Elektromobilität zuzüglich der Ladesäuleninfrastruktur zu 15,2 ct€/kWh in 2050 angenommen.

Die Szenarienergebnisse der Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum (von 2010 bis 2050) werden für jede Verkehrsart als Differenz zum Referenzszenario ausgewiesen. Diese reichen im Straßennahverkehr von +243 Milliarden € im *E+Szenario* bis zu +738 Milliarden € im *Szenario H₂+ FI+* und *CH₄+Szenario* befinden sich beide bei ca. +350 Milliarden €. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich auch für die anderen Straßenverkehrsarten. Als Grund für den Kostenunterschied ist zum einen die kostenintensivere Energiebereitstellung zu nennen. Im Fall des *H₂+Szenario* sind zum anderen vor allem die höher ausgewiesenen Fahrzeugkosten entscheidend. Im Schiffsverkehr fallen die Unterschiede der drei hier analysierten Szenarien deutlich geringer aus. Dabei ist ein leichter Vorteil für das *CH₄+* und das *H₂+Szenario* gegenüber dem *FI+Szenario* zu erkennen.

Im Jahr 2019 veröffentlichten Mottschall et al. [241] eine Aktualisierung der zuvor beschriebenen Szenarien für den Zeitraum von 2020 bis 2050. Dadurch sollen Veränderungen hinsichtlich der erwarteten Fahrzeugkosten sowie der Energiebereitstellung Rechnung getragen werden. Dazu werden die Kosten verschiedener Komponenten wie

Fahrzeuggatterie, Brennstoffzellensystem oder Gastank und die Kostenannahmen der Energiebereitstellung auf Basis aktueller Publikationen angepasst. Zudem werden jeweils zwei Sensitivitäten niedriger bzw. hoher Kostenverläufe einbezogen. Die Batteriekosten werden weiterhin nicht mehr wie von Kasten et al. zwischen Pkw und Lkw differenziert angenommen. Die Kosten der niedrigen Sensitivität für 2050 (65 €/kWh) liegen 56 % unter der Annahme von Kasten et al. [240]. Für das Brennstoffzellensystem beträgt die Differenz durch die Aktualisierung nur 12 % auf 38 €/kW in 2050. Die Importkosten der Power-to-X-Kraftstoffe reduzieren sich in 2050 um ca. 40 % gegenüber der ersten Veröffentlichung im Jahr 2016. Für Wasserstoff bedeutet dies in 2050 im Fall der niedrigen Sensitivität Importkosten in Höhe von 3,90 €/kg_{H2}. Die Stromsystemkosten erhöhen sich von 2020 bis 2040 im Vergleich zu Kasten et al. [240]. Aufgrund der sinkenden Entwicklung ab 2030 für die niedrige Sensitivität liegen diese in 2050 mit 12 ct€/kWh jedoch unter den zuvor angenommenen 15 ct€/kWh.

Insgesamt sinken die Mehrkosten aller Szenarien gegenüber dem Referenzszenario in allen Verkehrsbereichen ungeachtet der beiden Sensitivitäten. Die höchste Reduktion ergibt sich für das *E+Szenario*. Die Gesamtkostendifferenz fällt für die niedrige Sensitivität um 55 % auf +373 Milliarden € für den betrachteten Zeitraum von 2020 bis 2050. Grund dafür ist die zuvor beschriebene Entwicklung der Batteriekosten, welche die Gesamtkostendifferenz der Fahrzeuganschaffung deutlich reduziert. Die Reduktion ist so stark, dass sich für die Fahrzeuganschaffung in der niedrigen Sensitivität im Straßenverkehr sogar ein positives Verhältnis gegenüber dem Referenzszenario ergibt. Die Aktualisierung der Szenarien unterstreicht den kostenmäßigen Vorteil des *E+Szenarios* und somit des batterieelektrischen und oberleitungsgebundenen Verkehrs.

Zusammenfassung

An dieser Stelle werden die vorgestellten Szenarien zusammengefasst und anschließend kritische Aspekte hervorgehoben.

Die *eMobil* Szenarien [46] stellen vor allem mögliche Veränderungen hinsichtlich der Verkehrsnachfrage in den Vordergrund. Diese resultieren aus Verhaltensänderungen, welche sich in geänderten Mobilitätsentscheidungen widerspiegeln. Dies betrifft sowohl die Gesamtverkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr als auch den jeweiligen modalen Split.

Die *Renewability* Szenarien [47] zielen auf einen treibhausgasneutralen Verkehrssektor im Jahr 2050 ab. Dazu wird das Gesamtsystem analysiert. Die Szenarien stellen eine Kombination verschiedener Aspekte veränderter gesellschaftlicher, politischer und technologischer Rahmenbedingungen dar.

Die Analysen von Kasten et al. [240] und Mottschall et al. [241] vergleichen die Kosten verschiedener technologischer Optionen. Dabei werden im Gegensatz zu den anderen Szenarien insbesondere keine verhaltensbezogenen Aspekte einbezogen.

Allen betrachteten Szenarien ist gemein, dass die Wechselwirkung des Verkehrssektors mit anderen Sektoren nicht ausreichend abgebildet ist, obwohl die Bedeutung von Hacker et al. [46] erkannt wird. Aspekte der Netzintegration von Elektrofahrzeugen werden nicht in der nötigen Tiefe untersucht. Dazu zählt die vereinfachte Nutzung standardisierter Nachfrageprofile und die unzureichende Abbildung verschiedener Stufen des Vehicle-to-Grid.

Hinzu kommt die häufig mit 150 oder 300 km angenommene Reichweite batterieelektrischer Pkw, welche deutlich von der aktuellen Entwicklung höherer Reichweiten abweicht. Aufgrund des hohen Einflusses der Batterie auf die Fahrzeugkosten ist dies vor allem in Bezug auf die Kostenanalysen von Mottschall et al. [241] kritisch zu sehen. Zudem werden Power-to-X-Kraftstoffe in allen betrachteten Szenarien vollständig importiert. Dadurch wird die kostengünstige Nutzung von Überschussstrom zur Herstellung dieser Energieträger nicht berücksichtigt. Ferner sind die Auswirkungen erkennbarer Trends des autonomen Fahrens und der Shared Mobility in den Szenarien unterrepräsentiert. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell sowie die zugehörigen Szenarien soll eine verbesserte Analyse der genannten Punkte bieten.

3.5 Auswirkungen von Mobilitätstrends auf die Emissionsmodellierung

Bevor die Modellierung der in Abschnitt 2.3 identifizierten Trends in der Literatur analysiert wird, gibt dieser Abschnitt einen detaillierten Überblick über mögliche Auswirkungen der Trends auf die Treibhausgasemissionen und deren Modellierung. Die Auswirkungen sind nach der nachstehend erläuterten ASIF-Methodik gegliedert (vgl. Sektion 3.4.1).

3.5.1 Modaler Shift

Die Treibhausgasreduktion aufgrund einer Verlagerung der Verkehrsnachfrage von einem Verkehrsträger auf einen anderen kann infolge mehrerer Effekte entstehen. Der modale Shift beeinflusst hauptsächlich den modalen Split (S) in der ASIF-Gleichung (vgl. Gl. 3.10). Für Massenverkehrsmittel wie öffentliche Busse und Bahnen ist der verkehrsleistungsspezifische Energiebedarf (I in kWh/pkm) im Vergleich zum individuellen Pkw geringer [242]. Dies ist auf die höhere Fahrgastanzahl zurückzuführen, die im Durchschnitt die höheren fahrleistungsspezifischen Energieverbrauchswerte größerer Fahrzeuge überkompensiert. Der beschriebene Effekt könnte sich durch die Verkehrsverlagerung noch verstärken, wenn sie zu einer höheren Auslastung der bereits vorhandenen Kapazitäten führt. Im Fall der Schiene verstärkt zudem der hohe Anteil des elektrifizierten Verkehrs den positiven Effekt auf die Treibhausgasemissionen aufgrund der höheren Effizienz des Antriebsstrangs.

Abbildung 3.11 zeigt die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen verschiedener Personenverkehrsträger für Deutschland im Jahr 2018. Die Abbildung verdeutlicht den großen Unterschied von Pkw und Inlandsflügen zu anderen öffentlichen Verkehrsmitteln. Dieser Unterschied trifft qualitativ nicht nur auf Deutschland, sondern weltweit zu [243]. Zusätzlich zu den dargestellten Modi ist ein Umstieg auf langsame Verkehrsträger wie Gehen und Radfahren denkbar.

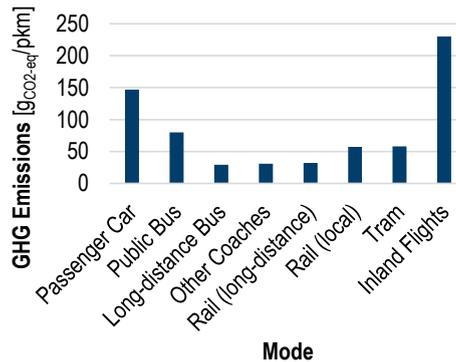


Abbildung 3.11: Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für verschiedene Personenverkehrsmodi in Deutschland 2018 (basierend auf [244]).

Die bereits heute mögliche Reduktion durch die Verkehrsverlagerung verdeutlicht den großen Einfluss dieses Trends auf die Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Er führt direkt zu einer Treibhausgasemissionsreduktion, ohne dass ein technologischer Wandel notwendig ist. Stattdessen wird die Reduktion vollständig durch das Nutzerverhalten getrieben.

3.5.2 Kraftstoffwechsel

Der Kraftstoffwechsel hat verschiedene Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor und deren Berechnung auf Basis der ASIF-Methode. Sowohl die Energieintensität (I) als auch die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs (F) werden durch den Trend verändert.

Der Wechsel von konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeugen zu elektrifizierten Fahrzeugen führt zu einer Steigerung der Effizienz des Antriebsstrangs. Je höher der Grad der Elektrifizierung, desto größer fällt die Verbesserung aus [245]. Durch den Umstieg auf Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge sinkt der spezifische Energieverbrauch ebenfalls, jedoch nicht so stark wie im Fall von Batterie-Elektrofahrzeugen. Insbesondere bei Plug-in-Hybridfahrzeugen spielt das Nutzungsmuster dabei eine wichtige Rolle. Einerseits kann es sein, dass der Nutzer aufgrund von kurzen Strecken und häufigen Ladevorgängen fast alle Fahrten im vollelektrischen Modus fährt. Auf der anderen Seite ist es aber auch möglich, dass aufgrund langer Strecken und seltener Aufladung des Fahrzeugs nur ein geringer Anteil der Gesamtfahrleistung elektrisch gefahren wird. Zudem beeinflusst die Fahrregion die Auswirkungen des Kraftstoffwechsels. Das Rekuperationspotential unterscheidet sich zwischen Stadt- und Überlandfahrten (vgl. Abbildung 4.7), weshalb die Effizienzverbesserung elektrifizierter Antriebsstränge gegenüber konventionellen regionsabhängig sind.

Neben den Änderungen der Energieintensität wird, wie bereits erwähnt, auch die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs durch die Kraftstoffverlagerung beeinflusst. Abbildung 3.12 veranschaulicht die Well-to-Wheel (WTW)-Treibhausgasintensität der Kraftstoffe, aufgeteilt in Well-to-Tank (WTT)- und Tank-to-Wheel (TTW)-Anteile [85]. Das Diagramm verdeutlicht das Reduktionspotenzial der Treibhausgasintensität durch den Kraftstoffwechsel. Zusätzlich wird deutlich, dass die Treibhausgasintensität von alternativen Kraftstoffen wie Strom und Wasserstoff stärker von der Well-to-Tank- als von der Tank-to-Wheel-Komponente abhängt. Aufgrund verschiedener möglicher Well-to-Tank-Pfade für

die verschiedenen Energieträger (Sektion 2.2.3) muss dieser Teil der Treibhausgasintensität als Spektrum statt als fester Wert verstanden werden. Insbesondere bei Biokraftstoffen unterliegt die Well-to-Tank-Treibhausgasintensität einer großen Bandbreite in Abhängigkeit vom verwendeten Produktionspfad.

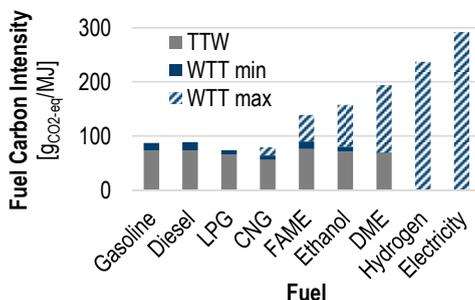


Abbildung 3.12: Spezifische Treibhausgasemissionen ausgewählter Kraftstoffe basierend auf [85].
LPG: Autogas, CNG: Erdgas, FAME: Fettsäuremethylester, DME: Dimethylether, WTT: Well-to-tank, TTW: Tank-to-wheel.

Studien unterstreichen, dass die Wahl des Verkehrsträgers auch durch Umweltaspekte beeinflusst wird [246]. Für den Fall, dass die Verkehrsmittelwahl eine solche Umweltkomponente hat, könnte der Kraftstoffwechsel zu einer Verkehrsverlagerung führen und somit auch den Modalanteil (S) beeinflussen.

Insgesamt hat diese Sektion den großen Einfluss des Trends des Kraftstoffwechsels auf die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor herausgestellt.

3.5.3 Shared Mobility

Die Auswirkungen von Shared Mobility auf die Verkehrssektormodellierung sind vielfältig und werden im Folgenden wie zuvor nach der ASIF-Methodik strukturiert dargelegt.

Die Gesamtverkehrsaktivität (A) kann durch Fahrdienste auf Abruf beeinflusst werden. Insbesondere für Menschen, die zu jung sind, um Auto zu fahren, oder ältere Menschen, die nicht mehr fahren können, ist eine solche Mobilität auf Abruf eine attraktive Option [247].

Für den Fall, dass Fahrten auch mit anderen Verkehrsmitteln durchgeführt worden wären, hätte die Shared Mobility einen Einfluss auf die Modalanteile (S). Es ist denkbar, dass Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln, privaten Pkw und anderen Verkehrsmitteln durch dieses neue Verkehrsmittel ersetzt werden könnten. Daher kann die geteilte Mobilität den in Sektion 2.3.1 beschriebenen modalen Shift beeinflussen.

Darüber hinaus wird die Energieintensität (I) durch geteilte Mobilität auf unterschiedliche Weise beeinflusst. Da die Energieintensität von Fahrzeugen unter anderem vom verwendeten Antriebsstrang abhängt, ist die Wahl der Technologie beim Kauf eines Fahrzeugs grundlegend für dessen Gesamtenergieintensität. Die Faktoren, die Kaufentscheidungen für Fahrzeuge beeinflussen, unterscheiden sich zwischen privaten und gewerblichen Käufern. Während bei gewerblichen Käufern eher die Kosten im Vordergrund stehen, können bei privaten Käufern andere Überlegungen ausschlaggebend sein. Die veränderten Anforderungen der geteilten Fahrzeuge hinsichtlich Jahresfahrleistung und Reichweite führen zu

veränderten techno-ökonomischen Eigenschaften. Dies ist ein weiterer Aspekt, der die Technologieentscheidung verändern kann.

Ein weiterer Einfluss auf die Energieintensität durch Shared Mobility ist der "Rightsizing"-Effekt. Ohne ein Fahrzeug für alle Zwecke zu besitzen, haben die Nutzer die Möglichkeit, das Fahrzeug in Bezug auf Größe und andere Eigenschaften an die Bedürfnisse der jeweiligen Fahrt anzupassen [248]. Hierbei gilt es jedoch die Gleichzeitigkeit der Nutzerbedürfnisse zu berücksichtigen, da eine Konzentration dieser einen erhöhten Fahrzeugbestand erfordern kann.

Eine andere Form der Auslastungsoptimierung wird durch Ridesharing erreicht, was zu höheren Belegungsraten führt. Diese haben nach Schäfer und Yeh [249] einen wesentlichen Einfluss auf die Energieintensität der Fahrzeuge und damit auf die Treibhausgasemissionen, die ein bestimmtes Verkehrsmittel verursacht. Zusätzlich führen höhere Belegungsraten zu weniger Staus und somit einem veränderten Energiebedarf unter der Annahme, dass durch Shared Mobility keine weitere Pkw-Aktivität erzeugt wird [250].

Im Fall von Plug-in-Elektrofahrzeugen kann die geteilte Mobilität einen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen des elektrischen Stroms (F) haben, der für das Aufladen der Batterie verwendet wird. Dieser Effekt resultiert aus dem Nutzungswechsel und den daraus resultierenden unterschiedlichen Ladezeiten, welche die Treibhausgasintensität des Netzstroms beeinflussen [251].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die geteilte Mobilität alle Komponenten der ASIF-Methodik beeinflusst. Der größte Einfluss ist im Zusammenhang mit der Energieintensität zu erwarten. Die Auswirkungen auf den modalen Anteil sollten jedoch ebenfalls nicht unterschätzt werden.

3.5.4 Automatisiertes Fahren und Vehicle-to-X

Im Folgenden werden die Einflüsse des automatisierten Fahrens auf die verschiedenen Teile der ASIF-Faktoren beschrieben. Dies erfolgt vor allem basierend auf der Arbeit von Wadud et al. [252]. Die Auswirkungen hängen vom Grad der Automatisierung ab, welcher wie in Sektion 2.3.4 erläutert in fünf Stufen eingeteilt wird. Während einige Mechanismen bereits aus Level-1-Fahrzeugen resultieren, erfordern andere einen hohen Automatisierungsgrad.

Abbildung 3.13 zeigt mögliche Veränderungen des Pkw-Energieverbrauchs aufgrund von Effekten der Fahrzeugautomatisierung nach Wadud et al. [252]. Es überwiegen Mechanismen, die zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs führen. Es wird jedoch ersichtlich, dass die Veränderungen durch Einzeleffekte sehr unterschiedlich ausfallen können. Die Gesamtwirkung hängt also stark von der Art der Einzeleffekte ab, wie die Szenarien von Wadud et al. untermauern. Die Ergebnisse der Gesamtszenarien reichen von einer 40 %igen Reduktion bis zu einer 100 %igen Erhöhung des Gesamtenergiebedarfs im Straßenverkehr [252].

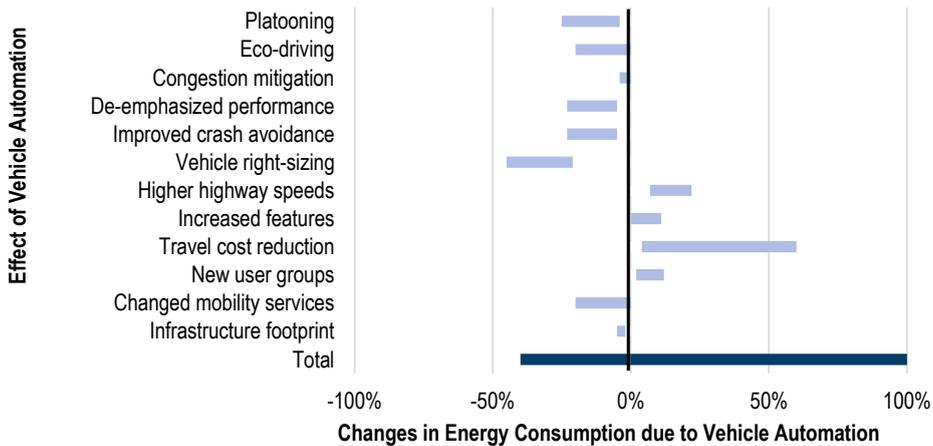


Abbildung 3.13: Veränderungen des Pkw-Energiebedarfs aufgrund automatisierten Fahrens nach [252].

Insgesamt beeinflusst automatisiertes Fahren alle Teile von ASIF, was dessen hohe Bedeutung für die zukünftigen Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors unterstreicht. Da die gesamte Transportaktivität (A) teilweise von den Kosten abhängt, würde eine Reduktion dieser zu einer steigenden Nachfrage führen. Zusätzlich würde die Veränderung der Kosten die Verkehrsmittelwahl und somit die modalen Anteile (S) beeinflussen. Ein beispielhafter Mechanismus, der sich auf die Energieintensität (I) auswirkt, ist das sogenannte Platooning. Insbesondere Sattelzugmaschinen fahren mit nahezu konstanter Geschwindigkeit auf Autobahnen und eignen sich für Platooning. Dies ist der Grund für die Erprobungsaktivitäten der Fahrzeughersteller [253], [254]. Nach Wadud et al. wird die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs (F) durch drei Effekte beeinflusst, die potenziell die Technologieentscheidungen der Fahrzeugkäufer verändern [252]. Ein geringerer Komfortverlust durch erhöhte Ladezeiten, eine geringere Reichweitenangst und die Reduktion der Gesamtbetriebskosten durch höhere Fahrleistungen.

In diesem Abschnitt wurden die vielfältigen Auswirkungen der betrachteten Mobilitätstrends auf die verschiedenen Faktoren der ASIF-Methode und damit auf die gesamten Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors beschrieben. Während die Verkehrsverlagerung in erster Linie den Modalanteil (S) beeinflusst, sind die Auswirkungen des Kraftstoffwechsels eher auf die Energieintensität (I) sowie die Treibhausgasintensität (F) des Kraftstoffs bezogen. Es wird auch herausgestellt, dass die Trends nicht isoliert, sondern in aggregierter Form betrachtet werden sollten, da sie sich gegenseitig beeinflussen können. Insbesondere Shared Mobility und autonomes Fahren in Kombination können die Modal- und Kraftstoffwahl grundsätzlich beeinflussen.

3.6 Einbezug der Mobilitätstrends in Modellen

In diesem Abschnitt wird eine Analyse der Modellierung der Trends in den in Abschnitt 3.4 ausgewählten Verkehrssektormodellen durchgeführt. Dabei wird analysiert, inwieweit die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Effekte in den Verkehrssektormodellen untersucht werden.

3.6.1 Modaler Shift

Die Verkehrsverlagerung wird in den Verkehrssektormodellen auf unterschiedliche Weise modelliert. Diese werden in dieser Sektion beschrieben. Eine wichtige Voraussetzung, um die Auswirkungen von Verkehrsverlagerungen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors zu untersuchen, ist der Einbezug aller relevanten Verkehrsmittel (vgl. Tabelle 3.1). Die meisten der untersuchten Modelle erfüllen diese Anforderung, wie in Sektion 3.4.4 herausgestellt.

Eine einfache Möglichkeit, den modalen Shift einzubeziehen, besteht darin, sie exogen vorzugeben. In einem solchen Fall wird die Verlagerung von einem Verkehrsmittel auf ein anderes vom Anwender als exogener prozentualer Parameter definiert [224].

Eine andere Methode zur Modellierung der Verkehrsmittelverlagerung erfolgt mittels Elastizitäten. Brand et al. berechnen die Verkehrsnachfrage T nach Gl. 3.12 [203]:

$$\frac{T_n}{T_{n-1}} = \frac{BIP_n}{BIP_{n-1}}^{E_{GDP}} \cdot \frac{NHH_n}{NHH_{n-1}}^{E_{NHH}} \cdot \frac{RC_n}{RC_{n-1}}^{E_{RC}} \quad \text{Gl. 3.12}$$

Die Verkehrsnachfrage im Jahr n ist abhängig vom Bruttoinlandsprodukt (BIP), der Anzahl der Haushalte (NHH) und einem Faktor für den relativen Fahrzeugbesitz sowie den Betriebskosten für die Nachfragesegmente (RC). Der Zusammenhang zwischen der Änderung der Verkehrsnachfrage und der Änderung jedes dieser Parameter wird mit Hilfe von Elastizitäten (E_x) berechnet. Die Elastizität (E_{RC}) beinhaltet die Verlagerung von einem Verkehrsmittel auf ein anderes. Wenn sich die Kosten für die Bereitstellung der Verkehrsleistung relativ zueinander ändern, findet die Verkehrsverlagerung statt. Daher ist die Verkehrsverlagerung insbesondere von monetären Faktoren abhängig, wenn die Methodik nach Brand et al. [203] verwendet wird.

Die gebräuchlichste Methode zur Modellierung der Verkehrsmittelwahl und damit auch der Verkehrsverlagerung ist die mit Hilfe eines Discrete-Choice-Modells (vgl. Abschnitt 3.1). Zumeist wird die Auswahlwahrscheinlichkeit mittels des multinomialen Logitmodells (MNL) bestimmt, welches eine Art der Discrete Choice Modelle ist. Mathematisch wird die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Modus i mittels der folgenden Gleichung ausgedrückt [228]:

$$Share_i = \frac{\exp(\lambda \cdot Cost_i)}{\sum_i \exp(\lambda \cdot Cost_i)} \quad \text{Gl. 3.13}$$

Dabei ist λ ein Faktor, der die Sensitivität des modalen Anteils von den verschiedenen Kosten darstellt [228]. Die Grundform der Gleichung des Multinomial-Logit-Modells ist stets gleich. Der Anteil kann auf einer aggregierten geografischen Ebene [206] oder für jede der betrachteten Regionen berechnet werden [228]. Darüber hinaus berücksichtigen Mittal et al. in ihrer Verkehrsmittelwahl Reiseentfernungskategorien [229].

Der Hauptunterschied zwischen den Verkehrssektormodellen, welche das Multinomial-Logit-Modell zur Verkehrsmittelwahl nutzen, ergibt sich aus den abweichenden Faktoren C_x , die in die betrachteten Gesamtkosten eingehen. Außerdem können diese Kostenarten durch abweichende α_x gewichtet werden:

$$Cost = \sum_x \alpha_x \cdot C_x \quad \text{Gl. 3.14}$$

Die Reisezeit ist neben den Reisekosten der wichtigste Einflussfaktor [255]. Daher wird sie in den meisten Modellen berücksichtigt.

Mittal et al. berechnen die Kosten eines Verkehrsmittels aus den gewichteten Preisen der verschiedenen verwendeten Antriebstechnologien und den monetären Kosten der Zeit. Diese Reisezeitkosten sind abhängig vom Bruttoinlandsprodukt, der Bevölkerung, der Jahresarbeitszeit sowie der Tür-zu-Tür-Reisegeschwindigkeit der untersuchten Verkehrsträger [229].

In ähnlicher Weise beziehen Wang et al. die Reisezeitkosten ein, die sie mit Hilfe des Verhältnisses von Stundeneinkommen und Fahrzeuggeschwindigkeit ermitteln. Darüber hinaus machen sie von der Möglichkeit Gebrauch, die Faktoren bei der Berechnung der Gesamtkosten zu gewichten. So können z. B. die Fahrzeitkosten einen geringeren Einfluss als die Kraftstoffkosten haben. Zusätzlich trennen Wang et al. die Kraftstoffkosten von anderen fahrzeugbezogenen Kosten, wie dem Kaufpreis, den Wartungskosten und den Steuern. Somit kann der Einfluss der Kraftstoffkosten auf die Verkehrsmittelwahl hervorgehoben werden [206]. Dies könnte zu einer anderen Verkehrsmittelwahl führen, wenn sich der Antriebsstrang und damit die Kraftstoffkosten eines Verkehrsmittels ändern.

Neben den Kosten der Fahrzeuge und der von den Passagieren aufgewendeten Reisezeit sind die Infrastrukturkosten ein weiterer Kostenfaktor, der die gesellschaftlichen Kosten des Verkehrs beeinflusst. Girod et al. betrachten diese Kosten als die nicht-energetischen Kosten der verschiedenen Verkehrsträger, wenn die Kosten nicht vom Staat subventioniert werden. Ansonsten haben diese Kosten keinen Einfluss auf das Reiseverhalten und sollten daher nicht berücksichtigt werden [228].

Ein weiterer Unterschied im TRAVEL-Modell von Girod et al. im Vergleich zu anderen Modellen ist die endogene Berechnung der Gewichtung der Zeitkosten. Die Analyse von Schäfer et al. unterstreicht die zeitliche Konstanz der täglichen Reisezeit in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Entwicklungsniveaus [256]. Daher beziehen Girod et al. dieses Reisezeitbudget (travel time budget) als zusätzliche Randbedingung ein. Wenn das Reisezeitbudget überschritten wird, wird das Gewicht der Reisezeitkosten erhöht, bis die Bedingung erfüllt ist [228].

Die Analyse zeigt, wie die Verlagerungseffekte in der Literatur modelliert werden. Die am häufigsten verwendeten Discrete-Choice-Modelle erlauben die Berücksichtigung verschiedener Parameter, die die Modalwahl beeinflussen.

3.6.2 Kraftstoffwechsel

Die in Sektion 3.5.2 identifizierten Effekte des Kraftstoffwechsels sind vielfältig. Deren Modellierung wird in dieser Sektion analysiert und beschrieben. Grundlage für die Modellierung des Kraftstoffwechsels ist die Einbeziehung der wichtigsten im untersuchten Zeithorizont verfügbaren Antriebsarten und Kraftstoffe. Wie in Sektion 3.4.4 festgestellt, wird diese Voraussetzung von den meisten Modellen erfüllt. Lediglich manche Antriebsalternativen wie z. B. Range-Extender-Elektrofahrzeuge sind häufig nicht repräsentiert, obwohl sie im zukünftigen Verkehrssektor nicht unerhebliche Anteile erreichen können. Gleiches gilt für synthetische Kraftstoffe, denen eine große Rolle hinsichtlich der Dekarbonisierung von Schiff- und Luftfahrt zugeteilt wird [257].

In den meisten der analysierten Modelle ist der Kraftstoffverbrauch der betrachteten Verkehrsträger und Antriebsarten eine exogene Annahme. Andere führen Fahrzyklusberechnungen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs durch [200], [201]. Im Gegensatz zu anderen Modellen nehmen Belmonte et al. einen, mit Ausnahme von Batterie-Elektrofahrzeugen, über der Zeit konstanten Kraftstoffverbrauch an [201]. Daher vernachlässigen sie technologische Verbesserungen der Fahrzeuge (Aerodynamik oder Massenreduktion) und Antriebsstränge.

Um regionale Effekte auf den Kraftstoffverbrauch zu berücksichtigen, unterscheiden sechs der Modelle zwischen typischen Regionstypen, z. B. städtischen und ländlichen Gebieten. Im Rahmen der Modellierung wird dies durch exogene Annahmen erreicht [47]. Siskos et al. berücksichtigen unterschiedliche Geschwindigkeitsbänder, wie in Abbildung 3.14 dargestellt [258]. Der Gesamtkraftstoffverbrauch wird durch Aktivitätsanteile für diese definierten Geschwindigkeitsbänder und die entsprechenden spezifischen Kraftstoffverbrauchswerte bestimmt. Die Aktivitätsanteile werden in Abhängigkeit vom untersuchten geografischen Gebiet exogen angenommen. Durch die Änderung dieser Anteile kann auch die Auswirkung von zunehmender oder abnehmender Infrastrukturüberlastung auf den Kraftstoffverbrauch berücksichtigt werden.

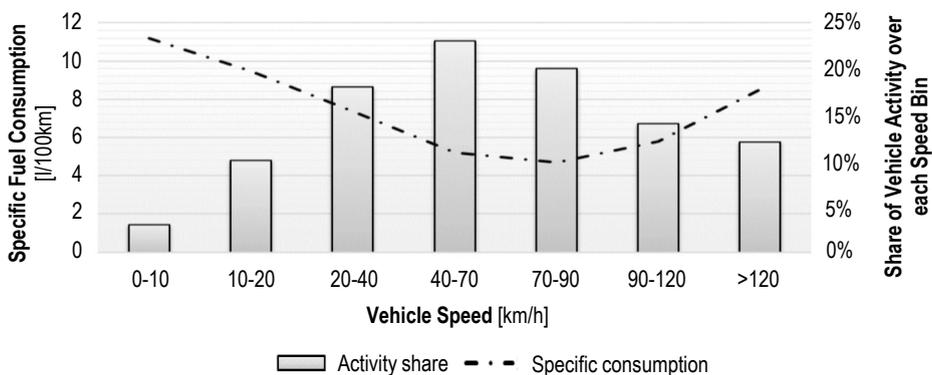


Abbildung 3.14: Geschwindigkeitsabhängiger Kraftstoffbedarf in *TRIMODE* [258].

Belmonte et al. gewichten unterschiedliche *ARTEMIS*-Fahrzyklen in Abhängigkeit von der Fahrtdauer. Während bei Kurzstrecken der Kraftstoffverbrauch durch den Stadtzyklus dominiert wird, enthalten längere Strecken einen größeren Anteil des Autobahnzyklus [201]. Darüber hinaus berücksichtigen sie unterschiedliche Anteile des elektrischen Fahrens für Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit von der Reiselänge. Je länger die Fahrt, desto geringer ist der Anteil des elektrischen Fahrens aufgrund geringer Batteriekapazitäten und damit einhergehend geringer elektrischer Reichweiten von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen [200].

Da die meisten Modelle nicht nach geografischen Gebieten differenzieren, vernachlässigen sie die Unterschiede im Verbrauchsverhalten der Antriebsarchitekturen und die daraus resultierenden abweichenden Einsatzgebiete.

Neben der oben skizzierten Modellierung der Energieintensität (I) ist die Modellierung der Treibhausgasintensität (F) ein weiterer wichtiger Punkt zur Analyse des Kraftstoffwechsels. Fast alle Modelle verwenden exogen bestimmte Emissionsfaktoren für die untersuchten

Kraftstoffe. In den meisten Fällen werden diese Emissionsfaktoren in Well-to-Tank- und Tank-to-Wheel-Segmente aufgeteilt. Die Emissionen konventioneller Kraftstoffe werden durch den Tank-to-Wheel-Bereich dominiert. Die Well-to-Tank-Produktionsalternativen haben hier keine großen Auswirkungen auf die gesamten Treibhausgasemissionen (vgl. Abbildung 3.12). Daher entsprechen die festen, zeitunabhängigen Emissionsfaktoren dem Emissionsverhalten der konventionellen Kraftstoffe.

Bei alternativen Kraftstoffen können die Well-to-Tank-Emissionen variieren, vor allem in Abhängigkeit von der verwendeten Kraftstoffherstellungstechnologie [85]. Daher müssen die Anteile der verschiedenen Produktionstechnologien bestimmt werden. Dies kann entweder exogen oder endogen erfolgen. Beispielsweise gehen Belmonte et al. davon aus, dass der Anteil der Elektrolyse für die globale Wasserstoffproduktion je nach gewähltem Szenario von 10 % im Jahr 2020 auf 20-70 % im Jahr 2050 ansteigt [201]. Im Gegensatz dazu modellieren Yabe et al. die elektrische Energieversorgung und berechnen so die Technologieanteile sowie die entsprechenden Well-to-Tank-Kohlendioxidemissionen endogen [216].

Bei einer Vermischung der Produktionspfade können die Emissionen auch zeitabhängig sein, was insbesondere beim elektrischen Laden von Bedeutung ist (vgl. Sektion 3.5.2). Pichlmaier et al. verwenden daher stündliche Well-to-Tank-Emissionsfaktoren für Strom, die durch ein Energieversorgungsmodell berechnet werden. Ihre Ergebnisse weisen in jedem untersuchten Jahr höhere mittlere Emissionsfaktoren für getankte elektrische Energie im Vergleich zum Gesamtdurchschnitt auf. Die größte Differenz von +10 $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$ tritt im Jahr 2035 auf [231]. Daher sollten Stromangebot und -nachfrage zeitlich aufgelöst werden, um die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs korrekt zu modellieren.

Der Gesamteffekt des Kraftstoffwechsels auf die Emissionen des Verkehrssektors hängt davon ab, wie die Technologie von den Entscheidungsträgern angenommen wird. Es geht um die Frage, warum die Käufer eine bestimmte Technologie wählen. Daher wird im Folgenden die Modellierung der Technologiewahl analysiert. Abbildung 3.15 gibt einen Überblick, welche Kriterien in den untersuchten Modellen verwendet werden.

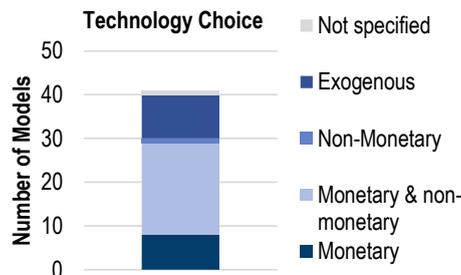


Abbildung 3.15: Kriterien der Antriebswahl in den untersuchten Verkehrssektormodellen.

Zunächst ist zwischen der exogenen und endogenen Modellierung von Technologieanteilen für die Verkehrsträger zu unterscheiden. In zehn der untersuchten Modelle werden die Anteile exogen angenommen. Diese Modelle berücksichtigen nicht endogen das Nutzerverhalten oder Entscheidungsprozesse.

Weitere acht Modelle führen einen monetären Vergleich der Antriebstechnologien durch. In diesen Fällen wird die Entscheidung meist mit Hilfe einer Analyse der Gesamtbetriebskosten getroffen. Dabei können, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, verschiedene Fahrzeugkostenarten berücksichtigt werden. Beispielsweise verwenden Pichlmaier et al. die Systemsicht und vernachlässigen damit die steuerlichen Vorteile verschiedener Antriebstechnologien [231]. Yabe et al. verwenden zwar ebenfalls nur monetäre Kriterien für die Technologiewahl, jedoch unterscheidet sich ihr Konzept von den oben genannten [216]. Da ihr Modell auch die Energieversorgung umfasst, werden auch diese Kosten in die Gesamtoptimierungsfunktion einbezogen. Somit werden die Auswirkungen des Verkehrssektors auf den Stromsektor bei der Wahl der Antriebstechnologie berücksichtigt.

Analysen stellen heraus, dass Fahrzeugkaufentscheidungen in der Realität nicht nur nach wirtschaftlichen (monetären) Kriterien getroffen werden, sondern auch von anderen Faktoren beeinflusst werden [200]. Die meisten der untersuchten Modelle beinhalten, wie in Abbildung 3.15 veranschaulicht, neben den zuvor beschriebenen monetären auch nicht-monetäre Kriterien, um die Technologieentscheidungen realistischer zu modellieren. In solchen Fällen werden Discrete-Choice-Modelle verwendet (vgl. Abschnitt 3.1). Die verschiedenen Eigenschaften der Antriebstechnologien werden innerhalb der Nutzenfunktion gewichtet, um den unterschiedlichen Einfluss dieser Faktoren auf die Kaufentscheidung zu modellieren. Häufig berücksichtigte nicht-monetäre Faktoren sind die Reichweitenangst und die Verfügbarkeit von Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur, die bei alternativen Antriebstechnologien wie Brennstoffzellen- und Batterie-Elektrofahrzeugen eine wichtige Rolle spielt [259]. Harrison et al. nutzen einen weiterentwickelten Discrete-Choice-Modellierungsansatz [218]. Die ermittelte Nutzenfunktion, einschließlich aller Kriterien, wird mit einem Faktor namens Bereitschaft multipliziert. Mit Hilfe dieses Faktors berücksichtigen Harrison et al. Marketing und Mundpropaganda, die die Bekanntheit von neuen Technologien bei potenziellen Käufern erhöhen. Ist dieser Faktor zu niedrig, wird die Technologie nicht im Choice-Set der Käufer berücksichtigt [218].

Belmonte et al. sind die einzigen Forscher in der hier analysierten Auswahl, die die Technologiewahl endogen modellieren und dabei ausschließlich nicht-monetäre Kriterien nutzen. Die Zielfunktion in ihrem Optimierungsmodell beinhaltet die LCA-Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors. Ihre Untersuchungen konzentrieren sich folglich auf das Gesamtsystem mit den minimal erreichbaren Treibhausgasemissionen [201].

In knapp einem Drittel der untersuchten Modelle werden verschiedene Käufertypen aufgrund unterschiedlicher Nutzungsmuster und Prioritäten der Entscheidungsträger kategorisiert, vergleichbar zu den Nutzergruppen innerhalb der Verkehrsnachfragemodellierung (vgl. Abschnitt 3.1). Eine geeignete Möglichkeit zur Einteilung von Nutzergruppen nach mehreren Merkmalen bieten Clustering-Algorithmen, welche mittels Softwarepaketen frei verfügbar sind [260]. Die Einteilungsmerkmale können auf der Basis verschiedener sozioökonomischer Parameter definiert werden. Brooker et al. [209] und Siskos et al. [258] verwenden das Einkommen als Klassifikationskriterium. Manley et al. klassifizieren hingegen nach den Wohnformen der Käufer [208]. Trost differenziert stattdessen zwischen privaten und gewerblichen Käufern [200]. Darüber hinaus bezieht er eine differenzierte Zahlungsbereitschaft ein, um in Anlehnung an Rogers [261] unterschiedliche Adoptergruppen zu berücksichtigen. Somit wird nicht immer der günstigste Antrieb, sondern

die Alternative mit den geringsten Treibhausgasemissionen innerhalb einer Kostenspanne gewählt.

Wenn der Kraftstoffwechsel nicht nur in einem Jahr, sondern über mehrere Jahre exogen modelliert wird, können die Anteile in Anlehnung an Markthochlaufmodelle wie das S-Kurven-Modell bestimmt werden [261]. Im *TRAN-Modell* werden abhängig von den Jahren im Markt maximale Durchdringungsgrade als obere Grenze gesetzt [197].

Die Analysen zeigen, dass die vielfältigen Auswirkungen des Kraftstoffwechsels in den untersuchten Modellen sehr unterschiedlich berücksichtigt werden. So reicht die Modellierung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen von exogenen Annahmen über detaillierte Nutzergruppen bis hin zu geschwindigkeitsabhängiger Modellierung. Innerhalb der analysierten Modelle wird die Technologiewahl sowohl durch monetäre als auch nicht-monetäre Kriterien beeinflusst.

3.6.3 Shared Mobility und automatisiertes Fahren

Aufgrund der großen Wechselwirkungen und der wahrscheinlichen Kombination von Shared Mobility und automatisiertem Fahren in der Zukunft werden diese beiden Trends in der Literatur zur Verkehrssektormodellierung oft zusammen diskutiert. Daher wird im Folgenden ebenfalls eine gemeinsame Analyse bezüglich der Modellierung dieser Trends durchgeführt.

Es ist festzustellen, dass die beiden Trends in den Verkehrssektormodellen weitgehend unberücksichtigt bleiben. Adolf et al. gehen in ihrem Modell von einer geringeren Motorisierungsrate bei jüngeren Menschen infolge von Carsharing aus [195]. Hacker et al. treffen ähnliche exogene Annahmen zur Verkehrsnachfrage aufgrund von Carsharing und autonomem Fahren [46]. In ihrem Szenario *Grenzenlos eMobil* erhöht sich die durchschnittliche Weglänge durch autonomes Fahren um 10 %, die der Arbeitswege sogar um 20 %. In einigen Fällen sind die Effekte konträr zueinander gewählt. Während der Besetzungsgrad im Szenario *Grenzenlos eMobil* aufgrund der zunehmenden Leerfahrten durch autonome Fahrzeuge von 1,47 auf 1,4 sinkt, führt Carsharing im Szenario *Regional eMobil* zu einem Anstieg des Besetzungsgrades auf 1,6 [46]. Dies untermauert die große Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Auswirkungen der beiden Trends.

Zimmer et al. diskutieren den Einfluss des autonomen Fahrens, beziehen ihn aber nicht in ihre Modellierung ein. Im Gegensatz dazu modellieren sie Carsharing als eigenen alternativen Verkehrsträger [47]. Aufgrund mangelnder Daten basieren die Parameter für die Verkehrsmittelwahl auf einer Kombination aus Werten für das Auto und den öffentlichen Verkehr. Außerdem wird angenommen, dass die Verfügbarkeit des Carsharing-Modus vom modellierten Jahr und Regionstyp abhängig ist. Die volle Verfügbarkeit dieses neuen Modus wird in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern im Jahr 2030 und in solchen mit mehr als 50.000 Einwohnern im Jahr 2050 erreicht. Im Vergleich zu den zuvor genannten Annahmen von Adolf et al. sinkt die Motorisierungsrate in den *Renewability*-Szenarien durch Carsharing. Der Unterschied der beiden Ansätze besteht darin, dass sich diese nicht in Abhängigkeit von der Altersgruppe, sondern in Abhängigkeit von der Art der Region ändert.

Xie und Lin erweitern das *MA3T-Modell*, um die Auswirkungen von geteilten und autonomen Fahrzeugen auf verschiedene verkehrsbezogene Forschungsfragen zu untersuchen, wie z. B. die zukünftigen Anteile von Antrieben [207]. Daher verwenden sie eine ähnliche

Methodik, wie sie zuvor für Zimmer et al. beschrieben worden ist. Um automatisierte Fahrzeuge und geteilte Mobilität zu berücksichtigen, umfasst ein geschachteltes multinomiales Logit-Modell vier Pkw-Modi, wie in Abbildung 3.16 dargestellt.

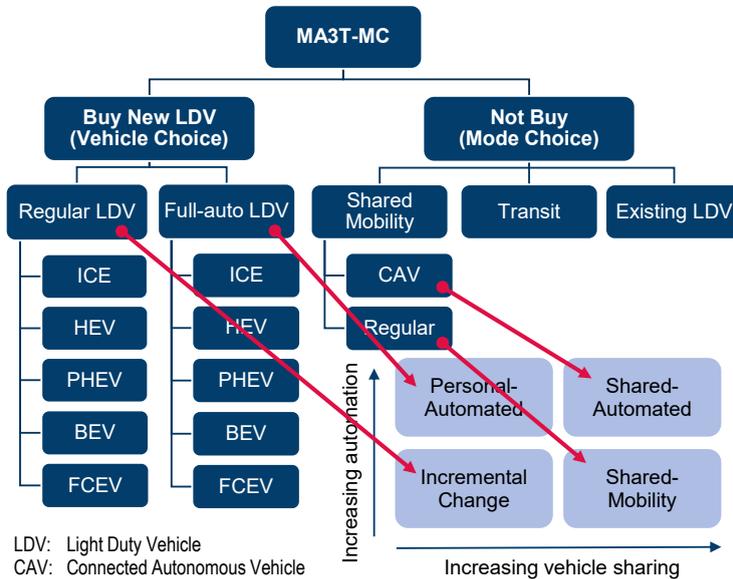


Abbildung 3.16: Neue Modi zur Berücksichtigung der Automatisierung und Shared Mobility im Modell MA3T-MC [207]. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

Während Zimmer et al. [47] nur einen alternativen Modus für Carsharing vorstellen, repräsentieren die vier Alternativen von Xie und Lin [207] die möglichen Kombinationen von automatisierten oder menschlich geführten und persönlichen oder geteilten Fahrzeugen. Sie berücksichtigen also nicht nur Carsharing, sondern auch die Automatisierung von Fahrzeugen sowie die Kombination der beiden Möglichkeiten. Neben der Betrachtung der Modalwahl berücksichtigen Xie und Lin auch die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Kraftstoffverbrauch und damit die Energieintensität (I) mit Hilfe der folgenden Gleichung [207]:

$$Consumption_{CAV} = Consumption_{HV} \cdot (1 - Reduction_{CAV}) + AddLoad_{CAV} \quad \text{Gl. 3.15}$$

Der Kraftstoffverbrauch von vernetzten, autonomen Fahrzeugen (CAV) ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch des vom Menschen gesteuerten Fahrzeugs (HV), einer angenommenen relativen Reduktion und einer zusätzlichen elektrischen Belastung durch die Komponenten des autonomen Systems. Angaben zur Reduktion infolge der Automatisierung werden keine gemacht.

Die Ergebnisse von Xie und Lin zeigen einige Effekte der Fahrzeugautomatisierung und Shared Mobility auf. Zunächst steigt die Anzahl der verkauften Fahrzeuge im Jahr 2030 aufgrund der erheblichen Vorteile disruptiv an. Außerdem ist der Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen aufgrund der Fahrzeugautomatisierung höher. Er ist jedoch abhängig vom

zusätzlichen elektrischen Energiebedarf der Automatisierungskomponenten. Höhere elektrische Energienachfragen durch Sensoren führen zu höheren Plug-In Hybrid- und niedrigeren Batterie-Elektrofahrzeug-Anteilen. [207]

Insgesamt berücksichtigen Adolf et al. [195], Hacker et al. [46] und Zimmer et al. [47] nur die Auswirkungen von Carsharing auf die Verkehrsnachfrage. Xie und Lin beziehen die Auswirkungen von Fahrzeugautomatisierung und Shared Mobility detaillierter ein [207]. Die Ergebnisse des *MA3T-MC-Modells* unterstreichen die hohe Bedeutung dessen. Keines der untersuchten Modelle berücksichtigt Fahrzeugautomatisierung für den Güterverkehr, obwohl insbesondere Platooning in der Lage ist, den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen um mehr als 10 % zu reduzieren [253].

3.6.4 Vergleich der Trends

In den vorherigen Sektionen werden die Mobilitätstrends getrennt analysiert. Nun werden die Wechselwirkungen, sowie deren Berücksichtigung in den untersuchten Modellen, verglichen.

Abbildung 3.17 stellt den Einfluss der analysierten Mobilitätstrends auf die verschiedenen Teile der ASIF-Methode sowie untereinander dar (vgl. Abschnitt 3.5). Darüber hinaus enthält die Abbildung Informationen über die Modellierungsqualität der aktuellen Modelle in Bezug auf die visualisierten Wechselwirkungen.

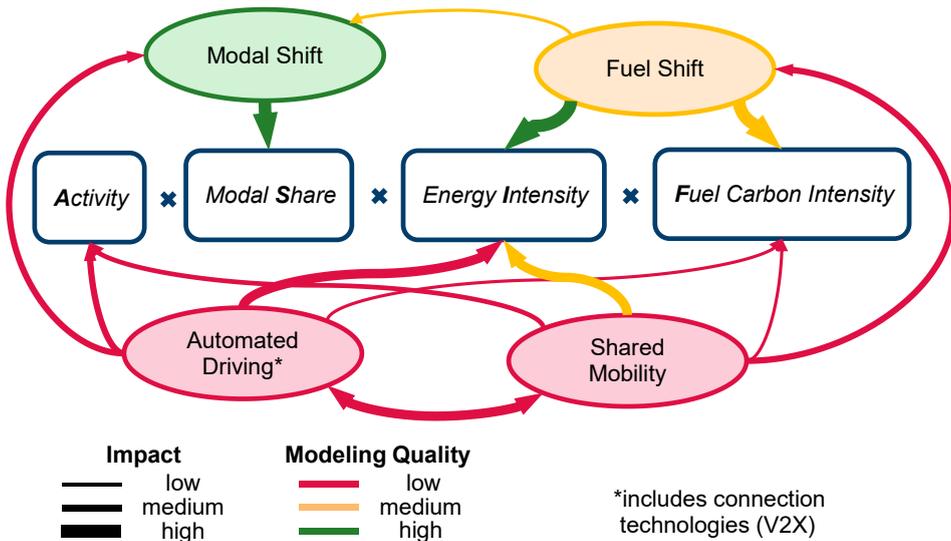


Abbildung 3.17: Einfluss der Mobilitätstrends untereinander sowie auf die Teile der ASIF-Methode sowie deren Modellierungsqualität in Verkehrssektormodellen. V2X: Vehicle-to-X.

Die Unterschiede zwischen den Mobilitätstrends werden direkt sichtbar. Die Einflüsse des modalen Shifts und des Kraftstoffwechsels wirken sich insbesondere auf Bestandteile der ASIF-Gleichung aus. Effekte wie die Veränderung des modalen Splits durch die Verkehrsverlagerung sind in den meisten der untersuchten Modelle gut nachvollziehbar modelliert. Das Gleiche gilt für die unterschiedlichen Energieintensitäten aufgrund des Kraftstoffwechsels. Dennoch verwenden die meisten Modelle statische Emissionsfaktoren für

Energieträger, die mögliche Unterschiede nicht berücksichtigen, wie z. B. die Differenz zwischen der durchschnittlichen geladenen Elektrizität und der durchschnittlichen Gesamtstromerzeugung. Daher sollten die Details weiter verbessert werden, um die Gesamteffekte korrekt zu modellieren.

Im Gegensatz zum modalen Shift und dem Kraftstoffwechsel sind die Einflüsse der Fahrzeugautomatisierung und der Shared Mobility vielfältig. Die Trends implizieren nicht nur Änderungen in den ASIF-Faktoren, sondern auch Auswirkungen auf die anderen Trends. Daher haben die beiden Trends Auswirkungen auf fast alle Teile der Treibhausgasemissionsberechnungen des Verkehrssektors zur Folge. Die meisten Wechselwirkungen haben jedoch einen geringeren Einfluss im Vergleich zu den Auswirkungen des modalen Shifts und des Kraftstoffwechsels. Darüber hinaus sind die Effekte oft mit großen Unsicherheiten verbunden, wie die große Bandbreite der Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Treibhausgasemissionen nach Wadud et al. zeigt [252]. Dennoch sollten die Effekte nicht außer Acht gelassen werden.

Da die meisten der analysierten Modelle die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung und Shared Mobility überhaupt nicht berücksichtigen, ist die Modellierungsqualität dieser Trends sehr gering. Nur wenige Modelle berücksichtigen Shared Mobility und die veränderten Besetzungsgrade in ihren Modellen. Die Ergebnisse des *MA3T-MC-Modells* sind jedoch ein ausreichender Beleg für die Bedeutung der Schließung der Modellierungslücke, die in diesem Forschungsfeld zu sehen ist.

3.7 Erkenntnisse für diese Arbeit

Der Literaturüberblick stellt die große Lücke bei der Modellierung der identifizierten Mobilitätstrends heraus. Während der modale Shift und der Kraftstoffwechsel meist berücksichtigt werden, sind Carsharing und Fahrzeugautomatisierung unterrepräsentiert. Diese Lücke sollte in Zukunft geschlossen werden, um die interdependenten Effekte von Mobilitätstrends bewerten und quantitative Zahlen für den zukünftigen Energiebedarf im Verkehr oder andere verkehrsbezogene Themen projizieren zu können. Zudem gilt es die verstärkten Wechselwirkungen insbesondere mit dem Energiesektor stärker in die Modelle einzubeziehen.

Um die Auswirkungen des automatisierten Fahrens und der geteilten Mobilität in die Modelle einzubeziehen, ist eine ausreichende Modellierungstiefe in Bezug auf alle Teile von ASIF erforderlich. Als grundlegende Erweiterung ist es ratsam, neue Modi zu definieren, wie von Xie und Lin [207], die die verschiedenen möglichen Kombinationen von automatisierter und geteilter Mobilität darstellen.

Um die veränderte Aktivität sowie den modalen Split zu bestimmen, ist der Elastizitätsansatz unzureichend. Hier muss auch das Verhalten der Menschen berücksichtigt werden, weshalb eine Angleichung der Verkehrssektormodelle an agentenbasierte Modelle sinnvoll erscheint. Neben der modellinternen Erweiterung ist die Modellkopplung ein geeigneter Ansatz.

Die Einführung neuer Verkehrsträger, wie oben erwähnt, vereinfacht die Integration der Auswirkungen des automatisierten Fahrens und der geteilten Mobilität auf die Energie- und Treibhausgasintensität. Angepasste Fahrzyklussimulationen sind ein geeignetes Mittel, um die Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs durch die Automatisierung zu ermitteln. Im

Zusammenhang mit der geteilten Mobilität ist der Anteil der Leerfahrten oder die Auslastung der Fahrzeuge einzubeziehen. Auch hier sind weitere lokale Analysen mit ortsbezogenen Modellen (agentenbasierte Modelle und Verkehrsnetzmodelle) hilfreich.

Da sich die Auswirkungen auf die Treibhausgasintensität der Kraftstoffe aus deren Zeitabhängigkeit ergeben, müssen entweder Zeitreihen anstelle konstanter Werte verwendet werden, oder die Modellierung des Kraftwerksparks, wie von Yabe et al. [216] vorgenommen, in das Modell einbezogen werden. Insbesondere im Fall von Vehicle-to-Grid ist es empfehlenswert, den Stromsektor detaillierter abzubilden. Es besteht auch die Möglichkeit, Modelle an Integrated Assessment Modelle zu koppeln, die alle Sektoren umfassen und Informationen über den Kraftwerkspark oder zeitabhängige Emissionsfaktoren der Kraftstoffe liefern.

Abbildung 3.18 fasst die aus den Analysen abgeleiteten potenziellen Anpassungen der Verkehrssektormodelle zusammen. Dazu gehören erstens modellinterne Anpassungen, wie die Definition neuer Verkehrsträger. Zweitens, die Erweiterung des Modells und die Verwendung von Modellierungstechniken aus anderen Modellklassen (ortsbezogene und Integrated Assessment Modelle). Hierzu zählen z. B. die Modellierung verschiedener Nutzergruppen oder des Stromsektors, welche in der Abbildung durch die sich überschneidenden Bereiche veranschaulicht sind. Schließlich ist die Modellkopplung die letzte Verbesserungsmöglichkeit, welche aus den Analysen abgeleitet wird.

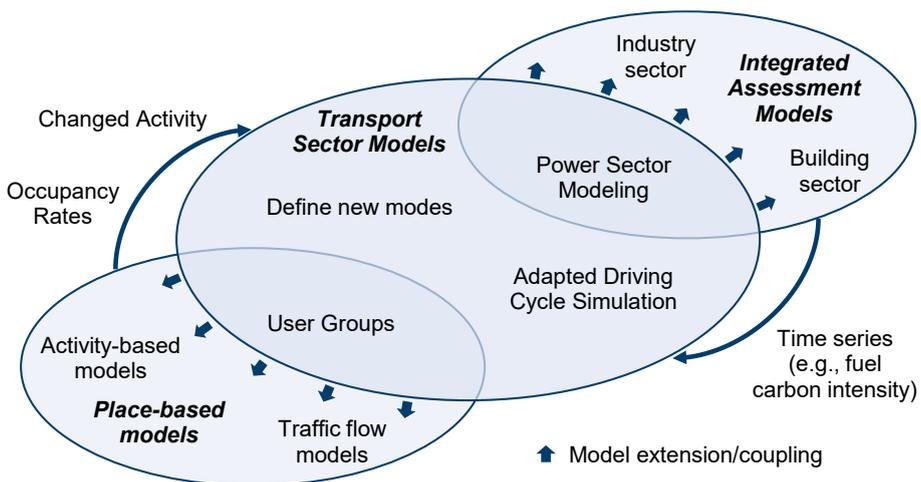


Abbildung 3.18: Überblick über potentielle Anpassungen der Verkehrssektormodelle.

Insgesamt wird deutlich, dass eine Angleichung der verschiedenen Modelltypen und wissenschaftlichen Disziplinen notwendig ist, um die Auswirkungen der Trends in großem Maßstab zu bestimmen.

Neben den zuvor genannten Verbesserungsmöglichkeiten bei Verkehrssektormodellen bestehen in der Literatur ebenso Schwachpunkte in der techno-ökonomischen Modellierung auf Fahrzeugebene (vgl. Ende Abschnitt 3.3). Diese beziehen sich auf die Bestimmung der Komponenten- und der Wartungskosten sowie der Kraftstoffverbräuche. Zumeist beruhen diese entscheidenden Parameter der Analysen auf der Literatur und werden nicht methodisch fundiert bestimmt. Zudem sind die angenommenen Reichweiten batterieelektrischer Fahrzeuge, insbesondere in der deutschen Literatur, fernab von der aktuellen

Entwicklung (vgl. Sektion 3.3.4). Des Weiteren werden einzelne Verkehrsmittel isoliert betrachtet und insbesondere die Entwicklung der Antriebskomponenten nicht miteinander verknüpft.

Tabelle 3.2 fasst die wesentlichen im Rahmen dieser Arbeit verwendeten methodischen Ansätze zusammen, welche zu einer Verbesserung der Modellierungsqualität gegenüber der Literatur führen. Wie bereits erläutert haben die methodisch fundiert bestimmten techno-ökonomischen Parameter aus den Analysen auf der Fahrzeugebene ebenfalls eine Qualitätssteigerung der Sektoranalysen zur Folge.

Tabelle 3.2: Methodische Schwachpunkte der Modelle in der Literatur auf Basis der durchgeführten Analyse inklusive der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lösungsansätze.

Ebene	Schwachpunkt Literatur	Lösungsansatz in dieser Arbeit
Fahrzeug	Fahrzeug-/Komponentenkosten als exogene Annahme	Komponentenbasierter Lernkurvenansatz
	Auslegung der Fahrzeuge	Konfiguration gemäß Leistungsparametern
	Auslegung Batteriekapazität	Bestimmung gemäß aktueller Entwicklung der Reichweiten
	Wartungskosten als exogene Annahme	Berechnung mittels Lebensdauern und Ersatzteilkosten (aus Lernkurvenansatz)
	Kraftstoffverbrauch als exogene Annahme	Fahrzyklussimulationen inklusive zukünftiger Entwicklung aller relevanter Fahrzeugparameter
	Isolierte Betrachtung einzelner Verkehrsmittel	Verknüpftes Weltmarktszenario über Verkehrsmittel hinweg innerhalb des Lernkurvenansatzes
Sektor	Fokussierung auf Batterie-Elektrofahrzeuge	Berücksichtigung aller relevanter Antriebs- und Kraftstoffoptionen
	Unzureichende Abbildung verschiedener Anforderungen	Nutzergruppenspezifische Verkehrsnachfrage
	Zeitliche Auflösung des Ladens von Batterie-Elektrofahrzeugen	Nutzergruppenspezifische stündliche Nachfrageprofile inklusive ortsabhängiger Verfügbarkeit der Lademöglichkeit (Kopplung an agentenbasiertes Personenverkehrsnachfragemodell)
	Zeitliche Auflösung der Energieversorgung (z.B. Verfügbarkeit, Emissionen)	Modellinterne Abbildung des Energiesektors
	Nutzungskonkurrenz zu anderen Sektoren	Kopplung an Gesamtenergiesystemmodell

4 Methodischer Ansatz

Das vorige Kapitel hat Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors vorgestellt. Dabei sind methodische Lücken aufgezeigt worden, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit geschlossen werden, um die in Kapitel 1 definierten Forschungsfragen zu beantworten. Dazu werden die am Ende von Kapitel 3 vorgeschlagenen methodischen Lösungsansätze verfolgt, welche sich in die Fahrzeug- und Sektorebene unterteilen.

Die Lücken auf Fahrzeugebene umfassen insbesondere die in Abschnitt 3.3 dargestellten häufig unzureichenden Daten. Aus diesem Grund werden zur fundierten techno-ökonomischen Analyse von Fahrzeugen die beiden Modelle *VE|Cost* und *VE|Energy* entwickelt. Mit Hilfe der beiden Modelle können zum einen Analysen auf Fahrzeugebene durchgeführt werden. Zum anderen dienen die ermittelten Daten als Eingangswerte weiterer Modelle. Unter anderem das Modell *FINE.Transport*, welches für Verkehrssektoranalysen entwickelt wird, greift auf techno-ökonomische Daten der zuvor beschriebenen Modelle zurück. Um eine technologieneutrale Analyse durchzuführen, bleiben im Rahmen dieser Arbeit Steuern und andere durch (unternehmens-)politische Entscheidungen beeinflussbare Größen unberücksichtigt. Somit werden stets Kosten und keine Preise berechnet sowie als Modelleingangswerte verwendet.

Die Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle in die Programm-Suite *ETHOS* (Energy Transformation Pathway Optimization Suite) ist in Abbildung 4.1 zusammenfassend veranschaulicht.

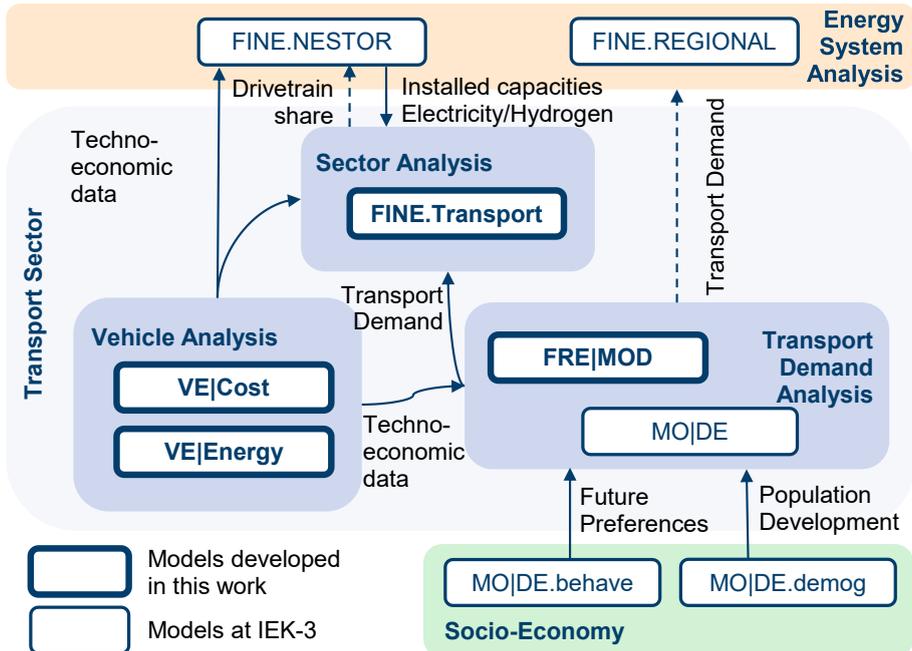


Abbildung 4.1: Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle sowie deren Einordnung innerhalb von *ETHOS*.

Die Abbildung verdeutlicht den hohen Verknüpfungsgrad der einzelnen Modelle. Shared Mobility und automatisiertes Fahren sowie der modale Shift sind zentrale Aspekte der Modelle *MO|DE* und *FRE|MOD*. Diese bilden die Personen- und Güterverkehrsnachfrage ab. Somit wird dem in Abschnitt 3.6 beschriebenen Defizit bisheriger Modellansätze hinsichtlich der beiden Trends mittels der in Sektion 4.2.2 erläuterten Modellkopplung an die genannten Verkehrsnachfragemodelle verbessert. Die Modellkopplung findet ebenso Anwendung, um Effekte der Sektorenkopplung detaillierter in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verkehrssektormodell *FINE.Transport* abzubilden. Dazu werden unter anderem Erzeugungskapazitäten der verschiedenen Umwandlungstechnologien mittels Kopplung an das Gesamtenergiesystemmodell *FINE.NESTOR* bestimmt. Eine detaillierte Erläuterung dieser Modellkopplung erfolgt in Sektion 4.2.5.

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Methodik der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle erläutert. Dazu wird zunächst auf die Modellierung auf Fahrzeugebene eingegangen bevor anschließend das Verkehrssektormodell *FINE.Transport* inklusive der zugehörigen Modellkopplungen thematisiert wird. Tabelle D.1 im Anhang und Tabelle 4.7 bieten eine Zusammenfassung grundlegender Modellinformationen.

4.1 Fahrzeugebene

Die Gesamtbetriebskosten eines Fahrzeugs setzen sich aus verschiedenen Kostenarten zusammen (vgl. Abschnitt 3.3). Aufgrund der bereits erwähnten Vernachlässigung von Steuern und weiteren (unternehmens-)politischen Kostenarten reduzieren sich die betrachteten Kostenarten auf die Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Diese finden sich in Abbildung 4.2 wieder, welche das methodische Vorgehen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modells *VE|Cost* veranschaulicht. Dieses dient zur techno-ökonomischen Analyse auf Fahrzeugebene.

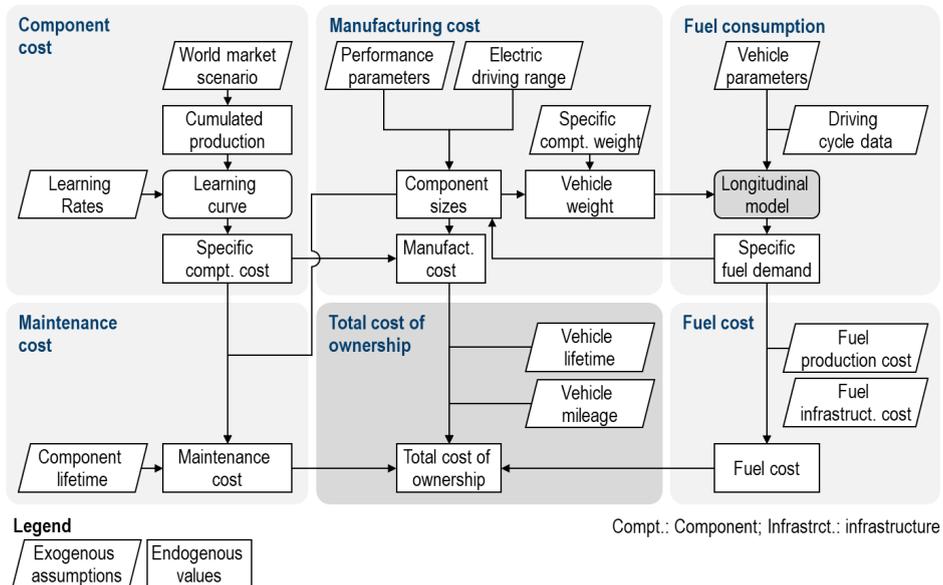


Abbildung 4.2: Flussdiagramm des Modellaufbaus *VE|Cost* inklusive der Kopplung an *VE|Energy*. [149]

Zur Berechnung der Herstellungs- sowie der Wartungskosten eines Fahrzeugs wird ein komponentenbasierter Ansatz gewählt, weshalb die Komponentenkosten sowie deren Dimensionierung ein zentraler Bestandteil der Methodik ist. Des Weiteren wird der Kraftstoffverbrauch von Straßenfahrzeugen innerhalb von *VEI Energy* mittels eines Longitudinalmodells bestimmt, um anschließend die Kraftstoffkosten ableiten zu können. Eine tiefere Erläuterung der einzelnen Bausteine des Modells erfolgt in den nachfolgenden Sektionen.

4.1.1 Segmentierung der Verkehrsmittel

Bevor die verschiedenen methodischen Aspekte des Modells dargestellt werden, wird zunächst die Segmentierung der Verkehrsmittel eingeführt. Somit können Unterschiede hinsichtlich der in das Modell eingehenden Parameter, wie z. B. die Fahrzeugmasse, berücksichtigt und deren Einfluss auf die Modellergebnisse analysiert werden. Darüber hinaus erlaubt die Flexibilität des Modells eine zukünftige Betrachtung aktuell nicht berücksichtigter Fahrzeugtypen.

Bei Straßenfahrzeugen erfolgt die Einteilung in Anlehnung an die in Sektion 2.1.2 eingeführten Segmente des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), wie in Tabelle 4.1 ausgewiesen.

Tabelle 4.1 Modellseitige Segmente der Straßenfahrzeuge inklusive deren Randbedingungen bzw. zugehörige Kraftfahrtbundesamt-Fahrzeugsegmente.

Verkehrsmittel	Modellseitige Segmentierung	KBA-Fahrzeugsegmente / Randbedingung
Pkw (M1)	Klein	Minis, Kleinwagen
	Mittel	Kompakt-, Mittelklasse, Mini-Vans
	Groß	Obere Mittelklasse, Oberklasse, Sportwagen, Großraum-Vans
	SUV	SUV, Geländewagen
Busse (M2, M3)	Klein	<30 Personen (Nahverkehr)
	Mittel	12 m Standardbus (Nahverkehr)
	Groß	18 m Gelenkbus (Nahverkehr)
	Reisebus	Fernverkehr
Nutzfahrzeuge (N1-N3)	Leicht	N1 (<3,5 t)
	Mittel	N2 (3,5 – 12 t)
	Schwer	N3 (>12 t, o. Sattelzugmaschine)
	Sattelzugmaschine	N3 (>12 t, Sattelzugmaschine)
	Abfallsammelfahrzeug	Abfallsammelfahrzeug
	Kipper (Baustellenfahrzeug)	N3 (>12 t, Kipper)
	Kommunalfahrzeug	Straßenkehrer, Kanalreiniger

Die Segmente des Kraftfahrtbundesamtes werden im Fall von Pkw modellseitig in den vier Arten *klein*, *mittel*, *groß* und *SUV* zusammengefasst. Busse werden sowohl nach

Einsatzzweck (Nah- und Fernverkehr), als auch nach der Fahrzeuggröße segmentiert. Die Segmentierung der Nutzfahrzeuge erfolgt in Anlehnung an die Kraftfahrtbundesamt-Fahrzeugklassen nach zulässigem Gesamtgewicht. Zudem werden aufgrund ihrer Repräsentativität weitere Fahrzeugarten als eigenständige Fahrzeugsegmente in den Analysen aufgenommen. Dies sind Sattelzugmaschinen, Abfallsammelfahrzeuge, Kipper (Baustellenfahrzeuge) sowie Kommunalfahrzeuge (Straßenkehrer, Kanalreiniger).

Züge werden in Anlehnung an die Zuggattungen der deutschen Bahn klassifiziert. Somit können modellseitig Unterschiede hinsichtlich der Zuggröße, welche insbesondere die Passagierkapazität und die Dimensionierung des Antriebsstrangs betrifft, sowie Betriebsgrößen wie Auslastung und Energiebedarf einbezogen werden. Darüber hinaus hebt Abbildung 4.3 einen weiteren wesentlichen Unterschied innerhalb der Zuggattungen hervor, den es modelltechnisch zu berücksichtigen gilt.

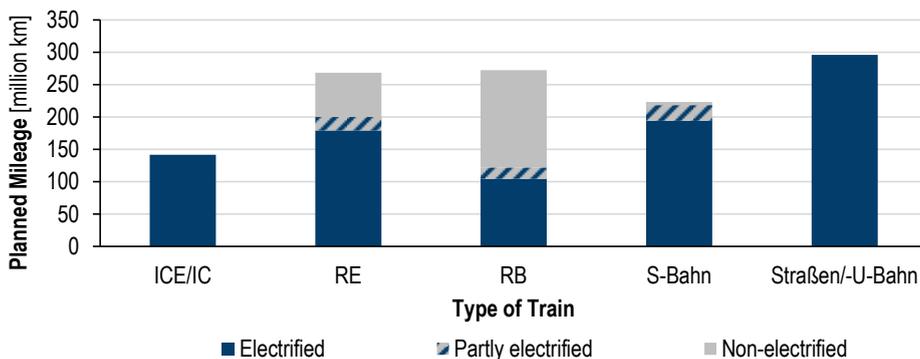


Abbildung 4.3: Elektrifizierungsgrad der verschiedenen Zuggattungen auf Basis von [31], [32].

So korreliert der Anteil der aktuell in Deutschland elektrifizierten Fahrleistung mit der Zuggattung. Der Fernverkehr sowie der innerstädtische Zugverkehr erfolgen nahezu vollständig oberleitungselektrisch. S-Bahnen, welche in suburbanen Gebieten eingesetzt werden, weisen mit über 87 % ebenfalls einen sehr hohen Elektrifizierungsanteil auf. Die restliche Fahrleistung erfolgt zudem in Teilen auf mittels Oberleitungen elektrifizierten Strecken. Die weiteren zum Nahverkehr gehörenden Zuggattungen des Regional-Expresses (RE) und der Regionalbahnen (RB) werden mit 67 % bzw. 38 % seltener auf oberleitungselektrifizierten Strecken eingesetzt. Insbesondere bei Regionalbahnen ist der niedrige Anteil durch den vermehrten Verkehr auf weniger frequentierten Strecken im ländlichen Raum begründet, auf welchen der Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur weniger ökonomisch ist.

Flugzeuge werden in der vorliegenden Arbeit zum einen in national und international verkehrende Flugzeuge eingeteilt. Zum anderen kommt eine Unterteilung nach Flugdistanz hinzu, welche unter anderem aufgrund des unterschiedlichen Verhältnisses zwischen Start und Landung bzw. Reisebetrieb, einen Einfluss auf den Energiebedarf der Flugzeuge hat. Zudem weisen Daten der aus Deutschland abgehenden Flüge [37] eine Abhängigkeit der Passagierkapazität und der Auslastung von der Flugdistanz auf, weshalb diese einen geeigneten Parameter zur modellseitigen Segmentierung der Flugzeuge darstellt. Da es keine allgemeingültige Definition zu den zugrundeliegenden Distanzen für Kurz-, Mittel- und Langstreckenflüge gibt, sind die in Tabelle 4.2 ausgewiesenen Grenzen in Anlehnung an

die EU-Fluggastrechte-Verordnung [36] gewählt, welche eine sinnvolle Übereinstimmung zur flugdistanzabhängigen Parametrierung der Flugzeuge aufweist.

Tabelle 4.2: Flugdistanzen der modellseitigen Segmente des Luftverkehrs [36].

Verkehrsmittel	Modellseitige Segmentierung	Flugdistanz/ Luftfahrtbundesamt-Klasse
Nat. Flugverbindungen	Zubringer	Luftfahrtbundesamt-Kennzeichenklasse C
	Regional	<400 km
	National	>400 km
Int. Flugverbindungen	Kurzstrecke	<1.500 km
	Mittelstrecke	1.500 – 3.500 km
	Langstrecke	>3.500 km

Mittels der beschriebenen modellseitigen Segmentierung der Verkehrsmittel ist es möglich differenzierte techno-ökonomische Analysen durchzuführen. So können unterschiedliche Entwicklungen und Randbedingungen berücksichtigt und deren Einfluss analysiert werden.

4.1.2 Konfiguration der Verkehrsmittel

Zur Bestimmung des Fahrzeuggewichts sowie weiterer techno-ökonomischer Größen ist die Auslegung des Antriebsstrangs relevant. Wesentliche Parameter sind die Antriebsleistung sowie die Dimensionierung des Energiespeichers. Letzterer ist insbesondere bei elektrifizierten Antriebssträngen von erhöhter Bedeutung, da der Batteriespeicher unter anderem die Fahrzeugmasse und die Herstellungskosten stark beeinflusst. Aus den genannten Gründen wird eine systematische Konfiguration der Straßenverkehrsmittel durchgeführt, welche im Folgenden beschrieben wird. Die Auslegung der weiteren Verkehrsmittel (Schiene, Wasser, Luft) erfolgt jeweils in Anlehnung an die Literatur [35], [38], [144], [145].

Tabelle 4.3 zeigt die angenommene Konfigurationsmatrix der betrachteten Antriebsformen von Straßenfahrzeugen. Die Auslegung des Antriebsstrangs erfolgt hinsichtlich zwei Kriterien. Auf der einen Seite ist der mechanische Leistungsbedarf entscheidend für die Dimensionierung der mechanischen Übertragungseinheit inklusive des Getriebes. Ebenso wird die Dimensionierung des Motors inklusive Leistungselektronikkomponenten und Abgasnachbehandlung je nach Elektrifizierungsgrad vom mechanischen Leistungsbedarf bestimmt. Die Leistung der Brennstoffzelle wird in Anlehnung an [174], [175] zu 80 % bei Pkw und zu 65 % bei Bussen und Nutzfahrzeugen im Verhältnis zur Leistung des Elektromotors skaliert. Auf der anderen Seite erfolgt die Auslegung des Batteriespeichers von Plug-In Fahrzeugen in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite.

Tabelle 4.3: Konfigurationsmatrix der betrachteten Antriebsarten von Straßenfahrzeugen.

ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle, -cng: Erdgas, P: Leistung, S: Speicherkapazität, konv: konventionell, PowBat: Leistungsbatterie.

	ICE / Brennstoffzelle	E-Motor	Speicher (flüssig/gas)	Batterie
ICEV-d/-g	P	-	S_{konv}	-
HEV-d/-g	P	$2/3 * P$	S_{konv}	S_{PowBat}
PHEV-d/-g	P	$2/3 * P$	$0,8 * S_{konv}$	100 km
PHEV-fc	$2/3 * P$	P	$0,8 * S_{FCEV}$	100 km
REEV-d/-g	$1/3 * P$	P	$0,5 * S_{konv}$	S_{REEV}
REEV-fc	$1/3 * P$	P	$0,5 * S_{FCEV}$	S_{REEV}
BEV	-	P	-	S_{BEV}
FCEV	$0,8 * P / 0,6 * P$	P	S_{FCEV}	S_{PowBat}
ICEV-cng	P	-	S_{CNG}	-

Der mechanische Leistungsbedarf von Pkw wird in Abhängigkeit von zwei Leistungsparametern bestimmt. Zum einen wird eine maximale Geschwindigkeit und zum anderen ein Beschleunigungswert für die Beschleunigung von 0-100 km/h angenommen. Beide Bedingungen werden in Abhängigkeit vom Fahrzeugsegment in Anlehnung an heutige Fahrzeugmodelle bestimmt. Tabelle 4.4 fasst die Annahmen zusammen.

Tabelle 4.4: Maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung in Abhängigkeit des Pkw-Segments.

	<i>Klein</i>	<i>Mittel</i>	<i>Groß</i>	<i>SUV</i>
Max. Geschwindigkeit [km/h]	165	200	250	200
Beschleunigung 0-100 km/h [s]	15	10	7	10

Das linke Diagramm der Abbildung 4.4 zeigt das Verhältnis des mechanischen Leistungsbedarfs zur Fahrzeugmasse sowie den beiden als Randbedingung gesetzten Leistungsparametern für einen Pkw des mittleren Segments. Bei kleineren Fahrzeugmassen stellt die erforderliche Maximalgeschwindigkeit das entscheidende Kriterium dar. Bei höheren Fahrzeugmassen ist es hingegen der Beschleunigungswert.

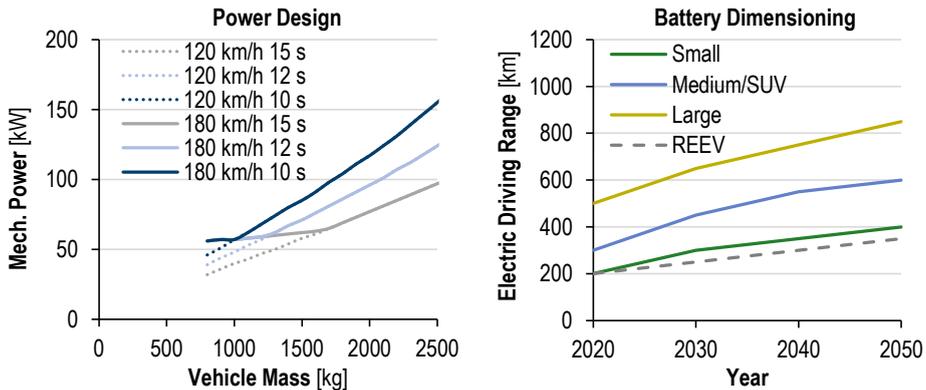


Abbildung 4.4: Einfluss der verwendeten Kriterien auf den berechneten Leistungsbedarf eines Pkw des mittleren Segments (links). Angenommene Reichweiten von Batterie-Elektrofahrzeugen und Range-Extender-Elektrofahrzeugen (REEV) in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments sowie des Produktionsjahres (rechts).

Die zur Auslegung der Batterie angenommenen elektrischen Reichweiten der betrachteten Pkw-Segmente sind im rechten Diagramm der Abbildung 4.4 dargestellt. Da die Reichweite ein wesentlicher Einflussfaktor zur Bewertung von Batterie-Elektrofahrzeugen ist, enthalten die Analysen neben den hier visualisierten Werten der Standardvariante darüber hinaus jeweils eine Variante mit geringerer (*BEV_s*) bzw. höherer Reichweite (*BEV_l*) (vgl. Tabelle D.3). Die Reichweite wird abhängig vom Fahrzeugsegment sowie dem Produktionsjahr angenommen. Die Startwerte orientieren sich an aktuellen Neufahrzeugmodellen. Aufgrund der Kundenanforderungen sowie der Entwicklungen in den letzten Jahren werden insbesondere bis zum Jahr 2030 steigende Reichweiten erwartet. Hierbei ist anzumerken, dass die Steigerungen nicht nur durch höhere Batteriekapazitäten erzielt werden, sondern positive Entwicklungen der Antriebseffizienzen und der Fahrwiderstände ebenfalls zu höheren Reichweiten bei gleicher Batteriekapazität führen. Für Range-Extender-Elektrofahrzeuge wird eine linear von 200 km in 2020 auf 350 km in 2050 ansteigende elektrische Reichweite angenommen.

Analog zum Vorgehen bei Pkw werden auch für Busse und Nutzfahrzeuge drei Batteriegrößen in den Analysen einbezogen, um unterschiedliche Nutzeranforderungen zu berücksichtigen. Die Reichweiten werden dabei nicht in Anlehnung an aktuelle Modelle, sondern auf Basis von Literaturdaten zu täglichen Fahrleistungen der gesamten Flotte bestimmt [59], [112]. Abbildung 4.5 veranschaulicht das Vorgehen für einen Standardbus und eine Sattelzugmaschine.

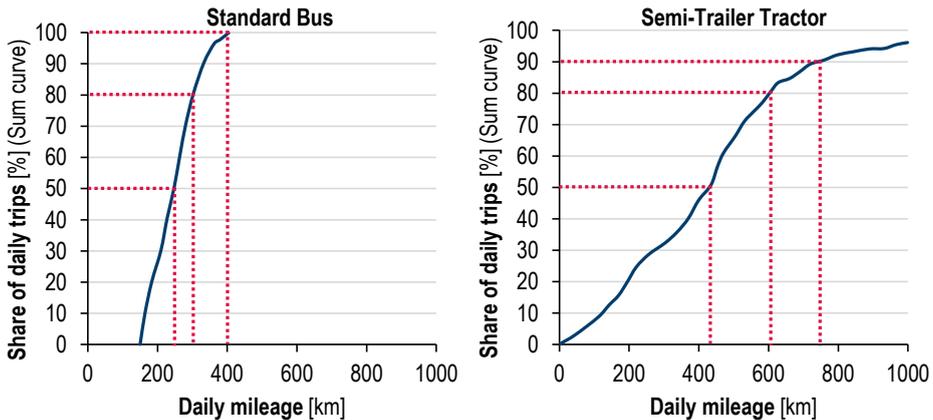


Abbildung 4.5: Tägliche Fahrleistung der Standardbusse nach [59] und Sattelzugmaschinen nach [112] zur Ableitung der erforderlichen Reichweiten von batterieelektrischen Varianten.

Es wird angenommen, dass ein Fahrzeug der mittleren Batterievariante 80 % der Fahrten ohne Zwischenladung bedienen kann. Daraus ergibt sich im Fall eines Standardbusses eine erforderliche Reichweite von 300 km. Für eine Sattelzugmaschine ist der Wert aufgrund der höheren täglichen Fahrleistungen doppelt so hoch. Nutzfahrzeuge sollen die erforderlichen Reichweiten nicht nur unter Standardbedingungen, sondern auch in selten auftretenden Fällen maximaler Zuladung erreichen, um den Fahrbetrieb stets sicherzustellen. Daher wird bei der Auslegung dieser Fahrzeuge der Energiebedarf bei einer Auslastung in Höhe von 100 % gewählt. Bei Bussen wird zusätzlich der Heizbedarf des Fahrgastraums bei einer Außentemperatur von 0 °C berücksichtigt. Die dazu verwendete Methodik wird in Sektion 4.1.3 beschrieben.

Abbildung D.1 in Anhang D zeigt die Summenkurven der täglichen Fahrleistungen für die weiteren Segmente der Busse und Nutzfahrzeuge auf. Bei Nutzfahrzeugen ist zu erkennen, dass die Fahrleistungen mit der Fahrzeuggröße ansteigen, weshalb die Anforderungen an Batteriefahrzeuge insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen mit ebenfalls hohen Energiebedarfen kritisch sind.

Abschließend ist anzumerken, dass die erläuterte Auslegung des Antriebsstrangs iterativ erfolgt, da die Fahrzeugmasse abhängig von der Antriebsstrangdimensionierung ist und diese sowohl den mechanischen Leistungsbedarf als auch die Reichweitenberechnung beeinflusst. Die bei der Berechnung der Gesamtfahrzeugmasse angenommenen Leistungs- und Energiedichten der einzelnen Komponenten sind in Tabelle D.4 in Anhang D ausgewiesen.

Neben der Konfiguration des Antriebsstrangs und der damit einhergehenden Dimensionierung dessen Komponenten gilt es die Transportkapazitäten der Verkehrsmittel zu bestimmen. Die Nutzlast der Nutzfahrzeuge wird für konventionelle und alternative Antriebsstränge differenziert bestimmt. Die Nutzlast der konventionellen Dieselfahrzeuge im Straßengüterverkehr wird auf Basis einer Nutzlastanalyse der Krafftahrbundesamt-Daten von Decker [26] parametrisiert. Für alternative Antriebsstränge berechnet sich die maximale Nutzlast aus dem zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeugklasse (N1-N3) abzüglich der innerhalb des Modells bestimmten Leermasse des Fahrzeugs. Dabei ist zu beachten,

dass für emissionsfreie Fahrzeuge nach EU-Richtlinie 96/53/EG¹ abweichende zulässige Gesamtmassen gelten, falls durch den alternativen Antriebsstrang ein Mehrgewicht gegenüber einem konventionellen Referenzfahrzeug entsteht. Dadurch soll der aktuell andernfalls resultierende Nachteil hinsichtlich der Nutzlast durch schwere Komponenten, wie z. B. die Fahrzeugbatterie, ausgeglichen werden. Aufgrund von erwarteten Steigerungen der Leistungs- und Energiedichten alternativer Komponenten sowie deren Antriebswirkungsgraden nimmt der Nachteil hinsichtlich der Nutzlast bis zum Ende dieses Jahrzehnts stark ab.

Flugzeuge können, wie zuvor Straßenfahrzeuge, in verschiedene Größen eingeteilt werden. Damit einhergehend sind unterschiedliche Passagierkapazitäten. Abbildung 4.6 veranschaulicht die Abhängigkeit der durchschnittlichen Passagierkapazität von der zurückgelegten Flugdistanz für aus Deutschland abgehende internationale Flüge. Insgesamt lässt sich ableiten, dass die Passagierkapazität mit steigender Flugdistanz ansteigt, wenngleich ab 2.500 km kein stetiger Anstieg zu beobachten ist. Die Kapazität der Kurz-, Mittel- und Langstreckenflugzeuge zur Parametrierung des Modells wird mittels gewichteter Durchschnittswerte zu 135, 175 und 260 Passagieren bestimmt. Ähnlich wird für nationale Flüge und die Auslastung der Flugzeuge verfahren. Die berechnete Auslastung der Mittelstreckenflüge ist mit 84 % höher als die der Kurz- und Langstreckenflüge mit 76 % und 80 %.

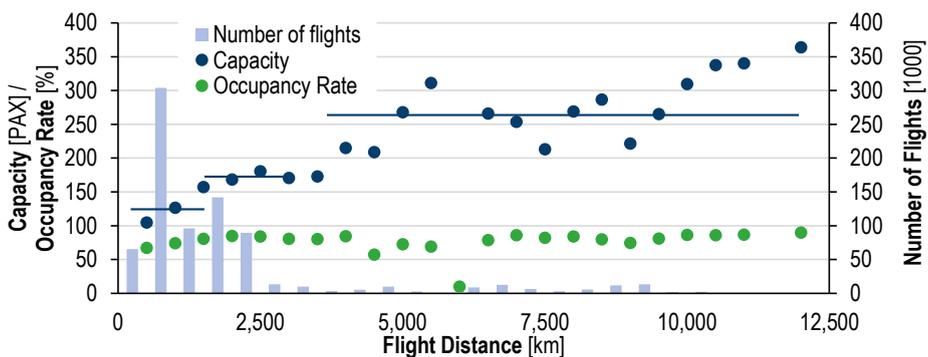


Abbildung 4.6: Kapazität, Auslastung und Fluganzahl in Abhängigkeit der Flugdistanz für aus Deutschland abgehende Flüge nach [37].

Im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln weisen Flugzeuge die höchsten Auslastungen auf. Insbesondere bei kleineren Straßenfahrzeugen resultieren die niedrigeren Auslastungen aus Leerfahrten. In Tabelle D.2 sind die implementierten Kapazitäten und deren durchschnittliche Auslastung zusammengefasst.

¹ In der EU-Richtlinie 96/53/EG, welche unter anderem die gesetzlich zulässigen Gewichte festlegt, wurde im Jahr 2019 aufgenommen, dass „bei Fahrzeugkombinationen, die Fahrzeuge mit alternativem Antrieb oder emissionsfreie Fahrzeuge umfassen, [...] die [...] vorgesehenen höchstzulässigen Gewichte um das zusätzliche Gewicht der alternativen Kraftstoffe oder der emissionsfreien Technologie, höchstens jedoch um 1 t bzw. 2 t, zu erhöhen“ sind. [27]

4.1.3 Berechnung des Energiebedarfs

Die Berechnung des Energiebedarfs der Verkehrsmittel erfolgt mit dem Modell *VE|Energy*. Das Modell wurde grundlegend im Rahmen einer betreuten Masterarbeit entwickelt [125], [126]. Dabei wird für Straßenverkehrsmittel der detaillierteste Ansatz verfolgt, da diese den höchsten Anteil am gesamten Energiebedarf des Verkehrssektors haben und ihnen somit die größte Bedeutung zukommt. Für andere Verkehrsmittel erfolgt die Parametrierung des Modells auf Basis von Literaturdaten.

Der Energiebedarf von Straßenfahrzeugen wird mittels eines Longitudinalmodells berechnet, wie in Abschnitt 3.2 eingeführt. Im Folgenden werden die Eingangsparameter dieses Modells erläutert. Dies umfasst neben den verwendeten Fahrzyklen vor allem die Entwicklung fahrzeug- und antriebspezifischer Eigenschaften.

Die modellseitig angewandten Fahrzyklen werden abhängig von der Fahrzeugart standardmäßig wie folgt gewählt:

- | | | |
|------------------------------|---------------------|---------------|
| • Pkw | WLTC 3a | Abbildung 3.1 |
| • Nahverkehrsbusse | Braunschweig Zyklus | Abbildung D.4 |
| • Nutzfahrzeuge | WHVC | Abbildung D.3 |
| • Reisebus/Sattelzugmaschine | WHVC „Autobahn“ | Abbildung D.3 |
| • Abfallsammelfahrzeuge | NRTC | Abbildung D.5 |

Durch die Wahl der Fahrzyklen sollen realitätsnahe Fahrprofile abgebildet werden. Im Fall von Bussen bedeutet dies z. B. vermehrte Stopps im Vergleich zu Pkw aufgrund des Ein- und Auslasses von Fahrgästen an Bushaltestellen, welche im *Braunschweig Zyklus* abgebildet werden. Ähnlich bezieht der *Neighborhood Refuse Truck Cycle (NRTC)* den überdurchschnittlichen Start-Stopp-Verkehr von Abfallsammelfahrzeugen ein. Neben der Nutzung der gesamten Zyklen bieten insbesondere der *Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle (WLTC)* und der *Worldwide harmonized Heavy-duty vehicles test cycle (WHVC)* die Möglichkeit einzelne Zyklusabschnitte in Anlehnung an den betrachteten Einsatzfall zu gewichten. Somit kann beispielsweise zwischen Stadt- oder Langstrecken-Pkw, welche vermehrt innerstädtisch bzw. auf Autobahnen verkehren, differenziert werden.

Der Energiebedarf eines Mittelklasse-Pkw unterscheidet sich innerhalb der einzelnen Abschnitte des *Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*, wie im linken Diagramm der Abbildung 4.7 gezeigt. Dies resultiert aus den verschiedenen Abhängigkeiten der Widerstandskräfte (Gl. 3.3 bis Gl. 3.5) von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung der Fahrzeuge. Im Fall des urbanen Profils dominiert aufgrund des Start-Stopp-Verkehrs der Beschleunigungsanteil. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt der aerodynamische Widerstand quadratisch zu, weshalb dieser im Autobahnabschnitt am größten ist.

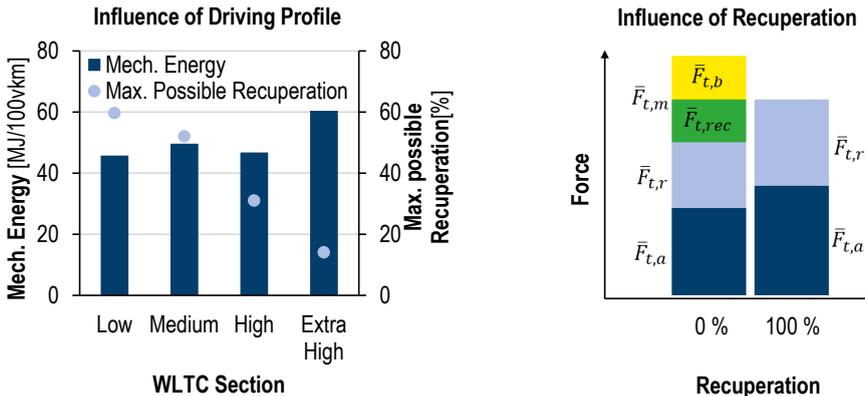


Abbildung 4.7: Mechanischer Energiebedarf eines mittleren Pkw sowie das maximale Rekuperationspotenzial in Abhängigkeit des WLTC3a-Zyklusabschnitts (links). Qualitativer Vergleich der Widerstandskräfte mit und ohne Rekuperation in Anlehnung an [125] (rechts). WLTC: Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle.

Neben dem mechanischen Energiebedarf hat bei elektrifizierten Fahrzeugen das Rekuperationspotenzial einen Einfluss auf den finalen Kraftstoffbedarf. Da aerodynamische und Rollreibungsverluste nicht rekuperiert werden können, ist der mögliche Rekuperationsanteil ebenfalls abhängig vom gewählten Fahrzyklus. Zudem gilt es zu beachten, dass die maximal mögliche rekuperierte Energie nicht dem Massenträgheitsanteil im Fall ohne Rekuperation entspricht. Grund hierfür ist, dass ein Teil dieser Energie in Momenten, in denen antriebsseitig nicht beschleunigt wird, genutzt wird, um die aerodynamischen und Rollreibungswiderstandskräfte auszugleichen. Zum weiteren Verständnis veranschaulicht das rechte Diagramm der Abbildung 4.7 diesen Zusammenhang.

Die Fahrzeugmasse ist ein grundlegender Eingangsparameter des Longitudinalmodells. Diese wird segmentspezifisch auf Basis der in Sektion 4.1.2 vorgestellten Konfiguration der Fahrzeuge bestimmt. Hinzu kommen je nach Fahrzeugklasse weitere Massen. Die Gesamtmasse von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen wird gemäß den Richtlinien des *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* (WLTP)¹ bestimmt [135]. Abbildung 4.8 veranschaulicht beispielhaft die komponentenbasiert berechnete Leermasse eines Mittelklasse-Pkw von 2020 bis 2050.

¹ In den WLTP-Richtlinien ist die zu berücksichtigende Gesamtmasse die Summe aus der Leermasse des Fahrzeugs, der Fahrermasse (75 kg), der zugeladenen Masse (25 kg) sowie der Masse der Betriebsflüssigkeiten und dem Kraftstoff bei 90 % Tankfüllung.

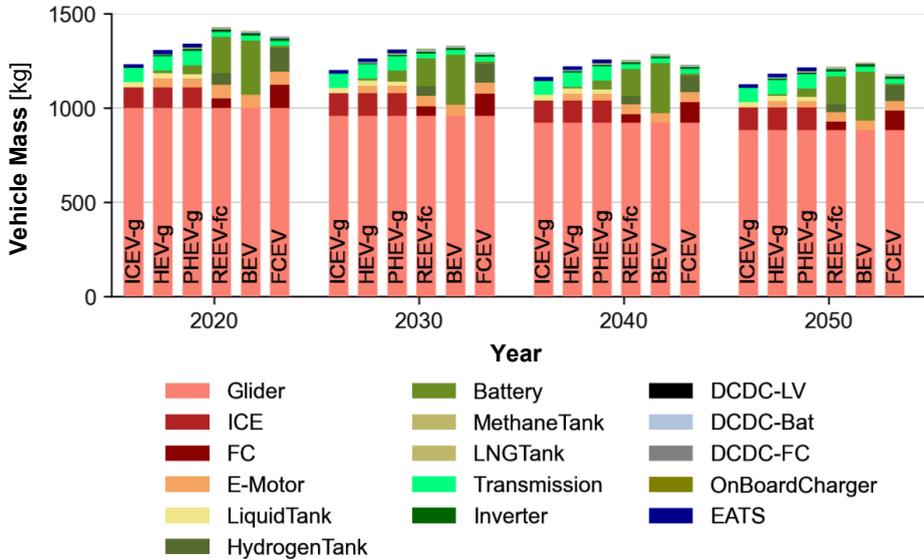


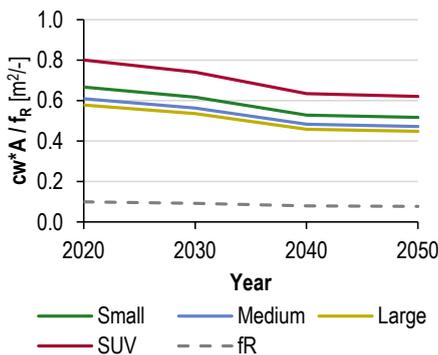
Abbildung 4.8: Komponentenspezifische Fahrzeugmassen von mittleren Pkw mit konventionellem und elektrifiziertem Antrieb von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc/FC: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz), EATS: Abgasnachbehandlungssystem.

In der Abbildung wird ersichtlich, dass die Elektrifizierung mit steigenden Fahrzeugmassen einhergeht. Die Batteriemasse sowie im Fall von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen die Brennstoffzelle und der Wasserstofftank sind der Grund für die steigenden Massen. Da durch technologische Weiterentwicklungen dieser Komponenten geringere spezifische Massen erwartet werden, sinkt das Mehrgewicht gegenüber dem konventionellen Antrieb. Zudem werden Leichtbaumaßnahmen am Glider erwartet, um eine Reduktion des Energiebedarfs der Fahrzeuge und somit auch höhere Reichweiten zu erzielen.

Die Gesamtmasse von Bussen und Nutzfahrzeugen und somit ebenso der Energiebedarf sind stark von der Auslastung der Fahrzeuge abhängig. Aus diesem Grund findet dieser Effekt besondere Beachtung bei der in Sektion 4.1.2 beschriebenen Konfiguration der Fahrzeuge.

Neben der Fahrzeugmasse stellen die aerodynamischen sowie die Rollreibungseigenschaften entscheidende Parameter bei der Bestimmung des mechanischen Energiebedarfs dar. Als Basis zur Parametrierung des Luftwiderstandsbeiwertes sowie der Frontflächen von Pkw dient eine Marktrecherche der 30 im Jahr 2019 in Deutschland meist verkauften Pkw. Der gewichtete Mittelwert deren aerodynamischer Eigenschaften wird modellseitig segmentspezifisch für das Jahr 2020 angenommen. Die zukünftige relative Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwertes wird von Islam et al. übernommen [174]. Die Frontflächen werden über den Betrachtungszeitraum konstant gehalten. In Abbildung 4.9 ist im linken Diagramm das Produkt der beiden Größen visualisiert. Es wird deutlich, dass der Luftwiderstand im SUV-Segment am höchsten ist. Dies resultiert zum einen aus der um ca. 10 % größeren Frontfläche. Zum anderen sind die Luftwiderstandsbeiwerte höher als in den anderen

Segmenten. Fahrzeuge der höherklassigen Segmente besitzen zwar größere Frontflächen im Vergleich zu Kleinfahrzeugen, jedoch überwiegt insgesamt der Vorteil hinsichtlich des Luftwiderstandsbeiwertes. Aus diesem Grund ist der Luftwiderstand für dieses Segment am geringsten. Bei den Betrachtungen ist stets zu beachten, dass es sich um segmentspezifische Mittelwerte handelt und einzelne Fahrzeuge bessere oder schlechtere Eigenschaften aufweisen können. Die Parametrierung der aerodynamischen Eigenschaften von Bussen und Nutzfahrzeugen erfolgt auf Basis von Literaturwerten, welche in Tabelle D.8 und Tabelle D.9 in Anhang D zusammengefasst sind. Bei Oberleitungshybridfahrzeugen wird der negative Einfluss des ausgefahrenen Pantographen auf den Luftwiderstandsbeiwert in Anlehnung an [60] während des Autobahnabschnittes des *World Harmonized Vehicle Cycle* berücksichtigt [124].



Efficiency Class	c_r
A	$c_r \leq 0.004$
B	$0.0041 \leq c_r \leq 0.005$
C	$0.0051 \leq c_r \leq 0.006$
D	$0.0061 \leq c_r \leq 0.007$
E	$c_r \geq 0.0071$

Abbildung 4.9: Aerodynamische Eigenschaften und Rollreibungswiderstand der betrachteten Pkw-Segmente von 2020 bis 2050 (links). EU-Effizienzklassen der Reifen für Busse und Nutzfahrzeuge nach Regulation (EU) 2020/740 [131] (rechts).

Der neben den aerodynamischen Eigenschaften ebenfalls in Abbildung 4.9 für den *Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle* (WLTC) visualisierte Rollwiderstandsbeiwert von Pkw wird innerhalb des Modells geschwindigkeitsabhängig bestimmt. Dazu wird nach [123] die folgende Gleichung verwendet:

$$c_r(v) = 0.0088 + 0.0017 \cdot \frac{v}{100} + 0.00028 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^4, \text{ mit } v \text{ in km/h} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Somit wird berücksichtigt, dass der Rollwiderstandsbeiwert exponentiell mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ansteigt. Der angenommene Rollwiderstandsbeiwert von Bussen und Nutzfahrzeugen sowie dessen zukünftige Entwicklung orientiert sich an der in Abbildung 4.9 inkludierten Tabelle der EU-Effizienzklassen der Reifen für diese Fahrzeugarten [131].

Um aus den berechneten mechanischen Energiebedarfen am Rad Kraftstoffbedarfe bestimmen zu können, werden modellseitig vereinfacht konstante Wirkungsgrade der jeweiligen Antriebsarten angenommen. Diese Gesamtwirkungsgrade des Antriebsstrangs werden als Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen verbauten Komponenten berechnet. Die Komponentenwirkungsgrade sind dabei keine Maximal-, sondern Mittelwerte, um geringere Wirkungsgrade im Teillastbereich der Komponenten ebenfalls zu berücksichtigen. Dennoch stellt die gemittelte Betrachtung eine vereinfachte Form der Kraftstoffbedarfsbestimmung dar.

Tabelle 4.5 fasst die auf Basis der Literatur angenommenen Komponentenwirkungsgrade zusammen. Diese zeigen den Wirkungsgradvorteil der elektrischen Komponenten gegenüber dem konventionellen Verbrennungsmotor auf. Zudem ist zu erkennen, dass mit der Zeit tendenziell geringere Effizienzsteigerungen erwartet werden.

Tabelle 4.5: Wirkungsgrade der verschiedenen Antriebskomponenten von 2020 bis 2050 [174], [136] - [137].
ICE: Verbrennungsmotor, -g: Benzin, -d: Diesel.

Komponenten	Effizienz				Quellen
	2020	2030	2040	2050	
Brennstoffzelle	0.59	0.62	0.65	0.66	[174]
Elektromotor	0.85	0.90	0.92	0.93	[174]
Batterie	0.93	0.94	0.95	0.96	[136], [138], [139]
Mech. Übertragung	0.95	0.96	0.97	0.98	[140]
Getriebe	0.93	0.94	0.945	0.95	[141]
ICE-g	0.29	0.34	0.37	0.385	[174]
ICE-d	0.30	0.39	0.42	0.435	[174]

Der mechanische Energiebedarf von Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen kann sowohl aus dem elektrischen als auch aus einem weiteren Energiespeicher bereitgestellt werden. Um die Aufteilung in die beiden Energieformen zu bestimmen, werden modellseitig vereinfacht zwei Betriebsmodi angenommen. Im elektrischen Betriebsmodus wird der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs berücksichtigt. Im Verbrenner-/Brennstoffzellenmodus wird der Wirkungsgrad des verbrennungsmotorischen bzw. des Brennstoffzellenantriebsstrangs angenommen. Der Fahranteil des elektrischen Betriebsmodus ist variabel und viel diskutiert, da er maßgeblich über die Reduktionen der Umweltauswirkungen entscheidet [143]. In dieser Arbeit wird der elektrische Fahranteil aufgrund der unterschiedlichen Batteriekapazitäten von Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen differenziert betrachtet. Zudem wird die Abhängigkeit des elektrischen Fahranteils von der jährlichen Fahrleistung auf Basis der Daten von Trost [200] berücksichtigt, wie im linken Diagramm von Abbildung 4.10 aufgezeigt. Dabei wird nicht einbezogen, dass der elektrische Fahranteil vom individuellen Nutzerverhalten abhängt.

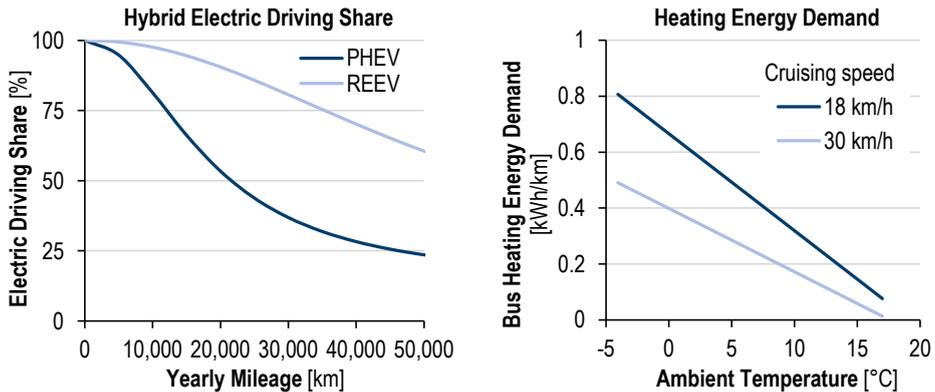


Abbildung 4.10: Elektrischer Fahranteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen (PHEV) und Range-Extender-Elektrofahrzeugen (REEV) in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung in Anlehnung an [200] (links). Energiebedarf der Heizung des Fahrgastraums von Bussen nach [59] (rechts).

Neben dem Energiebedarf, welcher zur Fortbewegung des Fahrzeugs am Rad entsteht, gibt es einen weiteren Energiebedarf der Nebenverbraucher. Diese werden modellseitig mittels eines fahrzeugtypabhängigen konstanten Leistungsbedarfs abgebildet. Aufgrund des hohen Einflusses wird der Heizbedarf des Fahrgastraums bei Bussen gesondert berechnet. Das rechte Diagramm der Abbildung 4.10 veranschaulicht die von Knot et al. [59] übernommene Abhängigkeit des Heizbedarfs von der Umgebungstemperatur, welche der endogenen Berechnung zugrunde liegt. Der Kühlbedarf fällt bei Bussen niedriger als der Heizbedarf aus, weshalb Ersterer bei der Auslegung unbeachtet bleibt. [59] Eine Validierung des vorgestellten Longitudinalmodells erfolgt in Sektion 4.1.5.

Der Energiebedarf der nicht straßengebundenen Verkehrsmittel wird auf Basis der Literatur ermittelt. Tabelle D.10 bis Tabelle D.13 in Anhang D fasst diese zusammen.

4.1.4 Total Cost of Ownership

Die Gesamtbetriebskosten von Fahrzeugen setzen sich aus mehreren Kostenarten zusammen, wie in Abschnitt 3.3 eingeführt. In dieser Arbeit werden Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten berücksichtigt. Letztere beinhalten neben den Kosten der Kraftstoffproduktion ebenfalls die der Infrastruktur. Die Methodik zur Berechnung der genannten Kostenarten in dieser Arbeit wird im Folgenden erläutert.

Herstellungskosten

Die Herstellungskosten der Fahrzeuge werden komponentenbasiert bestimmt. Die Komponentenkosten berechnen sich aus spezifischen Kosten sowie den sich aus der Konfiguration der Fahrzeuge (vgl. Sektion 4.1.2) ergebenden Komponentendimensionen. Die zukünftigen spezifischen Kosten der Komponenten alternativer Antriebe werden mittels des Lernkurvenansatzes bestimmt (vgl. Sektion 3.3.1). Dazu wird die Entwicklung der jeweiligen Produktionsmengen, die Lernrate sowie ein Aufsetzpunkt für den Start der Lernkurve benötigt. Letzterer wird auf Basis von Marktdaten bis 2020 produzierter Fahrzeugstückzahlen mit alternativen Antrieben sowie Literaturdaten zu Produktionskosten für das Jahr 2020 festgelegt.

Die kumulierten zukünftigen Produktionsmengen der Komponenten werden mittels eines definierten Weltmarktszenarios bestimmt, welches die für den Straßenfahrzeugmarkt relevantesten Fahrzeugklassen umfasst und nach diesen differenziert. Der Grund der Differenzierung sind die in den verschiedenen Klassen unterschiedlichen erwarteten Diffusionsraten der Technologien. Das Szenario beinhaltet somit je Fahrzeugklasse auf der einen Seite die Neuzulassungsanteile der verschiedenen Antriebsformen, wie im linken Diagramm der Abbildung 4.11 für Pkw dargestellt. Auf der anderen Seite werden absolute Produktionsstückzahlen für den Betrachtungszeitraum nach McKerracher et al. [177] angenommen. Bei der Definition des Referenzszenarios für Pkw wird eine Parität der Anteile von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen sowie den Hybridalternativen im Jahr 2050 angenommen, um eine Position der Technologieneutralität einzunehmen.

Das rechte Diagramm der Abbildung 4.11 zeigt den erwarteten Anstieg der produzierten Stückzahlen bis zum Jahr 2035, nachdem diese im Jahr 2020 aufgrund der Coronakrise gegenüber dem Vorjahr um 11,3 Millionen Fahrzeuge zurückgegangen ist. Ab dem Jahr 2035 wird aufgrund einer Sättigung des Markts ein Rückgang der Stückzahlen erwartet. In einem weiteren eigen definierten Szenario findet der Rückgang stärker und bereits ab dem Jahr 2030 statt. Hintergrund dieses Szenarios ist eine ausgeprägtere Entwicklung des autonomen und geteilten Fahrens, wodurch weniger Fahrzeuge nachgefragt werden.

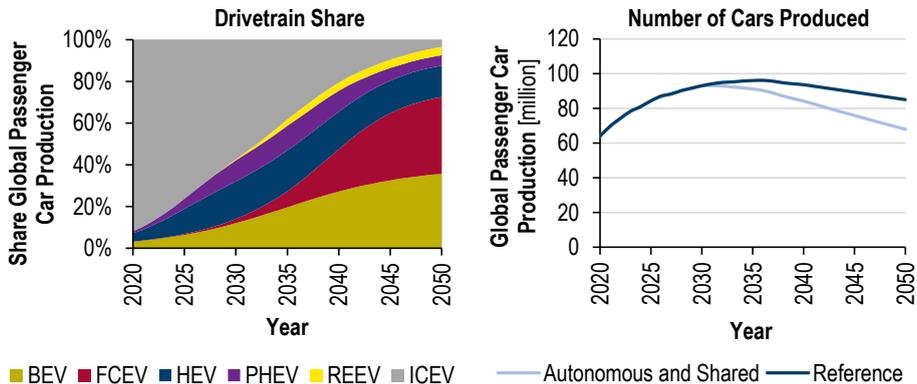


Abbildung 4.11: Szenario-basierte Anteile der Antriebsalternativen an globalen Pkw-Neuzulassungen (links). Globale jährliche Pkw-Produktionsstückzahlen im Referenzszenario und „Autonom und geteilt“-Szenario (rechts) [149]. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Die Lernraten der Komponenten werden in Anlehnung an die Literatur angenommen. Insbesondere für Batterien existiert eine Vielzahl an Literaturwerten mit einer Streuung von mehr als 10 %. In dieser Arbeit wird eine Lernrate der Batterie von 18,9 % auf Basis ausführlicher Analysen der historischen Kostenentwicklung nach Ziegler und Trancik angenommen [179]. Für Leistungsbatterien wird aufgrund der geringeren Batteriekapazität und dem folglich kleineren Anteil der Zelle an den Systemkosten eine um einen Prozentpunkt niedrigere Lernrate (17,9 %) unterstellt. Die Lernrate des Brennstoffzellensystems wird nach Propfe zu 15 % festgelegt. Bis 2030 wird die gleiche Lernrate für den Wasserstofftank angenommen [164], wobei diese anschließend auf 8 % abfällt. Für den Elektromotor sowie

die Leistungselektronikkomponenten wird nach Propfe eine Lernrate von 7 % angenommen [164].

Abbildung 4.12 visualisiert die für den Betrachtungszeitraum berechneten spezifischen Kosten der drei relevantesten Komponenten alternativer Antriebe – der Batterie, dem Brennstoffzellen- und dem Wasserstofftankssystem – im Vergleich zu Literaturwerten.

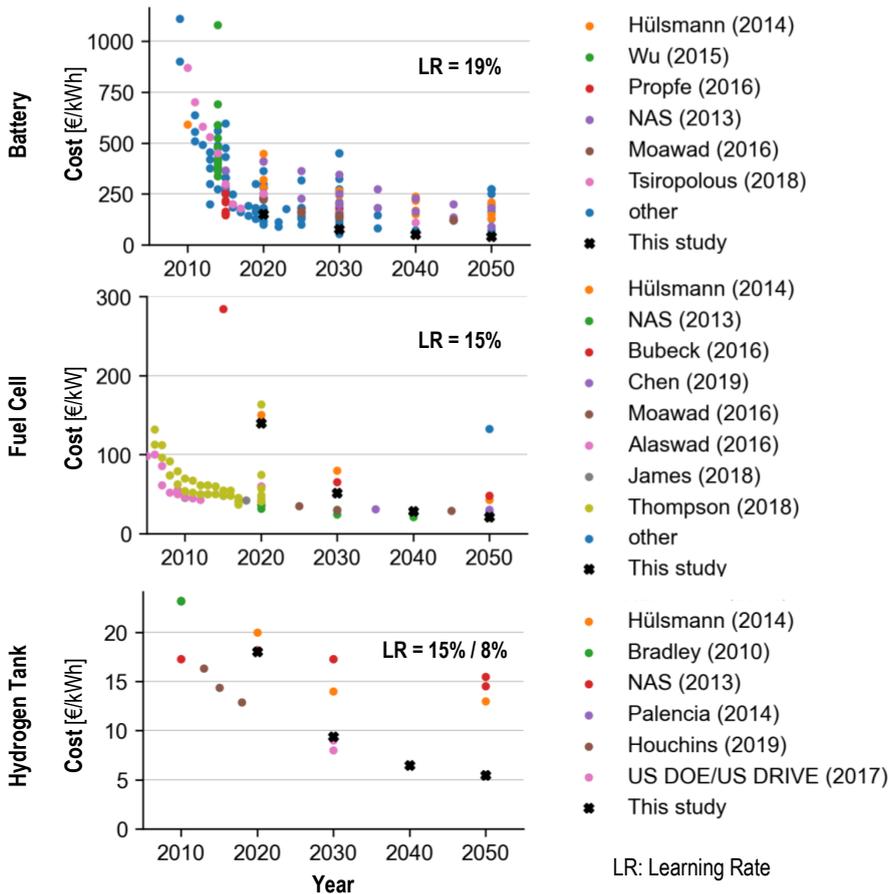


Abbildung 4.12: Auf Basis des Lernkurvenansatzes berechnete spezifische Herstellungskosten des Batterie-, Brennstoffzellen- und Wasserstofftanksystems im Vergleich zu Literaturwerten. [127], [128], [142], [150], [151], [154], [156], [157], [159], [161], [164], [171], [213].

Zunächst ist festzuhalten, dass sich die berechneten Werte für alle Komponenten innerhalb der Literaturwerte einordnen und keine Grenzwerte am oberen oder unteren Rand der Streuung darstellen. Die Batteriekosten haben sich von 2010 bis 2020 um mehr als 80 % auf 150 €/kWh reduziert. Die Unterschreitung der 100 €/kWh-Marke wird für das Jahr 2025 berechnet. Eine weitere Halbierung der Kosten wird im Jahr 2037 erwartet. Dennoch ist zu erkennen, dass die berechneten zukünftigen Kostensenkungen langsamer als die zuvor genannten historischen Entwicklungen im letzten Jahrzehnt erfolgen. Im Gegensatz dazu hat die Brennstoffzellentechnologie noch nicht den Massenmarkt erreicht. Der im hinterlegten Weltmarktszenario angenommene Einstieg in die Massenfertigung führt vor allem im

aktuellen Jahrzehnt zu signifikanten Kostendegressionen. Ähnliches gilt für das Wasserstofftanksystem.

Aufgrund der höheren Anforderungen von Nutzfahrzeugen an die Belastbarkeit der Brennstoffzelle sowie deren Lebensdauer wird der Startwert für das Jahr 2020 zu 300 €/kW an Stelle der 140 €/kW im Automotivebereich gesetzt. Die zukünftige relative Entwicklung der Kosten erfolgt hingegen über alle Fahrzeugklassen hinweg gleichermaßen.

Tabelle D.6 in Anhang D fasst die spezifischen Kosten der betrachteten Komponenten zusammen.

Wartungskosten

Die Wartungskosten von Straßenfahrzeugen werden ebenso wie die Herstellungskosten komponentenbasiert bestimmt. Die betrachteten Komponenten werden in Anlehnung an Propfe [164] in Gruppen eingeteilt. Tabelle 4.6 gibt eine Übersicht zu dieser Einteilung.

Tabelle 4.6: Betrachtete Komponenten der Pkw-Wartungskostenberechnung nach Propfe [164].

Verbrennungsmotor	Bremssystem	Getriebe	Elektrifizierte Komponenten	Sonstige
Starterbatterie	Bremsflüssigkeit	Getriebeöl	DC/DC	Reifen
Lichtmaschine	Bremsscheibe	Kupplung	DC/AC	Kühlmittel
Anlasser	Bremsklotz	Getriebe	AC/DC	Klimaanlage
Zündkerze			Ladegerät	Kabinenluftfilter
Zylinderkopf			E-Maschine	Multimedia
Keilriemen			Wasserstofftank	
Zahnriemen			Brennstoffzelle	
Luftfilter			Batterie	
Kraftstofffilter				
Endrohr				
Auspuffsystem				
Motoröl				

Die Wartung der Komponenten der Kategorie *Sonstige* ist mit Ausnahme der Klimaanlage unabhängig vom Antrieb. Da Teile der Komponenten der Klimaanlage bei elektrifizierten Antrieben ebenfalls zur Kühlung elektrischer Antriebskomponenten eingesetzt werden, ist die Wartung in diesen Fällen kostenintensiver. Die Wartung der Komponenten der anderen Kategorien sind antriebsabhängig, da diese entweder nicht Teil des jeweiligen Antriebs sind oder wie im Fall des Bremssystems ein veränderter Verschleiß in Abhängigkeit des Antriebs entsteht. Anhand der Tabelle wird ersichtlich, dass der Verbrennungsmotor und dessen Peripherie eine Vielzahl verschiedener zu wartender Komponenten aufweist.

Abbildung 4.13 zeigt die von Propfe bestimmten Wartungskosten eines mittleren Pkw nach Gruppierung.

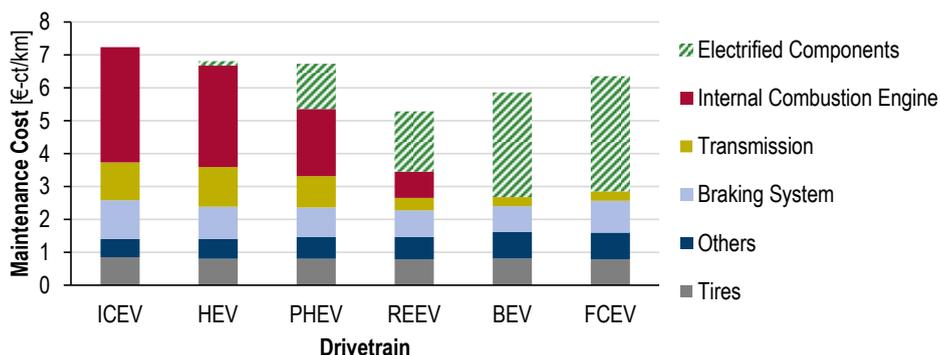


Abbildung 4.13: Spezifische Wartungskosten verschiedener Antriebsalternativen eines mittleren Pkw nach Komponentenart in Anlehnung an Propfe [164]. Die Wartungskosten der elektrifizierten Komponenten sind straffiert dargestellt, da diese in der vorliegenden Arbeit endogen auf Basis der mittels des Lernkurvenansatzes berechneten spezifischen Komponentenkosten bestimmt werden und somit nicht von Propfe übernommen werden. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Es ist zu erkennen, dass konventionelle Fahrzeuge aufgrund des Wartungsaufwands des Verbrennungsmotors inklusive seiner Peripherie höhere Wartungskosten als elektrifizierte Fahrzeuge aufweisen. Die Wartungskosten von Range-Extender-Elektrofahrzeugen sind am niedrigsten, da im Vergleich zu Batterie-Elektrofahrzeugen geringere Wartungskosten der elektrischen Komponenten, insbesondere der Batterie, entstehen. Die zusätzlichen Wartungskosten aufgrund der höheren Batteriekapazität im Batterie-Elektrofahrzeug übersteigen die des Verbrennungsmotors im Range-Extender-Elektrofahrzeug.

In dieser Arbeit werden die Pkw-Wartungskosten der Kategorien *Verbrennungsmotor*, *Getriebe* und *Sonstige* fahrzeugsegmentspezifisch von Propfe übernommen. Für die Wartungskosten des Bremssystems elektrifizierter Antriebe wird angenommen, dass diese ein Drittel des Bremssystems konventioneller Fahrzeuge betragen. Die Annahme wird aufgrund der geringeren Nutzung des Bremssystems infolge der Rekuperation mittels des elektrischen Antriebs getroffen. In Abbildung 4.13 ist zu erkennen, dass die Wartungskosten elektrifizierter Antriebe stark von den Kosten der elektrifizierten Komponenten und deren Dimensionierung abhängen. Aus diesem Grund werden die Wartungskosten dieser Komponenten endogen nach der in Sektion 3.3.2 eingeführten Methodik nach Propfe [164] berechnet.

Dazu sind für diese Komponenten Ersatzteilkosten, deren Lebensdauer, die Wartungsdauer sowie der Stundensatz des Personals erforderlich. Der Stundensatz wird nach Propfe zu 70 €/h definiert [164]. Die Ersatzteilkosten berechnen sich aus der Dimensionierung der Komponenten (vgl. Sektion 4.1.2) und den spezifischen Kosten (vgl. Sektion 4.1.4). Somit wird die Kostendegression der Ersatzteile im betrachteten Zeitraum an dieser Stelle berücksichtigt. Erwartete steigende Lebensdauern der elektrifizierten Komponenten spiegeln sich ebenfalls in den Annahmen wider. Tabelle D.5 in Anhang D fasst die angenommenen Lebensdauern der Komponenten zusammen.

Die Datengrundlage der Wartungskosten von Bussen und Nutzfahrzeugen ist weniger detailliert. Becker et al. beziffern im *lastauto omnibus Katalog* Wartungskosten verschiedener verfügbarer konventioneller Fahrzeugmodelle unterteilt in drei Kategorien [165]:

1. Schmierstoffkosten
2. Reifenkosten
3. Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten

Während die ersten beiden Kostenarten antriebsunabhängig sind und somit direkt übernommen werden können, müssen letztere in Abhängigkeit des Antriebs bestimmt werden. Für konventionelle Fahrzeuge werden die Daten von Becker et al. angenommen [165]. Die Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten elektrifizierter Nutzfahrzeuge werden hingegen zum einen aus einem relativen Anteil der Wartungskosten der konventionellen Fahrzeuge berechnet. Die Höhe dieses Anteils wird auf Basis der komponentenbasierten Wartungskosten nach Propfe für Pkw bestimmt. Zum anderen werden die Wartungskosten der elektrifizierten Komponenten wie zuvor erläutert endogen komponentenbasiert berechnet und addiert.

Ein Vergleich der Daten von Bussen und Nutzfahrzeugen der Klasse N3 nach Becker et al. [165] verdeutlicht, dass die Wartungskosten von Bussen deutlich höher ausfallen. Die Antriebsstränge der beiden Fahrzeugklassen sind jedoch vergleichbar. Daher wird angenommen, dass ein signifikanter Anteil der Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten von Bussen auf Komponenten entfällt, welche nicht Teil des Antriebsstrangs sind. Diese antriebsunabhängigen Wartungskosten werden aus der Differenz der ausgewiesenen Wartungskosten der beiden Fahrzeugklassen abgeleitet. Somit werden diese zu den endogen bestimmten antriebsabhängigen Wartungskosten der Busse addiert.

Die Wartungskosten der Regionalbahnen (RB) werden nach Klebsch et al. parametrisiert [145]. Für alle weiteren betrachteten Verkehrsmittel dient die GEMIS-Datenbank in dieser Arbeit als Grundlage [144].

Kraftstoffkosten

Die neben den Herstellungs- und Wartungskosten der Fahrzeuge dritte betrachtete Kostenart sind die Kraftstoffkosten. Diese werden modellseitig aus dem Energiebedarf der Fahrzeuge (vgl. Sektion 4.1.3) und den spezifischen Kosten der Energieträger berechnet. Letztere setzen sich aus den Produktions- und Infrastrukturkosten zusammen. Die Infrastrukturkosten sind nicht nur vom Kraftstoff, sondern darüber hinaus auch vom Verkehrsmittel abhängig. Dies resultiert aus den verkehrsmittelspezifischen Anforderungen an die Infrastruktur, die insbesondere deren Dimensionierung und Auslastung betreffen.

Abbildung 4.14 zeigt die im Rahmen der in Kapitel 6 durchgeführten techno-ökonomischen Analysen von Straßenfahrzeugen spezifischen Kraftstoffkosten, welche auf Basis der Literatur ermittelt werden.

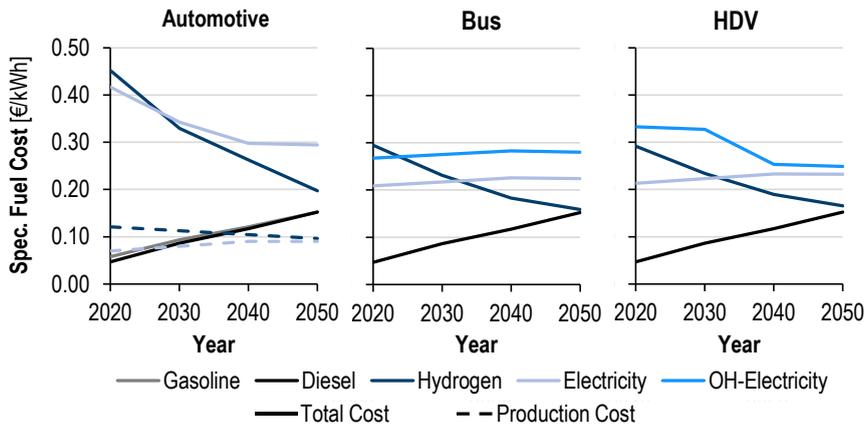


Abbildung 4.14: Angenommene spezifische Kraftstoffkosten der Energieträger an der Tankstelle/Ladesäule für Pkw, Busse und Sattelzugmaschinen inklusive Produktions- und Infrastrukturkosten von 2020 bis 2050. HDV: Schwere Nutzfahrzeuge, OH-: Oberleitungen.

Da die Tankstelleninfrastrukturkosten für konventionelle Flüssigkraftstoffe mit weniger als 1 ct€/l sehr gering ausfallen [50], werden diese im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Die steigenden Kosten dieser Kraftstoffe resultieren aus der Annahme eines linearen Umstiegs von fossilem auf Erdöl basierendem hin zu einem synthetischen Kraftstoff [166], [168]. Somit liegt für alle Antriebsformen im Jahr 2050 ein treibhausgasneutraler Betrieb der Fahrzeuge vor. Für elektrischen Strom wird aufgrund der Veränderungen des Energiesektors ebenfalls ein Anstieg der Produktionskosten angenommen [240].

Die Infrastrukturkosten setzen sich aus denen der Transmissions-, der Distributions- sowie der Tankstellen- bzw. Ladeinfrastruktur zusammen. Die Kosten des Stromnetzes werden in Anlehnung an das Netzentgelt eines Gewerbebetriebs zu 6,3 ct€/kWh festgelegt [70]. Das den Analysen zugrundeliegende zeitabhängige Transmissions- und Distributionsnetz für Wasserstoff basiert auf Untersuchungen von Robinus et al. [75].

Während die Produktionskosten von Strom und Wasserstoff in Zukunft niedriger als die der Flüssigkraftstoffe erwartet werden, sorgen die höheren Infrastrukturkosten für insgesamt höhere spezifische Gesamtkosten der beiden Energieträger. Der Vergleich der Kosten in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse weist die höchsten spezifischen Kosten für Pkw auf, was unter anderem in der geringeren Auslastung der Infrastruktur begründet ist. Diese ist bei Wasserstoffbustankstellen am höchsten, weshalb für diese Fahrzeugklasse die geringsten Wasserstoffkosten an der Tankstelle erwartet werden [57].

Insgesamt sinken die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelleninfrastruktur am stärksten, da mit zunehmender Flottengröße immer größere Tankstellen genutzt werden und somit Skaleneffekte auftreten. Ein weiterer Grund ist der „Überbau“ der Infrastruktur während der Markteinführung, um eine möglichst flächendeckende Infrastruktur zu erreichen. Dies ist neben sinkenden Kosten der Ladestationen ebenfalls ein Grund für die sinkenden Infrastrukturkosten batterieelektrischer Pkw. Sowohl die Kosten der batterieelektrischen als auch die der Wasserstoffinfrastruktur von Pkw basieren auf Analysen von Robinus et al. [75].

Die geringere Degression der spezifischen Kosten der Ladeinfrastruktur batterieelektrischer Busse und Sattelzugmaschinen resultiert aus den sinkenden Energiebedarfen der Fahrzeuge über dem Betrachtungszeitraum. Dieser Effekt gleicht die absolute Kostendegression der Ladestationen nahezu aus, welche aus Daten der Nationalen Plattform Mobilität [169] übernommen werden. Hinzu kommt, dass die öffentliche Ladeinfrastruktur weniger relevant für diese Fahrzeuge ist. Die Depotlader werden während der Markteinführung weniger überbaut als bei Pkw, da das Verhältnis der Fahrzeuganzahl pro Ladestation weniger von der Gesamtflottengröße abhängt [59]. Die zusätzliche Infrastruktur entlang der Fahrtroute von Bussen führt zu steigenden Infrastrukturkosten. Die Kosten der Oberleitungsinfrastruktur entlang des Autobahnnetzes für Sattelzugmaschinen ist insbesondere zu Beginn teurer als andere Optionen, da für wenige Fahrzeuge ein ausreichendes Startnetz ausgebaut sein muss. Die Kostendegression zwischen 2030 und 2040 resultiert aus der höheren Auslastung der Infrastruktur. Anschließend wird jedoch keine weitere Kostensenkung erwartet [40].

Weitere Erläuterungen zu den techno-ökonomischen Annahmen, welche die Grundlage der spezifischen Kraftstoffkosten bilden, finden sich in Sektion 4.2.4.

4.1.5 Validierung

Um die Validität des Modells zu prüfen, werden in dieser Sektion verschiedene Ergebnisse des Modells mit Herstellerangaben zu aktuellen Fahrzeugmodellen verglichen. Zur Validierung der berechneten Komponentenkosten sei auf die in Abbildung 4.12 dargestellten Ergebnisse hingewiesen, welche keine Ausreißer im Vergleich zur Literatur aufweisen.

Die Konfiguration batterieelektrischer Fahrzeuge mittels Reichweitenanforderungen sowie den Leistungskriterien Maximalgeschwindigkeit und Beschleunigung ist ein weiterer Modellschritt, den es zu validieren gilt. Dazu sind im linken Diagramm der Abbildung 4.15 die endogen berechneten Batteriekapazitäten und die Antriebsleistung der vier im Modell definierten Pkw-Segmente sowie Herstellerangaben der beiden Größen visualisiert.

Die berechneten Batteriekapazitäten befinden sich in der Streuung der aktuellen Modelle mit einer Tendenz zu höheren Batteriekapazitäten. Dies lässt sich mit der Entwicklung des Fahrzeugmarkts aufgrund der erwarteten Kundenanforderungen hinsichtlich der Reichweite begründen. Ein Vergleich der modellseitig bestimmten Antriebsleistungen mit den Herstellerangaben weist für das kleine und das mittlere Segment keine signifikanten Abweichungen auf. Die Antriebsleistungen des großen und des SUV-Segments weichen hingegen ab. Der Grund für die berechneten kleineren Antriebsleistungen sind die mit der Elektrifizierung der Fahrzeuge von Herstellern wachsenden verbauten Antriebsleistungen. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung nicht berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Antriebsarten zu gewährleisten. Insbesondere Fahrzeuge mit konventionellem Antriebsstrang weisen kleinere Leistungen als elektrifizierte Pkw auf.

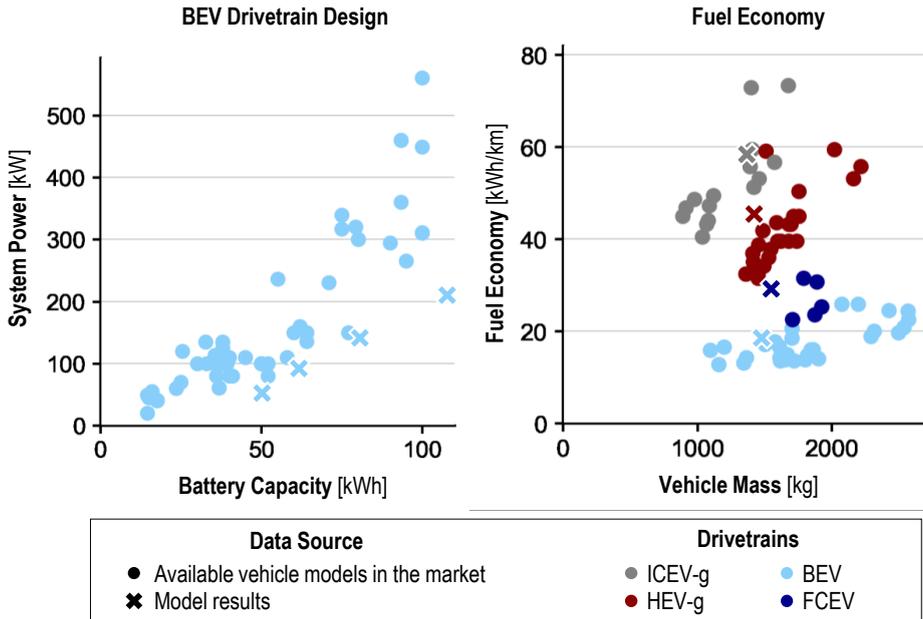


Abbildung 4.15: Validierung der Modellergebnisse hinsichtlich Antriebskonfiguration (Systemleistung und Batteriekapazität) (links) sowie der massenabhängigen Kraftstoffverbrauchsberechnung (Kraftstoffverbrauch und Fahrzeugmasse) (rechts) im Vergleich zu aktuellen Fahrzeugmodellen. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin.

Das rechte Diagramm der Abbildung 4.15 dient der Validierung des Longitudinalmodells innerhalb von $VE|Energy$ sowie der dabei als Eingangsdaten verwendeten Fahrzeugmassen, welche mit $VE|Cost$ bestimmt werden. Die Modellergebnisse hinsichtlich der beiden Größen finden sich in den Punktwolken der Literaturdaten, weshalb auch diese Berechnungsschritte als validiert gelten.

Die Validierung der Berechnungsmethodik der Wartungskosten wird mit Hilfe der Abbildung 4.16 durchgeführt.

Das linke Diagramm weist die Abhängigkeit der Wartungskosten von der Antriebsleistung der Fahrzeuge für verschiedene Antriebsformen aus. Trotz der Überschneidung der Punktwolken der einzelnen Antriebsarten sind Tendenzen zu erkennen. Mit steigendem Elektrifizierungsgrad sinken die Wartungskosten der Fahrzeuge, was durch die höhere Wartungsintensität des Verbrennungsmotors und seiner Peripherie begründet ist. Zudem sind die Wartungskosten des Brennstoffzellenfahrzeugs höher als die des batterieelektrischen. Die Modellergebnisse weisen untereinander ähnliche Verhältnisse sowie die Abhängigkeit von der Antriebsleistung auf. Des Weiteren befinden sie sich innerhalb der Punktwolken der Literaturwerte.

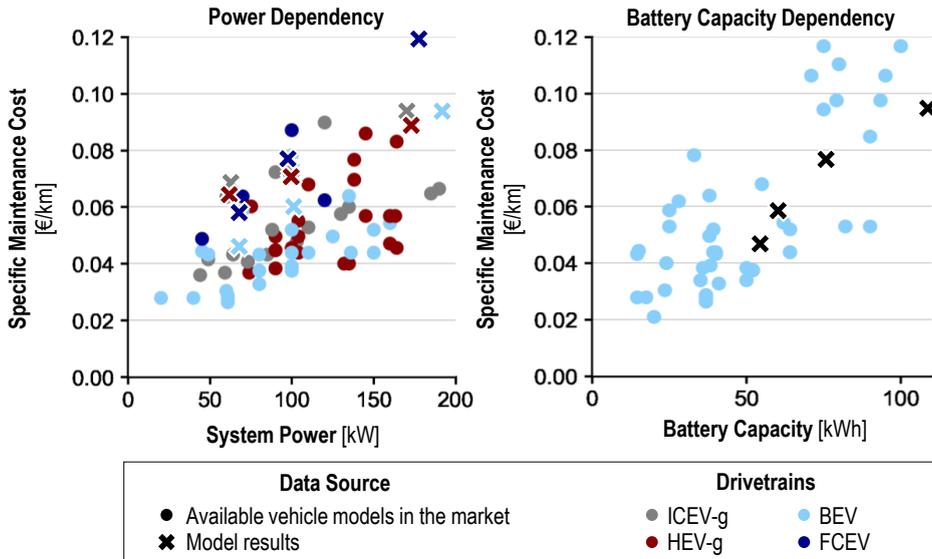


Abbildung 4.16: Vergleich der endogen berechneten Wartungskosten in Abhängigkeit der Systemleistung (links) und der Batteriekapazität (rechts) mit Literaturwerten. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin.

Das rechte Diagramm der Abbildung 4.16 zeigt darüber hinaus die Abhängigkeit der Wartungskosten batterieelektrischer Fahrzeuge von der Batteriekapazität. Ebenso wie zuvor finden sich die Modellergebnisse innerhalb der Punktwolke der Literaturdaten wieder und weisen die in der Literatur erkennbare Abhängigkeit der Wartungskosten von der Batteriekapazität auf.

Da alle dargestellten berechneten Größen keine signifikanten Abweichungen von den Literaturdaten aufweisen, gelten die Modelle $VE|Cost$ und $VE|Energy$ als validiert. Techno-ökonomische Analysen mit den beiden Modellen werden in Kapitel 6 durchgeführt. Vorab erläutert der nachfolgende Abschnitt 4.2 den methodischen Ansatz der Modellierung auf Sektorebene.

4.2 Sektorebene

Neben den Analysen auf Fahrzeugebene werden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls Untersuchungen auf Sektorebene zu den Optionen zur Defossilisierung des Verkehrssektors durchgeführt. Der methodische Ansatz des dazu entwickelten Modells inklusive der Kopplung an weitere *ETHOS*-Modelle wird in diesem Abschnitt erläutert.

4.2.1 Allgemeiner Ansatz

Zur Analyse des Verkehrssektors und dessen Wechselwirkungen mit dem restlichen Energiesystem wird, wie zuvor in Abbildung 4.1 visualisiert, das Modell *FINE.Transport* entwickelt. Die Basis des Modells bildet das *Framework for Integrated Energy System Assessment (FINE)* [188]. Das Framework bietet den Anwendern die Möglichkeit modellgestützte Energiesystemanalysen durchzuführen. Dazu stehen verschiedene

Modellbausteine zur Verfügung, die vom Anwender parametriert und verknüpft werden können. Nach der Initialisierung und Parametrierung des Energiesystemmodells wird eine Kostenminimierung der annualisierten Systemkosten (TAC) durchgeführt. Vor dem Optimierungsschritt wird das *Time Series Aggregation Module (TSAM)* [232] im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Dieses Softwarepaket führt eine Zeitreihenaggregation durch und verringert somit die Rechenzeit des Modells. An dieser Stelle wird auf eine tiefere Beschreibung von *FINE* und *TSAM* verzichtet und auf die Dokumentation sowie zugehörige Veröffentlichungen verwiesen [188], [189], [232].

Abbildung 4.17 veranschaulicht die Modellstruktur von *FINE.Transport* inklusive der verschiedenen Ebenen sowie der vorliegenden Stoff- und Energieströme.

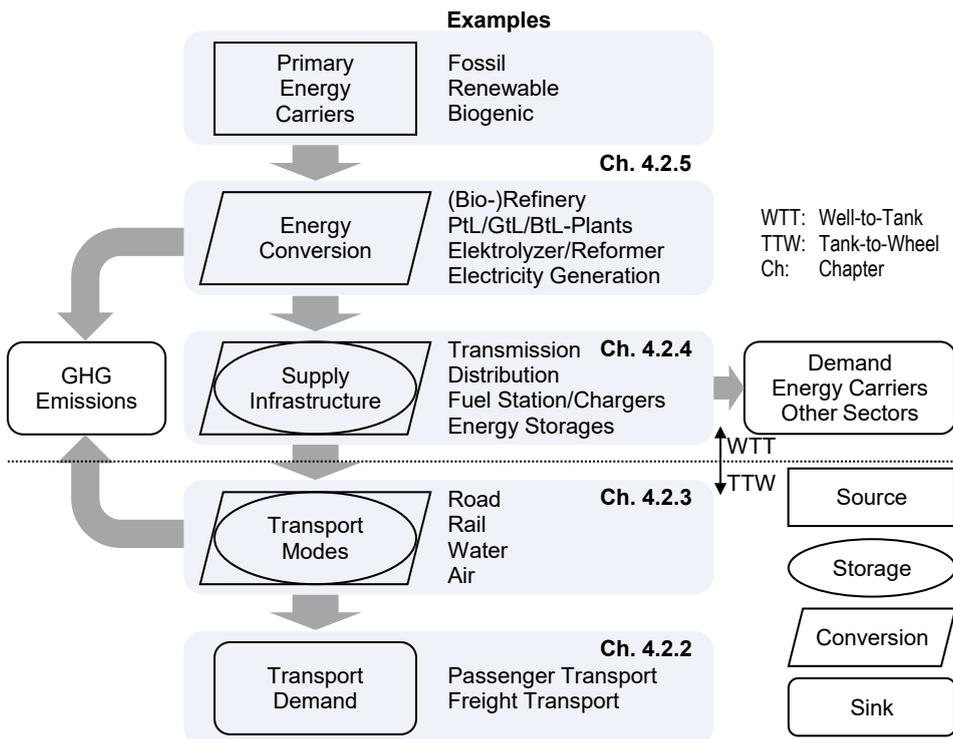


Abbildung 4.17: Aufbau des Modells *FINE.Transport* inklusive Energie- und Stofffluss.

Der Einfluss des Energiesektors auf die Analysen des Verkehrssektors nimmt im Zuge der Defossilisierung des Verkehrssektors zu. Daher wird neben dem Verkehrs- auch der Energiesektor endogen modelliert, wodurch Effekte der Sektorenkopplung berücksichtigt werden. Die Modelllogik ist bottom-up, da einzelne Technologien modelliert und zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Die Nachfragen (Senken) werden dem Modell exogen fest vorgegeben und müssen in jedem Fall gedeckt werden. Zum einen sind dies die Verkehrsnachfragen im Personen- und Güterverkehr. Zum anderen sind es die Nachfragen der weiteren Sektoren des Energiesystems (Industrie, Gebäude, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) nach den modellseitig berücksichtigten Energieträgern. Zur Deckung der Nachfragen stehen dem Modell eine Vielzahl verschiedener Technologien (Wandler)

zur Verfügung. Diese Technologien wandeln Stoff- und Energieströme ineinander um und verknüpfen somit die Primärenergieträger (Quellen) mit den genannten Nachfragen. Zudem stehen innerhalb des Systems Speicher zur Verfügung, um zeitliche Abweichungen zwischen Erzeugung und Nachfrage auszugleichen. Eine ausführliche Erläuterung der Ebenen erfolgt in den Sektionen 4.2.2 bis 4.2.5.

Zur modellseitigen Berechnung der Systemkosten müssen für die Komponenten sowohl Investitions- (CAPEX) als auch Betriebskosten (OPEX) exogen angenommen werden. Darüber hinaus bedarf es der Annahme eines Zinssatzes, um die Investitionskosten zu annuallisieren. Dieser wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit für private Investitionen (Pkw, private Ladeinfrastruktur, Aufdach-Photovoltaik) zu 2 % gesetzt. Für alle weiteren gewerblichen und industriellen Investitionen wird ein Zinssatz in Höhe von 6 % angenommen.

Das generierte lineare Optimierungsproblem (LP) umfasst verschiedene Arten von Randbedingungen. Diese lassen sich in Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen unterteilen und stellen unter anderem Stoff- oder Energiebilanzen dar. Eine bedeutende Randbedingung des Minimierungsproblems ist die Begrenzung der in Abbildung 4.17 inkludierten Treibhausgasemissionen. Dies sind zum einen die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors, welche während des Betriebs der Verkehrsmittel aufgrund der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe entstehen (Tank-to-Wheel). Zum anderen sind es die Treibhausgasemissionen, die während diverser Umwandlungsschritte im Energiesektor emittiert werden. Diese enthalten unter anderem auch die Well-to-Tank-Emissionen, welche aufgrund der Energienachfrage des Verkehrssektors entstehen. Die maximalen Treibhausgasemissionen, welche im Energie- und Verkehrssektor emittiert werden dürfen, sind abhängig vom betrachteten Jahr, wie in Abbildung 4.18 veranschaulicht.

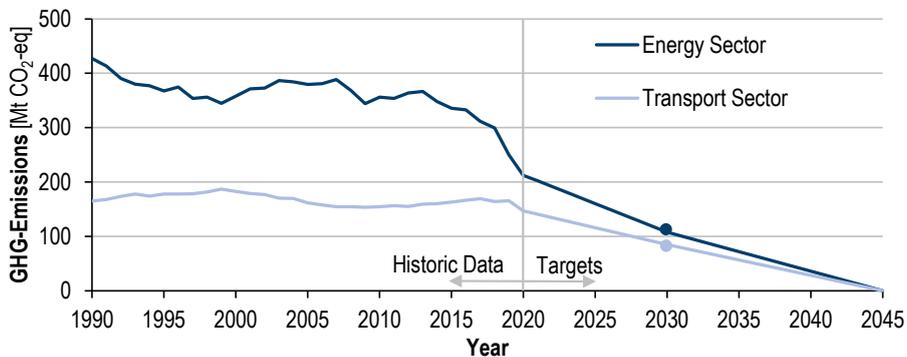


Abbildung 4.18: Historische Treibhausgasemissionen des Verkehrs- und Energiesektors sowie linearisierte Zielwerte in Anlehnung an Ziele der Bundesregierung für die Jahre 2030 und 2045 [2].

Die im Rahmen dieser Arbeit angenommenen Werte basieren auf den aktuellen Klimaschutzzielen der Bundesregierung [2]. Diese gehen von einer Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors bis 2030 um fast 50 % gegenüber 2020 aus. Im Energiesektor liegt das Reduktionsziel im gleichen Zeitraum sogar über 50 %. Insgesamt sollen beide Sektoren im Jahr 2045 keine Treibhausgasemissionen mehr emittieren. Zwischen den von der Bundesregierung genannten Zielwerten wird endogen eine lineare Reduktion der Emissionen unterstellt. Durch diese Randbedingung muss das Modell beide

Sektoren defossilisieren und somit verstärkt alternative Technologien bzw. Energieträger einsetzen.

Um nicht nur einzelne Jahre unabhängig voneinander modellieren zu können, sondern darüber hinaus auch einen Transformationspfad zu bestimmen, ist ein geeigneter methodischer Ansatz erforderlich. *FINE.Transport* nutzt dazu den *myopischen Ansatz* [190]. Dieser sieht eine Zerlegung des gesamten Betrachtungshorizonts in zeitliche Abschnitte vor. Dabei werden in der Optimierung eines Zeitabschnitts lediglich Informationen der vorherigen Zeitschritte einbezogen. Im Gegensatz zum Ansatz der *perfekten Voraussicht* bleiben Informationen über nachfolgende Zeitschritte unberücksichtigt. Somit reduziert sich zum einen die benötigte Rechenleistung und -dauer. Zum anderen führt es zu einer höheren Realitätsnähe. Nachteilig sind mögliche Fehlinvestitionen, welche beim myopischen Ansatz über den Betrachtungszeitraum getroffen werden können. [190]

Die Berechnungen beginnen mit dem Startjahr des Betrachtungszeitraums. Dabei wird der Brownfield-Ansatz gewählt, das heißt es werden historische Bestände innerhalb der beiden Sektoren berücksichtigt. Nach Abschluss der Optimierung eines Jahres werden die berechneten Neuzulassungen bzw. neu installierte Kapazitäten fixiert und ebenfalls als historischer Bestand an die Berechnung des Folgejahres übergeben. Mittels Annahmen zur Lebensdauer wird die Verschrottung der historischen Bestände endogen bei der Datenübergabe in die Folgejahre einbezogen (vgl. Abbildung 4.26). Darüber hinaus werden Randbedingungen des Markthochlaufs als untere und obere Grenzen des Optimierungslösungsraums gesetzt (vgl. Abbildung 4.27). Somit werden sprunghafte Entwicklungspfade vermieden, welche unter anderem aufgrund von nicht beliebig steigenden Produktionskapazitäten nicht umsetzbar sind.

Tabelle 4.7 fasst die grundlegenden Eigenschaften des Modells *FINE.Transport* zusammen.

Tabelle 4.7: Eigenschaften des Verkehrssektormodells *FINE.Transport*. TAC: Annualisierte Gesamtkosten.

Modellname	FINE.Transport
Programmiersprache	Python
Art des Modells	Lineares Optimierungsmodell (LP)
Art der Optimierung	Kostenminimierung (TAC)
Transformationspfad	Myopischer Ansatz
Schrittweite	1 Jahr
Sektoren	Verkehr, Energie
Zeitlicher Horizont	2020 bis 2045
Räumlicher Horizont	Deutschland
Zeitliche Auflösung	Stündlich
Räumliche Auflösung	1 Knoten (+ RegioStaR7)

Insgesamt resultiert aus dem erläuterten Ansatz das in jedem Jahr kostenminimale Gesamtsystem unter Einhaltung der als Randbedingung gesetzten maximalen Treibhausgasemissionen des Energie- und Verkehrssektors sowie der Berücksichtigung der historischen Bestände.

4.2.2 Verkehrsnachfrage

Da die Verkehrsnachfrage den Ausgangspunkt der bottom-up Modelllogik darstellt, wird die Erläuterung des methodischen Ansatzes der Modellierung mit dieser begonnen. Die

Grundlage der Bestimmung der Verkehrsnachfrage bildet das in Abschnitt 3.1 erläuterte Territorialprinzip. Demnach werden alle Fahrten innerhalb der Grenzen Deutschlands unabhängig von der Herkunft des Fahrers oder des Fahrzeugs einbezogen. Die Verkehrsnachfrage ist ein Eingangsparameter von *FINE.Transport*, wie in Abbildung 4.1 bereits angedeutet. Sie wird aufgeteilt nach Personen- und Güterverkehr mittels einer Kopplung an zwei Modelle übergeben.

Personenverkehr

Die Personenverkehrsnachfrage basiert auf den Ergebnissen des aktivitätsbasierten Modells *MO|DE* [121]. Da dieses Modell nicht im Rahmen dieser Arbeit entwickelt worden ist, wird im Folgenden lediglich auf den methodischen Ansatz der Kopplung eingegangen. Zu den Grundlagen des Modells selbst sei auf die Literatur verwiesen [121].

Der Kopplungsprozess besteht im Wesentlichen aus drei Schritten, welche in Abbildung 4.19 visualisiert sind.

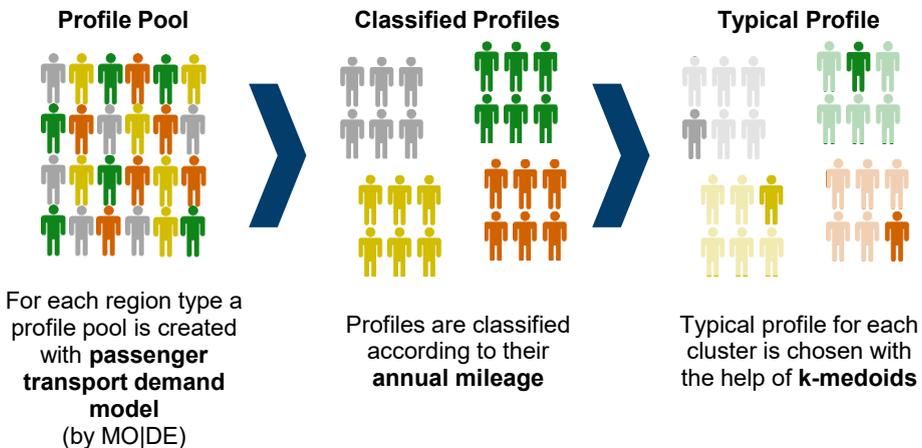


Abbildung 4.19: Prozessschema zum Auswahlprozess der im Modell *FINE.Transport* verwendeten typischen Profile aus dem mit dem Modell *MO|DE* generierten Profilpool.

Zunächst wird mittels *MO|DE* ein Pool von ca. 2.500 Profilen je Regionstyp erzeugt. Diese sind jeweils aus demografisch repräsentativen Nutzergruppen zusammengesetzt. Durch die Nutzung der RegioStar7-Klassifizierung [120] werden raumtypabhängige Unterschiede abgebildet. Abbildung D.6 in Anhang D gibt eine kartografische Einteilung der deutschen Gemeinden in die sieben Regionstypen. Anschließend werden die Profile nach ihrer Jahresfahrleistung klassifiziert, da die Jahresfahrleistung einen entscheidenden Einfluss auf die techno-ökonomischen Eigenschaften der Fahrzeuge hat. Als letzten Schritt des Kopplungsprozesses erfolgt die Auswahl eines typischen Profils je Profilkategorie mittels eines k-medoids-Algorithmus.

Bevor die methodische Auswahl des typischen Profils im weiteren Verlauf näher erläutert wird, ist zunächst die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte Inhalt des folgenden Absatzes. Die Verteilung der Fahrzeugsegmente ist nicht stark abhängig vom Regionstyp (vgl. linkes Diagramm der Abbildung 4.20). Es ist lediglich eine leichte Tendenz hin zu kleineren Fahrzeugen im urbanen Raum und größeren Fahrzeugen im ländlichen Raum zu erkennen. So

liegt beispielsweise der Anteil des KraftfahrBundesamt-Segments *Minis* in Metropolen (RT 1) 0,5 % über und der Anteil des KraftfahrBundesamt-Segments *SUV* im kleinstädtischen, dörflichen Raum einer ländlichen Region (RT 7) 0,9 % über dem Durchschnitt aller Regionstypen. Insgesamt liegen die segmentspezifischen Verschiebungen zwischen den Regionstypen mit +/- 1 % in einem niedrigen Bereich.

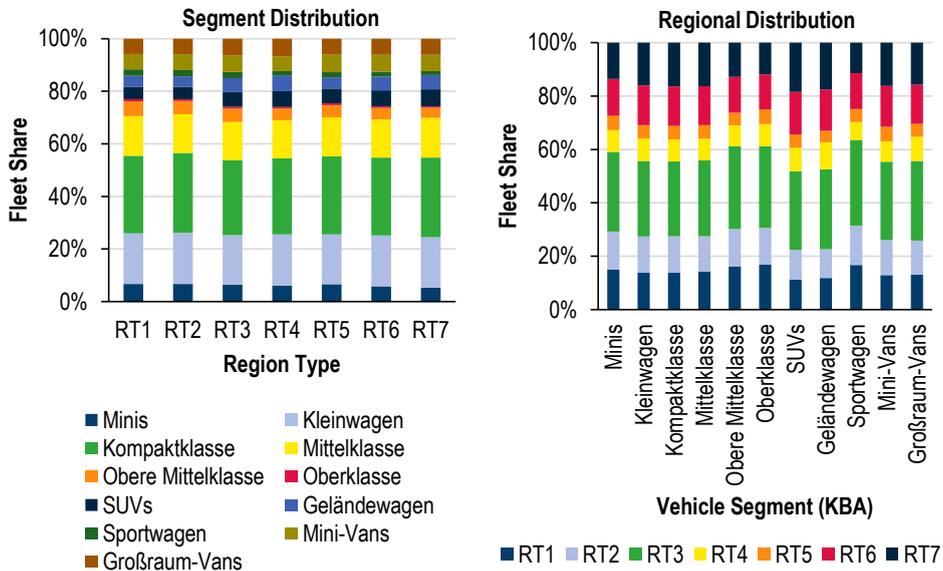


Abbildung 4.20: Verteilung der Pkw-Flotte nach Regionstyp und Fahrzeugsegment (KraftfahrBundesamt) auf Basis der *Mobilität in Deutschland 2017*-Daten [110]. RT: Regionstyp.

Aufgrund der ungleichmäßigen Bevölkerungsanteile innerhalb der Regionstypen ergeben sich Verschiebungen der Pkw-Flottenanteile der einzelnen Regionstypen, wie im rechten Diagramm der Abbildung 4.20 zu erkennen ist. Zudem wird die Verteilung durch regions-typabhängige Motorisierungsraten beeinflusst. Mit 449 Fahrzeugen je 1.000 Einwohnern ist die Motorisierungsrate in Metropolen (RT 1) am niedrigsten. Die höchste Motorisierungsrate mit 737 Fahrzeugen je 1.000 Einwohnern findet sich im kleinstädtischen, dörflichen Raum einer Stadtregion (RT 4) wieder. Aufgrund des höchsten Bevölkerungsanteils der städtischen Räume einer Stadtregion (RT 3, 25 %) und einer zudem hohen Motorisierungsrate (657 Pkw je 1.000 Einwohner) ist nahezu jeder dritte Pkw in diesem Regionstyp angemeldet. Dies verdeutlicht den hohen Einfluss dieser Regionen auf die gesamte Pkw-Flotte.

Neben der Verteilung der Fahrzeugflotte auf die Regionstypen ist auch deren Betrieb abhängig von der Region und dem Fahrzeugsegment. Abbildung 4.21 veranschaulicht diese Abhängigkeit.

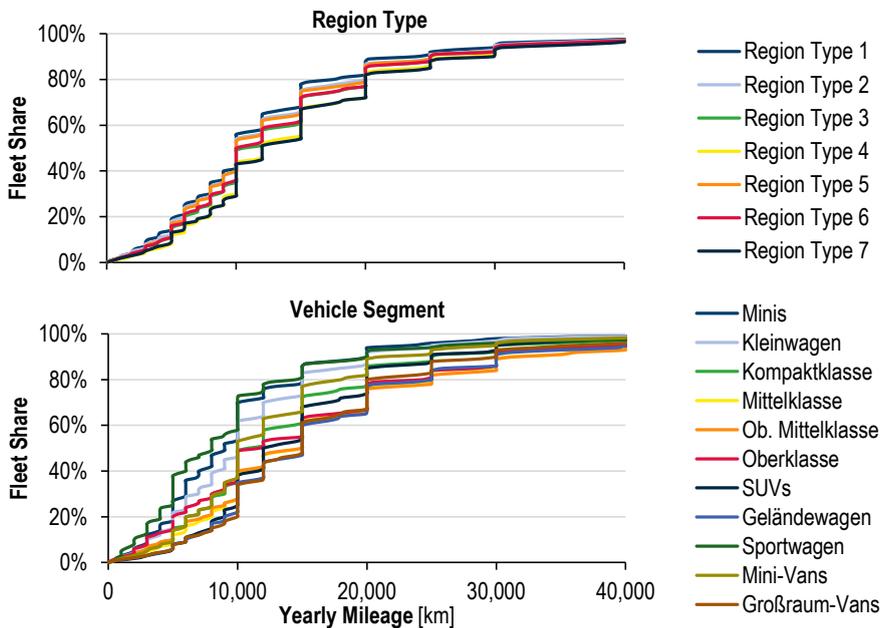


Abbildung 4.21: Verteilung der Jahresfahrleistung nach Regionstyp und Fahrzeugsegment auf Basis der *Mobilität in Deutschland 2017*-Daten [110].

Die Stufen in den visualisierten Kurven ergeben sich aus den Daten der Studie *Mobilität in Deutschland 2017*, da die Befragten zumeist ihre Jahresfahrleistung gerundet angegeben haben. In den Diagrammen wird ersichtlich, dass die Abhängigkeit der Jahresfahrleistung vom Regionstyp weniger stark ausgeprägt ist als die Abhängigkeit vom Fahrzeugsegment. So ist die Streuung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung im Vergleich der Regionstypen mit 2.240 km deutlich niedriger als zwischen den Fahrzeugsegmenten, wo diese 8.056 km beträgt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Jahresfahrleistung im städtischen Raum niedriger als im ländlichen Raum ist, wenngleich die Abweichungen wie bereits erwähnt innerhalb von ca. 2.000 km liegen. Des Weiteren steigt die Jahresfahrleistung mit der Fahrzeuggröße an. Eine Ausnahme bilden dabei Fahrzeuge der Kraftfahrtbundesamt-Segmente *Oberklasse* und *Sportwagen*, welche eine niedrigere Jahresfahrleistung als andere Fahrzeugsegmente aufweisen. Zudem ist in den Diagrammen zu erkennen, dass weniger als 20% der Pkw mehr als 20.000 km/a gefahren werden. Etwa jeder dritte Pkw weist eine Jahresfahrleistung unter 10.000 km auf.

Die Auswahl des typischen Profils aus den anhand der Jahresfahrleistung vorab klassifizierten Profilen des Pools erfolgt, wie in Abbildung 4.19 visualisiert, mittels des k-medoids-Algorithmus. Vergleichbar zum k-means-Algorithmus clustert auch der k-medoids-Algorithmus das Datenset und minimiert dabei den Abstand der Datenpunkte innerhalb eines Clusters. Im Gegensatz zum k-means-Algorithmus bestimmt der k-medoids-Algorithmus jedoch tatsächliche Datenpunkte als Zentrum der Cluster (Medoide). Da im vorliegenden Anwendungsfall ein vorhandenes Profil aus dem Datenset ausgewählt werden soll, wird folglich

die k-medoids-Clustering verwendet. Dazu wird das *kmedoids*-Package der Python-Bibliothek genutzt [260].

Es können beliebig viele Medoide und somit Cluster gewählt werden, wie die der k-medoids-Clustering zugrundeliegende Gl. 4.2 ausdrückt. Zudem besteht die Möglichkeit eine multikriterielle Clustering des Datensets durchzuführen.

$$V = \min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - c_i)^2 \quad \text{Gl. 4.2}$$

mit: k: Anzahl der Medoids
 x_j: Datenpunkte
 S_i: Datenpunkte in Cluster i
 c_i: Medoid

Das linke Diagramm der Abbildung 4.22 veranschaulicht die k-medoids-Clustering für einen zweidimensionalen Fall. Der mittels des Algorithmus bestimmte Medoid besitzt den kleinsten Abstand zu allen weiteren Datenpunkten des Datensets. Im Rahmen dieser Arbeit werden vier Kriterien zur Clustering gewählt. Die maximale tägliche Fahrleistung als Indiz für die höchste Anforderung hinsichtlich der Langstreckentauglichkeit des Fahrzeugs. Die durchschnittliche tägliche Fahrleistung als Hinweis auf die allgemeine Nutzungsintensität. Darüber hinaus wird die Standardabweichung der täglichen Fahrleistungen als weiteres Kriterium gewählt, um die Streuung höherer täglicher Fahrleistungen gegenüber der durchschnittlichen Fahrleistung miteinzubeziehen. Als letztes Kriterium wird die jährliche Standzeit des Fahrzeugs zu Hause berücksichtigt, um die Frequenz der Lademöglichkeit im Fall von batterieelektrischen Fahrzeugen im Auswahlprozess zu inkludieren.

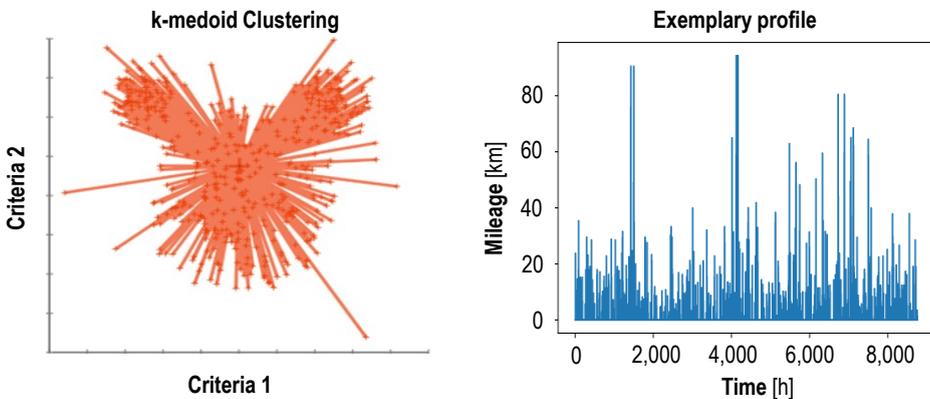


Abbildung 4.22: Veranschaulichung der k-medoid-Clustering zur Auswahl der typischen Fahrprofil (links). Beispielhaftes typisches Fahrprofil mit stündlicher Auflösung (rechts).

Das mittels der k-medoids-Clustering ausgewählte Profil enthält Informationen über fahrzeugbezogene Eigenschaften wie die Jahresfahrleistung, Standorte des Fahrzeugs und der Durchschnittsgeschwindigkeit sowie darüber hinaus weitere fahrerbezogene Eigenschaften. Die Information zum Standort des Fahrzeugs wird zur Modellierung des elektrischen Ladens von Plug-In Fahrzeugen genutzt, wie in Sektion 4.2.4 beschrieben. Das rechte Diagramm der Abbildung 4.22 zeigt ein beispielhaftes stündlich aufgelöstes Fahrprofil im

Regionstyp 3. Im dargestellten Beispiel wird lediglich in wenigen Fällen mehr als 50 km je Stunde gefahren.

Insgesamt werden in *FINE.Transport* im Pkw-Bereich sieben Regionstypen, vier Segmente und jeweils zehn Nutzergruppen modelliert, woraus sich in Summe 280 Nachfrageprofile für Pkw ergeben. Die Verkehrsleistung von Bussen und Schienenfahrzeugen wird ebenfalls mit *MO|DE* bestimmt und an *FINE.Transport* übergeben. Die Aufteilung der gesamten Verkehrsleistung auf die in Sektion 4.1.1 beschriebenen Busklassen und Zuggattungen erfolgt anhand der heutigen Verteilung. Bei Bussen werden darüber hinaus je Klasse zehn hinsichtlich der Jahresfahrleistung verschiedene Anwendungsfälle modelliert (vgl. Tabelle D.14).

Güterverkehr

Neben der Verkehrsnachfrage des Personenverkehrs ist ebenfalls die des Güterverkehrs erforderlich, um Analysen des gesamten Verkehrssektors durchzuführen. Dazu wurde im Rahmen einer betreuten Masterarbeit das Modell *FRE|MOD* entwickelt [108], dessen Aufbau inklusive der in den einzelnen Modellschritten verwendeten Datensätzen in Abbildung 4.23 visualisiert ist.

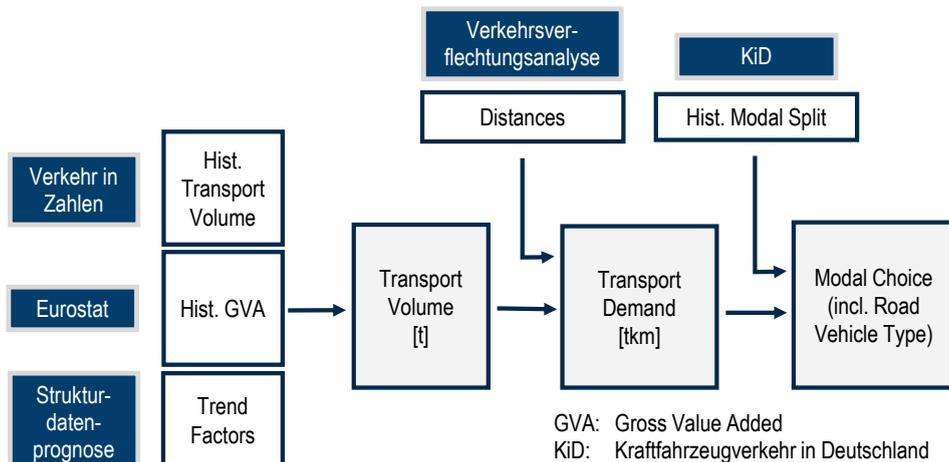


Abbildung 4.23: Funktionsschema des Modells *FRE|MOD* zur Modellierung der Güterverkehrsnachfrage.

Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Modell *MO|DE* besitzt *FRE|MOD* keine räumliche Auflösung. Darüber hinaus entspricht die zeitliche Auflösung einem Jahr. Die Modellierung erfolgt gütergruppenspezifisch unter Verwendung der Hauptgütergruppen nach NST-07 [114]. Eine tabellarische Übersicht dieser gibt Tabelle D.15 in Anhang D. Des Weiteren wird nach den Verkehrsarten National, Import, Export und Transit differenziert.

Dem Güterverkehrsnachfragemodell liegt ein vereinfachter Ansatz in Anlehnung an das klassische Vier-Stufen-Modell (vgl. Abschnitt 3.1) zugrunde. Der erste Schritt, die Verkehrserzeugung, erfolgt auf Basis historischer Daten des Transportaufkommens und der Bruttowertschöpfung sowie Trendfaktoren der wirtschaftlichen Entwicklung. Das zukünftige Verkehrsaufkommen je Gütergruppe wird als Quotient aus der Bruttowertschöpfung und der Wertdichte berechnet, wie in Gl. 4.3 zu erkennen ist.

$$A_g(t) = \frac{B_g(t)}{\tau_g(t)} \quad \text{Gl. 4.3}$$

$$B_g(t) = B_{t_{Ref}} * v_g^{t-t_{Ref}} \quad \text{Gl. 4.4}$$

$$\tau_g(t) = a_g * \ln(t - t_{ref}) + b_g \quad \text{Gl. 4.5}$$

- mit:
- A: Verkehrsaufkommen [t]
 - B: Bruttowertschöpfung [€]
 - τ : Wertdichte (tau) [€/t]
 - v : Trendfaktoren der Bruttowertschöpfung
 - t, t_{Ref} : Zeitpunkt
 - g : Hauptgütergruppe nach NST-07
 - a, b : Konstanten

Somit müssen Bruttowertschöpfung und Wertdichte zukünftiger Zeitschritte bestimmt werden. Die Berechnung der zukünftigen Bruttowertschöpfung je Gütergruppe erfolgt mittels Trendfaktoren, welche der Strukturdatenprognose entnommen werden (vgl. Gl. 4.4) [113]. Die zukünftige Wertdichte der Gütergruppen wird mittels logarithmischer Regression berechnet (vgl. Gl. 4.5). Die Funktionskonstanten a und b werden dazu auf Basis der historischen Daten ermittelt [12].

Der zweite Schritt des Vier-Stufen-Modells, die Verkehrsverteilung, wird in Anlehnung an die Daten der Verkehrsverflechtungsprognose modelliert [109]. Dazu werden die gütergruppenspezifischen Transportdistanzen bestimmt. Die Differenzierung nach den vier zuvor genannten Verkehrsarten - National, Export, Import und Transit - bezieht nicht nur die unterschiedliche Entwicklung des Transportaufkommens, sondern auch die abweichenden Transportdistanzen der Verkehrsarten ein. Abbildung 4.24 visualisiert die auf Basis der Verkehrsverflechtungsprognose bestimmten Verteilungen der Transportdistanzen nach den Verkehrsarten.

Darin wird die starke Abhängigkeit der Transportdistanz von der Verkehrsart deutlich. Auf der einen Seite liegen die Transportdistanzen des nationalen Verkehrs zu mehr als 75 % unter 500 km. Auf der anderen Seite betragen die Transportdistanzen des innerdeutschen Anteils des Transitverkehrs zu 60 % zwischen 600 und 900 km. Die Transportdistanzen des innerdeutschen Anteils des Import- und Exportverkehrs sind vergleichbar zueinander und liegen zwischen dem nationalen und dem Transitverkehr.

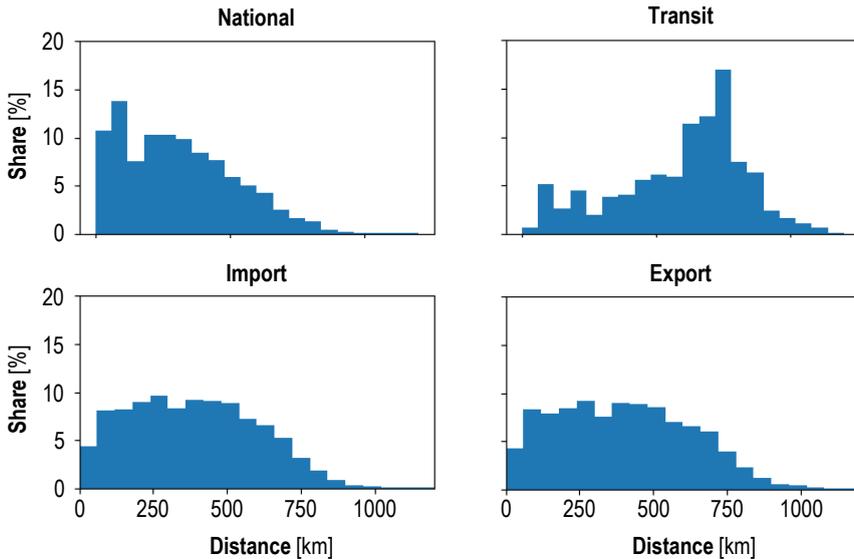


Abbildung 4.24: Abhängigkeit der Transportdistanzen von der Verkehrsart auf Basis von [109].

Der dritte Modellierungsschritt, die Verkehrsmittelwahl, erfolgt unter anderem auf Basis historischer Daten [12]. Dabei wird die Abhängigkeit der Modalwahl von der Gütergruppe und der Transportdistanz berücksichtigt. Der Einfluss der Gütergruppe spiegelt sich in Abbildung 4.25 wider.

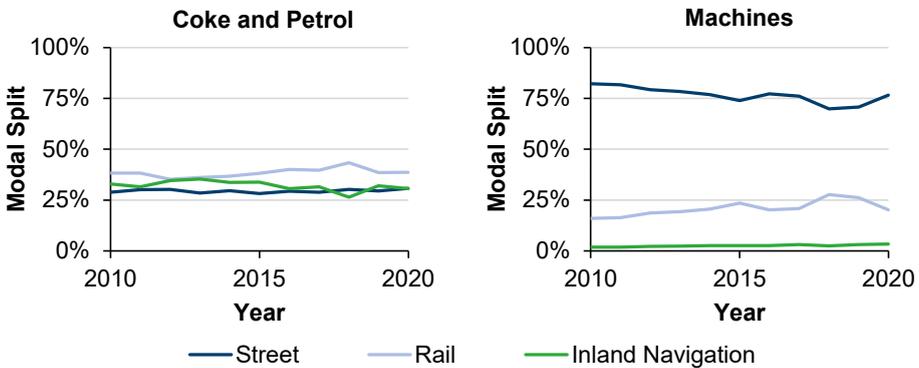


Abbildung 4.25: Modaler Split (verkehrsleistungsspezifisch) für Hauptgütergruppen Kokerei- und Mineralölzerzeugnisse sowie Maschinen und Anlagen zur Visualisierung des Einflusses der Wertdichte.

Die niedrige Wertdichte der Gütergruppe *Kokerei- und Mineralölzerzeugnisse* führt zu einem geringen Anteil des Straßenverkehrs. Demgegenüber ist der historische Anteil des Straßenverkehrs bei der Gütergruppe *Maschinen und Ausrüstungen*, welche eine höhere Wertdichte aufweist, mit nahezu 90 % mehr als doppelt so hoch. Aus der Betrachtung aller Gütergruppen lässt sich ableiten, dass insbesondere Gütergruppen mit hoher Wertdichte verstärkt auf der Straße transportiert werden.

Die zukünftige Entwicklung des modalen Splits stellt einen Szenarioparameter dar und kann in Abhängigkeit von der Gütergruppe, der Verkehrsart und der Transportdistanz variiert werden. Vergleichbar zur Modalwahl erfolgt die Aufteilung der Straßenverkehrsleistung auf die betrachteten Fahrzeugklassen auf Basis historischer Daten [112] sowie Szenarioannahmen.

Der letzte Schritt des Vier-Stufen-Modells, die Verkehrsumlegung auf die Verkehrsnetze, wird in *FRE|MOD* nicht durchgeführt. Die mit *FRE|MOD* berechneten Güterverkehrsnachfragen werden an *FINE.Transport* übergeben, sodass durch die Kopplung an die beiden Verkehrsnachfragemodelle die gesamte Verkehrsnachfrage im Modell verfügbar ist. Somit können mit *FINE.Transport* Analysen des Personen- und des Güterverkehrs durchgeführt werden.

4.2.3 Verkehrsmittel

Die zuvor beschriebene Verkehrsnachfrage kann mittels verschiedener Verkehrsmittel gedeckt werden. Die Verkehrsmittel werden, wie in Abbildung 4.17 gezeigt, innerhalb des Energiesystemmodells *FINE.Transport* als Wandler modelliert, welche Kraftstoffe in Verkehrsleistung umwandeln. Bei Batteriefahrzeugen werden zusätzlich Speicher implementiert, um die zeitliche Differenz zwischen dem Ladevorgang und der erbrachten Verkehrsleistung abbilden zu können (vgl. Sektion 4.2.4). Die techno-ökonomische Parametrierung der Modellkomponenten hinsichtlich Kosten und Energiebedarf erfolgt auf Basis von Berechnungen mit den Modellen *VE|Cost* und *VE|Energy*, welche in Abschnitt 4.1 eingeführt werden.

Aufgrund der Analyse eines Transformationspfades beginnend mit dem heutigen System entstehen zusätzliche Anforderungen an das Modell. Der gewählte Brownfield-Ansatz berücksichtigt den historischen Fahrzeugbestand. Die Modellierung des historischen Verkehrsmittelbestands erfolgt differenziert nach Fahrzeugklasse, Antriebsart sowie dem Jahr der ersten Zulassung [25]. Darüber hinaus muss für jedes Berechnungsjahr der Bedarf an den einzelnen Verkehrsmitteln bestimmt werden. Dazu wird im Folgenden die Modelllogik erläutert, welche mittels der nachstehenden Gleichungen beschrieben wird:

$$Neuzulassung_{jahr,seg} = Bedarf_{jahr,seg} - Bestand_{jahr,seg} \quad \text{Gl. 4.6}$$

$$Bestand_{jahr,seg} = \sum_{i=1980}^{jahr-1} Neuzulassung_{i,seg} * (1 - Abmeldung_{i,jahr,seg}) \quad \text{Gl. 4.7}$$

Die segmentspezifischen Neuzulassungen eines Modelljahres resultieren aus dem Gesamtbedarf, welcher aus der Verkehrsnachfrage abgeleitet werden kann, abzüglich des historischen Bestands. Der historische Fahrzeugbestand ergibt sich aus den Neuzulassungen der Vorjahre sowie einer Abmeldungsquote der jeweiligen Fahrzeugklasse. Letztere wird in Abhängigkeit des Fahrzeugalters bestimmt. Die Abmeldungsquote der Straßenfahrzeuge wird aus den in Abbildung 4.26 veranschaulichten Lebensdauerkurven auf Basis von Daten des Kraftfahrtbundesamtes abgeleitet [25].

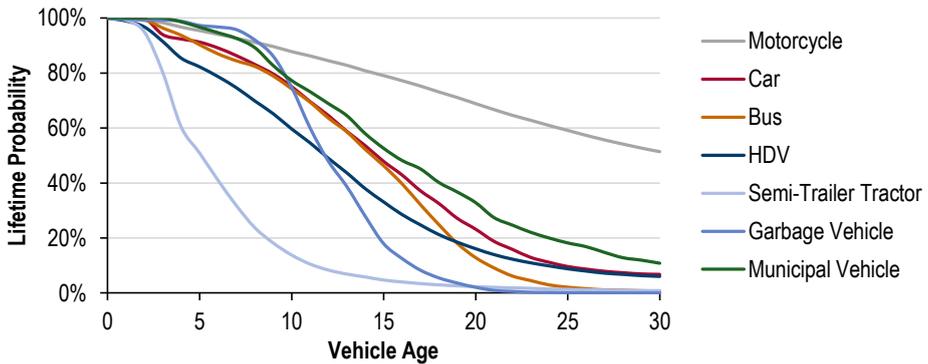


Abbildung 4.26: Lebensdauercurven von Straßenfahrzeugen auf Basis der Kraftfahrtbundesamt-Daten [25].
HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Es ist zu erkennen, dass die Lebensdauercurven mit Ausnahme von Sattelzugmaschinen und Krafträdern einen vergleichbaren Verlauf haben. Zudem wird deutlich, dass Nutzfahrzeuge kürzere durchschnittliche Lebensdauern aufweisen. Den Extremfall stellen die bereits erwähnten Sattelzugmaschinen dar. Die höchsten Lebensdauern von Straßenfahrzeugen erreichen Krafträder. Die Lebensdauercurven der Schienen-, Wasser- und Luftverkehrsmittel werden aufgrund nicht vorhandener Daten linear angenommen. Tabelle D.2 im Anhang D fasst die Annahmen hinsichtlich der durchschnittlichen Lebensdauern aller betrachteten Verkehrsmittel zusammen. Insgesamt hat die Lebensdauer der Fahrzeuge einen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeit der Umstellung der Gesamtflotte von konventionellen hin zu alternativen Antrieben. Diesen Effekt unterstreichen Analysen in Kapitel 7.

Neben dem Einfluss der Lebensdauer auf die Neuzulassungen eines Segments wird der Lösungsraum des Optimierungsmodells hinsichtlich der antriebsspezifischen Neuzulassungen durch ökonomische, politische und technische Randbedingungen eingeschränkt. Der Umstieg von einer bestehenden auf eine neue Technologie erfolgt aufgrund der eingeschränkten Marktdynamik nicht sprunghaft. Daher werden hinsichtlich des Antriebsanteils modellseitig zusätzliche Randbedingungen eingeführt, um realistische Marktentwicklungen ohne sprunghafte An- oder Abstiege der Marktanteile zu gewährleisten. Dazu wird auf der einen Seite der Markthochlauf alternativer Antriebstechnologien mittels eines Maximalwerts begrenzt. Auf der anderen Seite wird das Ausphasen einer Antriebstechnologie durch einen Minimalwert begrenzt. Zwischen den beiden Grenzkurven befindet sich der eingeschränkte Lösungsraum des Optimierungsmodells. Die Parametrierung der Grenzkurven erfolgt auf Basis der aktuellen Marktentwicklung im Pkw-Segment. Die resultierenden Grenzkurven sind in Abbildung 4.27 visualisiert. Ein vollständiger Umstieg der Neuzulassungen von einer bestehenden auf eine alternative Antriebstechnologie ist modellseitig innerhalb von 7 bis 8 Jahren möglich, wie dem Diagramm zu entnehmen ist.

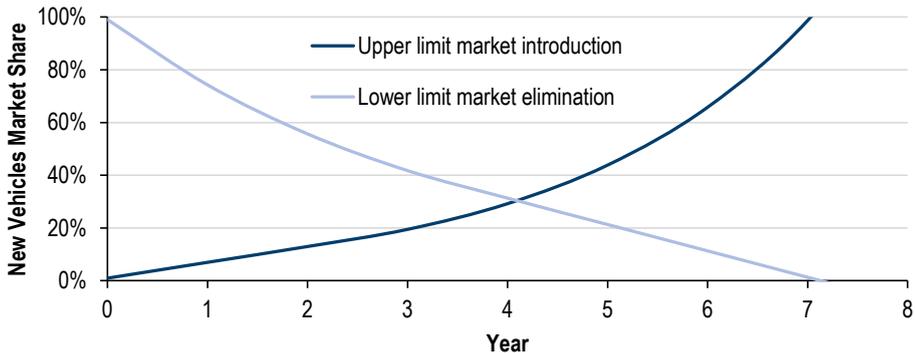


Abbildung 4.27: Obere bzw. untere Grenze der Marktentwicklung während der Markteinführung bzw. des Marktausscheidens.

Die Grenzkurve der auslaufenden Technologie wird ebenfalls bei der Modellierung eines Verbots einer bestimmten Antriebstechnologie zu einem zukünftigen Zeitpunkt angewandt. Mithilfe von *Backcasting* wird der maximale Anteil der ausphasenden Technologie in den Vorjahren bestimmt. So kann beispielsweise das in den letzten Jahren viel diskutierte Thema des politischen „Verbrennerverbots“ modelliert werden.

Der Technologie-Reifegrad (TRL) schränkt die Verfügbarkeit verschiedener Technologien bis zu einem gewissen Zeitpunkt ein. Dies betrifft Antriebstechnologien, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht am Markt verfügbar sind. Die Abschätzung der Eintrittsdaten der einzelnen Technologien in den Neufahrzeugmarkt erfolgt auf Basis der Literatur. Die szenariospezifisch angenommenen Daten werden in Kapitel 5 dargelegt. Im Fall von Schienenfahrzeugen ist der Elektrifizierungsgrad des Schienennetzes eine weitere technologische Randbedingung. Der Status Quo wird in Abhängigkeit der Zuggattung übernommen, wie in Abbildung 4.3 veranschaulicht. Die zukünftige Entwicklung des Elektrifizierungsgrads stellt einen Szenarioparameter dar.

4.2.4 Versorgungsinfrastruktur

Die energetische Versorgung der Verkehrsmittel findet per energieträgerspezifischer Infrastruktur statt. Diese ist modelltechnisch in Anlehnung an die reale Infrastruktur in vier Komponenten unterteilt. Dies sind die verkehrsmittelabhängige Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur, das Verteil- und das Übertragungsnetz sowie die Energiespeicher. Die Kosten und Verluste der Infrastruktur der Flüssigkraftstoffe Benzin, Diesel und Kerosin sind im Verhältnis zu denen der anderen Energieträger so gering, dass sie modellseitig vernachlässigt werden.

Die techno-ökonomische Parametrierung der Wasserstofftankstelleninfrastruktur erfolgt auf Basis eines Tankstellenmodells nach Cerniauskas [57], welches unter anderem nach Fahrzeugklasse und täglichem Bedarf differenziert. Die angenommenen Ladeleistungen der segmentspezifischen Ladepunkte bilden den Status Quo sowie erwartete zukünftige Entwicklungen in Anlehnung an die Literatur ab [47], [73], [75].

Die Modelllogik der Tankstellen- und Ladeinfrastruktur basiert auf dem Verhältnis der Fahrzeuge je Tankstelle bzw. Ladesäule. Da während der Markteinführung der alternativen Antriebe bereits eine flächendeckende Infrastruktur zum Markterfolg aufgebaut werden sollte,

ist dieser Szenarioparameter auf Basis der Literatur in Abhängigkeit von der Marktdurchdringung angenommen. Abbildung 4.28 veranschaulicht das Verhältnis für batterieelektrische und Brennstoffzellen-Pkw.

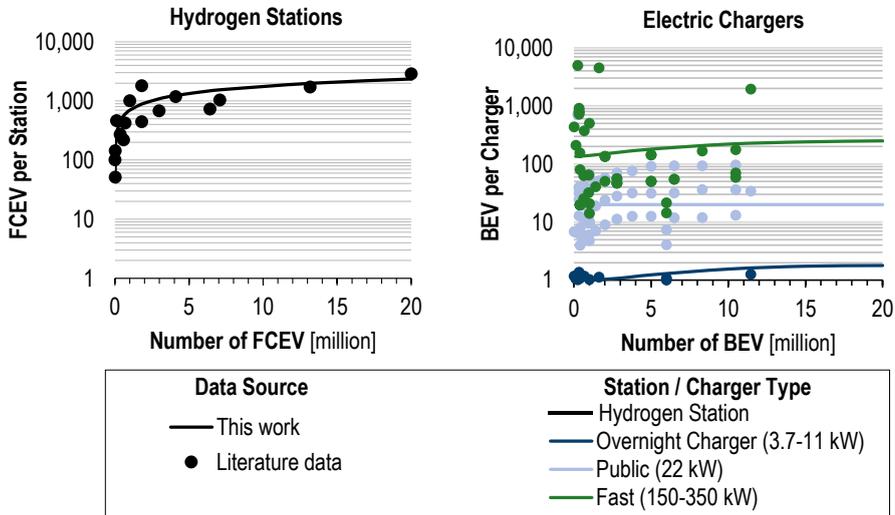


Abbildung 4.28: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) je Wasserstofftankstelle (links) bzw. Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV) je Ladepunkt aufgeteilt nach Ladepunktart (rechts) in Abhängigkeit des Gesamtfahrzeugbestands [64], [73], [75], [240].

Es ist zu erkennen, dass die Zahl der versorgten Fahrzeuge je Ladesäule bzw. Tankstelle mit steigender Flottengröße wächst. Dies trifft insbesondere auf die Schnellladeinfrastruktur für Batterie-Elektrofahrzeuge sowie die Tankstelleninfrastruktur für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge zu. Zudem versorgt eine Wasserstofftankstelle mehr Fahrzeuge als eine Ladesäule, was die hohen Anforderungen der Batterie-Elektrofahrzeuge an die Ladeinfrastruktur unterstreicht.

Bei batterieelektrischen Pkw ist das Verhältnis der Fahrzeuge je Ladesäule neben der Marktdurchdringung zusätzlich abhängig vom Ladesäulentyp. In Anlehnung an die Kategorien der Nationalen Plattform Mobilität [61] wird innerhalb des Modells zwischen Ladepunkten an verschiedenen Orten differenziert. Die Verfügbarkeit eines Heimpladers wird in Abhängigkeit des Regionstyps auf Basis der Daten nach Bamberg et al. [62] zur Verfügbarkeit eines Stellplatzes bestimmt (vgl. Abbildung 4.29). Die Daten verdeutlichen, dass Pkw mit steigendem Urbanisierungsgrad verstärkt im öffentlichen Straßenraum geparkt werden und somit die Wahrscheinlichkeit eines privaten Heimpladepunktes sinkt.

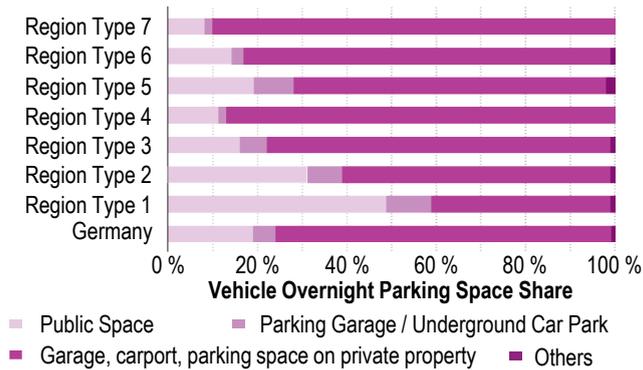


Abbildung 4.29: Art des Fahrzeugstellplatzes zu Hause nach Regionstyp (RegioStaR7) [62].

Das Verhältnis der Fahrzeuge je öffentlicher Tankstelle bzw. Ladepunkt wird nutzergruppenspezifisch in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung bestimmt. Abbildung 4.28 veranschaulicht die Anzahl der Fahrzeuge je Tankstelle bzw. Ladepunkt bei durchschnittlicher Jahresfahrleistung. Geringere Jahresfahrleistungen führen zu einer geringeren Abhängigkeit der Fahrzeuge von der öffentlichen Infrastruktur, sodass die Anzahl der Fahrzeuge je Tankstelle bzw. öffentlichem Ladepunkt steigt. Für Hybridfahrzeuge wird die jährliche Fahrleistung mittels des jeweiligen Energieträgers berücksichtigt. Entscheidender Faktor ist dabei der jahresfahrleistungsabhängige Anteil des batterieelektrischen Fahrens (vgl. Abbildung 4.10).

Während Tankstellen für gasförmige und flüssige Energieträger standardmäßig über Vor-Ort-Speicher verfügen, ist dies für die elektrische Ladeinfrastruktur zumeist nicht der Fall. Batteriespeicher, welche zur Glättung des Strombezugs aus dem Netz dienen, werden modellseitig nicht betrachtet. Aus diesem Grund ist zur Modellierung der Ladeinfrastruktur die zeitliche Dimension der Ladevorgänge zu berücksichtigen. Dazu sind innerhalb des Modells drei verschiedene Ladestrategien zuzüglich der Vehicle-to-Grid-Option implementiert, welche in Abbildung 4.30 veranschaulicht sind. Als Grundlage der nutzergruppenspezifischen Modellierung dienen Informationen, welche der in Sektion 4.2.2 erläuterten agentenbasierten Modellierung der Personenverkehrsnachfrage entstammen. Aus den Ergebnissen können nicht nur die Fahrten, sondern auch die Örtlichkeiten, an denen die Fahrzeuge stehen, abgeleitet werden. Somit ist bekannt zu welchen Zeiten die Fahrzeuge einen bestimmten Ladesäulentyp nutzen können. Dieser Schritt beinhaltet ebenfalls szenariobasierte Annahmen zur Verfügbarkeit und Anschlusswahrscheinlichkeit der einzelnen Ladesäulentypen, wie z. B. der Lademöglichkeit am Arbeitsplatz.

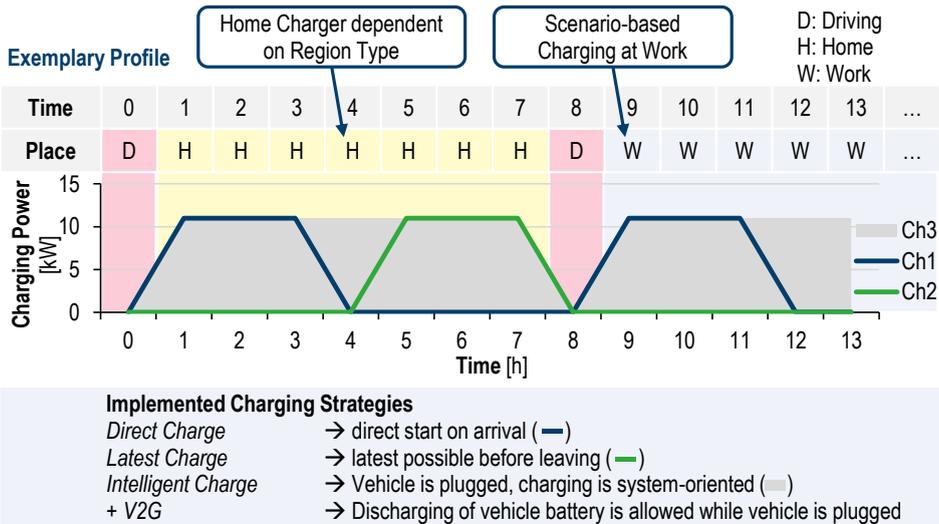


Abbildung 4.30: Visualisierung der implementierten Ladestrategien anhand eines beispielhaften Profils.

Die drei implementierten Ladestrategien unterscheiden sich hinsichtlich der zeitlichen Nutzung der Ladepunkte. Die erste Strategie des *direkten Ladens* unterstellt, dass die Fahrzeuge bei ihrer Ankunft an einem Ort an den Ladepunkt angeschlossen und ohne Zeitversatz geladen werden. Die zweite Strategie des *letztmöglichen Ladens* nimmt an, dass das Fahrzeug so geladen wird, dass es zum Ende der Standzeit an einem Ladepunkt geladen wird. Die dritte und letzte implementierte Ladestrategie des *intelligenten Ladens* unterstellt, dass die Fahrzeuge systemdienlich geladen werden. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge dauerhaft angeschlossen sind und der letztendliche Ladevorgang vom Optimierungsmodell bestimmt werden kann. Dabei sei erwähnt, dass hierzu geeignete Hard- und Software der Ladeinfrastruktur benötigt wird. Die darüber hinaus als Option zur Verfügung stehende Vehicle-to-Grid-Technologie erlaubt es zu Zeiten des angeschlossenen Fahrzeugs den Strom aus der Traktionsbatterie in das Haus- oder Stromnetz einzuspeisen. Die letztendliche Nutzung der Option unterliegt innerhalb des Modells ähnlich zur intelligenten Ladestrategie der Optimierung des gesamten Systems. Durch die modelltechnische Abbildung der verschiedenen Ladestrategien kann deren Einfluss auf das Gesamtsystem analysiert werden.

Die Ladezeiten elektrifizierter Busse und Nutzfahrzeuge werden aus Daten der Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* [112] abgeleitet. Zur Erläuterung sind in Abbildung 4.31 die Start- und Endzeiten der Tagesrouten verschiedener Nutzfahrzeugklassen visualisiert. Diese verdeutlichen die zeitliche Übereinstimmung der Start- und Endzeiten für eine Vielzahl der Routen. Insbesondere die Startzeiten verdichten sich auf wenige Morgenstunden. So starten mehr als 50 % der Fahrten innerhalb eines Zeitraums von weniger als zwei Stunden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die zeitliche Verdichtung mit sinkender Nutzlast zunimmt. Dies gilt sowohl für die Start- als auch die Endzeiten der täglichen Routen.

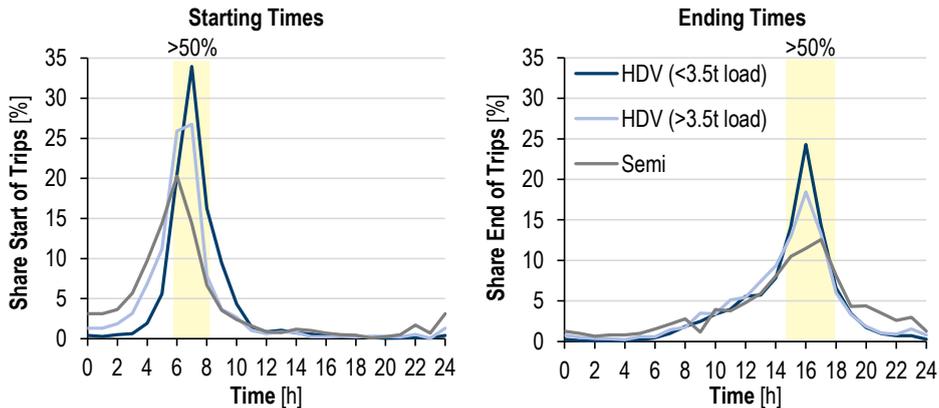


Abbildung 4.31: Start- und Endzeiten der täglichen Routen für verschiedene Nutzfahrzeugklassen. Stündlich aggregiert nach [112]. HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Die dargestellten Daten bilden die Basis der Zeiten des Depotladens, was folglich maßgeblich über Nacht erfolgt. Ähnlich wie zuvor für batterieelektrische Pkw beschrieben sind auch hier die verschiedenen Ladestrategien verfügbar. Die ergänzende öffentliche Schnellladeinfrastruktur der Nutzfahrzeuge wird ebenfalls vergleichbar zu der öffentlichen Ladeinfrastruktur der Pkw berücksichtigt. Insbesondere im Fernverkehr leistet diese einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zur energetischen Versorgung der Fahrzeuge. Aufgrund der höheren Energiebedarfe, welche innerhalb der gesetzlichen 45-minütigen Pause geladen werden, ist die angenommene Ladeleistung mit 750 kW mehr als doppelt so hoch wie die der Pkw-Ladeinfrastruktur.

Die Versorgung der Lade- und Tankstelleninfrastruktur mit den jeweiligen Energieträgern erfolgt mittels der Verteil- und Übertragungsinfrastruktur. Die Parametrierung dieser Komponenten basiert für elektrischen Strom und Methan auf Daten der aktuellen Infrastruktur [70]. Dies umfasst zum einen die Verluste innerhalb der Infrastruktur. Zum anderen werden die Kosten der Infrastruktur auf Basis der im Jahr 2020 durchschnittlich erhobenen Netzentgelte für Gewerbekunden einbezogen. Diese beinhalten unter anderem auch Netzausbaubedarfe seitens der Netzbetreiber. Für die Verteil- und Übertragungsinfrastruktur von Wasserstoff wird eine hohe Diskrepanz zwischen dem heutigen und dem zukünftigen System erwartet. Daher werden die Annahmen zur Wasserstoffinfrastruktur in dieser Arbeit nicht auf Daten der heutigen Infrastruktur, sondern auf Analysen von Robinius et al. zu einer modelltechnisch bestimmten Wasserstoffinfrastruktur gestützt [75]. Die Analysen erlauben die modellseitige Abbildung spezifischer Kosten der Infrastrukturbestandteile in Abhängigkeit vom gesamten Wasserstoffbedarf.

Als weitere Komponenten der Versorgungsinfrastruktur sind Energiespeicher innerhalb des Systems zu berücksichtigen. Diese lassen sich in Kurz- und Langzeitspeicher sowie nach Energieträger unterteilen. Aufgrund der Kopplung an *FINE.NESTOR* als Gesamtenergiesystemmodell werden diese in Anlehnung an dieses Modell inkludiert und parametrisiert [234]. Da Kavernenspeicher sowohl zur Wasserstoff- als auch zur Methanspeicherung genutzt werden können, wird die Nutzungskonkurrenz innerhalb des Modellframeworks *FINE* ebenfalls abgebildet. Tabelle 4.8 gibt eine Übersicht der einbezogenen Energiespeicher.

Tabelle 4.8: Energiespeicher im Modell *FINE.Transport*.

Speicherart	Energieträger	Speicher
Kurzzeitspeicher	Elektrisch	Batterie (klein und groß)
	Wasserstoff	Druckspeicher
	Methan	Druckspeicher
Langzeitspeicher	Elektrisch	Pumpspeicher
	Wasserstoff	Kavernenspeicher
	Methan	Kavernenspeicher
	Biogene Rohstoffe	Holz, Stroh

Mit Hilfe des beschriebenen methodischen Ansatzes zur Modellierung der Versorgungsinfrastruktur wird deren hoher Bedeutung im Fall von alternativen Kraftstoffen Rechnung getragen. Dies umfasst sowohl die Abhängigkeit der Infrastruktur von der Marktdurchdringung als auch den zeitlichen Aspekt unterschiedlicher Ladestrategien bei Plug-In Fahrzeugen.

4.2.5 Energieumwandlung und Primärenergieträger

Die Herstellung und Bereitstellung der im Verkehrssektor nachgefragten Energieträger muss seitens des Energiesektors sichergestellt werden. Dessen Modellierung wird in dieser Sektion erläutert. Um die verschiedenen technologischen Optionen vergleichen zu können, werden innerhalb des Modells sämtliche in Abbildung 2.9 inkludierte Kraftstoffproduktionspfade berücksichtigt. Die techno-ökonomischen Parameter der berücksichtigten Umwandlungstechnologien werden vom Gesamtenergiesystemmodell *FINE.NESTOR* übernommen [234].

Die Herstellung der Sekundärenergieträger mittels der unterschiedlichen Umwandlungsprozesse wird durch die Verfügbarkeit der Primärenergieträger begrenzt. Ein limitierender Faktor der Biokraftstoffherstellung ist die Anbaufläche der benötigten Energiepflanzen. Innerhalb des Modells wird zwischen Gras- und Ackerland differenziert, da auf den beiden Flächenarten unterschiedliche Kulturen angebaut werden können. Nach Majer et al. [87] steigt das Flächenpotenzial von Grün- und Ackerland für nachwachsende Rohstoffe in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf 1,7 bzw. 3 Millionen Hektar an. Das angenommene Potenzial bezieht die Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion ein. Aufgrund der niedrigeren Bodenqualität können auf Grasland lediglich Gras und Kurzumtriebsplantagen (KUP) kultiviert werden. Das Ackerland bietet innerhalb des Modells die Möglichkeit KUP, Mais, Weizen, Raps und Zuckerrüben anzubauen, welches die aktuell vielversprechendsten Energiepflanzen sind. Der höchste energetische Flächenertrag wird mit Zuckerrüben erzielt. Jedoch entstehen dabei auch die höchsten Anbaukosten.

Neben der Begrenzung der Herstellungsmengen durch die zur Verfügung stehende Anbaufläche kann die Nutzung der Biokraftstoffe aufgrund von maximalen Beimischungsraten eingeschränkt sein. Diese berücksichtigen (betriebs-)technische Anforderungen an den Antriebsstrang. So ist die Beimischung von Ethanol zu marktüblichem Ottokraftstoff aktuell auf maximal 5 bzw. 10 % begrenzt. Für Biodiesel liegt das Limit bei 7 % (vgl. Sektion 2.2.3). Höhere Anteile der biogenen Komponenten sind technisch möglich, jedoch müssen dabei stets die Materialverträglichkeit kraftstoffführender Bauteile sowie der Einfluss auf Motorenöl und Abgasnachbehandlung beachtet werden [86]. Darüber hinaus muss die Versorgungsinfrastruktur je nach Beimischungsrate ebenfalls angepasst werden. Aufgrund der notwendigen Änderungen seitens des Fahrzeugantriebssystems und der

Versorgungsinfrastruktur wird die aktuelle maximale Beimischungsrate für Biokraftstoffe modellseitig berücksichtigt.

Um Effekte der Sektorenkopplung innerhalb des Modells einzubeziehen, erfolgt eine Modellkopplung zwischen *FINE.Transport* und dem Gesamtenergiesystemmodell *FINE.NESTOR*. Mittels der Modellkopplung wird zum einen die installierte Leistung der verschiedenen Umwandlungstechnologien beschränkt, wie in Abbildung 4.32 gezeigt. Zum anderen wird die Nachfrage der Sektoren Industrie, Gebäude und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) nach Sekundärenergieträgern innerhalb von *FINE.Transport* berücksichtigt.

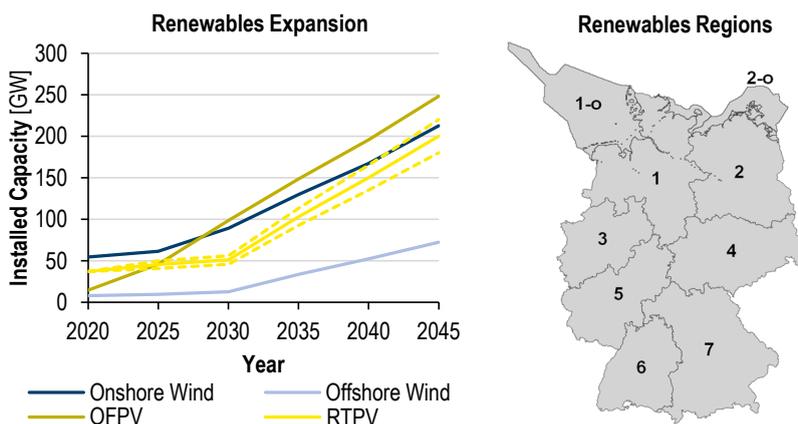


Abbildung 4.32: Installierte Leistung der Windenergie und Photovoltaik des treibhausgasneutralen Szenarios nach Stolten et al. [234] inklusive daraus abgeleiteter Grenzen des Ausbaus im Modell *FINE.Transport* (links). Räumliche Auflösung der Windenergie und Photovoltaik im Modell *FINE.Transport* in Anlehnung an das Modell *FINE.NESTOR* (rechts). OPFV: Freiflächen-Photovoltaik, RTPV: Aufdach-Photovoltaik.

Der Ausbau der Umwandlungstechnologien orientiert sich am treibhausgasneutralen Szenario nach Stolten et al. [234]. Dieses beinhaltet politische Entscheidungen zum Ausstieg aus der Kernenergie sowie der Kohleverstromung [79], [80]. Abbildung 4.32 zeigt im linken Diagramm die installierte Wind- und PV-Leistung des Szenarios. Darin ist der Anstieg der installierten Leistungen der Technologien zu erkennen. Während die installierte Leistung der Freiflächen-PV nahezu konstant über den Betrachtungszeitraum wächst, steigt die installierte Leistung der Aufdach-PV insbesondere ab dem Jahr 2030. Auf Basis des Szenarios wird eine Bandbreite von +/- 10 % bestimmt, wie innerhalb des Diagramms grafisch angedeutet wird. Diese jahresspezifische Bandbreite wird als obere und untere Grenze der installierten Leistung innerhalb von *FINE.Transport* definiert. Somit ist das Modell hinsichtlich der Antriebswahl nicht aufgrund von zu starken Restriktionen seitens der Kraftstoffproduktion beschränkt. Dennoch werden durch die Begrenzung des Lösungsraums gesamtenergiesystemrelevante Effekte berücksichtigt.

Um regionale Unterschiede in Bezug auf die Verfügbarkeit der Windenergie und Photovoltaik modellseitig einzubeziehen, werden die in Abbildung 4.32 auf der rechten Seite dargestellten Regionen in Anlehnung an *FINE.NESTOR* verwendet. Abbildung 4.33 zeigt

beispielhaft die nach Ryberg modelltechnisch bestimmten maximalen Erzeugungprofile der Windenergie und der Aufdach-Photovoltaik für zwei verschiedene Regionen [90].

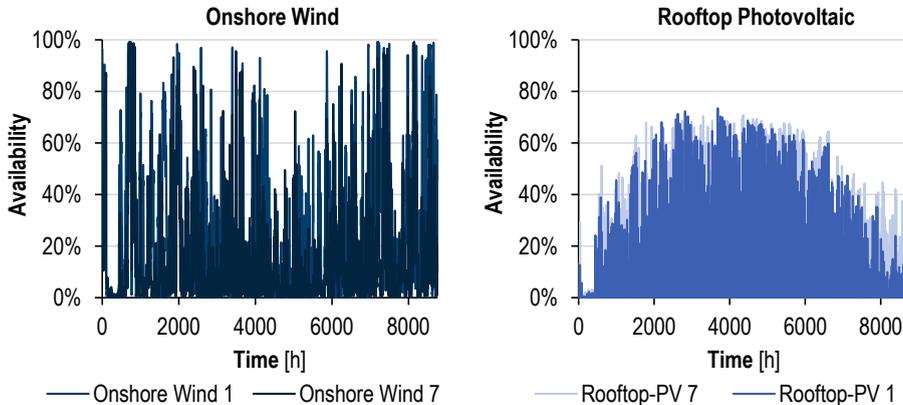


Abbildung 4.33: Erzeugungprofile der Windenergie und Photovoltaik für die Modellregionen 1 und 7, basierend auf [90]. PV: Photovoltaik.

Zum einen ist zu erkennen, dass die maximale Erzeugungsleistung der Photovoltaik infolge der Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung einen jahreszeitenabhängigen Verlauf aufweist. Demgegenüber wird die Verfügbarkeit der Windenergie geringfügiger von der Jahres- bzw. der Tageszeit beeinflusst. Zum anderen ist die abweichende Verfügbarkeit der beiden Technologien in den Regionen erkennbar. Durch die modellseitige räumliche Differenzierung der volatilen Stromerzeugungstechnologien wird die Qualität der Ergebnisse erhöht.

Die implementierten Erzeugungprofile beinhalten in Anlehnung an Stolten et al. [234] ebenfalls eine Dunkelflaute. Diese wird modelliert, indem die Verfügbarkeit der Windenergie und Photovoltaik in den beiden letzten Januarwochen auf 15 % der tatsächlichen zur Verfügung stehenden Erzeugungsleistung des verwendeten Wetterjahres 2013 beschränkt wird. Somit werden systemkritische Effekte einer solchen Einschränkung der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien modellseitig berücksichtigt.

Ebenso wie die beschriebene inländische Produktion erneuerbarer Energien ist auch der Import von Energieträgern mittels Potenzialen beschränkt. Die Potenziale und Kosten des Wasserstoffimports sowie des Imports synthetischer Kraftstoffe werden aus globalen Analysen von Heuser [168] übernommen.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der verschiedenen Energieträger entsteht eine Nutzungskonkurrenz bei verschiedenen Nachfrageoptionen. Um diese Nutzungskonkurrenz innerhalb des Modells zu berücksichtigen, werden wie zuvor bereits erwähnt die Nachfragen der weiteren Sektoren nach den Energieträgern einbezogen. Abbildung 4.34 zeigt im linken Diagramm die kumulierte Nachfrage nach verschiedenen Energieträgern der Sektoren Industrie, Gebäude und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) im treibhausgasneutralen Szenario nach Stolten et al. [234]. Diese spiegelt den Wechsel von fossilen Energieträgern wie Kohle, Rohöl und Erdgas hin zu biogenen Energieträgern sowie Wasserstoff und Elektrizität wider.

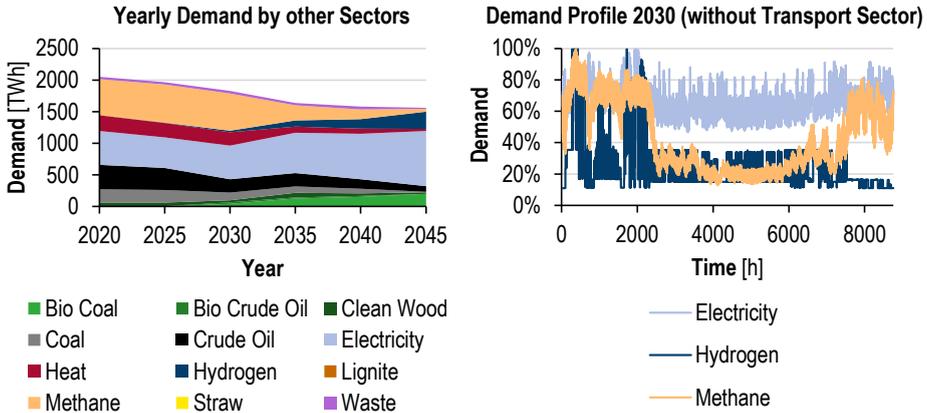


Abbildung 4.34: Absolute Energienachfrage der Sektoren Industrie, Gebäude und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen nach Energieträger von 2020 bis 2045 (links). Kumuliertes Profil der Nachfrage nach Elektrizität, Methan und Wasserstoff im Jahr 2030 (rechts). Beides jeweils nach treibhausgasneutralem Szenario nach Stolten et al. [234].

Neben der absoluten jährlichen Nachfrage ist auch die zeitliche Verteilung der Nachfrage hinsichtlich der Nutzungskonkurrenz relevant. Diese wird ebenfalls mittels der Modellkopplung an *FINE.NESTOR* abgebildet. Das rechte Diagramm der Abbildung 4.34 visualisiert beispielhaft die berechnete relative Zeitreihe der Nachfrage der anderen Sektoren des Energiesystems nach Elektrizität, Methan und Wasserstoff im Jahr 2030. Die Stromnachfrage weist keine starke Abhängigkeit von der Jahreszeit, sondern lediglich der Tageszeit auf. Demgegenüber ist insbesondere die Erdgasnachfrage aufgrund des hohen Anteils der Nutzung zur Raumheizung in den kälteren Monaten deutlich erhöht.

Insgesamt zeichnet sich die Modellierung des Energiesektors innerhalb von *FINE.Transport* durch einen hohen Grad der Modellkopplung aus. Somit werden trotz einer vereinfachten Abbildung des Energiesektors Effekte der Sektorenkopplung modellseitig berücksichtigt, welches einer der in Abschnitt 3.6 genannten Schwachpunkte der analysierten Verkehrssektormodelle in der Literatur ist.

4.2.6 Validierung

Zur Überprüfung der Validität des Modells *FINE.Transport* werden die Modellergebnisse für das Jahr 2020 mit Literaturdaten verglichen. Dies umfasst zum einen die Endenergienachfrage des Verkehrssektors. Zum anderen wird der Primärenergiebedarf des gesamten Energiesystems betrachtet. Der Vergleich der Modellergebnisse erfolgt gegenüber den historischen Daten des Jahres 2019, da im Jahr 2020 außergewöhnliche Effekte aufgrund der Coronapandemie aufgetreten sind, die eine Aussage zur Validität des Modells erschweren würden.

In Abbildung 4.35 wird die endogen berechnete Endenergienachfrage des Verkehrssektors kraftstoffspezifisch mit den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) verglichen [3].

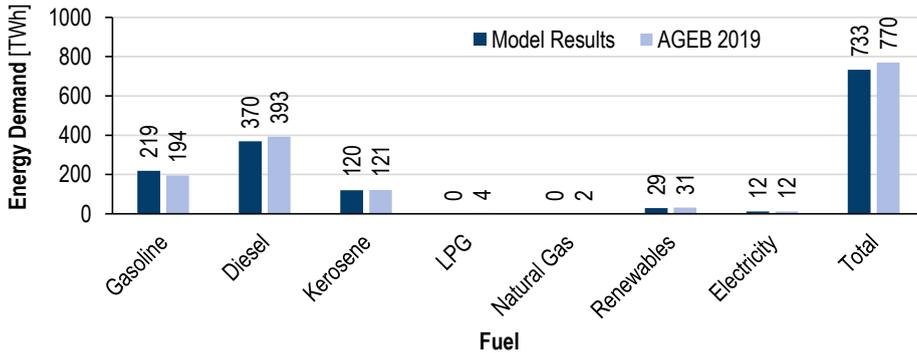


Abbildung 4.35: Vergleich der Modellergebnisse für das Jahr 2020 mit Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [3] für das Jahr 2019 zur kraftstoffspezifischen Endenergienachfrage des deutschen Verkehrssektors. LPG: Autogas.

Die Abweichung der gesamten Endenergienachfrage des Verkehrssektors liegt mit unter 5 % in einem akzeptablen Bereich. Innerhalb des Modells ist eine Verschiebung der Kraftstoffnachfrage vom Diesel- zum Ottokraftstoff zu erkennen. Daraus resultiert eine um 24 TWh erhöhte Benzinnachfrage. Die Verschiebung vom Diesel- zum Ottokraftstoff ergibt sich aufgrund der divergenten Jahresfahrleistung von Pkw mit Diesel und Ottomotor. Dieser Unterschied im Betrieb der Fahrzeuge wird in der Modellierung des historischen Fahrzeugbestands nicht berücksichtigt. Aufgrund des erwarteten sinkenden Anteils der konventionellen Pkw in den nächsten Jahren sowie des Ausscheidens der Altfahrzeuge aus dem Fahrzeugbestand vermindert sich der beschriebene Effekt. Somit reduziert sich der Modellfehler mit fortschreitendem Betrachtungshorizont, weshalb die relative Abweichung um 12 % bzw. 6 % im Modelljahr 2020 akzeptiert wird. Die Differenz der Modellergebnisse hinsichtlich der Nachfrage der weiteren Kraftstoffe liegt unter 4 %. Die Nachfrage des Verkehrssektors nach Autogas und Erdgas wird aufgrund des kleinen Anteils am gesamten Endenergiebedarf im Jahr 2020 modellseitig vernachlässigt.

Als weiteren Schritt der Modellvalidierung wird in Abbildung 4.36 der endogen berechnete Primärenergiebedarf für das Jahr 2020 energieträgerspezifisch den Daten der AGEB für das Jahr 2019 gegenübergestellt.

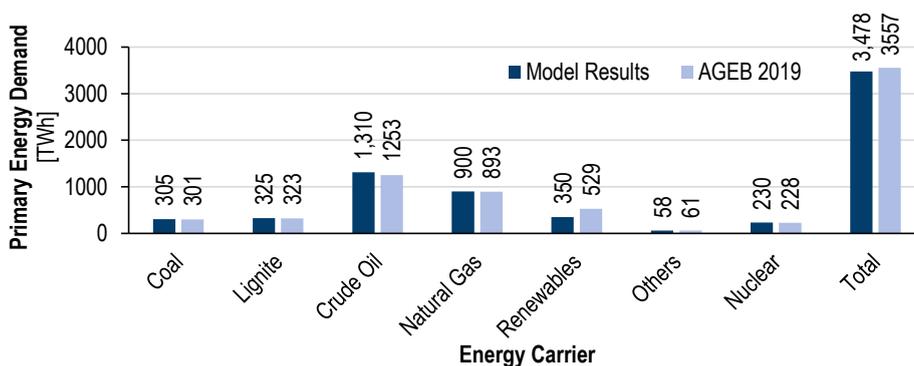


Abbildung 4.36: Vergleich der Modellergebnisse für das Jahr 2020 mit den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [3] für das Jahr 2019 zum energieträgerspezifischen Primärenergiebedarf des gesamten deutschen Energiesystems.

Insgesamt liegt der endogen berechnete Primärenergiebedarf 2 % unter dem historischen Bedarf. Ein Grund für den niedrigeren Primärenergiebedarf gegenüber den historischen Daten ist der Stromhandel mit anderen Ländern. So hatte Deutschland im Jahr 2019 einen positiven Saldo in Höhe von 33 TWh. Da der Stromhandel mit anderen Ländern in *FINE.Transport* nur stark vereinfacht modelliert ist, wird dieser Effekt nicht korrekt wiederspiegelt. Aus dem genannten Effekt ergibt sich auch der niedrigere Primärenergiebedarf erneuerbarer Energien, da der durch sie erzeugte elektrische Überschussstrom modellseitig nicht realitätsnah exportiert wird. Die Analyse des Verkehrssektors wird durch diese Abweichung nicht beeinflusst. Da dies das primäre Ziel des Modells darstellt, wird der beschriebene geringe Modellierungsfehler akzeptiert.

Insgesamt lässt sich durch den Vergleich des berechneten Endenergiebedarfs im Verkehrssektor sowie dem Primärenergiebedarf des gesamten Energiesystems mit historischen Daten die Validität des Modells *FINE.Transport* ableiten.

5 Szenarien

Die Analysen im Rahmen dieser Arbeit erfolgen szenariobasiert. Die Szenarien beziehen sich zum einen auf typische Fahrzeuganwendungen zur techno-ökonomischen Analyse von Straßenfahrzeugen in Kapitel 6. Zum anderen werden für die in Kapitel 7 durchgeführten Analysen auf Sektorebene relevante sozio- und techno-ökonomische Entwicklungen des Verkehrssektors in Szenarien zusammengefasst, um deren Einfluss auf Aspekte wie die Entwicklung der Neuzulassungen oder des Kraftstoffbedarfs zu untersuchen.

5.1 Fahrzeuganwendungen

Die untersuchten Fahrzeugtypen reichen von Personenkraftwagen (Pkw) über Busse bis hin zu verschiedenen Nutzfahrzeugtypen. Für jede Fahrzeugklasse werden drei verschiedene Anwendungen definiert und analysiert. Bei Pkw wird zusätzlich ein durchschnittliches Mittelklassefahrzeug betrachtet.

Die Fahrzeuge können mit unterschiedlichen Antriebssträngen ausgestattet sein. In dieser Arbeit werden die derzeit am meisten diskutierten Optionen berücksichtigt. Die entsprechenden Antriebskonzepte sind:

- Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor (ICEV)
- Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV)
- Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV)
- Range-Extender-Elektrofahrzeuge (REEV)
- Oberleitungs-Elektrofahrzeuge (O-BEV) (nur Busse und Sattelzugmaschinen)
- Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV)
- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)

Bei Bussen sind Batterie-Elektrofahrzeuge als Gelegenheitslader eine Option (O-BEV). Diese können über Stromabnehmer an bestimmten Haltestellen auf einer Tagesroute laden, um kleinere Batteriekapazitäten zu nutzen oder höhere Tageskilometer bei gleicher Batteriekapazität zu ermöglichen.

Neben Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge werden auch Oberleitungs-Sattelzugmaschinen (O-BEV) diskutiert [40], [67], [68]. Wie bereits im Zusammenhang mit Bussen beschrieben, ist es das Ziel, die erforderliche Batteriekapazität zu reduzieren. Zur Realisierung dieses Konzepts werden daher Teile der Autobahn mit Oberleitungen elektrifiziert, sodass der benötigte Strom über Stromabnehmer aus dem Netz bezogen werden kann, während unter den Oberleitungen gefahren wird.

Die Konfiguration des jeweiligen Antriebsstrangs erfolgt wie in Sektion 4.1.2 beschrieben.

5.1.1 Personenkraftwagen

Die erste Fahrzeugklasse, die in dieser Arbeit untersucht wird, sind Pkw. Die wichtigsten Parameter, die die Anwendung definieren, sind das Fahrzeugsegment, die Reichweite der batterieelektrischen Alternative und die jährliche Fahrleistung. Diese Daten sind in Tabelle 5.1 für die vier untersuchten Anwendungsfälle zusammengefasst. Die Fahrzeuglebensdauer wird für alle Pkw-Anwendungen mit 12 Jahren angenommen.

Als Referenz wird als Erstes ein durchschnittlicher Pkw analysiert. Die Fahrleistung dieses Mittelklassewagens beträgt 14.610 km/a, was der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von Pkw in Deutschland entspricht. Die Reichweite der batterieelektrischen Variante steigt, wie in Sektion 4.1.2 gezeigt, von 300 km im Jahr 2020 auf 600 km im Jahr 2050 an, um dem Wunsch der Fahrzeugkäufer nach höheren Reichweiten gerecht zu werden.

Die zweite analysierte Pkw-Anwendung ist ein Stadt-Pkw. Bei diesem handelt es sich um einen Kleinwagen, der hauptsächlich innerhalb eines Stadtgebiets kurze Strecken zurücklegt. Aufgrund der kurzen Strecken und der geringen Fahrhäufigkeit ist die jährliche Fahrleistung geringer als die durchschnittliche jährliche Fahrleistung in Deutschland. Außerdem ist eine geringere Reichweite von 200 km ausreichend.

Tabelle 5.1: Randbedingungen der untersuchten Personenkraftwagen. BEV: Batterie-Elektrofahrzeug.

Fahrzeugtyp	Fahrzeugsegment	BEV Reichweite	Jährliche Fahrleistung
Durchschnittlicher Pkw	C, D, E	300-600 km	14.610 km/a
Stadt-Pkw	A, B	200 km	10.000 km/a
Langstrecken-Pkw	C, D, E	500-850 km	30.000 km/a
SUV mit Anhängerbetrieb	J	300-600 km	15.000 km/a

Im Gegensatz zum Stadt-Pkw ist der dritte untersuchte Pkw-Typ ein Mittelklassewagen, der häufig für lange Strecken auf Autobahnen genutzt wird. Daher wird die Reichweite im Laufe der Zeit von 500 km im Jahr 2020 auf 850 km im Jahr 2050 erhöht, um Langstreckenfahrten komfortabler zu machen und die Notwendigkeit von Ladestopps an Schnellladestationen zu verringern. Außerdem wird angenommen, dass die jährliche Fahrleistung mit 30.000 km/Jahr aufgrund der hohen Häufigkeit von Langstreckenfahrten überdurchschnittlich hoch ist.

Der letzte analysierte Pkw-Typ ist ein Sport Utility Vehicle (SUV), das auch für den Betrieb von Anhängern, z. B. Pferdeanhängern oder Wohnwagen, genutzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass der Energiebedarf im Anhängerbetrieb 50 % über dem Durchschnitt liegt. Daher sind die Batterien von Batterie-Elektrofahrzeugen größer ausgelegt, um die angenommenen Reichweiten auch im Anhängerbetrieb zu erreichen. Zusätzlich wird die Leistung des Antriebsstrangs gegenüber der ursprünglich ermittelten Antriebsleistung um 10 % erhöht, entsprechend den in Sektion 4.1.2 beschriebenen Leistungsparametern.

5.1.2 Busse

Nach den Pkw sind Busse die zweite Fahrzeugart, die in dieser Arbeit für die Personenbeförderung analysiert wird. Die unterschiedenen Einsatzgebiete sind der Stadtbus, der Überlandbus und der Reisebus.

Der Stadtbus wird als Gelenkbus mit einer Länge von 18 m angenommen. Er wird hauptsächlich in städtischen Gebieten eingesetzt und verkehrt auf Strecken mit geringeren Entfernungen. Die Reichweite der batterieelektrischen Alternative wird auf 225 km festgelegt. Mit dieser Reichweite können 50 % der täglichen Umlaufpläne in Deutschland bedient werden [59]. Bei Gelegenheitsladern (O-BEV) wird eine Reichweite von 100 km angenommen.

Im Gegensatz zum Stadtbus fährt der Überlandbus längere Strecken. Die Reichweite der Batterie-Elektrofahrzeuge wird daher so festgelegt, dass er entgegen dem Stadtbus auf allen Umläufen eingesetzt werden kann (vgl. Sektion 4.1.2) [59]. Bei Gelegenheitsladern

werden die Reichweiten aufgrund der größeren Entfernungen zwischen den Ladestationen ebenfalls höher angesetzt. Zudem ergeben sich durch die höheren Tagesfahrleistungen auch höhere Jahresfahrleistungen für die in diesem Anwendungsbereich betrachteten Standardbusse.

Die Lade- und Betankungsinfrastruktur für die beiden vorgenannten Bustypen wird als identisch angenommen. Für einen batterieelektrischen Bus werden 0,9 Depotladegeräte mit 100 kW berücksichtigt, da sich die Fahrzeuge die Ladegeräte zu einem gewissen Grad teilen können [59]. Gelegenheitslader benötigen weniger leistungsstarke Depot-Ladegeräte (50 kW), aber zusätzlich eine 350 kW-Ladestation je vier Fahrzeugen, die auf der gleichen Strecke verkehren [59]. Die angenommene Wasserstofftankstelle befindet sich auf dem Betriebshof und ist in Anlehnung an Cerniauskas [57] konfiguriert.

Die dritte Anwendung in dieser Fahrzeugklasse ist ein Reisebus. Im Gegensatz zu den beiden anderen untersuchten Busanwendungen wird ein solches Fahrzeug nicht nach Umlaufrouten betrieben, sondern für die Langstreckenfahrt größerer Gruppen eingesetzt. Er fährt also hauptsächlich auf Autobahnen und benötigt höhere Reichweiten, um zusätzliche Ladestopps zu vermeiden, die zu längeren Fahrzeiten und höheren Fahrerkosten führen würden. Außerdem unterscheidet sich die Fahrzeugtopologie, d. h. die aerodynamischen Parameter, von Standard- oder Gelenkbussen, die somit abweichende Energieanforderungen haben. Es wird davon ausgegangen, dass diese Fahrzeuge die gleiche öffentliche Lade- und Betankungsinfrastruktur wie Sattelzugmaschinen nutzen.

In Tabelle 5.2 sind die wichtigsten Parameter für die Fahrzeugkonfiguration der untersuchten Busanwendungen aufgeführt.

Tabelle 5.2: Randbedingungen der untersuchten Bustypen. BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, O-BEV: Gelegenheitslader/Oberleitungselektrisches Fahrzeug mit Batterie.

Fahrzeugtyp	Länge	BEV-Reichweite (O-BEV)	Jährliche Fahrleistung
Stadtbus	18 m	225 km (100 km)	60.000 km/a
Überlandbus	12 m	400 km (200 km)	90.000 km/a
Reisebus	-	500 km (250 km)	70.000 km/a

5.1.3 Nutzfahrzeuge

Zusätzlich zu den bisher definierten Fahrzeugen des Personenverkehrs werden drei Nutzfahrzeugtypen zur Güterbeförderung betrachtet. Wie bei den Bussen spielen auch hier die Gesamtbetriebskosten eine sehr wichtige Rolle, da Logistikunternehmen ihre Kaufentscheidungen in erster Linie auf Basis der Kosten treffen.

Der erste Fahrzeugtyp, der in diesem Bereich untersucht wird, ist ein 3,5-7,5 t schweres Fahrzeug, das für die Beförderung von Gütern im urbanen Gebiet eingesetzt wird. Hierfür wird lediglich eine batterieelektrische Reichweite von 230 km benötigt, was 90 % der täglichen Fahrten in Deutschland in dieser Fahrzeugklasse abdeckt [112]. Zum Laden wird für jedes Fahrzeug ein 22 kW-Depotlader angenommen.

Eine weitere typische Anwendung sind Abfallsammelfahrzeuge. Diese zeichnen sich durch einen hohen Energiebedarf durch Nebenverbraucher aus. Zum einen führen ihre häufigen Start-Stopp-Fahrten zu einem erhöhten Verbrauch. Zum anderen haben die Fahrzeuge aufgrund der Müllpresse einen hohen Nebenverbrauch. Die batterieelektrische Reichweite und

die Jahresfahrleistung der Müllfahrzeuge werden mit 300 km und 30.000 km angenommen. Für das batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug wird eine Ladeleistung von 100 kW unterstellt.

Schließlich wird eine Langstreckensattelzugmaschine untersucht. Die hohen Tageskilometerleistungen dieser Fahrzeugklasse machen eine Reichweite von 600 km erforderlich. Mit dieser Reichweite können 80 % der täglichen Fahrten von Fahrzeugen dieser Größe zurückgelegt werden, ohne dass zwischendurch eine Hochleistungsladung erforderlich ist [112]. Für längere Fahrten bedarf es "Mega-Chargern" entlang von Autobahnen, um die Batterien während der vorgeschriebenen Lenkpausen aufzuladen. Darüber hinaus werden Langsammlader mit einer Leistung in Höhe von 150 kW für das Aufladen während längerer Standzeiten, z. B. über Nacht auf einem Betriebshof, benötigt. Das Verhältnis der Anzahl der Ladegeräte zu den Fahrzeugen wird von Hacker et al. [40] übernommen.

Die wichtigsten Parameter der Fahrzeugtypdefinition für die in dieser Arbeit untersuchten Nutzfahrzeuge sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Randbedingungen der untersuchten Nutzfahrzeugtypen. BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, O-BEV: Oberleitungselektrisches Fahrzeug mit Batterie.

Fahrzeugtyp	Fahrzeuggewicht	BEV-Reichweite (O-BEV)	Jährliche Fahrleistung
Urbanes Lieferfahrzeug	3.5-7.5 t	230 km	35.000 km/a
Abfallsammelfahrzeug	<26t	300 km	30.000 km/a
Langstreckensattelzugmaschine	<40t	600 km (200 km)	114.000 km/a

Die techno-ökonomische Analyse der in diesem Abschnitt definierten Fahrzeuge erfolgt in Kapitel 6.

5.2 Szenarien des Verkehrssektors

Die Analyse des Verkehrssektors erfolgt auf Basis von Szenarien, um mögliche Entwicklungen abzubilden und deren Einfluss auf die Ergebnisse zu untersuchen. Die Szenarioentwicklung erfolgt auf zwei Ebenen. Zum einen werden zwei Szenarien der Verkehrsnachfrageentwicklung definiert, welche sozio-ökonomische Entwicklungen berücksichtigen. Zum anderen werden drei techno-ökonomische Szenarien definiert, welche vor allem unterschiedliche Entwicklungen der Antriebsarten abbilden. Insgesamt ergeben sich durch die Kombination somit sechs Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrssektors, die in Kapitel 7 analysiert werden.

5.2.1 Sozio-ökonomische Szenarien

Die Entwicklung der Verkehrsnachfrage stellt einen wesentlichen Einflussfaktor auf den gesamten Verkehrssektor dar. Die in dieser Sektion eingeführten Verkehrsnachfrageszenarien basieren in Bezug auf den Personenverkehr auf der Arbeit von Reul [121].

Die Szenarien entstehen, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, durch das Aufspannen eines Szenarioraums mit den beiden in Abschnitt 3.1 vorgestellten Dimensionen. Um auf Basis der beiden Dimensionen Szenarien zu entwickeln, wird jeweils auf der einen Seite der Status Quo und auf der anderen Seite eine progressive Strömung abgebildet. So entstehen insgesamt vier mögliche Szenarien. In dieser Arbeit wird lediglich der Status Quo sowie die

gleichzeitige progressive Entwicklung der beiden Dimensionen betrachtet. Somit werden die beiden Extreme gegenübergestellt und die Szenarioanalyse im Umfang begrenzt.

Das Verkehrsnachfrageszenario **Status-Quo** orientiert sich an Eigenschaften der heutigen Verkehrsnachfrage. Diese zeichnet sich durch eine Dominanz des Individualverkehrs aus. Die meisten Personen möchten ein Auto besitzen, mit dem sie nahezu uneingeschränkten Zugang zu allen Gebieten haben. Der Trend zu SUV setzt sich dabei ungebremst fort. Im Güterverkehr ist der Anteil des Straßenverkehrs ebenfalls ungebrochen hoch. Die weitere Globalisierung und der steigende Online-Handel lassen die Güterverkehrsnachfrage zudem weiter ansteigen. Fahrten zur Arbeit und Dienstreisen nehmen ein vor der Coronapandemie gekanntes Niveau ein.

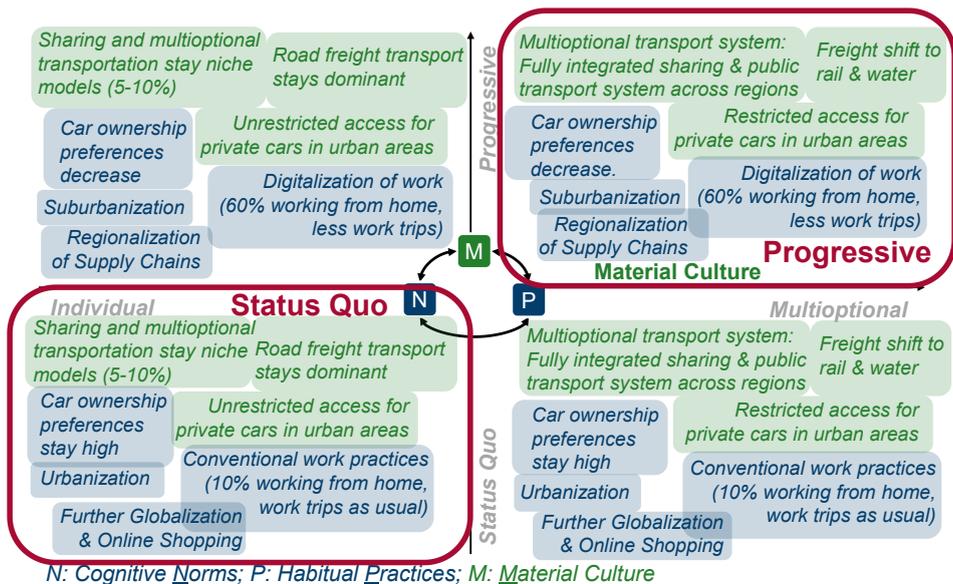


Abbildung 5.1: Dimensionsbasierte Entwicklung der sozio-ökonomischen Szenarien nach Reul [121]. Szenarioparameter gehören den kognitiven Normen, Gewohnheitspraktiken oder der Materialkultur an und können unterschiedliche Ausprägungen annehmen. In dieser Arbeit werden auf Basis der dimensionsbasierten Szenarioentwicklung ein Status Quo und ein Progressives Szenario abgeleitet.

Im Gegensatz dazu steigt die Digitalisierung der Arbeit im Verkehrsnachfrageszenario **Progressive** an, weshalb Arbeitsfahrten und Dienstreisen auf Grund von zunehmendem Homeoffice und Webmeetings weniger werden. Die Dominanz des Individualverkehrs wird mittels eines verbesserten öffentlichen Verkehrssystems gebrochen. Der attraktivere öffentliche Verkehr und der eingeschränkte Zugang von Pkw in urbanen Gebieten führen dazu, dass der Autobesitz rückläufig ist. Des Weiteren verschiebt sich die Pkw-Nachfrage von SUV zurück zu Mittelklasse- und Kleinwagen. Eine verstärkte Regionalisierung von Lieferketten führt zu kürzeren Transportdistanzen im Güterverkehr. Darüber hinaus findet bei längeren Transportdistanzen eine Verlagerung von der Straße auf die Schiene und Flüsse statt.

Die beschriebenen sozio-ökonomischen Szenarien bilden gegenläufige Trends der Verkehrsentwicklung ab, welche durch veränderte Einstellungen und Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer aber auch durch politische Entscheidungen entstehen können. Die Coronapandemie hat verdeutlicht, inwiefern Schocks des Systems zu solchem Wandel führen können. Die Annahmen der Szenarien sind in Tabelle E.1 bis Tabelle E.3 in Anhang E zusammengefasst.

5.2.2 Techno-ökonomische Szenarien

Im Gegensatz zu den sozio-ökonomischen Szenarien beeinflussen die techno-ökonomischen Szenarien nicht die Verkehrsnachfrage, sondern die Entwicklung der verschiedenen Antriebskonzepte. Dies umfasst mögliche fahrzeugklassenspezifische politische Verbote von bestimmten Antriebskonzepten (Verbot von Verbrennungsmotoren), Reichweitenanforderungen an batterieelektrische Pkw sowie unterschiedliche techno-ökonomische Entwicklungen der Hauptkomponenten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen.

Das Szenario **Reference (Ref)** zeichnet sich durch eine uneingeschränkte Nutzung der Antriebs- und Kraftstoffoptionen aus. Somit ist vor allem der Einsatz und die Neuzulassung von konventionellen Antrieben über den gesamten Betrachtungszeitraum möglich. Dies inkludiert ebenfalls den Einsatz synthetischer Flüssigkraftstoffe in allen Bereichen des Verkehrssektors. Die Wahl der Batterievariante ist bei Pkw innerhalb des Modells an die jährliche Fahrleistung der Fahrzeuge geknüpft. Im Szenario *Reference* wird unterhalb einer Fahrleistung von 10.000 km/a eine kleinere Batterie gewählt. Zwischen 10.000 km/a und 20.000 km/a wird eine mittlere Batteriekapazität genutzt. Oberhalb von 20.000 km/a ist eine größere Batteriekapazität erforderlich. Die techno-ökonomische Entwicklung der Batterie, der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks entspricht der Referenzentwicklung. Dies umfasst sowohl das angenommene Weltmarktszenario zur Bestimmung der Komponentenkosten als auch alle weiteren komponentenspezifischen Parameter.

Im Folgenden werden die angenommenen Weltmarktszenarien aufgezeigt, welche szenarioabhängig innerhalb des Lernkurvenansatzes genutzt werden. Das Referenzszenario unterstellt im Jahr 2050 eine Parität der Anteile von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen, um Technologieoffenheit zu gewährleisten. Demgegenüber wird im *BEV-* bzw. *FCEV-*Szenario eine verstärkte Durchdringung der jeweiligen Antriebstechnologie angenommen. Der Anteil der Verbrennungsmotorfahrzeuge und der Hybridalternativen wird dabei konstant zum Referenzszenario gehalten. Abbildung 5.2 zeigt die Anteile der Antriebsalternativen an der globalen Pkw-Produktion in den drei Szenarien.

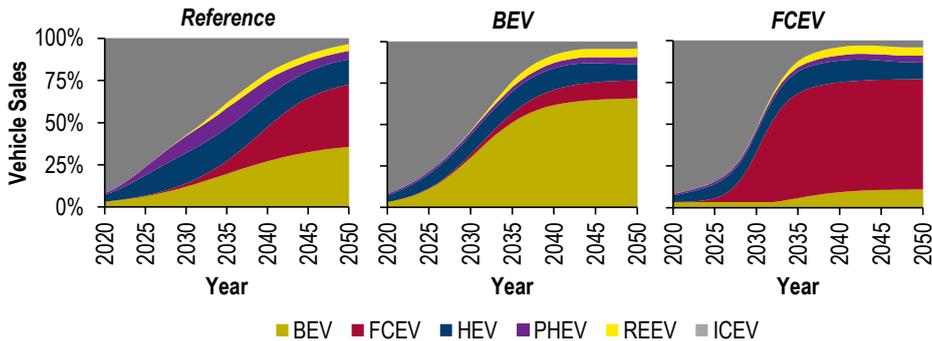


Abbildung 5.2. Anteile der verschiedenen Antriebsoptionen an der weltweiten Pkw-Produktion in den drei definierten Szenarien (Referenz, BEV, FCEV) von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Das vierte Szenario unterliegt einer anderen Variation der Pkw-Produktion. Das *Autonomous & Shared*-Szenario (A&S) basiert auf der Annahme einer ab dem Jahr 2030 reduzierten Gesamtproduktionskapazität neuer Pkw (vgl. Abbildung 4.11). Hintergrund dafür ist die Annahme eines verstärkten Einsatzes von autonomen und geteilten Pkw, welche den Neufahrzeugmarkt schrumpfen lassen könnten. Die Anteile der Antriebe werden im A&S-Szenario vom Referenzszenario übernommen.

Im Gegensatz zum techno-ökonomischen Szenario *Reference* wird im Szenario **Electricity+ (E+)** eine positivere Entwicklung der Batterietechnologie unterstellt. Die Lernrate der Batterie wird gegenüber dem Szenario *Reference* um 2 % auf 20,9 % erhöht angenommen. Zudem wird eine stärkere Durchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen bei der Pkw-Produktion zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 5.2). Darüber hinaus führt die Fokussierung auf die Batterietechnologie bis zum Jahr 2045 zu 5 % niedrigeren spezifischen Batteriemassen und einem 5 % niedrigeren Energiebedarf von Batterie-Elektrofahrzeugen. Infolge einer geringeren Reichweitenangst erhöht sich der Anteil der kleineren Batterievarianten bei Pkw. Zudem wird der Umstieg vom konventionellen auf den batterieelektrischen Antrieb mittels flankierender politischer Maßnahmen unterstützt. Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden in allen Straßenfahrzeugen bis spätestens 2040 verboten. Im Personenverkehr und bei leichten Nutzfahrzeugen erfolgt das Verbot bereits zum Jahr 2035. Zudem bleibt im Straßenverkehr der Einsatz synthetischer Flüssigkraftstoffe bis zum Jahr 2040 verboten. Somit können diese anschließend lediglich zur Defossilisierung der Restbestandsflotte mit Verbrennungsmotoren verwendet werden. Des Weiteren entscheidet sich die Politik im Szenario *Electricity+* dazu keinen Wasserstoff im Straßen- und Schienenverkehr einzusetzen, um diesen lediglich zur Defossilisierung des Schiff- und Flugverkehrs sowie der Industrie zu nutzen.

Demgegenüber wird im Szenario **Hydrogen+ (H₂+)** ein maßgeblich mittels Wasserstoff defossilisiertes Energiesystem forciert. Aus diesem Grund sind der Anwendung des Wasserstoffs im Verkehrssektor keine politischen Grenzen gesetzt. Im schweren Straßengüterverkehr sowie bei Bussen und Zügen wird zudem der Einsatz von Batterien unterbunden, um dem hohen Verbrauch kritischer Rohstoffe entgegenzuwirken. Die

Szenarien

Einschränkungen von Verbrennungsmotoren und synthetischen Kraftstoffe gleichen aus Effizienzgründen denen im Szenario *Electricity+*. Die Nachteile von Batterie-Elektrofahrzeugen hinsichtlich Ladegeschwindigkeit haben im Pkw-Bereich zur Folge, dass Käufer höhere Reichweiten der Fahrzeuge fordern. Des Weiteren führt der verstärkte Einsatz der Wasserstofftechnologie in allen Bereichen des Energiesystems in diesem Szenario zu verbesserten techno-ökonomischen Entwicklungen der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks.

In Tabelle 5.4 sind die techno-ökonomischen Szenarioparameter zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Ausprägung der techno-ökonomischen Szenarioparameter in den drei definierten Szenarien *Reference*, *Electricity+* und *Hydrogen+*. REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Szenario	<i>Reference (Ref)</i>	<i>Electricity+ (E+)</i>	<i>Hydrogen+ (H₂+)</i>
Restriktionen Antriebsarten	Keine Restriktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbot Verbrennungsmotor: Automotive: 2035 Busse: 2035 Schwere Nutzfahrzeuge: 2040 ▪ Keine synthetischen Flüssigkraftstoffe im Straßenverkehr vor 2040 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine REEV & BEV bei Bussen, HDV und Zügen
Grenzen der Pkw-Reichweitenoptionen BEV (Grenzen in km/a)	Grenzen bei 10.000 und 20.000	Grenzen bei 12.000 und 25.000	Grenzen bei 8.000 und 15.000
Weltmarktszenario (Komponentenkosten, vgl. Abbildung 5.2)	"Reference"	"BEV"	"FCEV"
Komponentenspezifikation (Lernrate, Gewicht)	Referenzwerte	Verstärkte Entwicklung der Batterie	Verstärkte Entwicklung der Brennstoffzelle und des H ₂ -Tanks
Kraftstoffbedarf	Referenzwerte	-5 % bis 2050 für BEV	-5 % bis 2050 für FCEV

Die Kombinationen der sozio- und techno-ökonomischen Szenarien spannen insgesamt sechs verschiedene Welten des zukünftigen Verkehrssektors auf. Die Analyse der unterschiedlichen Entwicklungen des Systems erfolgt in Kapitel 7.

6 Techno-ökonomische Analyse von Verkehrsmitteln

In diesem Kapitel werden techno-ökonomische Analysen von Verkehrsmitteln mit besonderem Fokus auf Straßenfahrzeuge durchgeführt. Dies inkludiert insbesondere die Analyse der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Anwendungsfälle im Hinblick auf die Herstellungs- und die Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge. Dabei wird je Fahrzeugklasse eine komponentenbasierte Betrachtung der Modellergebnisse durchgeführt. Für alle weiteren Anwendungen erfolgt die Analyse anhand der kumulierten Kosten. Der anschließende intermodale Vergleich zielt auf energetische und ökonomische Aspekte ab. Eine tiefergehende Analyse bedeutsamer Einflussfaktoren sowie ein Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten runden die Untersuchungen ab.

6.1 Personenkraftwagen

Beginnend werden die techno-ökonomischen Eigenschaften der verschiedenen Antriebskonzepte für Pkw analysiert. Dies umfasst ein durchschnittliches Mittelklassefahrzeug, ein kleines Stadtfahrzeug, einen Langstrecken-Pkw sowie ein SUV, welches teilweise im Anhängerbetrieb genutzt wird. Die Annahmen zu den einzelnen betrachteten Fahrzeugen finden sich in Sektion 5.1.1. Die Analyse eines mit Durchschnittswerten parametrisierten Pkw dient der allgemeinen Einordnung der Antriebsalternativen. Die anschließende Betrachtung der spezifischen Anwendungsfälle stellt die Vor- und Nachteile der einzelnen Antriebskonzepte in Bezug auf unterschiedliche Anforderungen heraus.

6.1.1 Durchschnittlicher Mittelklasse-Pkw

Diese Sektion beinhaltet die techno-ökonomische Analyse verschiedener Elektrifizierungsalternativen im Vergleich zum konventionellen Antrieb im Fall eines Mittelklasse-Pkw mit einer Jahresfahrleistung von 14.610 km/Jahr, was dem deutschen Durchschnitt entspricht.

Die komponentenbasiert berechneten Herstellungskosten des Fahrzeugs sind in Abbildung 6.1 für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 dargestellt. Zunächst ist festzuhalten, dass die Kosten des Basisfahrzeugs (Glider), welcher unabhängig vom Antriebskonzept innerhalb eines Fahrzeugsegments gleich angenommen wird, aufgrund von Aerodynamik- und Leichtbaumaßnahmen steigen. Im Jahr 2020 sind die Herstellungskosten des Verbrennungsmotorfahrzeugs niedriger als die aller elektrifizierten Konzepte. Zudem ist zu erkennen, dass die Kosten mit dem Elektrifizierungsgrad korrelieren. Darüber hinaus sind die Herstellungskosten der Fahrzeuge mit Brennstoffzelle (REEV-fc und FCEV) im Jahr 2020 am höchsten. Während die Kosten der Leistungselektronik nur eine untergeordnete Rolle spielen, sind insbesondere die Batterie, die Brennstoffzelle und der Wasserstofftank für die erhöhten Herstellungskosten der elektrifizierten Fahrzeuge verantwortlich. Diese Mehrkosten übersteigen die im Zuge der Elektrifizierung entstehende Kostenreduktion des Getriebes sowie den Umstieg vom Verbrennungsmotor inklusive Abgasnachbehandlung auf den kostengünstigeren Elektromotor.

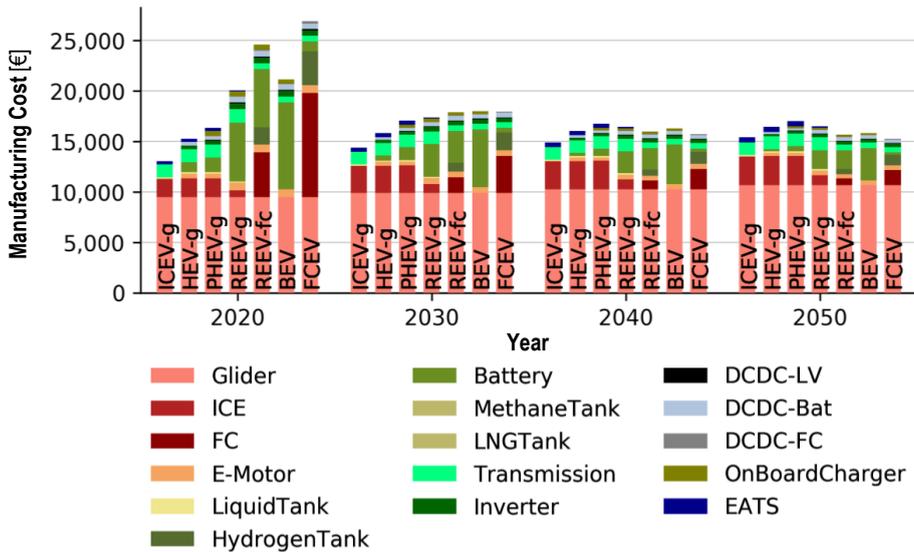


Abbildung 6.1. Komponentenbasierte Herstellungskosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc/FC: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz), EATS: Abgasnachbehandlungssystem.

Aufgrund steigender Marktanteile elektrifizierter Fahrzeuge werden die Produktionskapazitäten der elektrischen Komponenten ausgebaut, woraus wiederum sinkende spezifische Produktionskosten resultieren. Diese endogen berechnete Kostenreduktion findet vor allem bis 2030 statt, weshalb sich die Herstellungskosten der elektrifizierten Antriebskonzepte in diesem Zeitraum stark denen des Verbrennungsmotorfahrzeugs annähern. Dabei fällt die Kostenreduktion aus zwei Gründen bei Batterie-Elektrofahrzeugen kleiner als bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen aus. Zum einen sinken die spezifischen Kosten der Batterie nicht in dem Maße wie die der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks, da bis 2020 bereits ein höheres Produktionsniveau erreicht wurde. Zum anderen führen steigende Anforderungen hinsichtlich der elektrischen Reichweite von Range-Extender- und Batterie-Elektrofahrzeugen zu höheren verbauten Batteriekapazitäten bis 2030. Dies relativiert einen Teil der sinkenden spezifischen Komponentenkosten auf Fahrzeugebene. Neben der Kostenreduktion der elektrifizierten Fahrzeuge führen zunehmende Effizienzmaßnahmen seitens des Verbrennungsmotors zu steigenden Kosten von Verbrennungsmotorfahrzeugen und unterstützen somit die Annäherung der Herstellungskosten. Bis zum Jahr 2050 sinken die Herstellungskosten aller vollständig elektrifizierten Konzepte unterhalb die der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, unabhängig davon, ob diese hybridisiert sind oder nicht. Insgesamt liegen die Herstellungskosten aller betrachteten Antriebskonzepte nach 2040 innerhalb einer Spanne von weniger als 2.000 €.

Der techno-ökonomische Gesamtvergleich der verschiedenen Antriebskonzepte erfolgt jedoch nicht nur auf Basis der Herstellungskosten, sondern darüber hinaus vor allem hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten (TCO). Diese sind aufgeschlüsselt nach Herstellungs-

Wartungs- und Kraftstoffkosten in Abbildung 6.2 für den untersuchten Fall des Mittelklasse-Pkw visualisiert.

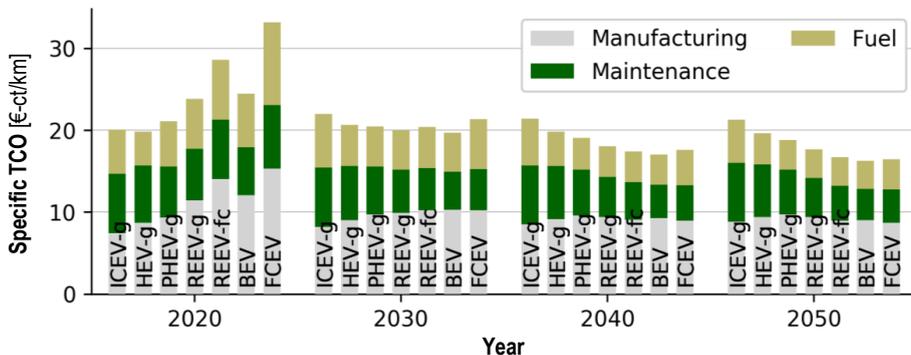


Abbildung 6.2. Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Insgesamt ist ein grundlegend vergleichbarer Verlauf der Gesamtbetriebskosten der Antriebsalternativen wie zuvor bei den Herstellungskosten zu erkennen. Im Jahr 2020 führen vor allem die erhöhten Herstellungskosten, aber auch noch erhöhte Kraftstoffkosten, insgesamt zu Mehrkosten der stärker elektrifizierten Antriebskonzepte gegenüber dem Verbrennungsmotorfahrzeug. Dennoch sind darüber hinaus auch wesentliche Unterschiede im Vergleich zu den zuvor analysierten Herstellungskosten festzustellen. So führt die Hybridisierung bereits im Jahr 2020 bei Hybrid-Elektrofahrzeugen zu geringeren Gesamtbetriebskosten als bei Verbrennungsmotorfahrzeugen. Hier werden die wesentlichen Vorteile der Elektrifizierung ersichtlich. Erstens sinken die Wartungskosten aufgrund der Elektrifizierung. Zweitens steigt die Effizienz der Fahrzeuge, weshalb wiederum die Kraftstoffkosten sinken. Eine vergleichbare Entwicklung tritt ebenfalls bei allen weiteren elektrifizierten Antriebskonzepten auf. Jedoch führen bei diesen die erhöhten Mehrkosten in der Herstellung im Jahr 2020 noch zu einem Nachteil hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten. Zudem entfaltet sich die positive Wirkung der verstärkten Elektrifizierung inklusive Kraftstoffwechsel erst innerhalb der 2020er Jahre. Während der Markteinführung wird der Effizienzvorteil durch erhöhte spezifische Kraftstoffkosten aufgrund der Infrastruktur relativiert. Dies gilt sowohl für wasserstoff- als auch strombetriebene Pkw, wobei der höhere Energiebedarf der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge zu Beginn zu einem größeren Nachteil dieser Antriebstechnologie führt. Da der zunehmende Einsatz synthetischer Kraftstoffe steigende Kraftstoffkosten bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zur Folge hat und gleichzeitig die Kosten der alternativen Energieinfrastrukturen mit steigendem Marktanteil sinken, fallen die Kraftstoffkosten aller elektrifizierter Antriebskonzepte unter die des Verbrennungsmotorfahrzeugs.

Da wie zuvor beschrieben die Produktionskosten von Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks ebenfalls mit wachsendem Marktvolumen sinken, ergeben sich sowohl Vorteile hinsichtlich der Herstellungs- als auch der Wartungskosten. Letztere entwickeln sich darüber hinaus aufgrund steigender erwarteter Lebensdauern der elektrischen

Komponenten verstärkt positiv. Alles in allem führen die beschriebenen Entwicklungen zu vergleichbaren Gesamtbetriebskosten bis 2030 sowie einem Vorteil für elektrifizierte Pkw im Anschluss. Dabei ist außerdem zu erkennen, dass der Vorteil mit steigendem Elektrifizierungsgrad stärker ausfällt und ein vollständiger Verzicht auf den Verbrennungsmotor vorteilhaft ist. Insgesamt sind Batterie-Elektrofahrzeuge im betrachteten Fall das günstigste Antriebskonzept. Jedoch sind die Mehrkosten der beiden Alternativen mit Brennstoffzelle (REEV-fc und FCEV) ab 2035 mit weniger als 1 ct€/km, was 5 % entspricht, sehr gering. Abbildung F.1 im Anhang zeigt die jährlichen Verläufe der Herstellungskosten und der Gesamtbetriebskosten der betrachteten Antriebsalternativen.

6.1.2 Stadtfahrzeug

In dieser Sektion wird ein Stadtfahrzeug analysiert, welches abweichende Eigenschaften gegenüber dem zuvor betrachteten Mittelklasse-Pkw aufweist. Die Herstellungskosten und die Gesamtbetriebskosten der analysierten Antriebskonzepte sind in Abbildung 6.3 für den Zeitraum von 2020 bis 2050 dargestellt.

Vergleichbar zum vorherigen Fahrzeugtyp werden auch beim Stadtfahrzeug zunächst Nachteile der elektrifizierten Antriebskonzepte hinsichtlich der Herstellungskosten sowie der Gesamtbetriebskosten ersichtlich. Der Anstieg der Kosten des Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugs bis 2023 resultiert aus den wachsenden gesetzlichen Anforderungen an die elektrische Reichweite der Fahrzeuge. Diese führen zu größeren verbauten Batteriekapazitäten, welche höhere Kosten zur Folge haben. Die Herstellungskosten der betrachteten Antriebsalternativen liegen ab 2035 innerhalb einer Spanne von 2.500 €. Die Kostenreduktion gegenüber 2020 ist für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge am größten. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge profitieren von den geringen Leistungsanforderungen eines Stadt-Pkw aufgrund der angenommenen erforderlichen Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeit. Somit kann die Brennstoffzelle, welche ein wesentlicher Kostentreiber der Herstellungskosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ist, klein dimensioniert werden.

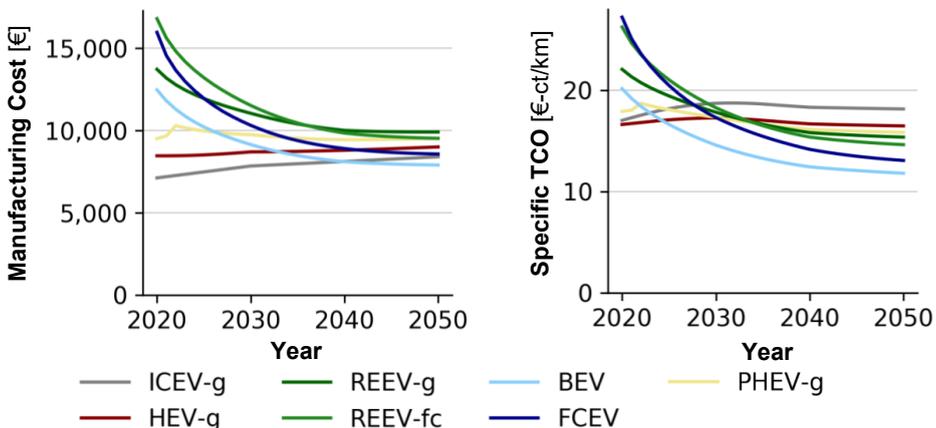


Abbildung 6.3. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines städtischen Kleinwagens für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Ähnlich vorteilhaft sind die Randbedingungen des Stadtfahrzeugs für Batterie-Elektrofahrzeuge. Hier resultiert der Vorteil aus der geringen elektrischen Reichweite des Fahrzeugs. Darüber hinaus wird in diesem Segment die Annahme getroffen, dass positive Effizienzentwicklungen nicht zur Erhöhung der elektrischen Reichweite, sondern zur Reduktion der Batteriekapazität genutzt werden. Somit sinkt die erforderliche Batteriekapazität des Stadt-Batterie-Elektrofahrzeugs von 36 kWh im Jahr 2020 auf unter 25 kWh in 2050. Dies reduziert sowohl die Herstellungs-, als auch die Wartungskosten der Fahrzeuge. Aus diesem Grund entsteht im Vergleich zum Mittelklasse-Pkw insbesondere hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten ein größerer Vorteil von Batterie-Elektrofahrzeugen gegenüber allen weiteren Antriebskonzepten. Zudem tritt die Kostenparität mit Verbrennungsmotorfahrzeugen schon im Jahr 2023 auf, welches den Vorteil der Batterietechnik im urbanen Pkw unterstreicht.

6.1.3 Langstreckenfahrzeug

Die in Abbildung 6.4 gezeigten Ergebnisse für ein mittelgroßes Langstreckenfahrzeug weisen sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede zum Stadtfahrzeug auf. Die Gesamtentwicklung der Herstellungskosten und der Gesamtbetriebskosten ist für beide Fahrzeugtypen vergleichbar. Die Effizienzsteigerung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor führen in Zukunft zu höheren Herstellungskosten dieser Fahrzeuge. Darüber hinaus haben die höheren Kosten für synthetische flüssige Kraftstoffe auch einen Anstieg der Gesamtbetriebskosten zur Folge. Eine weitere Gemeinsamkeit mit den Ergebnissen des Stadtfahrzeugs ist der positive Trend für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in Bezug auf die beiden in Abbildung 6.4 visualisierten Kostenparameter.

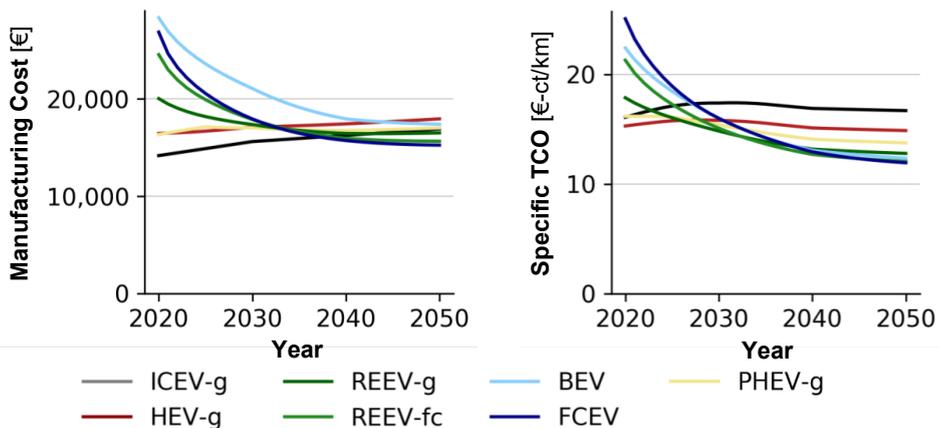


Abbildung 6.4. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Langstrecken-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Allerdings ist das Kostenverhältnis zwischen Range-Extender-, Brennstoffzellen- und Batterie-Elektrofahrzeugen unterschiedlich. Die hohen Reichweiten machen hohe Batteriekapazitäten (~110 kWh) bei Batterie-Elektrofahrzeugen notwendig. Diese wiederum führen zu den höchsten Herstellungskosten für Batterie-Elektrofahrzeuge im Jahr 2020. Darüber

hinaus verhindert der weitere Anstieg der geforderten Reichweiten in der Zukunft größere Kostendegressionen bei Batterie-Elektrofahrzeugen, wohingegen die positive Bilanz zugunsten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen verstärkt wird. Range-Extender-Elektrofahrzeuge – insbesondere mit Benzinmotor – weisen zunächst einen Kostenvorteil gegenüber Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen auf, da die Brennstoffzelle und der Wasserstofftank zu Beginn zu Mehrkosten führen. Dieser Vorteil schwindet bis zum Jahr 2030. Dies gilt ebenso für (Plug-In-)Hybrid-Elektrofahrzeuge, wobei deren Kosten anschließend über denen von Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen liegen.

Trotz der Unterschiede hinsichtlich der Herstellungskosten sind die Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen für das untersuchte Langstreckenfahrzeug nahe beieinander. Dies ist in der hohen Fahrleistung begründet, die den Einfluss der Herstellungskosten reduziert und insbesondere die Rolle der Kraftstoffkosten verstärkt. Der Nachteil des höheren Energiebedarfs der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Batterie-Elektrofahrzeugen wird erst in den 2040er Jahren durch den Vorteil von niedrigeren Wasserstoffkosten ausgeglichen. Aus dem gleichen Grund bleibt der Vorteil der Range-Extender-Elektrofahrzeuge gegenüber den Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bezüglich der Gesamtbetriebskosten länger als bei den Herstellungskosten bestehen. Dennoch ist insgesamt ab 2040 ein kleiner Gesamtvorteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen zu beobachten.

6.1.4 SUV inklusive Anhängerbetrieb

Der Verlauf der Herstellungskosten und der Gesamtbetriebskosten eines SUV mit temporärem Anhängerbetrieb ist, wie in Abbildung 6.5 dargestellt, vergleichbar mit dem eines Langstrecken-Pkw.

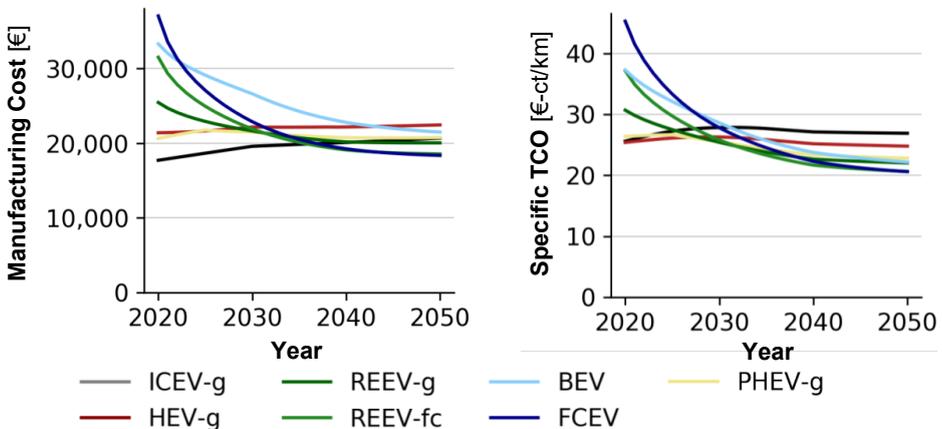


Abbildung 6.5. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines SUV mit temporärem Anhängerbetrieb für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Der Grund für die große Batteriekapazität ist in diesem Fall jedoch nicht die hohe Anforderung an die Reichweite, sondern der temporär hohe Energiebedarf durch die zusätzliche

Anhängelast. Diese hohe Last führt allerdings ebenso zu steigenden Anforderungen an die Leistung des Antriebs, was wiederum die Kosten der Brennstoffzelle erhöht. So sind die Herstellungskosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 am höchsten. Anfang der 2020er Jahre fallen sie jedoch unter die Herstellungskosten von Batterie-Elektrofahrzeugen und erreichen in den 2030er Jahren das Niveau von allen Hybridkonzepten sowie Verbrennungsmotorfahrzeugen.

Wie bei den drei zuvor diskutierten Pkw-Anwendungen führen die anfänglich hohen, dann aber sinkenden Energiekosten auch in diesem Fall zu günstigeren Gesamtbetriebskosten von Batterie- als Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Aufgrund der geringeren Fahrleistung kann dieser Vorteil jedoch nicht so stark wie beim Langstreckenfahrzeug genutzt werden, so dass die Kostenparität beider Alternativen früher, nämlich im Jahr 2027, erreicht wird. Außerdem zeichnet sich danach ein größerer Vorteil der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ab.

Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse dieses Abschnitts, dass Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge je nach Anwendungsfall auch im Pkw-Bereich die techno-ökonomisch günstigste Option sein können. Um herauszufinden, wann diese Vorteile auftreten, werden in Abschnitt 6.5 weitere Analysen hinsichtlich der entscheidenden Einflussfaktoren durchgeführt.

6.2 Busse

Busse weisen im Vergleich zu Pkw stark veränderte Anforderungen auf. Höhere Fahrwiderstände, unter anderem aufgrund von aerodynamischen Eigenschaften und Fahrzeugmassen, führen zu einem höheren Energiebedarf. Hinzu kommt, dass die Reichweiten der Busse unter allen Umständen erreicht werden müssen, um den Fahrbetrieb aufrecht zu erhalten. Wie sich diese und weitere abweichende Randbedingungen auf die Techno-Ökonomie der Fahrzeuge auswirken wird in den folgenden Sektionen analysiert.

6.2.1 Stadtbus

Ebenso wie zuvor bei Pkw wird auch für Busse zunächst eine komponentenbasierte Analyse der Herstellungskosten durchgeführt. Dies erfolgt anhand eines 18 m-Gelenkbusses, welcher im urbanen Gebiet eingesetzt wird.

Die in Abbildung 6.6 veranschaulichten Herstellungskosten der Antriebskonzepte für einen Stadtbus weisen einen hohen Anteil des Gliders an den Gesamtkosten aus. Im Umkehrschluss fällt der Anteil des Antriebs im Vergleich zum Pkw gering aus. Ebenso wie im Fall der Pkw werden aufgrund von Effizienzmaßnahmen steigende Gliderkosten unabhängig vom Antrieb angenommen. Die im Jahr 2020 über 700 kWh große Batterie des Batterie-Elektrobus führt zu Kosten von über 100.000 €, wodurch die Herstellungskosten des Fahrzeugs auf über 420.000 € ansteigen. Dies entspricht Mehrkosten in Höhe von 87.000 € gegenüber dem konventionellen Verbrennungsmotorbus.

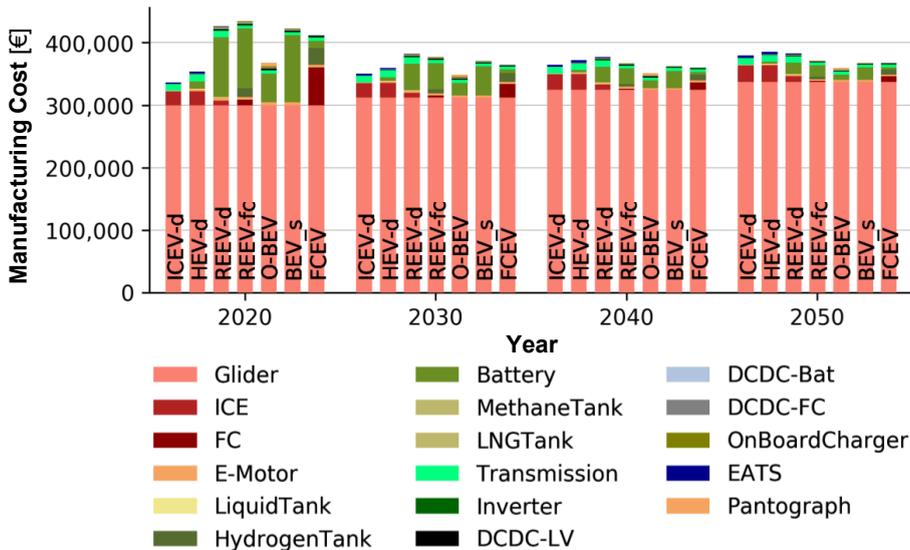


Abbildung 6.6. Komponentenbasierte Herstellungskosten eines 18 m-Stadtbusses in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorbus, HEV: Hybrid-Elektrobus, REEV: Range-Extender-Elektrobus, (O-)BEV: (Gelegenheitslader) Batterie-Elektrobus, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrobus, _s: kleine Batteriekapazität, -d: Diesel, -fc/FC: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz), EATS: Abgasnachbehandlungssystem.

Aufgrund der geringen Differenz der zugrundeliegenden elektrischen Reichweite von Range-Extender- und Batterie-Elektrofahrzeugen im Fall des Stadtbusses (200 und 225 km), weisen Range-Extender-Elektrofahrzeuge keinen Vorteil gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen auf. Die zusätzlichen Komponenten führen im Vergleich zum rein elektrischen Bus sogar zu Mehrkosten. Demgegenüber können Gelegenheitslader (O-BEV) auf eine geringere Reichweite ausgelegt werden, da während des Halts an definierten Haltestellen des täglichen Umlaufs mittels Pantographen geladen werden kann. Somit sind kleinere Batteriekapazitäten ausreichend, was trotz der zusätzlichen Kosten des Pantographen zu einem Gesamtkostenvorteil gegenüber Batterie-, Range-Extender- sowie Brennstoffzellen-Elektrobussen führt. Bei Letzterem resultieren die erhöhten Herstellungskosten gegenüber dem Verbrennungsmotorfahrzeug aus den Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten. Insgesamt liegen die Herstellungskosten des Brennstoffzellen-Elektrobusses weniger als 3 % unter denen des Batterie-Elektrobusses. Wenngleich der Vorteil der Gelegenheitslader gegenüber den anderen elektrifizierten Antriebskonzepten über den Betrachtungszeitraum bestehen bleibt, so schrumpft dieser von mehr als 11 % im Jahr 2020 auf unter 3 % in 2050 gegenüber Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrobussen. Diese Entwicklung ist das Resultat der sinkenden spezifischen Komponentenkosten sowie im Fall der Batterie-Elektrobusse der zudem geringeren erforderlichen Batteriekapazität (483 kWh in 2050) infolge der positiven Energiebedarfsentwicklung.

Die Verhältnisse der Gesamtbetriebskosten der Antriebskonzepte weisen wesentliche Unterschiede gegenüber den zuvor analysierten Herstellungskosten auf. Aufgrund der höheren Fahrleistungen der Busse im Vergleich zu Pkw sinkt der Einfluss der Herstellungskosten auf die Gesamtbetriebskosten, wie in Abbildung 6.7 gezeigt. Zudem ist zu erkennen, dass

die Wartungskosten der Busse eine geringere Abhängigkeit vom Antriebskonzept besitzen. Dies resultiert aus dem erhöhten Wartungsaufwand des Gliders von Bussen. Des Weiteren stellen die Kraftstoffkosten nach der anfänglichen Reduktion der Herstellungskosten elektrifizierter Busse den entscheidenden Parameter zum Vergleich der Antriebskonzepte dar. In dieser Hinsicht sind der erhöhte Energiebedarf sowie der zunehmende Einsatz synthetischen Diesels grundlegende Nachteile des Verbrennungsmotorfahrzeugs, weshalb eine Hybridisierung bereits im Jahr 2020 kostengünstiger ist. Ebenso sind Gelegenheitslader bereits 2020 günstiger als Verbrennungsmotorfahrzeuge, was den Vorteil der Elektrifizierung gegenüber dem konventionellen Antrieb insbesondere vor dem Hintergrund der zukünftigen Kostenreduktion unterstreicht.

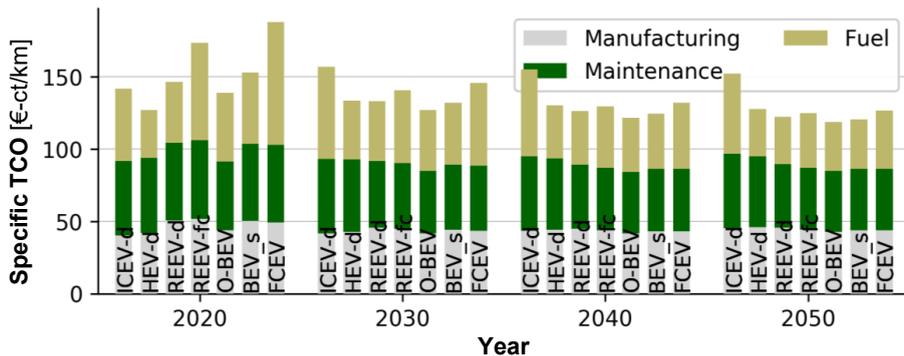


Abbildung 6.7. Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines 18m-Stadtbusses für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorbus, HEV: Hybrid-Elektrobus, REEV: Range-Extender-Elektrobus, (O-)BEV: (Gelegenheitslader) Batterie-Elektrobus, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrobus, _s: kleine Batteriekapazität, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Die Mehrkosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrobussen gegenüber Gelegenheitsladern sinken mit der Zeit unter anderem aufgrund einer stärkeren Reduktion der Infrastrukturkosten. Insgesamt bewegen sich alle Antriebskonzepte mit Ausnahme des Verbrennungsmotorfahrzeugs ab dem Jahr 2040 innerhalb einer Spanne von 10 ct€/km. Somit ist zwar ein Vorteil für Gelegenheitslader und Batterie-Elektrobusse gegenüber allen weiteren elektrifizierten Antriebskonzepten zu erkennen, wenngleich dieser weniger als 8 % der Gesamtbetriebskosten beträgt.

6.2.2 Überlandbus

Die Bedingungen eines im ländlichen Raum betriebenen 12 m-Standardbusses führen zu abweichenden Verhältnissen der untersuchten Alternativen gegenüber dem Stadtbuss, wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist. Die geforderten höheren Reichweiten haben teurere Batterien und somit höhere Herstellungskosten von Batterie-Elektrobussen und Gelegenheitsladern zur Folge. Die hohen jährlichen Fahrleistungen verringern jedoch den Einfluss der Herstellungskosten und steigern den Anteil der Energiekosten. Somit sind die Gesamtbetriebskosten des Brennstoffzellen-Elektrobusses aufgrund des Nachteils hinsichtlich des Energiebedarfs höher als die der anderen elektrifizierten Antriebsarten. Die geringere elektrische Reichweite des Range-Extender-Elektrobusses gepaart mit der gleichzeitig hohen Effizienz führen dazu, dass Range-Extender-Elektrobusse mit Dieselmotor bis 2030 kostengünstiger als Batterie-Elektrobusse sind. Die geringere Kostendegression der Range-

Extender-Elektrobuse mit Dieselmotor hat jedoch zur Folge, dass die Gesamtbetriebskosten der Batterie-Elektrobuse anschließend ein vergleichbares Niveau erreichen.

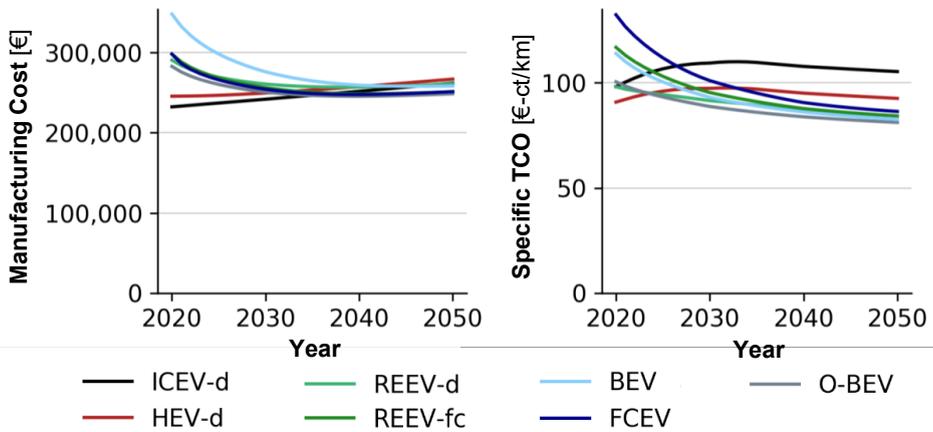


Abbildung 6.8. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines 12m-Überlandbusses für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorbus, HEV: Hybrid-Elektrobus, REEV: Range-Extender-Elektrobus, (O-)BEV: (Gelegenheitslader) Batterie-Elektrobus, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrobus, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Die Kostenparität mit konventionellen Fahrzeugen wird von allen elektrifizierten Antriebskonzepten vor dem Jahr 2027 erreicht. Zwar weisen Gelegenheitslader ab 2023 die geringsten Gesamtbetriebskosten aller Antriebsarten auf, allerdings ist hierbei zu beachten, dass die Möglichkeit der Gelegenheitsladung auf ländlichen Umlaufplänen gegebenenfalls nicht sinnvoll zu realisieren ist. Dieser Aspekt wird in den vorliegenden Analysen nicht betrachtet und muss im Einzelfall geprüft werden.

6.2.3 Reisebus

Die gesteigerten Anforderungen von Reisebussen in Bezug auf die Reichweite verstärken den Nachteil der Batterie-Elektrobuse hinsichtlich der Herstellungskosten. Hier haben Oberleitungs-Elektrobuse den Vorteil, dass ihre batterieelektrische Reichweite nicht so stark ansteigen muss, da lange Strecken zumeist auf Autobahnen zurückgelegt werden, welche im Rahmen der Analysen als elektrifiziert angenommen werden. Dennoch benötigen sie große Batterien, so dass Brennstoffzellen-Elektrobuse die vollelektrifizierte Alternative mit den niedrigsten Herstellungskosten sind.

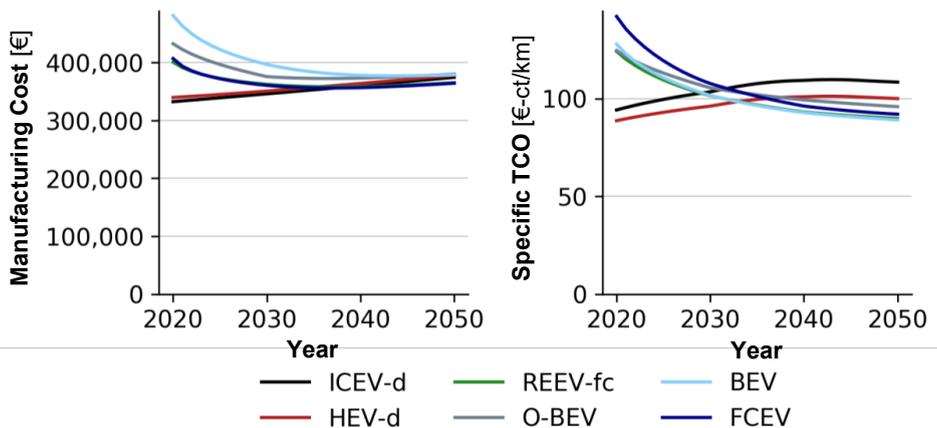


Abbildung 6.9. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Reisebusses für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorbus, HEV: Hybrid-Elektrobus, REEV: Range-Extender-Elektrobus, (O-)BEV: (Oberleitungsgebundener) Batterie-Elektrobus, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrobus, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Im Hinblick auf die Gesamtbetriebskosten sind Oberleitungs-Elektroreisebusse zunächst die günstigste vollelektrifizierte Alternative. Ab 2033 sind sie jedoch teurer als Range-Extender-, Brennstoffzellen- und Batterie-Elektroreisebusse, da deren spezifische Infrastrukturkosten stärker sinken. Wie beim Überlandbus entfaltet die Begrenzung der elektrischen Reichweite im Range-Extender-Elektroreisebus seine positive Wirkung hinsichtlich der Herstellungskosten, wenngleich die Gesamtbetriebskosten von Range-Extender- und Batterie-Elektroreisebus nahezu identisch sind. Zudem führt der Nachteil hinsichtlich des Energiebedarfs bei Brennstoffzellen-Elektroreisebussen erneut zu ca. 3 % höheren Gesamtbetriebskosten im Vergleich zu den zuvor genannten Alternativen. Allerdings ist diese Differenz als gering einzustufen.

6.3 Nutzfahrzeuge

Vergleichbar zu Bussen haben Nutzfahrzeuge ebenfalls höhere Fahrzeugmassen als Pkw sowie veränderte Anforderungen an die Reichweite der Fahrzeuge. Dieser Abschnitt beinhaltet die techno-ökonomische Analyse der drei definierten Nutzfahrzeuganwendungen, eine Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr, ein urbanes Lieferfahrzeug und ein Abfallsammelfahrzeug.

6.3.1 Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr

Die Analyse der Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr erfolgt anhand der komponentenbasierten Ergebnisse. Abbildung 6.10 zeigt die Herstellungskosten der betrachteten Antriebskonzepte für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. Auffällig ist vor allem der hohe Kostenaufschlag der Elektrifizierung im Jahr 2020. Je höher der Grad der Elektrifizierung, desto höher sind die Mehrkosten gegenüber dem konventionellen Antrieb. Zwar führt auch der Umstieg auf den Brennstoffzellenantrieb im Jahr 2020 zu 65.000 € höheren Herstellungskosten im Vergleich zum Verbrennungsmotorfahrzeug. Jedoch sind die Herstellungskosten des Batterie-Elektrofahrzeugs aufgrund der fast 1.200 kWh großen Batterie mit über

250.000 € nochmals fast 50 % höher. Da die elektrische Reichweite bei Range-Extender- und Oberleitungs-Elektrofahrzeugen niedriger ausgelegt werden kann, sinkt die Batteriekapazität auf 395 kWh bzw. 448 kWh. Somit ergeben sich für diese Antriebskonzepte im Jahr 2020 vergleichbare Herstellungskosten zum Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

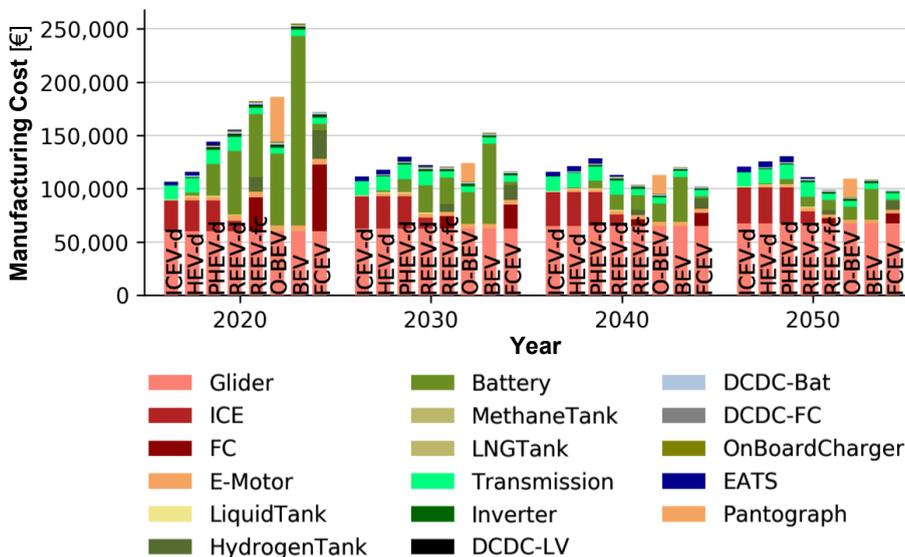


Abbildung 6.10. Komponentenbasierte Herstellungskosten einer 40 t-Sattelzugmaschine im Fernverkehr in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, (O-)BEV: (Oberleitungsgebundenes) Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc/FC: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz), EATS: Abgasnachbehandlungssystem.

Die Kostenreduktion der Batterie, der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks führen wie bei Bussen und Pkw insbesondere bis 2030 zu Kostenreduktionen der elektrifizierten Antriebskonzepte. Im Jahr 2030 betragen die Mehrkosten des Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugs gegenüber dem Verbrennungsmotorfahrzeug weniger als 5.000 € und unterschreiten diese im Jahr 2032. Batterie-Elektrofahrzeuge erreichen die Kostenparität mit Verbrennungsmotorfahrzeugen trotz sinkender Batteriekapazität (ca. 900 kWh in 2035) erst im Jahr 2043. Wie auch beim Oberleitungs-Elektrofahrzeug liegen die Herstellungskosten des Batterie-Elektrofahrzeugs stets über denen des Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugs, wenngleich die Differenz über den Betrachtungszeitraum abnimmt. Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge weisen zu Beginn aufgrund der kleineren Batterie Vorteile hinsichtlich der Herstellungskosten gegenüber den stärker elektrifizierten Antrieben auf. Allerdings schwindet dieser Vorteil mit Ausnahme der Batterie-Elektrofahrzeuge gegenüber allen anderen Antriebsoptionen bereits vor 2030.

Die hohe Fahrleistung im Fernverkehr führt zu einem erhöhten Anteil der Energiekosten im Vergleich zu den Herstellungs- und Wartungskosten, wie in Abbildung 6.11 zu erkennen. Dies ist erneut der Grund, weshalb die Kostenparität der elektrifizierten Antriebskonzepte hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten deutlich früher als hinsichtlich der

Herstellungskosten eintritt. Zum einen wiegen die erhöhten Herstellungskosten nicht so schwer. Zum anderen führt die Elektrifizierung zu niedrigeren Wartungs- und Kraftstoffkosten.

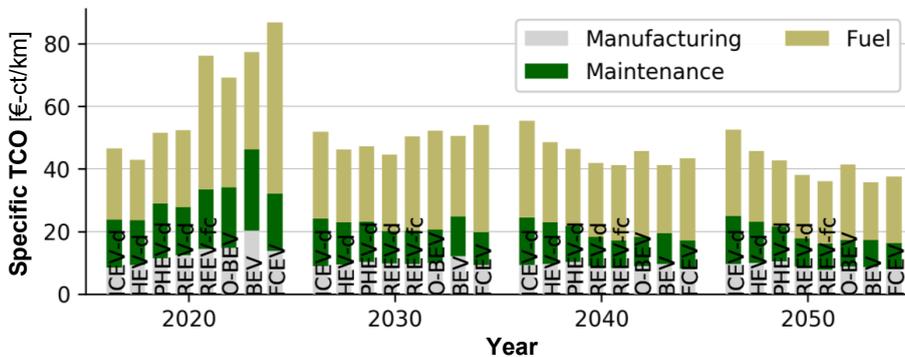


Abbildung 6.11. Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten einer 40 t-Sattelzugmaschine im Fernverkehr für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, (O-)BEV: (Oberleitungsgebundenes) Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Im Jahr 2020 sind Oberleitungs-Elektrofahrzeuge die günstigste vollelektrifizierte Antriebsvariante. Da deren Infrastrukturkosten jedoch nicht in dem Maße sinken wie die der Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, sind letztere ab 2030 günstiger. Da Batterie gegenüber Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen eine höhere Antriebsleistung aufweisen, sind die Gesamtbetriebskosten stets niedriger. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Differenz ab 2030 weniger als 7 % beträgt. Die nahezu identischen Gesamtbetriebskosten von Range-Extender-Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzelle und Batterie-Elektrofahrzeugen weisen zudem darauf hin, dass eine Begrenzung der elektrischen Reichweite, welche durch eine Reichweitenverlängerung mittels Brennstoffzelle ermöglicht wird, eine sinnvolle Alternative darstellen kann.

6.3.2 Urbanes Lieferfahrzeug

Das hier betrachtete urbane Lieferfahrzeug weist im Vergleich zur Fernlastsattelzugmaschine konträre Anforderungen und Fahrzeugeigenschaften auf, welche sich auch in der Techno-Ökonomie widerspiegeln. Die niedrigere erforderliche elektrische Reichweite sowie die vor allem aufgrund der kleineren Fahrzeugmasse geringeren Fahrwiderstände erlauben die Nutzung kleinerer Batteriekapazitäten bei dieser Anwendung. Dies führt zu Kostenvorteilen gegenüber den anderen Elektrifizierungskonzepten fernab des Hybrid-Elektrofahrzeugs. Die Parität der Herstellungskosten von batterieelektrischen und Verbrennungsmotorfahrzeugen wird im Jahr 2028 erreicht.

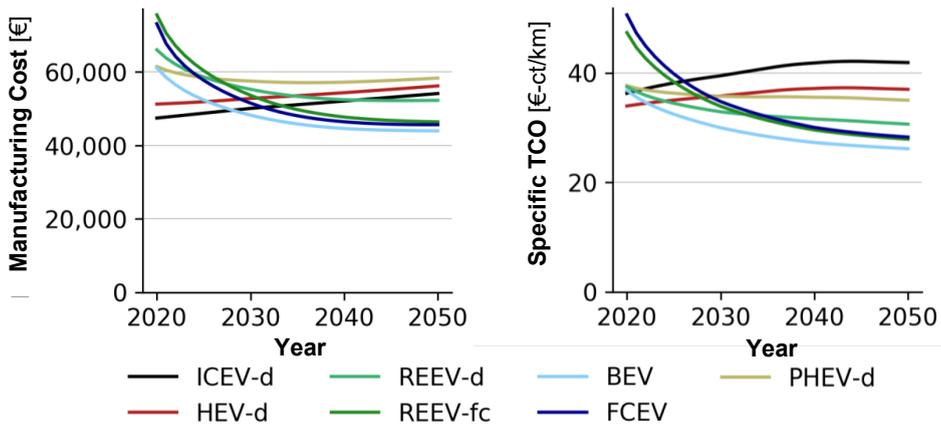


Abbildung 6.12. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines urbanen Lieferfahrzeugs für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Aufgrund der vorteilhaften Betriebskosten von Batterie-Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen sind deren Gesamtbetriebskosten bereits heute niedriger als die von konventionellen Fahrzeugen. Durch die Hybridisierung verzögert sich der Zeitpunkt der Kostenparität bis 2023. Die Nachteile von Brennstoffzellen- gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen hinsichtlich aller betrachteten Kostenarten sind vor allem in den ersten Jahren des untersuchten Zeithorizonts ausgeprägt. Die Überschneidungen von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen mit Verbrennungsmotor- und Hybrid-Elektrofahrzeugen werden erst 2027 bzw. 2029 erwartet. Trotz der in Zukunft angenommenen niedrigeren Wasserstoffkosten, überwiegen die Vorteile des Batterie-Elektrofahrzeugs in diesem urbanen Anwendungsfeld vergleichbar zu den in Sektion 6.1.2 durchgeführten Analysen eines kleinen städtischen Pkw.

6.3.3 Abfallsammelfahrzeug

Der hohe Anteil an Nebenverbrauchern sowie das ausgeprägte Start-und-Stopp-Fahrprofil von Abfallsammelfahrzeugen machen große Batteriekapazitäten trotz geringerer Reichweiten im Vergleich zum Langstreckenverkehr unumgänglich. Daher sind die Herstellungskosten von Batterie-Elektrofahrzeugen über den gesamten untersuchten Zeithorizont höher als die von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Die berechneten Gesamtbetriebskosten von Brennstoffzellen- und Batterie-Elektrofahrzeugen sind hingegen ab 2030 fast identisch. Aufgrund der niedrigeren Betriebskosten gibt es bis 2030 einen Vorteil für Batterie-Elektrofahrzeuge, wie Abbildung 6.13 zu entnehmen ist.

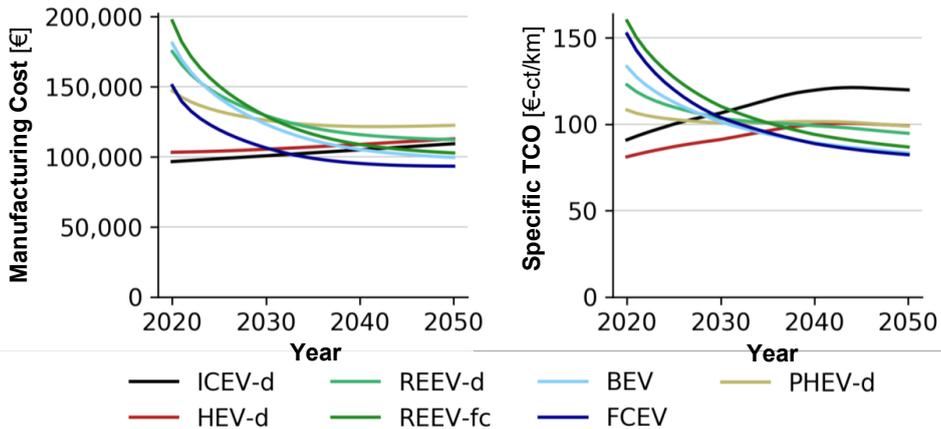


Abbildung 6.13. Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Abfallsammelfahrzeugs für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Die niedrigeren Kraftstoffkosten von Batterie-Elektrofahrzeugen helfen zunächst, die Nachteile hinsichtlich der Herstellungskosten gegenüber Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen auszugleichen. Anschließend führen niedrigere Infrastrukturkosten des Wasserstoffs jedoch zu einer stärkeren Kostendegression, welche zur beschriebenen Kostenparität führt. Das bereits erwähnte Start-und-Stopp-Fahren ist die Ursache des großen Abstands zwischen Verbrennungsmotor- und Hybrid-Elektrofahrzeugen und macht letztere trotz steigender Kraftstoffkosten bis Anfang der 2030er Jahre zur günstigsten Option. Stärkere Hybridisierungsgrade bei Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen führen ebenfalls zu zunächst geringeren Kosten im Vergleich zu Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Ab 2030 überwiegen allerdings die Vorteile der vollständigen Elektrifizierung bei Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen.

Zwischenfazit der Analysen von Straßenfahrzeugen

Die techno-ökonomische Analyse der definierten Anwendungsfälle stellt die Vor- und Nachteile der Antriebskonzepte heraus. Effizienzmaßnahmen sowie insbesondere die höheren Kraftstoffkosten aufgrund des Umstiegs auf synthetische Kraftstoffe zur Reduktion der Treibhausgasemissionen führen in Zukunft zu steigenden Kosten der Verbrennungsmotorfahrzeuge. Im Gegensatz dazu haben steigende Marktanteile sinkende Produktionskosten der wesentlichen Elektrifizierungskomponenten zur Folge. Ebenso resultieren aus der fortschreitenden Marktentwicklung geringere spezifische Kosten der Versorgungsinfrastruktur von Wasserstoff und Elektrizität. Somit sinken die Gesamtbetriebskosten der elektrifizierten Antriebe in allen untersuchten Fällen unter die der Verbrennungsmotorfahrzeuge. Zwar ist eine Teilelektrifizierung in manchen Fällen zwischenzeitlich kostengünstiger, jedoch sind darüber hinaus stets entweder Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge die günstigste Antriebsoption. In einigen Fällen bietet die Begrenzung der Batteriekapazität inklusive der Reichweitenverlängerung mit Brennstoffzelle (REEV-fc) eine Antriebsalternative mit nahezu gleichen Kosten.

Die in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 durchgeführten techno-ökonomischen Analysen heben hervor, dass die Kostendifferenz der beiden Antriebsalternativen, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, über dem Betrachtungszeitraum geringer wird, wie in Abbildung 6.14 veranschaulicht. Insgesamt weichen die Kosten im Jahr 2050 mit maximal 10 % nur geringfügig voneinander ab. Kostenvorteile von Batterie-Elektrofahrzeugen entstehen bei den urbanen Anwendungen im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich, was erneut den Vorteil von Batterie-Elektrofahrzeugen im Hinblick auf diese Anwendungen unterstreicht. Demgegenüber weisen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge einen Vorteil von ca. 7 % gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen bei SUV mit zeitweiligem Anhängerbetrieb auf. Die Kostendifferenz von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bei allen weiteren Anwendungen liegt im Jahr 2050 unter 5 %.

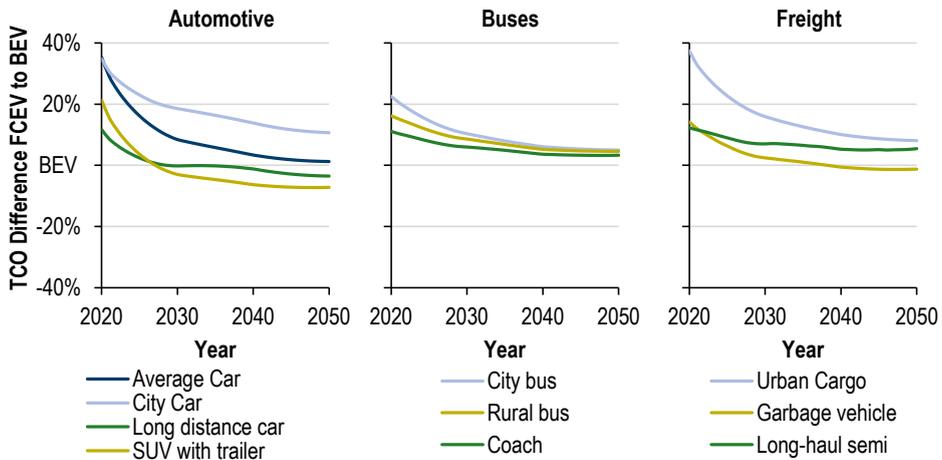


Abbildung 6.14. Differenz der Gesamtbetriebskosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) zu Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) (0 %) in den betrachteten Anwendungsfällen von 2020 bis 2050.

Insbesondere bei Bussen ist die Differenz der Kosten kaum abhängig vom jeweiligen Einsatzfall. Über den gesamten Zeitraum fällt die Streuung der Kostendifferenz hier am geringsten aus. Demgegenüber ist die Abhängigkeit der Differenz der Gesamtbetriebskosten im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich stärker ausgeprägt.

Die Analyse des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf die Techno-Ökonomie der Fahrzeuge in Abschnitt 6.5 gibt weiteren Aufschluss darüber, unter welchen Bedingungen entweder Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge günstiger sind.

6.4 Intermodaler Vergleich

Der im Folgenden durchgeführte intermodale Vergleich wird genutzt, um den Einfluss der Elektrifizierung und der Auslastung auf die techno-ökonomischen Eigenschaften der verschiedenen Verkehrsmittel vergleichend zu bewerten. Dies ist insbesondere in Bezug auf den modalen Shift von Bedeutung. Der Vergleich der Verkehrsmittel erfolgt fokussiert auf energetische und ökonomische Aspekte. Dabei werden sämtliche Analysen für das Jahr 2030 durchgeführt, sodass wesentliche Entwicklungen der Markteinführung alternativer Antriebskonzepte inkludiert sind. Zudem bedarf die Erreichung der Klimaschutzziele bis zum Jahr 2045 ein Handeln der Entscheidungsträger zu einem ausreichend frühen Zeitpunkt,

sodass an dieser Stelle 2030 als Zeitpunkt der Analysen gewählt wird. Um die verschiedenen Verkehrsmittel vergleichen zu können, werden die Werte auf die Verkehrsleistung in Personen- oder Tonnenkilometer bezogen.

6.4.1 Energetischer Vergleich

Der energetische Vergleich der Verkehrsmittel gliedert sich in den Personen- und Güterverkehr. Ersterer unterteilt sich in den Analysen zudem in den Nah- und Fernverkehr. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich der energetische Vergleich auf den Betrieb der Fahrzeuge. Es ist anzumerken, dass für einen vollständigen energetischen Vergleich der Verkehrsmittel der Energiebedarf der Produktion der Verkehrsmittel sowie der Entsorgung und des Recyclings im Anschluss an die Betriebsphase des Verkehrsmittels mit einbezogen werden müsste. Eine solche Lebenszyklusanalyse (LCA) ist nicht Ziel dieser Arbeit.

In Abbildung 6.15 ist der spezifische Energiebedarf der **Nahverkehrsmittel** in Abhängigkeit der Auslastung der Verkehrsmittel visualisiert.

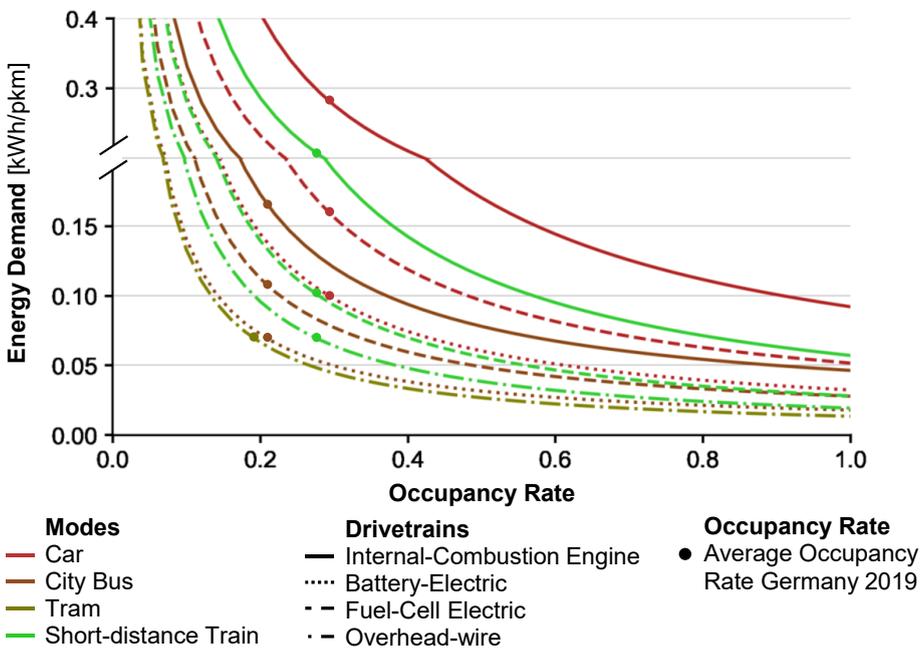


Abbildung 6.15. Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antrieboptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.

Grundlegend ist der energetische Vorteil der öffentlichen Verkehrsmittel ersichtlich. Dieser entsteht sogar trotz der niedrigeren durchschnittlichen Auslastung der öffentlichen Verkehrsmittel, welche ebenfalls im folgenden Diagramm gezeigt ist. Insbesondere Straßen- und U-Bahnen sowie elektrische Busse haben einen energetischen Vorteil gegenüber den anderen Verkehrsmitteln. Darüber hinaus stellt das Diagramm weitere Aspekte heraus. So verdeutlicht die Darstellung den zunehmenden Einfluss der Auslastung bei niedrigeren Werten. Dies soll am Beispiel eines Dieselmotors veranschaulicht werden. Verringert sich die Auslastung von 20 % auf 10 % so verdoppelt sich der spezifische Energiebedarf

nahezu. Sinkt die Auslastung ausgehend von 50 % ebenfalls um 10 % auf 40 % so steigt der spezifische Energiebedarf hingegen lediglich um 20 %. Ab welcher Auslastung nur noch eine geringere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs durch weitere Erhöhung der Auslastung entsteht ist sowohl abhängig vom Verkehrsmittel als auch vom Antrieb. Insgesamt sinkt die Differenz aller Alternativen bei höheren Auslastungen. Das Diagramm unterstreicht den hohen Einfluss der Auslastung auf den spezifischen Energiebedarf und somit deren Bedeutung für den intermodalen Vergleich. Aus energetischer Sicht ist es daher entscheidend geringe Auslastungen der Verkehrsmittel zu vermeiden bzw. möglichst hohe Auslastungen der Verkehrsmittel zu erzielen und hocheffiziente Antriebe einzusetzen.

Neben dem Einfluss der Auslastung ist der Antrieb der Verkehrsmittel ein bedeutsamer Faktor des intermodalen Vergleichs. Die Elektrifizierung der Antriebe führt zu geringeren Energiebedarfen der Fahrzeuge. Da das Energiebedarfsverhältnis der Verkehrsmittel bei gleichem Antrieb nahezu unverändert ist, führt die allgemeine Reduktion der Energiebedarfe zu absolut sinkenden Vorteilen der öffentlichen Verkehrsmittel. Dieser Effekt wird anhand des Vergleichs von Pkw und Bus jeweils ausgeführt als Verbrennungsmotor- und Batterie-Elektrofahrzeug deutlich. Bei durchschnittlicher Auslastung ist der spezifische Energiebedarf des konventionellen Pkw 13,5 kWh/100pkm höher als der des Dieselmotors. Bei den batterieelektrischen Varianten der beiden Verkehrsmittel beträgt die Differenz hingegen nur 3,8 kWh/100pkm. Zudem erhöht die Elektrifizierung der Pkw die erforderliche Mindestauslastung, welche im öffentlichen Verkehr erreicht werden muss, um einen energetischen Vorteil gegenüber dem Pkw zu erzielen. Bei konventionellen Fahrzeugen beträgt diese für Busse 11 %. Unterhalb dieser Auslastung wäre der spezifische Energiebedarf der Dieselmotors höher als der eines durchschnittlichen Diesel-Pkw. Bei den brennstoffzellenelektrischen Varianten steigt dieser Wert auf 13 %, bei Batterie-Elektrofahrzeugen auf 15 %. Diese Werte liegen unterhalb der durchschnittlichen Auslastung der Busse in Deutschland im Jahr 2020 (21 %). Dennoch gilt es diesen Aspekt beim Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs zu beachten.

Hinzu kommt, dass vermehrtes Ridesharing die Auslastung der Pkw erhöht, weshalb der energetische Vorteil des öffentlichen Verkehrs sinkt oder je nach öffentlichem Verkehrsmittel sogar vollständig schwinden kann. Abbildung 6.16 visualisiert diesen Effekt.

Dargestellt ist der verkehrsleistungsspezifische Energiebedarf der verschiedenen Personennahverkehrsmittel in Abhängigkeit des Antriebs von 2020 bis 2050. Dabei werden die durchschnittlichen Auslastungen des öffentlichen Verkehrs konstant gehalten und für Pkw ab dem Jahr 2030 ein linearer Anstieg von den historischen 28 % auf 35 % im Jahr 2050 unterstellt. Diese Erhöhung könnte sich durch vermehrtes Ridesharing ergeben, wie zuvor beschrieben.

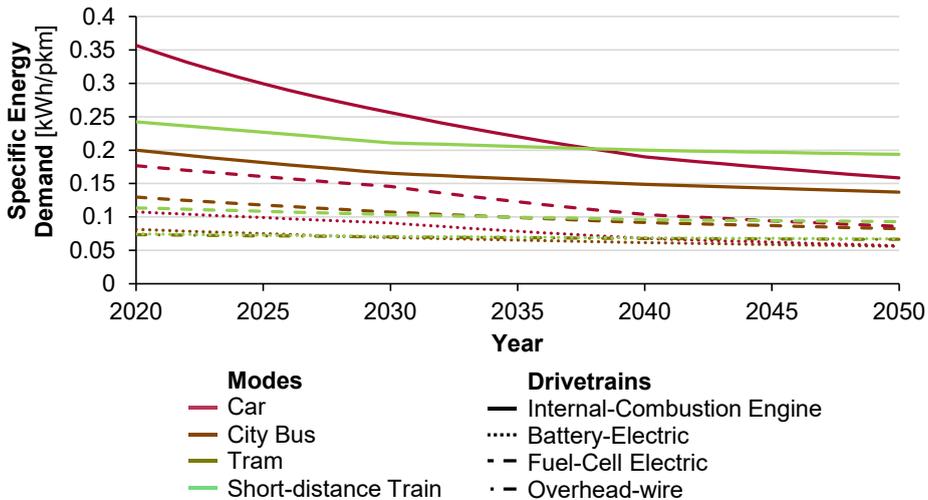


Abbildung 6.16. Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antrieben von 2020 bis 2050. Bei allen öffentlichen Verkehrsmitteln wird eine konstante, der Historie entsprechende durchschnittliche Auslastung angenommen. Bei Pkw wird die Auslastung von 2035 bis 2050 in der Untersuchung aufgrund von verstärktem Ridesharing linear von den historischen 28 % auf 35 % erhöht.

Das Diagramm verdeutlicht, dass aerodynamische und fahrzeugspezifische Entwicklungen sowie Effizienzsteigerungen des konventionellen Antriebs zwar zu deutlich niedrigeren Energiebedarfen von Pkw in Zukunft führen. Jedoch hat insbesondere die Elektrifizierung der Fahrzeuge zur Folge, dass der energetische Vorteil des öffentlichen Nahverkehrs deutlich schrumpft. Die bis 2050 um 7 % wachsende angenommene Auslastung der Pkw führt sogar zu nahezu identischen spezifischen Energiebedarfen mit Bus und Bahn. Vereinfacht gesagt bedeutet dies, dass ein hoch ausgelasteter elektrifizierter Pkw einen geringeren spezifischen Energiebedarf als durchschnittlich ausgelastete Busse und Bahnen verursacht. Dies unterstreicht das Energiereduktionspotential von Ridesharing-Apps in Kombination mit elektrifizierten Fahrzeugen. Autonomes Fahren kann hierbei einen verstärkenden Faktor der Entwicklung darstellen, da sowohl die Flexibilität des Angebots steigt als auch zeitgleich die Kosten der Dienstleistung aufgrund der wegfallenden Fahrerkosten sinken.

Im **Fernverkehr** kommen neben Pkw, Bus und Bahn ebenfalls Flugzeuge zum Einsatz. Abbildung 6.17 veranschaulicht deren energetischen Nachteil, der trotz der verglichen mit den anderen Verkehrsmitteln hohen Auslastungen im Flugverkehr entsteht.

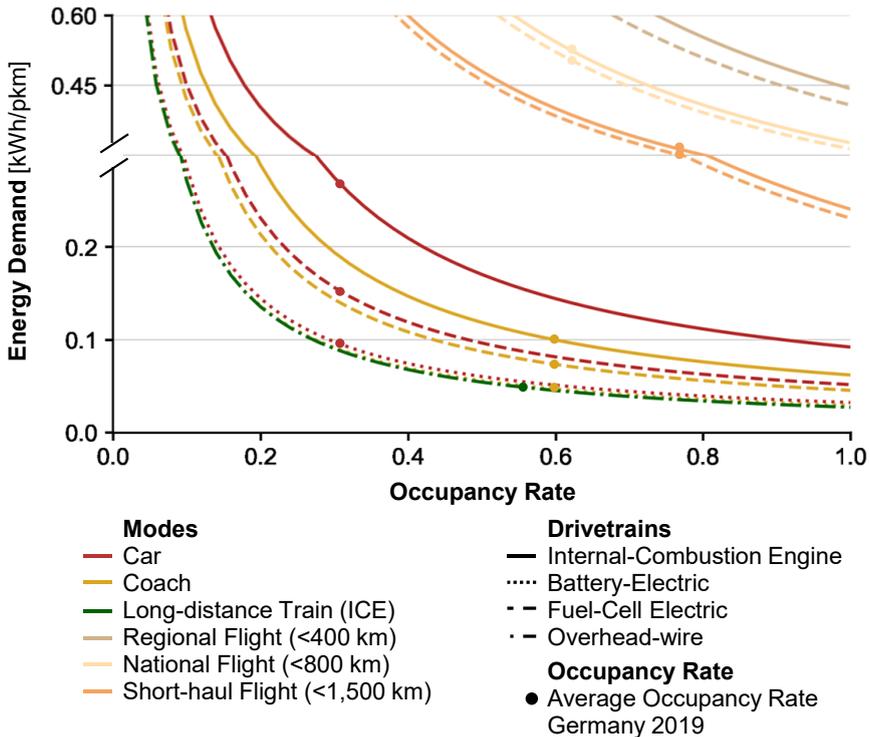


Abbildung 6.17. Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personenfernverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.

Zudem ist zu erkennen, dass der energetische Nachteil insbesondere bei kürzeren Regional- oder Nationalflügen verstärkt ist. Zum einen steigt bei kürzeren Flügen der Anteil der energieintensiven Start- und Landephases. Zum anderen werden auf kürzeren Flügen tendenziell kleinere Flugzeuge eingesetzt, welche höhere verkehrsleistungsspezifische Energiebedarfe aufweisen. Wenngleich eine Elektrifizierung der kürzeren Flüge in den nächsten Jahren möglich ist und dadurch eine energetische Verbesserung erzielt wird, so kann diese nicht den erhöhten spezifischen Energiebedarf des Flugverkehrs aufheben. Da der bodengebundene Verkehr stärker von der Elektrifizierung profitiert, erhöht sich sogar die Differenz von Flügen zum Straßenverkehr.

Im Vergleich zu Reisebussen sinkt der Energiebedarf von Pkw aufgrund der Elektrifizierung stärker. Dies führt dazu, dass der auslastungsabhängige Energiebedarf von Pkw, Reisebussen und Fernverkehrszügen nahezu identisch ist, obwohl bei Dieselfahrzeugen noch ein Nachteil von Pkw zu erkennen ist. Da die Auslastung von Bus und Bahn im Fernverkehr (60 % und 56 %) jedoch höher als im Nahverkehr (21 % und 27 %) ist, müssen Pkw im Fernverkehr ebenfalls ähnlich hoch ausgelastet sein, um energetisch gleichauf zu sein. Wie im Nahverkehr kann dies durch vermehrtes Ridesharing erreicht werden.

Im **Güterverkehr** ist der energetische Vorteil des elektrischen Schienenverkehrs ebenso ausgeprägt, wie in Abbildung 6.18 dargestellt.

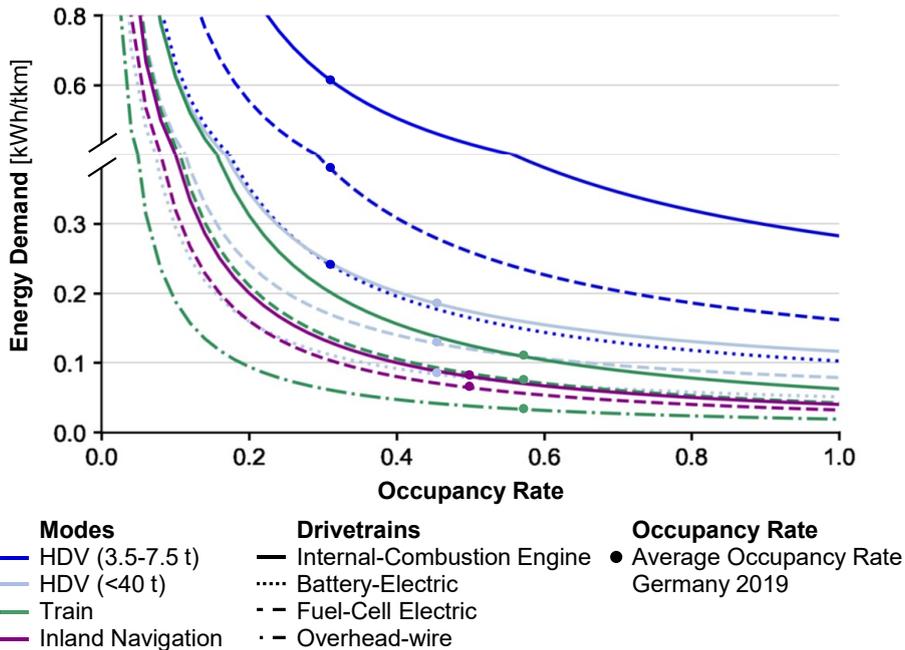


Abbildung 6.18. Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Güterverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030. HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Dieser Vorteil besteht sogar gegenüber dem Güterverkehr via Binnenschiff. Zwar kann der Umstieg dessen vom dieselmotorischen Antrieb hin zur Brennstoffzelle den Energiebedarf der Binnenschiffahrt senken, jedoch wird dennoch nicht das Niveau des elektrischen Schienenverkehrs erreicht. Ebenso stellt die Elektrifizierung im Straßengüterverkehr eine geeignete Option dar, um den energetischen Nachteil gegenüber dem Schienenverkehr zu senken. Dennoch entsteht auch hier weiterhin ein höherer spezifischer Energiebedarf. Zudem weist der Straßengüterverkehr gegenüber dem Schienen- und Binnenschiffgüterverkehr niedrigere durchschnittliche Auslastungen auf, was die Differenz hinsichtlich des verkehrsleistungsspezifischen Energiebedarfs ebenfalls erhöht.

Innerhalb des Straßengüterverkehrs bestehen ebenfalls Unterschiede bezüglich des spezifischen Energiebedarfs. Diese entstehen zum einen aufgrund der unterschiedlichen Auslastungen im Nah- (32 %) und Fernverkehr (45 %). Zum anderen führen die unterschiedlichen Fahrzeuggrößen zu abweichenden Energiebedarfen. Hierbei ergibt sich spezifisch ein Vorteil für größere Fahrzeuge, welche höhere Kapazitäten aufweisen. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass mit den unterschiedlichen Fahrzeuggrößen verschiedene Verkehrsnachfragen bedient werden. Daher ist es energetisch nicht immer vorteilhaft kleinere Fahrzeuge durch größere zu ersetzen, da Auswirkungen auf die Auslastung der Fahrzeuge auftreten. Ähnliches gilt für den Vergleich zwischen dem Straßengüterverkehr mit dem Schienen- und Binnenschiffgüterverkehr.

Alles in allem zeigen die Analysen des spezifischen Energiebedarfs der verschiedenen Verkehrsmittel einen Vorteil des öffentlichen Verkehrs, insbesondere des Schienenverkehrs, über alle betrachteten Verkehrsarten auf. Zudem weist der Luftverkehr einen stark erhöhten

Energiebedarf auf, welcher trotz möglicher Elektrifizierung weiterhin auf ähnlich hohem Niveau bleibt. Die Elektrifizierung des Straßengüter- und -personenverkehrs verkleinert die Differenz zum Schienenverkehr hingegen deutlich. Aus diesem Grund wächst die Bedeutung der Auslastung der Verkehrsmittel in Zukunft an. Abbildung 6.15 bis Abbildung 6.18 unterstreichen den großen Einfluss der Auslastung auf den spezifischen Energiebedarf und somit den intermodalen Vergleich. Folglich ist es im Rahmen des modalen Shifts stets entscheidend, welche Auswirkung durch den Wechsel auf die Auslastung der jeweiligen Verkehrsmittel entsteht. Zudem verdeutlicht die Analyse den positiven Einfluss des Ridesharing-Konzepts auf den Energiebedarf (vgl. Abbildung 6.16).

6.4.2 Ökonomischer Vergleich

Der ökonomische Vergleich der Verkehrsmittel erfolgt zunächst, wie der energetische Vergleich, nach Personen- und Güterverkehr differenziert sowie im Personenverkehr unterteilt in Nah- und Fernverkehr. Dabei werden neben den Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten im öffentlichen Personenverkehr sowie im Güterverkehr die Fahrerkosten mit 35 €/h [75] einbezogen. Die Kosten des Straßen-, Schienen-, Wasser- und Flughafenetzes sind in den Analysen nicht berücksichtigt. Hierdurch könnten sich die Verhältnisse zwischen den betrachteten Verkehrsmitteln verschieben. Abschließend werden die Anteile der Kostenarten an den Gesamtbetriebskosten für die in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 analysierten Fahrzeuge verglichen, um den Einfluss der einzelnen Kostenarten auf die verschiedenen Anwendungen zu bestimmen.

Der Vergleich der spezifischen Gesamtbetriebskosten von Verkehrsmitteln des **Personenverkehrs** in Abbildung 6.19 weist, wie zuvor der spezifische Energiebedarf, bis zu einer Auslastung von etwa 50 % eine hohe Abhängigkeit von der Auslastung der Verkehrsmittel auf. Der spezifische Energiebedarf wird maßgeblich vom Antrieb bestimmt. Demgegenüber ist der Einfluss des Antriebs auf die spezifischen Gesamtbetriebskosten deutlich weniger ausgeprägt als die Abhängigkeit vom Verkehrsmittel. Dies resultiert aus verschiedenen Effekten. Dem energetischen Vorteil der Elektrifizierung wirken zu einem Teil höhere spezifische Kosten der alternativen Energieträger gegenüber fossilen Kraftstoffen entgegen. Dies führt dazu, dass die Differenz der Kraftstoffkosten der Antriebe geringer als der Unterschied des Energiebedarfs ausfällt. Darüber hinaus stellen die Energiekosten nur eine der vier betrachteten Kostenarten dar.

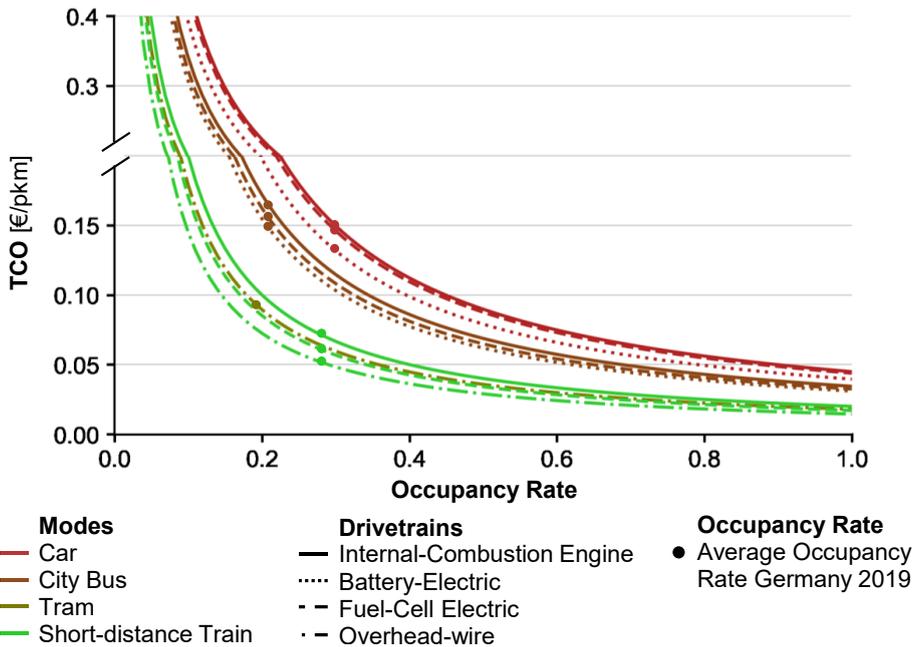


Abbildung 6.19. Verkehrsleistungsspezifische Gesamtbetriebskosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer (nicht für Pkw)) verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.

Die Ergebnisse zeigen einen ökonomischen Vorteil der Schienenverkehrsmittel. Dieser resultiert vor allem aus den höheren jährlichen Fahrleistungen und Kapazitäten der Bahnen im Vergleich zu Bussen und Pkw. Die Gesamtbetriebskosten von Bussen liegen zwischen denen von Bahnen und Pkw. Bei einer durchschnittlichen Auslastung der Verkehrsmittel sind die spezifischen Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten von Bussen im Vergleich zu Pkw niedriger. Insbesondere die spezifischen Herstellungskosten entsprechen bei allen Antriebsarten aufgrund der höheren Verkehrsleistung weniger als 30 % von denen der Pkw. Die spezifischen Kraftstoffkosten sind hingegen nur maximal 10 % niedriger im Vergleich zu Pkw.

Im **Personenfernverkehr** ergeben sich grundlegend ähnliche Verhältnisse zum Nahverkehr. Der Schienenverkehr stellt, wie in Abbildung 6.20 visualisiert, vor Bussen die günstigste Option dar. An dritter Stelle reihen sich wie zuvor Pkw ein. Hinzu kommt im Fernverkehr der Flugverkehr. Dieser ist trotz der höheren durchschnittlichen Auslastung teurer als alle anderen Verkehrsmittel, was unter anderem durch den zuvor thematisierten energetischen Nachteil begründet ist.

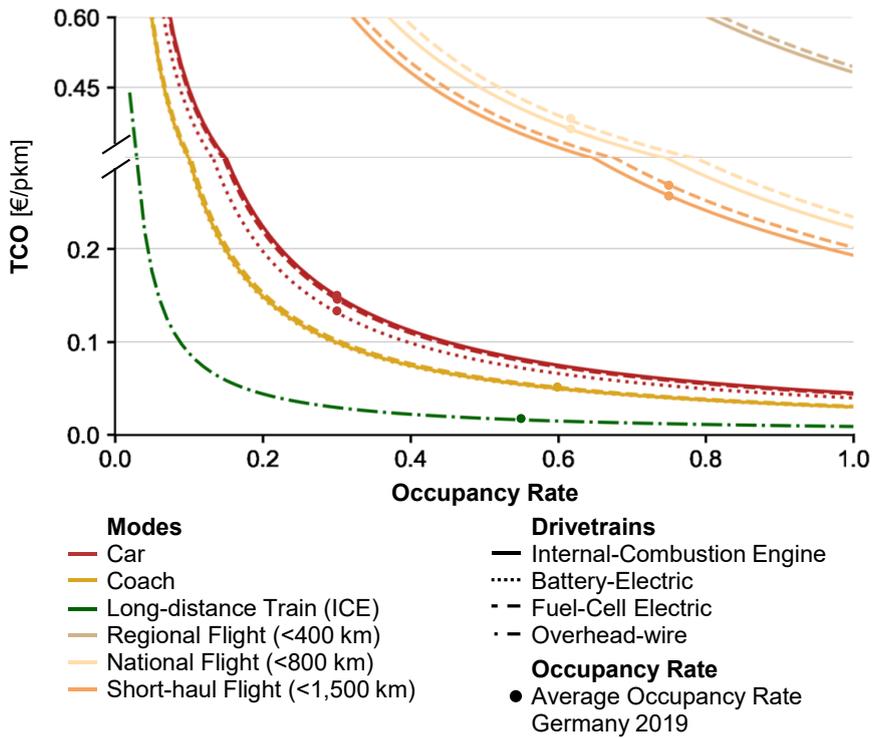


Abbildung 6.20. Verkehrsleistungsspezifische Gesamtbetriebskosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer (nicht für Pkw)) verschiedener Personenfernverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.

Aus dem Vergleich des Nah- und Fernverkehrs ist abzuleiten, dass die auslastungsabhängigen Kosten von Bussen nahezu unverändert bleiben. Dies resultiert aus der Annahme eines durchschnittlichen Reisebusses. Da im Fernbuslinienverkehr deutlich höhere Jahresfahrleistungen von über 180.000 km/a auftreten, sind die spezifischen Kosten in diesen Fällen entsprechend niedriger.

Abbildung 6.21 zeigt, dass der Straßenverkehr ebenso wie im Personen- auch im **Güterverkehr** teurer als der Transport via Schiene ist.

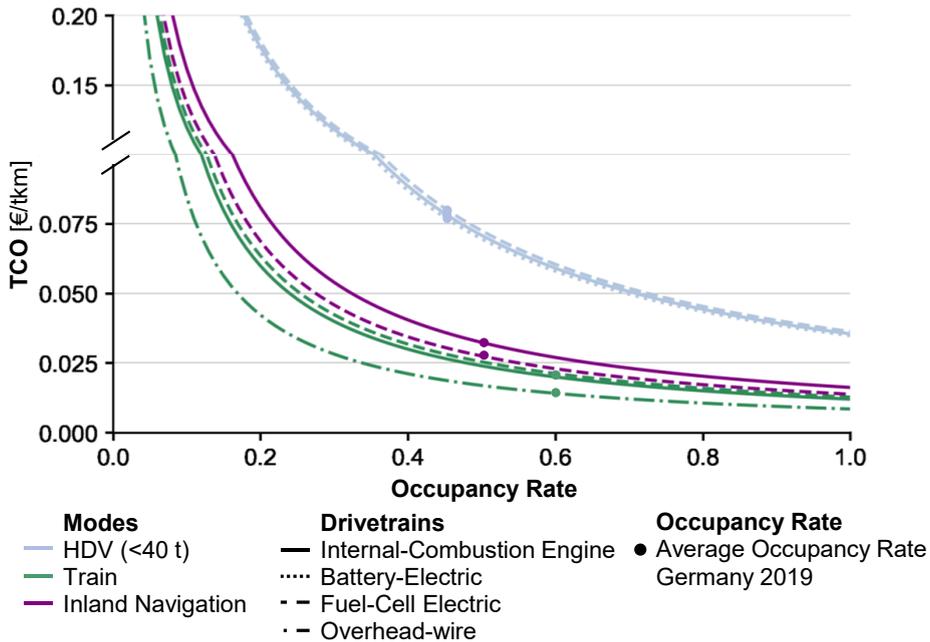


Abbildung 6.21. Verkehrsleistungsspezifische Gesamtbetriebskosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer) verschiedener Güterverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030. HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Die verkehrsleistungsspezifischen Kosten des Güterverkehrs mittels Binnenschiff sind geringfügig höher als die mittels Zug. Hier sei erneut auf die fehlende Berücksichtigung der Kosten der Verkehrsnetze hingewiesen, welche die geringe Kostendifferenz zwischen Schienen- und Schiffsverkehr ausgleichen oder gar zu einem Vorteil der Binnenschifffahrt führen könnten. Insbesondere im Straßenverkehr wird der hohe Einfluss der Kapazität und der Jahresfahrleistung auf die spezifischen Transportkosten deutlich. Die geringe Transportkapazität je Fahrzeug im straßengebundenen Transport führt zu einem steigenden Einfluss der Fahrerkosten. Der Transport mittels kleinerer Fahrzeuge, welche eine geringere Verkehrsleistung aufweisen, ist im Vergleich zu Sattelzugmaschinen im Fernverkehr mit höheren spezifischen Kosten verbunden. Wie bereits hinsichtlich des energetischen Nachteils ist jedoch darauf hinzuweisen, dass je nach Ausprägung weiterer logistischer Anforderungen kleinere Fahrzeuge vorteilhaft gegenüber größeren sein können. Ähnliches gilt für den Vergleich des Straßenverkehrs mit den anderen Verkehrsmitteln.

Neben den spezifischen Gesamtbetriebskosten können ebenso die Anteile der Kostenarten in Abhängigkeit der Verkehrsmittel und Antriebsarten verglichen werden. Diese Untersuchung wird im Folgenden für die in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 analysierten Straßenfahrzeuganwendungen durchgeführt.

Aus der im linken Diagramm der Abbildung 6.22 visualisierten Verteilung der Anteile der Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten in Abhängigkeit des Antriebs können verschiedene Effekte abgeleitet werden. Die Gesamtbetriebskosten von Verbrennungsmotorfahrzeugen sind im Mittel nahezu gleichmäßig auf die drei Kostenarten verteilt. Demgegenüber sinkt bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Mittel der Anteil der

Herstellungs- und vor allem der Wartungskosten, was zu einem steigenden Einfluss der Kraftstoffkosten führt. Ähnlich zum Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug sinkt auch bei Batterie-Elektrofahrzeugen der Anteil der Wartungskosten an den Gesamtbetriebskosten. Jedoch steigt nicht der Einfluss der Kraftstoff-, sondern der Herstellungskosten. Dies ist auf die höhere Effizienz sowie die Batteriekosten zurückzuführen. Zudem verdeutlicht das Diagramm, dass der Anteil der Herstellungskosten bei den beiden elektrifizierten Antriebsarten eine höhere Streuung als bei Verbrennungsmotorfahrzeugen aufweist. Dies unterstreicht die stärkere Abhängigkeit der Herstellungskosten vom jeweiligen Anwendungsfall bei Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen.

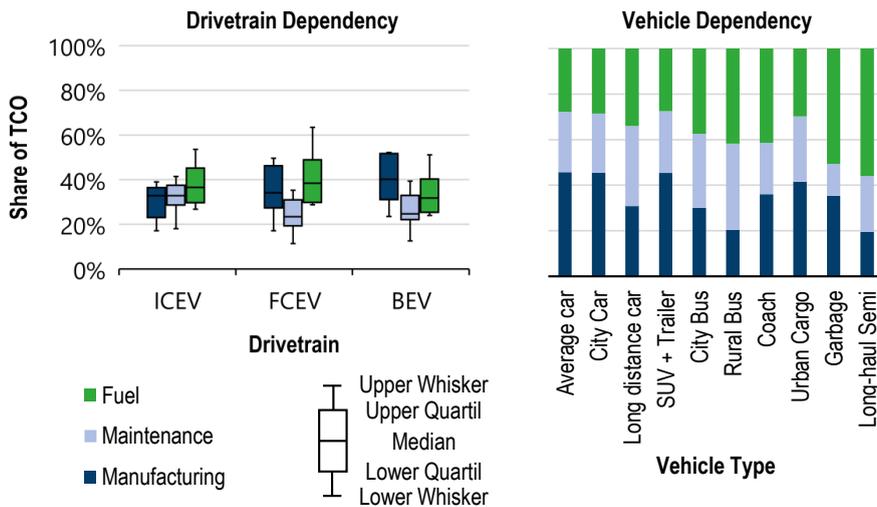


Abbildung 6.22. Anteile der Kostenarten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) an den Gesamtbetriebskosten (TCO) in Abhängigkeit der Antriebsart (links) und der Fahrzeuganwendung (rechts). ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug.

Das rechte Diagramm der Abbildung 6.22 visualisiert die über die drei Antriebsarten gemittelten Anteile der Kostenarten für die einzelnen betrachteten Fahrzeuganwendungen. Daraus ist zu entnehmen, dass der Anteil der Kraftstoffkosten bei Fahrzeugen mit einem höheren Energiebedarf und höheren Fahrleistungen steigt. Im Gegenzug sinkt bei diesen Fahrzeugen vor allem der Anteil der Herstellungskosten. Bei kleineren Fahrzeugen mit niedrigen Fahrleistungen tritt der entgegengesetzte Effekt auf. Die Wartungskosten weisen keine eindeutige Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp auf.

Zwischenfazit des intermodalen Vergleichs

Insgesamt zeigt der intermodale Vergleich den hohen Einfluss der Auslastung der Verkehrsmittel, insbesondere im Bereich unterhalb von 20 %, hinsichtlich des verkehrsleistungsbezogenen Energiebedarfs sowie der Gesamtbetriebskosten. Darüber hinaus sinkt der energetische Vorteil des öffentlichen Verkehrs gegenüber Pkw aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge. Eine höhere Auslastung der Pkw mittels verstärktem Ridesharing könnte sogar einen energetischen Vorteil gegenüber Bussen und Bahnen bewirken. Aus diesem Grund ist es erforderlich bei Entscheidungen zum Ausbau des

öffentlichen Verkehrs die Auslastung der Fahrzeuge mit einzubeziehen. Hinsichtlich des Vergleichs der Gesamtbetriebskosten hat die Elektrifizierung nur einen untergeordneten Einfluss, da die Auswirkung der hohen Kapazität und Fahrleistung des öffentlichen Verkehrs überwiegt. Des Weiteren unterstreichen die Ergebnisse, dass die Wartungskosten bei elektrifizierten Fahrzeugen einen geringeren Anteil an den Gesamtbetriebskosten aufweisen. Bei Batterie-Elektrofahrzeugen steigt im Gegenzug der Anteil der Herstellungskosten. Bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen sinken die absoluten Kraftstoffkosten gegenüber Verbrennungsmotorfahrzeugen zwar, jedoch wächst deren Anteil an den Gesamtbetriebskosten.

6.5 Einflussfaktoren der techno-ökonomischen Entwicklung

Die techno-ökonomische Analyse der definierten Straßenfahrzeuge in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 unterstreicht, dass die Beantwortung der Frage der kostengünstigsten Antriebsoption nicht nur von der Fahrzeugklasse abhängt, sondern ebenfalls von weiteren Faktoren beeinflusst wird. Hierzu zählen zunächst die Entwicklung des **Weltmarkts** (6.5.1) sowie die angenommene **Lernrate** (6.5.2) als grundlegende Parameter der Bestimmung der spezifischen **Komponentenkosten** (6.5.3) mittels Lernkurvenansatz. Die spezifischen Komponentenkosten wiederum beeinflussen zusammen mit der **Reichweite** (6.5.4) die Herstellungskosten des Gesamtfahrzeugs. Die **Jahresfahrleistung** (6.5.4) verschiebt das Verhältnis der Kostenarten und nimmt somit Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten. Insbesondere der Anteil der Kraftstoffkosten ist jahresfahrleistungsabhängig. Die Kraftstoffkosten wiederum bestimmen sich aus dem **Energiebedarf** (6.5.5) und den **Bereitstellungskosten** (6.5.7) der Energieträger. Vor allem bei batterieelektrischen Fahrzeugen hängen die Bereitstellungskosten von der angenommenen Ausprägung der **Ladeinfrastruktur** (6.5.6) ab, weshalb diese ebenfalls untersucht wird. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der einzelnen Faktoren isoliert analysiert. Daraus werden Aussagen über die Relevanz der Faktoren abgeleitet.

6.5.1 Weltmarkt

Die Berechnung der Komponentenkosten erfolgt auf Basis des Lernkurvenansatzes, wie in Sektion 4.1.4 beschrieben. Dieser bedarf der Bestimmung der zukünftigen kumulierten Produktionskapazitäten, welche heutzutage unbekannt sind. Um den Einfluss der Entwicklung des Weltmarkts zu analysieren, werden im Folgenden die spezifischen Kosten der Batterie, der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank in Abhängigkeit der in Sektion 5.2.2 definierten Weltmarktszenarien bestimmt.

Die Auswirkungen der Szenarien auf die Komponentenkosten sind sowohl abhängig vom Szenario als auch von der betrachteten Komponente. Der Einfluss der sinkenden Produktionskapazitäten im *Autonomous & Shared*-Szenario (vgl. Abbildung 4.11) ist verglichen mit dem der beiden anderen Szenarien gering, wie Abbildung 6.23 zeigt. Insgesamt führt das geringere Produktionsvolumen zu einer Erhöhung der spezifischen Komponentenkosten gegenüber dem Referenzszenario, welche jedoch weniger als 2 % beträgt. Demgegenüber liegen die Batteriekosten im *BEV*-Szenario im Jahr 2050 11 % unter denen des Referenzszenarios. Die verstärkte Kostendegression führt dazu, dass die Schwelle von 100 €/kWh nicht erst 2026, sondern ein Jahr früher erreicht wird. Im *FCEV*-Szenario verschiebt sich dieser Meilenstein ins Jahr 2027. Zudem erhöhen sich die Batteriekosten im

Jahr 2050 um 12 % auf 46 €/kWh. Im Gegensatz dazu fällt die Kostensteigerung der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks im *BEV*-Szenario mit 10 % bzw. 4 % geringer aus.

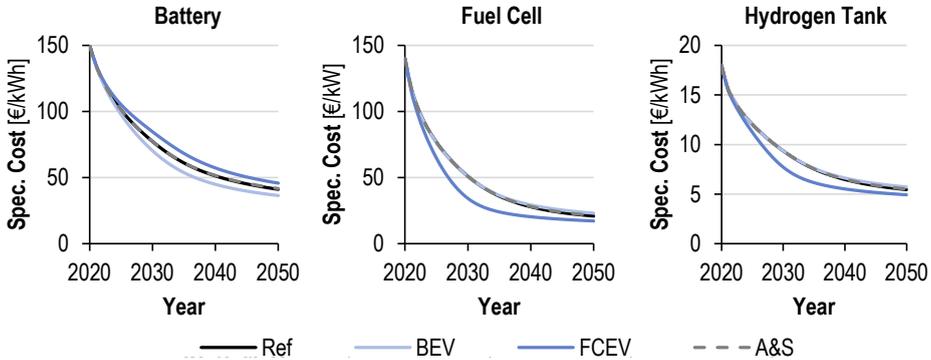


Abbildung 6.23. Spezifische Kosten der Batterie, Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank von 2020 bis 2050 in Abhängigkeit des betrachteten Weltmarktszenarios.

Der Wechsel vom *Referenz*- zum *FCEV*-Szenario hat hingegen eine stärkere Auswirkung auf die Komponentenkosten der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks. Zum einen sinken die Kosten im Jahr 2050 um 10 % bzw. 18 %. Zum anderen veranschaulichen die Kostenkurven in Abbildung 6.23, dass die Reduktion der Kosten im *FCEV*-Szenario vor allem bis zum Jahr 2030 deutlich stärker ausfällt. Dies resultiert aus der Annahme eines stark gesteigerten Anteils der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge an der globalen Pkw-Produktion (2 % vs. 30 % in 2030).

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass der Einfluss des Weltmarktszenarios auf die Komponentenkosten aus dem Marktanteil der Antriebe resultiert und nicht in dem Maße von sinkenden Gesamtproduktionskapazitäten beeinflusst wird. Zudem führt die geringe Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im *BEV*-Szenario nahezu keine Veränderungen gegenüber dem *Referenzszenario*. Dies unterstreicht, dass insbesondere der Eintritt in die Massenfertigung und weniger die finale Marktdurchdringung entscheidend die Kostenreduktion prägt. Wie stark letztendlich die Herstellungskosten sowie die Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge von veränderten Komponentenkosten beeinflusst werden, wird in Sektion 6.5.3 thematisiert.

6.5.2 Lernrate

Neben dem zuvor behandelten Weltmarktszenario ist die Lernrate ein weiterer Faktor der mittels des Lernkurvenansatzes bestimmten Komponentenkosten. Deren Einfluss wird in dieser Sektion untersucht. Dazu wird die Lernrate der Batterie, der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks ausgehend vom Referenzwert um 2 % erhöht bzw. gesenkt. In Abbildung 6.24 sind die sich aus der abweichenden Lernrate ergebenden Komponentenkosten im Zeitverlauf von 2020 bis 2050 visualisiert.

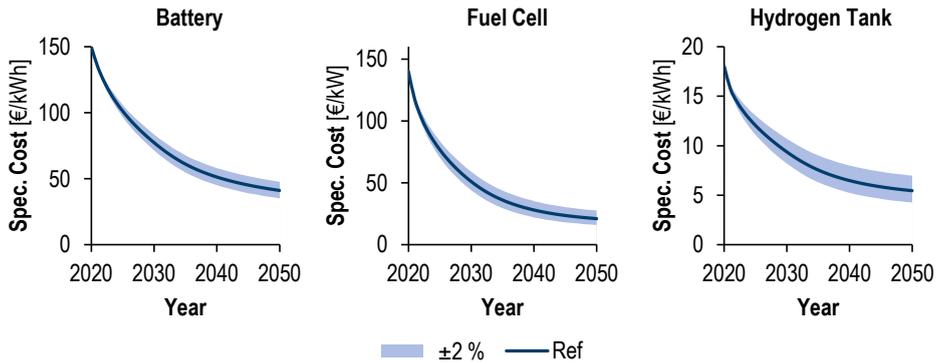


Abbildung 6.24. Spezifische Kosten der Batterie, Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks von 2020 bis 2050 bei um zwei Prozentpunkte veränderter Lernrate gegenüber dem Referenzwert.

Generell ist zu erkennen, dass die Veränderungen gegenüber den Referenzkosten mit der Zeit ansteigen. Am Beispiel der Batterie bedeutet dies, dass eine 2 % erhöhte Lernrate im Jahr 2030 zu 8 % und im Jahr 2050 zu 14 % geringeren Kosten führt. Der Vergleich mit der Brennstoffzelle untermauert, dass die Kosten der Brennstoffzelle eine höhere Sensitivität hinsichtlich der Lernrate aufweisen. Hier sinken sie bei einer um 2 % erhöhten Lernrate bereits bis zum Jahr 2030 um 14 % gegenüber dem Referenzverlauf. Der Wasserstofftank weist eine vergleichbar hohe Sensitivität in Bezug auf die Lernrate auf. Dieser Zusammenhang entsteht aufgrund der größeren erwarteten Steigerung der Produktionskapazitäten der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank im Vergleich zur Batterie.

6.5.3 Komponentenkosten

Um den Einfluss der Komponentenkosten auf die Herstellungskosten und die Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge bewerten zu können, ist in Abbildung 6.25 der Anteil der Kosten der Batterie bei einem Batterie-Elektrofahrzeug und der Anteil der Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten bei einem Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug für die in Abschnitt 5.1 definierten Fahrzeuganwendungen im Jahr 2030 visualisiert.

Die beiden Diagramme veranschaulichen, dass der Anteil zum einen von der betrachteten Komponente und zum anderen von der Fahrzeuganwendung abhängt. Zudem ist der Anteil an den Gesamtbetriebskosten geringer, da hier mit den Wartungs- und Energiekosten zusätzliche Kosten inkludiert sind, welche weniger von den Komponentenkosten abhängen.

Der Anteil der Batteriekosten ist unabhängig vom betrachteten Fahrzeugtyp am höchsten. Lediglich beim urbanen Lieferfahrzeug weist die Brennstoffzelle mit 21 % einen gleich hohen Anteil an den Herstellungskosten auf. Insbesondere bei Fahrzeugen mit hohen Reichweitenanforderungen (Sattelzugmaschine und Langstrecken-Pkw) oder Energiebedarf (Abfallsammelfahrzeug und SUV mit Anhängerbetrieb) ist der Anteil der Batteriekosten mit bis zu 50 % vergleichsweise hoch. Betrachtet man in diesen Fällen zudem die Gesamtbetriebskosten so wird deutlich, dass ein hoher Anteil an den Herstellungskosten nicht unbedingt einen hohen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten zur Folge hat. So liegt beispielsweise der Anteil der Batterie an den Herstellungskosten eines Langstrecken-Pkw bei vergleichsweise hohen 41 %, jedoch an den Gesamtbetriebskosten bei 15 %, was

vergleichbar mit einem Stadt-Pkw ist. Dies deutet auf den in diesem Zusammenhang kostenenkenden Einfluss einer hohen Fahrleistung hin.

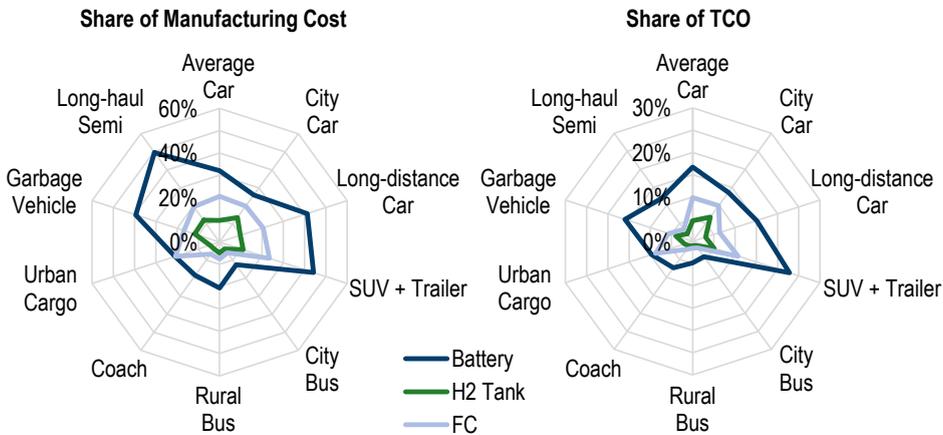


Abbildung 6.25. Anteile der Batterie (BEV) und der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks (FCEV) an den Herstellungskosten (links) sowie den Gesamtbetriebskosten (TCO) inklusive Herstellung, Wartung und Kraftstoff (rechts) bei den betrachteten Fahrzeuganwendungen im Jahr 2030. FC: Brennstoffzelle.

Der Anteil der Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten an den Herstellungskosten und den Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge ist nicht nur geringer als der Anteil der Batterie. Darüber hinaus ist der Anteil auch weniger abhängig vom Fahrzeugtyp. Die absolute Streuung beträgt bei der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank nur 10 % bzw. 17 % und fällt somit deutlich niedriger als bei der Batterie aus, wo diese bei 37 % liegt.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Fahrzeugkosten eines Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugs weniger sensitiv auf mögliche Änderungen hinsichtlich der spezifischen Herstellungskosten der Komponenten (Brennstoffzelle, Wasserstofftank) reagieren als ein Batterie-Elektrofahrzeug auf veränderte Batteriekosten. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Herstellungskosten von Fahrzeugen mit hohen Reichweitenanforderungen. Dennoch ist der Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten insgesamt gering, was mit folgendem Gedankengang unterstrichen wird. Im Mittel liegt der Anteil der Batteriekosten an den Gesamtbetriebskosten der Batterie-Elektrofahrzeuge bei den analysierten Fahrzeugtypen bei 12 %. Die Batteriekosten steigen bei einer um 2 % erhöhten Lernrate im Jahr 2050 um 16 % gegenüber dem Referenzwert an. Die Sensitivität in Bezug auf das Weltmarktszenario liegt mit maximal 11 % darunter. Eine Erhöhung der Komponentenkosten um 16 % führt bei einem Anteil der Komponentenkosten an den Gesamtbetriebskosten von 12 % zu insgesamt weniger als 2 % höheren Gesamtbetriebskosten. Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl das Weltmarktszenario als auch die Genauigkeit der Lernrate in den meisten Fällen eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Gesamtbetriebskosten einnehmen, welche zum Vergleich der Antriebskonzepte herangezogen wird.

6.5.4 Reichweite und Jahresfahrleistung

Die bisher analysierten Einflussfaktoren wirken sich auf die spezifischen Produktionskosten der Komponenten aus. Die Reichweite und die Jahresfahrleistung sind hingegen

Parameter, welche Teil der definierten Fahrzeuganwendung sind und insbesondere das Kostenverhältnis von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen beeinflussen. Daher wird in dieser Sektion deren Einfluss auf das Verhältnis der Gesamtbetriebskosten der beiden Antriebsarten untersucht.

Die geforderte Reichweite beeinflusst die notwendige Speicherkapazität. Diese wiederum beeinflusst die Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Letztere Beziehung resultiert aus dem veränderten Energiebedarf aufgrund des modifizierten Fahrzeuggewichts. Abbildung 6.26 veranschaulicht die Differenz der Gesamtbetriebskosten eines batterie- und brennstoffzellenelektrischen Mittelklasse-Pkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit von der Reichweite und der Jahresfahrleistung.

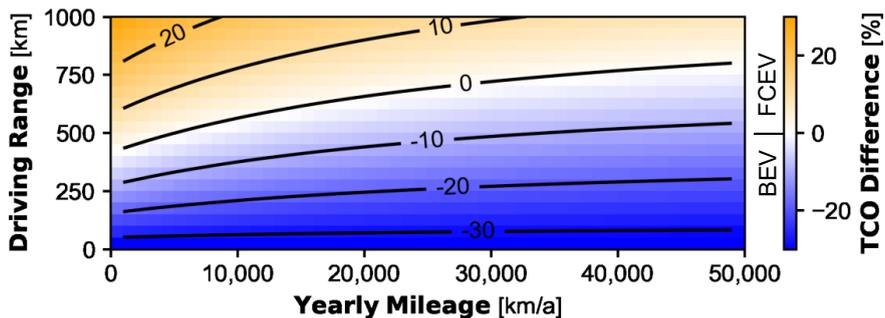


Abbildung 6.26. Differenz der Gesamtbetriebskosten (TCO) von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) (negativ, blau) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) (positiv, orange) eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.

Darin ist zum einen zu erkennen, dass höhere geforderte Reichweiten nachteilig für Batterie-Elektrofahrzeuge sind. Zum anderen sind höhere Fahrleistungen vorteilhaft für Batterie-Elektrofahrzeuge. Dies führt dazu, dass Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge bei höheren Reichweiten und gleichzeitig geringeren Fahrleistungen günstiger als Batterie-Elektrofahrzeuge sind. Der Nachteil der Batterie-Elektrofahrzeuge hinsichtlich höherer Reichweiten resultiert aus den höheren spezifischen Kosten der Batterie im Vergleich zum Wasserstofftank. Diese führen zu stärker steigenden Herstellungs- und Wartungskosten bei Batterie-Elektrofahrzeugen, wobei der Einfluss der Herstellungskosten überwiegt. Eine steigende Fahrleistung hat zur Folge, dass sich die Anteile der Kostenarten verschieben. Insbesondere der Anteil der Kraftstoffkosten gewinnt an Bedeutung. Da diese aufgrund der höheren Effizienz des Batterie-Elektrofahrzeugs je gefahrenem Kilometer niedriger sind, entsteht der Vorteil der Batterie-Elektrofahrzeuge. Somit tritt die Kostenparität bei steigenden Fahrleistungen erst bei höheren geforderten Reichweiten auf. Liegt die geforderte Reichweite eines Pkw mit einer Jahresfahrleistung von 10.000 km/a unter 550 km so ist ein Batterie-Elektrofahrzeug günstiger als ein Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug. Bei 30.000 km/a muss die Reichweite unter 700 km liegen, damit ein Batterie-Elektrofahrzeug weiterhin günstiger ist.

Im Vergleich zu Pkw ist die Reichweite, bei der Kostenparität zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrobussen eintritt, niedriger (vgl. Abbildung 6.27). Bei 30.000 km/a herrscht bei einer Reichweite von ca. 450 km Kostenparität zwischen den beiden Antriebsformen. Dabei sei jedoch angemerkt, dass Busse durchschnittlich eine Jahresfahrleistung von 57.000 km aufweisen, was mehr als dem Dreifachen der durchschnittlichen

Jahresfahrleistung von Pkw entspricht. Bei dieser Fahrleistung darf die geforderte Reichweite bei 600 km liegen. Ein Vergleich mit den Distanzen der Umlaufpläne im Liniennahverkehr in Deutschland zeigt, dass geringere Reichweiten notwendig sind.

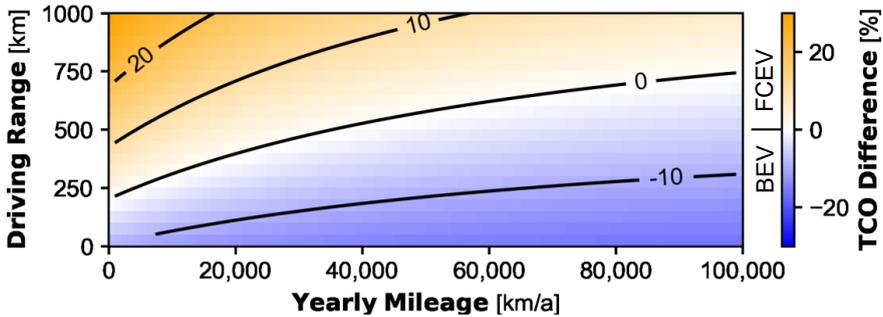


Abbildung 6.27. Differenz der Gesamtbetriebskosten (TCO) von Batterie-Elektrobussen (BEV) (negativ, blau) und Brennstoffzellen-Elektrobussen (FCEV) (positiv, orange) eines 12m-Standardbusses im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.

Die Abhängigkeit der Kostenparität von Sattelzugmaschinen und Bussen von der Jahresfahrleistung und der Reichweite sind vergleichbar. Jedoch hat die Reichweite bei Sattelzugmaschinen einen größeren Einfluss auf die relative Differenz der Gesamtbetriebskosten der beiden Antriebstechnologien. In Zahlen bedeutet dies, dass bei einer Fahrleistung von 100.000 km/a batterieelektrische Sattelzugmaschinen 10 % günstiger als brennstoffzellenelektrische Sattelzugmaschinen sind, bei Bussen hingegen nur 5 %. Diese Relation resultiert allerdings vor allem aus den niedrigeren absoluten Gesamtbetriebskosten der Sattelzugmaschinen.

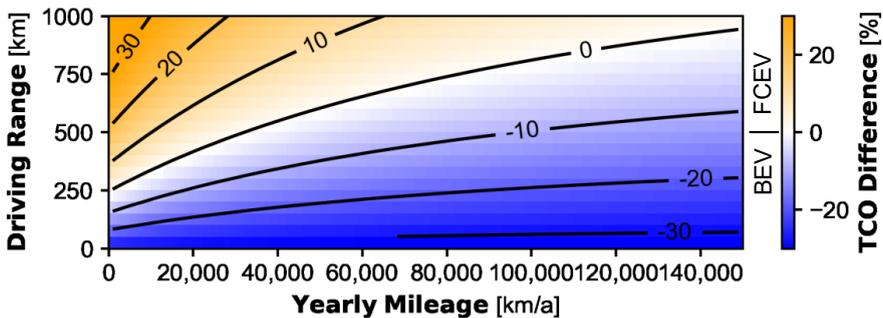


Abbildung 6.28. Differenz der Gesamtbetriebskosten (TCO) von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) (negativ, blau) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) (positiv, orange) einer 40 t-Sattelzugmaschine im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.

Bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 114.000 km in Deutschland muss die geforderte Reichweite der Sattelzugmaschinen unter 850 km liegen, damit Batterie-Elektrofahrzeuge günstiger als Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge sind. Hier wird erneut der positive Einfluss einer hohen Jahresfahrleistung für BEV aufgrund der höheren Effizienz des Antriebsstrangs deutlich. Der Einfluss der Reichweite auf die erforderliche Batteriekapazität wird in Sektion 6.5.5 aufgegriffen.

Insgesamt unterstreichen die Analysen den Einfluss der Reichweite und der Jahresfahrleistung auf die Verhältnisse der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Eine Entscheidung für die eine oder andere Technologie muss anhand des individuellen Einsatzprofils der Fahrzeuge getroffen werden. In jedem Fall sollte es aus techno-ökonomischer Sicht vermieden werden überdimensionierte Batterien in Fahrzeugen zu integrieren, die eine geringe Jahresfahrleistung aufweisen.

6.5.5 Entwicklung des Energiebedarfs

Der Energiebedarf der Fahrzeuge ergibt sich, wie zuvor die erforderliche Reichweite und die Jahresfahrleistung, ebenfalls aus den Eigenschaften der Verkehrsnachfrage. Der Energiebedarf der Fahrzeuge wird maßgeblich von der Fahrzeuggröße und -masse bestimmt. Ein höherer Energiebedarf hat vor allem höhere Kraftstoffkosten zur Folge. Dieser Effekt ist gleichzusetzen mit veränderten spezifischen Kraftstoffkosten, welche in Sektion 6.5.7 analysiert werden. Darüber hinaus wird über den Energiebedarf in Kombination mit der geforderten Reichweite die Speicherkapazität definiert. Da diese insbesondere bei Batterie-Elektrofahrzeugen einen Einfluss auf die Herstellungskosten hat (vgl. Sektion 6.5.3), ist in Abbildung 6.29 die Entwicklung des Energiebedarfs sowie der Reichweite von 2020 bis 2050 für die batterieelektrischen Varianten der analysierten Fahrzeuganwendungen dargestellt. Die visualisierten Energiebedarfe entsprechen den zur Auslegung des Batteriespeichers relevanten Werten. Dies bedeutet, dass bei Bussen und Nutzfahrzeugen eine volle Auslastung angenommen wird. Bei Bussen wird ebenfalls der Heizbedarf bei 0 °C einbezogen.

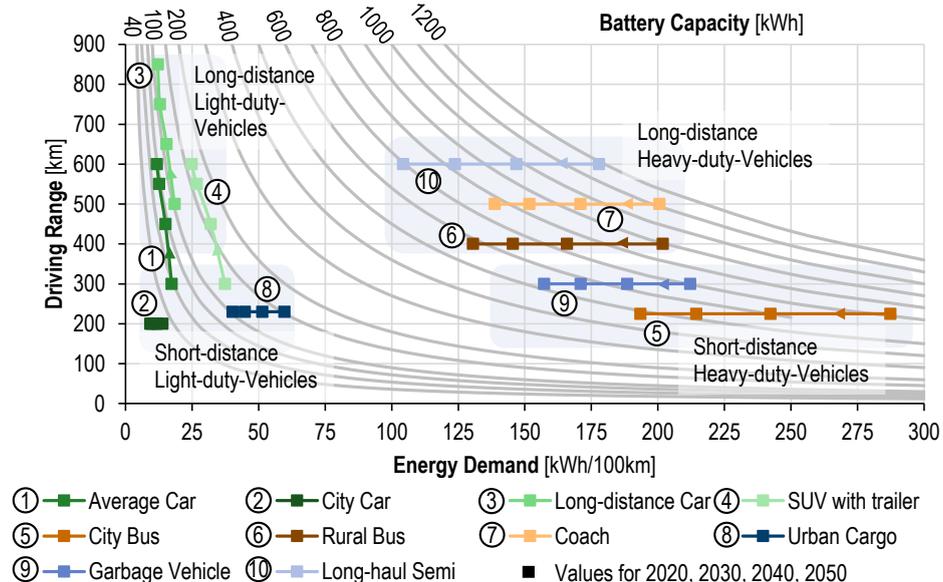


Abbildung 6.29. Erforderliche Batteriekapazität von Batterie-Elektrofahrzeugen der betrachteten Fahrzeuganwendungen in Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs und der elektrischen Reichweite. Einteilung der betrachteten Fahrzeuganwendungen in vier Gruppierungen anhand der beiden Dimensionen.

Das Diagramm verdeutlicht die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Anwendungsbeispiele in zwei Dimensionen: Erstens den unterschiedlichen Energiebedarf von kleinen und leichten Fahrzeugen gegenüber schweren Fahrzeugen, und zweitens die verschiedenen Reichweitenanforderungen von Kurz- und Langstrecken Anwendungen. Daraus ergeben sich insgesamt die vier gekennzeichneten Cluster der Straßenfahrzeuganwendungen.

Des Weiteren veranschaulicht das Diagramm die abweichenden Annahmen für Pkw-Anwendungen gegenüber Nutzfahrzeugen. Mit Ausnahme des Stadt-Pkw (2) wird bei den Pkw-Anwendungen (1, 3, 4) eine steigende Reichweite der Fahrzeuge erwartet, um diese langstreckentauglicher zu gestalten. Dies wird sowohl mittels steigender Batteriekapazitäten als auch mittels sinkender Energiebedarfe aufgrund von Effizienzentwicklungen ermöglicht. Demgegenüber werden die Anforderungen der Nutzfahrzeuganwendungen über der Zeit konstant angenommen. Daher führen sinkende Energiebedarfe zu sinkenden Batteriekapazitäten. Im Jahr 2020 beträgt diese für eine Langstreckensattelzugmaschine (10) fast 1.200 kWh. Im Jahr 2050 hingegen nur noch ca. 700 kWh. Ähnliche Entwicklungen sind ebenfalls für alle weiteren schweren Nutzfahrzeuganwendungen (5-9) zu erkennen.

Ein weiterer Aspekt, welchen das Diagramm unterstreicht, ist die hohe Bedeutung der geforderten Reichweite hinsichtlich der Batteriedimensionierung im Schwerlastverkehr. Durch einen geeigneten Ausbau der Schnellladeinfrastruktur für Fernlastsattelzugmaschinen soll unter Berücksichtigung der gesetzlichen Pausenzeiten eine Reichweite von 450 km ausreichen, um den Betrieb sicherzustellen. Dies hätte zur Folge, dass die notwendige Batteriekapazität im Jahr 2030 von nahezu 1.000 kWh auf etwa 750 kWh sinken könnte. Das würde wie in Sektion 6.5.4 zu einem größeren Vorteil der Gesamtbetriebskosten von Batterie- gegenüber Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen führen.

6.5.6 Ladeinfrastruktur

Welchen Einfluss ein möglicher Ausbau der Schnellladeinfrastruktur auf deren Kosten hat, wird in dieser Sektion anhand des Beispiels einer Fernlastsattelzugmaschine analysiert. Die Ladeinfrastruktur der Sattelzugmaschinen lässt sich in Langsam- und Schnelllader unterteilen. Langsamlader, welche mit einer Ladeleistung von 150 kW ausgestattet sind, werden während längerer Standzeiten insbesondere über Nacht genutzt. Demgegenüber dienen Schnelllader mit einer Ladeleistung von 750 kW einer Zwischenladung während kürzerer Standzeiten, z. B. während der gesetzlich vorgeschriebenen 45-minütigen Lenkpausen nach 4,5 Stunden Lenkzeit.

In dieser Arbeit werden Annahmen hinsichtlich der Anzahl an Fahrzeugen je Lader auf Basis von Hacker et al. [40] in Abhängigkeit des Betrachtungsjahres angenommen. Insbesondere während der Markteinführung bis 2030 wird dabei ein Überbau der Langsamlader mit mehr als einem Lader je Fahrzeug angenommen, da die Fahrzeuge nicht jede Nacht am gleichen Standort laden können. Bei der Schnellladeinfrastruktur ist das Verhältnis von Ladepunkt pro Fahrzeug deutlich geringer. Zum einen erlaubt die kürzere durchschnittliche Besetzung der Lader pro Fahrzeug eine höhere Anzahl der Fahrzeuge je Ladepunkt. Zum anderen sind nur solche Fahrzeuge auf eine Zwischenladung angewiesen, deren Reichweite für die tägliche Fahrstrecke nicht ausreicht. Abbildung 6.30 weist die spezifischen Kosten der Ladeinfrastruktur im Jahr 2030 in Abhängigkeit des Ausbaus der Langsam- und Schnellladeinfrastruktur aus.

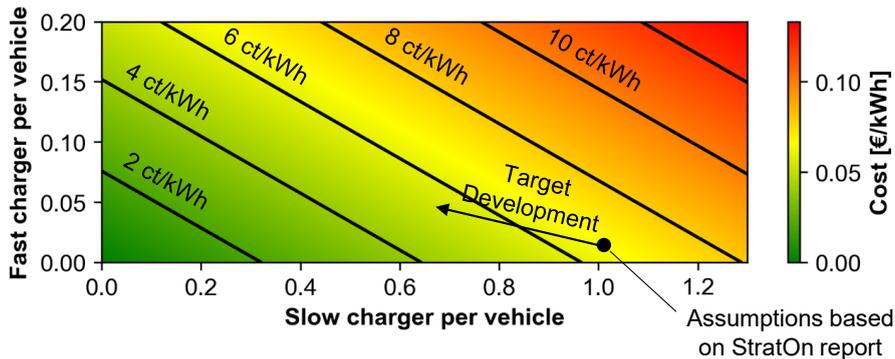


Abbildung 6.30. Spezifische Kosten der elektrischen Ladeinfrastruktur von Sattelzugmaschinen im Jahr 2030 in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrzeuge je Schnell- und Langsam-lader (750 bzw. 150 kW). Der Pfeil beschreibt qualitativ die Richtung der Entwicklung.

Das Diagramm verdeutlicht, dass eine Reduktion des Anteils der Langsam-lader hinsichtlich der spezifischen Kosten der Ladeinfrastruktur vorteilhaft ist. Eine Reduktion der Langsam-lader auf 0,2 Ladepunkte je Fahrzeug bei gleichzeitiger Erhöhung des Ausbaus der Schnell-lader auf 0,1 Ladepunkte je Fahrzeug würde die Infrastrukturkosten um 43 % auf 3,9 ct€/kWh senken. Hierbei bedarf es zusätzlicher Analysen hinsichtlich der Frage, inwiefern eine Reduktion der Zahl der Langsam-lader einen Ausbau der Schnell-lader erforderlich macht. Alles in allem bietet der verstärkte Ausbau der Schnell-ladeinfrastruktur bei gleichzeitig sinkenden Langsam-ladepunkten eine geeignete Möglichkeit die Kosten der gesamten Infrastruktur zu reduzieren und somit die Kraftstoffkosten der Fahrzeuge zu senken.

6.5.7 Kraftstoffkosten

In dieser Sektion wird der Einfluss der Kraftstoffkosten auf das Verhältnis der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen behandelt. Dazu ist in Abbildung 6.31 die relative Differenz der Gesamtbetriebskosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischen Pkw und Sattelzugmaschinen in Abhängigkeit der Strom- und Wasserstoffkosten visualisiert.

Der Vergleich der beiden Anwendungen zeigt, dass eine Veränderung der spezifischen Kraftstoffkosten bei Sattelzugmaschinen einen größeren Einfluss auf das Verhältnis der Gesamtbetriebskosten der beiden Antriebskonzepte hat. Dies resultiert aus dem höheren Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtbetriebskosten im Fernlastverkehr. Zudem wird ersichtlich, dass die Kosten der Energieträger an der Zapf- bzw. Ladesäule bei Sattelzugmaschinen niedriger als bei Pkw sind. Dieses Verhältnis entsteht aufgrund der energiespezifisch günstigeren Infrastruktur, welche durch die höhere Auslastung begründet ist.

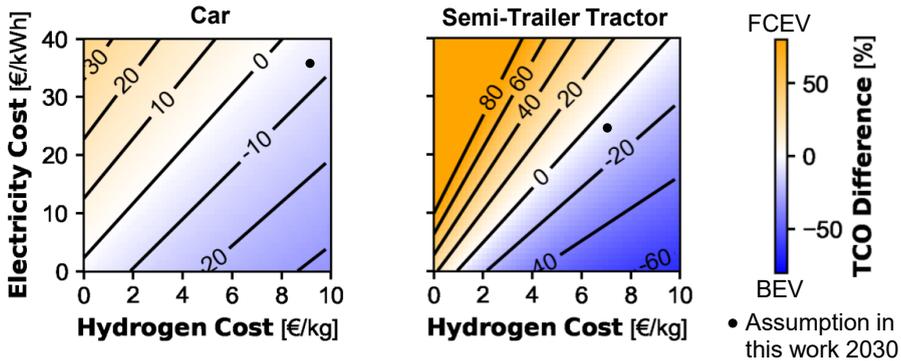


Abbildung 6.31. Differenz der Gesamtbetriebskosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) von batterieelektrischen (negativ, blau) und brennstoffzellenelektrischen (positiv, orange) Pkw und Sattelzugmaschinen im Jahr 2030 in Abhängigkeit der spezifischen Kraftstoffkosten an der Ladesäule bzw. der Tankstelle.

Bei konstanten Kosten des elektrischen Stroms müssten die Wasserstoffkosten an der Zapfsäule im Jahr 2030 unter 6 €/kg fallen, damit brennstoffzellenelektrische Sattelzugmaschinen günstiger als batterieelektrische sind. Dies entspricht einer Reduktion um weniger als 0,90 €/kg gegenüber den in dieser Arbeit angenommenen Wasserstoffkosten. Bei Pkw würde die Kostenparität erst bei einer Senkung der Wasserstoffkosten um 2,30 €/kg auf unter 7 €/kg eintreten. Abbildung F.4 im Anhang zeigt vergleichbare Verhältnisse für Busse im Jahr 2030. Da zukünftige Energiekosten Unsicherheiten unterliegen und zudem abhängig vom spezifischen Einzelfall sind, können Fälle auftreten, in denen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge aufgrund geringerer Wasserstoffkosten hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten günstiger als Batterie-Elektrofahrzeuge sind. Dementgegen können Stromkosten ebenfalls niedriger sein und somit den Vorteil für Batterie-Elektrofahrzeuge wahren oder gar vergrößern.

Zwischenfazit der Sensitivitätsanalysen

Die Analysen zu den verschiedenen Einflussfaktoren in diesem Abschnitt unterstreichen, dass die Komponentenkosten weniger von der finalen Durchdringung eines Antriebs im Weltmarkt, sondern vielmehr vom Zeitpunkt des Marktstadiums abhängen. Da der Anteil der Komponentenkosten an den Gesamtbetriebskosten zukünftig gering ist, sind die Auswirkungen von abweichenden Komponentenkosten allerdings nicht [allein] ausschlaggebend für den finalen Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Antriebskonzepte. Vielmehr sind es die Anforderungen der jeweiligen Fahrzeuganwendung in Bezug auf Energiebedarf, Reichweite und Fahrleistung. Einen weiteren bedeutsamen Faktor des Vergleichs der Gesamtbetriebskosten stellen die Kraftstoffkosten dar. Dabei sind auch die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur zu beachten, welche die Kraftstoffkosten entscheidend beeinflussen können.

6.6 Vergleich mit der Literatur

Zur Einordnung der Ergebnisse dieses Kapitels werden die Resultate mit Literaturwerten verglichen. Da in der Literatur vor allem Werte für Pkw und Sattelzugmaschinen vorliegen

und diese die beiden wichtigsten Verkehrsmittel darstellen, beschränkt sich der Vergleich auf diese beiden Fahrzeugklassen. Die Literaturwerte entsprechen entweder Herstellungskosten oder Kaufpreisen. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse in Relation zu den in der jeweiligen Publikation angegebenen Herstellungskosten bzw. Kaufpreisen eines Verbrennungsmotorfahrzeugs im Jahr 2020 skaliert. Somit werden die verschiedenen Arten der Literaturwerte vergleichbar. Im Folgenden ist stets von Herstellungskosten die Rede, auch wenn die Literaturwerte teils Kaufpreisen entsprechen.

6.6.1 Personenkraftwagen

Die beiden Diagramme in Abbildung 6.32 zeigen die in dieser Arbeit berechneten Herstellungskosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischen Pkw im Vergleich zur Literatur.

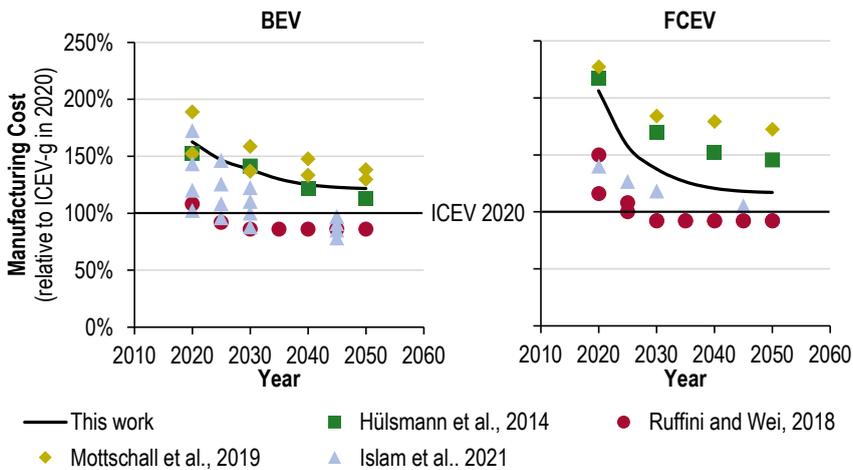


Abbildung 6.32. Vergleich der Herstellungskosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischen Pkw von 2020 bis 2050 im Verhältnis zu denen eines konventionellen Fahrzeugs (ICEV) im Jahr 2020 in dieser Arbeit sowie der Literatur [158], [171], [174], [241]. ICEV-g: Verbrennungsmotorfahrzeug (Benzin), BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

In beiden Fällen liegen die Ergebnisse innerhalb der Literatur und stellen somit keine Ausreißer dar. Bei Batterie-Elektrofahrzeugen sind von Mottschall et al. [241] und Islam et al. [174] mehrere Werte für ein Jahr angegeben. Diese beziehen sich auf Batterie-Elektrofahrzeuge mit unterschiedlichen Reichweiten. Mottschall et al. [241] geben Werte für Batterie-Elektrofahrzeuge mit 150 bzw. 300 km Reichweite an. Die Kosten nach Islam et al. [174] entsprechen Reichweiten von 200 bis 500 Meilen. Dass die Kosten der Batterie-Elektrofahrzeuge nach Mottschall et al. [241] trotz der niedrigen Reichweiten am oberen Ende der Literatur liegen, deutet auf die hohen angenommenen spezifischen Kosten der Batterien hin. Ähnliches gilt für Hülsmann et al. [171]. Die in dieser Arbeit berechneten Kosten liegen zunächst auf vergleichbarem Niveau zu denen nach Islam et al. [174] mit der höchsten Reichweite. Da die Reichweite im Gegensatz zum Vorgehen von Islam et al. jedoch nicht konstant über der Zeit angenommen wird, fällt die Kostenreduktion in dieser Arbeit verglichen mit Islam et al. [174] gering aus. Nach Ruffini und Wei [158] sowie Islam et al. [174] sinken die Kosten der Batterie-Elektrofahrzeuge in Zukunft unter die des Verbrennungsmotorfahrzeugs. Im Rahmen dieser Arbeit werden wie von Hülsmann et al. [171]

und Mottschall et al. [241] weiterhin höhere Herstellungskosten für Batterie-Elektrofahrzeuge erwartet.

Im rechten Diagramm der Abbildung 6.32 ist zu erkennen, dass Ruffini und Wei [158] auch bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ab 2030 günstigere Herstellungskosten als die der Verbrennungsmotorfahrzeuge erwarten. In den Jahren 2020 und 2025 geben Ruffini und Wei [158] zwei verschiedene Szenariowerte an. Beide liegen am unteren Ende der Literatur. Auf einem vergleichbaren Niveau befinden sich die Kosten der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge nach Islam et al. [174]. Die in dieser Arbeit berechneten Kosten sind zunächst in etwa so hoch wie die nach Mottschall et al. [241] und Hülsmann et al. [171] ausgewiesenen. Anschließend wird in dieser Arbeit eine stärkere Kostendegression von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen berechnet, sodass sich die Kosten denen nach Islam et al. [174] und Ruffini und Wei [158] annähern.

Ein Vergleich der beiden Diagramme lässt Rückschlüsse auf das Verhältnis zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen zu. Die Kosten nach Ruffini und Wei [158] sowie Islam et al. [174] liegen für beide Antriebsvarianten auf einem ähnlichen Niveau. Demgegenüber beträgt die Kostendifferenz zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen nach Mottschall et al. [241] und Hülsmann et al. [171] mindestens 30 % zugunsten von Batterie-Elektrofahrzeugen. In dieser Arbeit beträgt der Kostenaufschlag von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 ebenfalls mehr als 30 % gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen. Aufgrund der stärkeren Kostendegression nähern sich die Kosten jedoch bis 2030 an.

6.6.2 Sattelzugmaschinen

Für Sattelzugmaschinen zeigt Abbildung 6.33, dass die in dieser Arbeit berechneten Herstellungskosten von Oberleitungs-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ebenfalls in der Zukunft konvergieren. Zudem weist das linke Diagramm auf die hohe Übereinstimmung der Kosten von Oberleitungs-Elektrofahrzeugen mit der Literatur hin. Gegenüber dem Batterie-Elektrofahrzeug entstehen hier geringere Mehrkosten in allen betrachteten Literaturdaten im Vergleich zum Verbrennungsmotorfahrzeug, da kleinere Batterien genutzt werden können. Die in dieser Arbeit berechneten Kosten von Batterie-Elektrofahrzeugen sind insbesondere ab dem Jahr 2030 am unteren Ende der verglichenen Literatur. Die berechneten Kosten der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge sind über den gesamten Betrachtungszeitraum niedriger als die Literaturdaten.

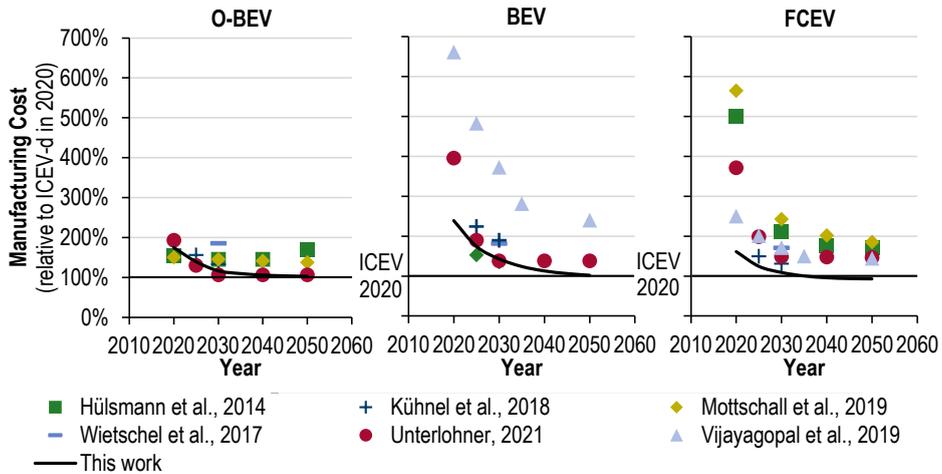


Abbildung 6.33. Vergleich der Herstellungskosten von (oberleitungs-)batterie- und brennstoffzellenelektrischen Sattelzugmaschinen von 2020 bis 2050 im Verhältnis zu denen eines konventionellen Fahrzeugs im Jahr 2020 in dieser Arbeit sowie der Literatur [67], [170], [171], [175], [176], [241]. ICEV-d: Verbrennungsmotorfahrzeug (Diesel), (O-)BEV: (Oberleitungsgebundenes) Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Die höheren Kosten nach Vijayagopal et al. [175] für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge resultieren aus den abweichenden Anforderungen an die Fahrzeuge in den USA gegenüber dem europäischen Markt. Zum einen ist die Antriebsleistung mit über 500 kW deutlich höher. Zum anderen sind die Kapazitäten der Batterie mit über 800 kWh und des Wasserstofftanks mit über 100 kg_{H₂} im Jahr 2050 über den in dieser Arbeit ermittelten Dimensionen. Ein Absenken der erforderlichen Antriebsleistung und der Speicherkapazität würde insbesondere die Kosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen nach Vijayagopal et al. [175] deutlich an die Kosten dieser Arbeit annähern.

Zwischenfazit des Vergleichs mit der Literatur

Alles in allem sind die im Rahmen dieser Arbeit berechneten Herstellungskosten von Pkw und Sattelzugmaschinen auf einem vergleichbaren Niveau mit der Literatur. Dennoch bewirkt der im Vergleich zur Literatur höhere Detaillierungsgrad des Modells ebenfalls Unterschiede. Verglichen mit den in der deutschen Literatur exogenen Annahmen wird auf Basis des Lernkurvenansatzes eine stärkere Kostendegression der Brennstoffzellen berechnet. Insbesondere hinsichtlich der Kosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ist sowohl bei Pkw als auch bei Sattelzugmaschinen bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen eine Diskrepanz zwischen der deutschen und der internationalen Literatur zu erkennen. In dieser Arbeit wird eine vergleichbar zur internationalen Literatur positive Entwicklung der Kosten der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge berechnet.

6.7 Fazit der Fahrzeuganalysen

Die durchgeführten techno-ökonomischen Analysen zeigen die Entwicklungen der Fahrzeugkosten im Zusammenhang mit der Elektrifizierung auf und setzen diese ins Verhältnis zum konventionellen Antrieb. Die analysierten Gesamtbetriebskosten der Verkehrsmittel bestehen aus den Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Die Ergebnisse

verdeutlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten der betrachteten Anwendungsfälle. Darüber hinaus werden die Auswirkungen einzelner Faktoren mittels zusätzlicher Analysen beleuchtet. Insgesamt liefern die Untersuchungen die folgenden wesentlichen Erkenntnisse:

1. Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge werden günstiger als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Die techno-ökonomischen Analysen unterstreichen, dass sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in allen betrachteten Anwendungen günstiger als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb werden. Diese Entwicklung resultiert zum einen aus der Kostendegression der Hauptkomponenten, Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank, der beiden elektrifizierten Antriebsoptionen. Zum anderen steigen die Gesamtbetriebskosten von Verbrennungsmotorfahrzeugen durch höhere Kraftstoffkosten aufgrund des angenommenen zunehmenden Anteils synthetischen Kraftstoffs zur Reduktion der betriebsbedingten Treibhausgasemissionen. Im Fall eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw liegen die Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Jahr 2045 sogar um mehr als 15% unter denen eines heutigen Pkw mit konventionellem Antriebsstrang.

Der in Abbildung 6.34 dargestellte Zeitstrahl zeigt den Zeitpunkt der Gesamtbetriebskostenparität von Batterie- bzw. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen mit Verbrennungsmotorfahrzeugen.

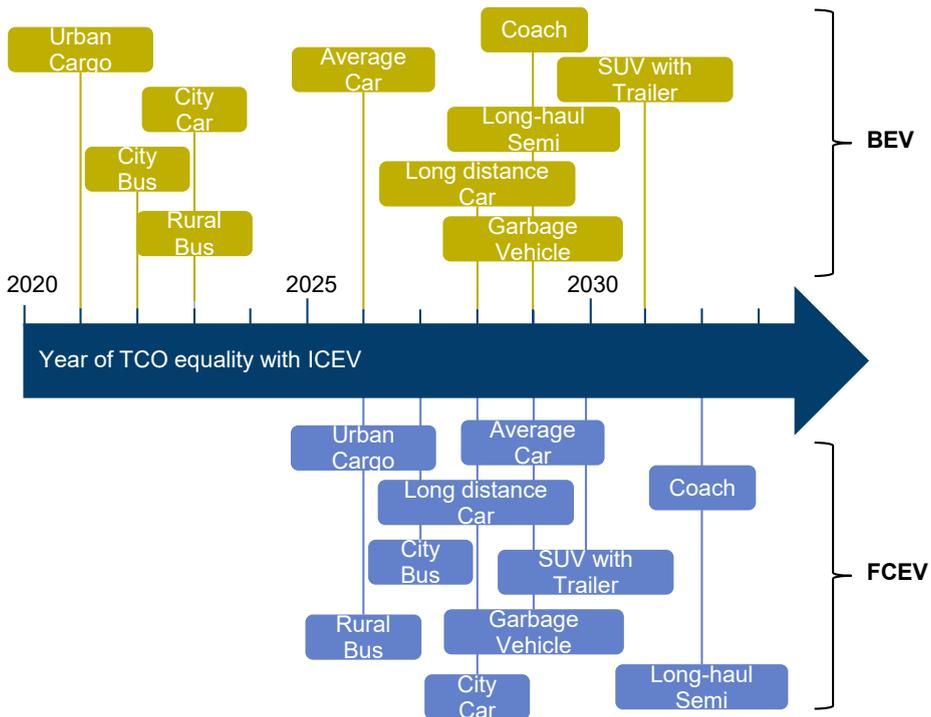


Abbildung 6.34. Zeitpunkt der Gesamtbetriebskostenparität (TCO) von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) mit Verbrennungsmotorfahrzeugen (ICEV) in den betrachteten Fahrzeuganwendungen.

Bis 2032 tritt diese Parität in allen betrachteten Fällen auf, wobei sie in einigen Fällen bereits deutlich früher vorliegt. Insbesondere bei urbanen Anwendungen wird die Kostenparität von batterieelektrischen und Verbrennungsmotorfahrzeugen zwischen 2021 und 2023 erzielt. Dies ist unabhängig davon, ob es sich um eine Personen- oder Güterverkehrsanwendung handelt, und unterstreicht die vorteilhaften Rahmenbedingungen solcher urbanen Einsatzfälle mit niedrigen täglichen Fahrleistungen für Batterie-Elektrofahrzeuge. Die Kostenparität zwischen batterieelektrischen und Verbrennungsmotorfahrzeugen aller weiteren betrachteten Anwendungen tritt im Zeitraum zwischen 2026 und 2031 auf.

Im Gegensatz zu Batterie-Elektrofahrzeugen ist die Streuung der Kostenparität von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen und Verbrennungsmotorfahrzeugen geringer. Dies unterstreicht die geringere Abhängigkeit der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge von den Rahmenbedingungen der Anwendung. Zudem verdeutlicht die Grafik, dass die Kostenparität der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge verzögert gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen ab 2026 auftritt, was in den unterschiedlichen Marktstadien der beiden Antriebsarten begründet ist. Dennoch ist bis 2032 – bei unterstellter Weltmarktentwicklung – auch für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge die Konkurrenzfähigkeit hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten in allen betrachteten Anwendungen gegeben.

2. Differenz der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen wird in allen betrachteten Anwendungen über der Zeit geringer.

Der berechnete zukünftige Kostenvorteil der Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge gegenüber den konventionellen Fahrzeugen verdeutlicht den Nutzen der Elektrifizierung. Weiterhin besteht die Frage nach dem Kostenverhältnis der beiden genannten Elektrifizierungsoptionen. Der Vergleich der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen für die untersuchten Anwendungsfälle zeigt, dass die Kostendifferenz in allen betrachteten Anwendungen über der Zeit geringer ausfällt (vgl. Abbildung 6.14). Grundlegend ist zu erkennen, dass Batterie-Elektrofahrzeuge vor allem im urbanen Bereich Vorteile aufweisen. In Bezug auf die Verkehrsmittel ist die Abhängigkeit der Kostendifferenz von der betrachteten Anwendung bei Bussen am geringsten ausgeprägt.

3. Energiebedarf, Reichweite und Fahrleistung sind Hauptfaktoren zur Entscheidung für die Batterie oder Brennstoffzelle.

Die Kostendifferenz zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen wird wesentlich durch die Anforderungen hinsichtlich Reichweite und Fahrleistung sowie dem Energiebedarf der Fahrzeuge beeinflusst. Höhere Energiebedarfe und Reichweiten steigern die notwendigen Speicherkapazitäten. Da Batterien um ein Vielfaches höhere spezifische Kosten als Wasserstofftanks aufweisen, steigen die Herstellungskosten von Batterie-Elektrofahrzeugen deutlich stärker als die der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge an, wenn höhere Speicherkapazitäten erforderlich werden. Aus diesem Grund weisen Anwendungen wie ein SUV mit Anhängerbetrieb oder das Abfallsammelfahrzeug günstigere Kosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Batterie-Elektrofahrzeugen auf. Der dritte bedeutsame Faktor, die Fahrleistung, führt im Fall von Fernlastsattelzugmaschinen dazu, dass für Batterie-Elektrofahrzeuge ein Kostenvorteil in Höhe von 5 bis 10 % über dem gesamten Betrachtungszeitraum besteht. Dennoch ist zu erkennen, dass auch in diesem Fall die Kostendifferenz über der Zeit geringer wird.

4. Kraftstoffkosten mit großem Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten im Fernverkehr.

Die hohe Jahresfahrleistung von Sattelzugmaschinen verschiebt die Kostenanteile. Insbesondere der Anteil der Herstellungskosten nimmt unabhängig von der Antriebsart mit steigenden Fahrleistungen stark ab. Der Anteil der Wartungs- und vor allem der Einfluss der Kraftstoffkosten nimmt im Gegenzug deutlich zu. Somit wiegt der Nachteil von Batterie-Elektrofahrzeugen hinsichtlich der Herstellungskosten, welcher aufgrund der hohen erforderlichen Speicherkapazität auftritt, bei hohen Fahrleistungen weniger stark. Zudem können BEV bei hohen Fahrleistungen ihren Vorteil hinsichtlich der Antriebseffizienz verstärkt nutzen.

Das Verhältnis der Kraftstoffkosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ist stark von den Kraftstoffkosten an der Ladesäule bzw. an der Tankstelle abhängig. Mögliche Veränderungen der Kraftstoffkosten können durch geringere Produktions- oder Infrastrukturkosten entstehen. Letztere sind bei Batterie-Elektrofahrzeugen unter anderem vom Verhältnis der Schnell- und Langsamladeinfrastruktur abhängig. Analysen in Sektion 6.5.7 verdeutlichen, dass veränderte Kraftstoffkosten insbesondere bei Sattelzugmaschinen aufgrund des hohen Energiebedarfes und der hohen Fahrleistungen das Verhältnis der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen maßgeblich beeinflussen.

5. Elektrifizierung verringert energetische Vorteile des öffentlichen Verkehrs. Auslastung als entscheidender Faktor des modalen Vergleichs.

Neben dem techno-ökonomischen Vergleich der verschiedenen Antriebsoptionen innerhalb einer Anwendung liefert der intermodale Vergleich in Abschnitt 6.4 ebenfalls Erkenntnisse, welche zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in Politik und anderen Bereichen der Verkehrsplanung dienen. Die hohe Abhängigkeit des verkehrsleistungsspezifischen Energiebedarfs und der Gesamtbetriebskosten von der Auslastung der Verkehrsmittel verdeutlicht die Notwendigkeit diesen Parameter bei jeglichen Vergleichen der unterschiedlichen Verkehrsmittel zu beachten. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die vielfach diskutierte Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene bzw. vom Pkw zum öffentlichen Personenverkehr. Der Ausbau des öffentlichen Verkehrs zur Erhöhung des Angebots und zur Steigerung der Attraktivität sollte nicht zuungunsten der Auslastung erfolgen, da der spezifische Energiebedarf sowie die Kosten insbesondere bei niedrigen Auslastungen unter 15 % stark ansteigen. Zudem führt eine gesteigerte durchschnittliche Auslastung von Pkw durch Ridesharing zu einem geringeren energetischen Nachteil von Pkw gegenüber dem öffentlichen Verkehr. Nicht nur eine Erhöhung der Auslastung verringert den energetischen Nachteil der Pkw im Vergleich zum öffentlichen Personenverkehr. Ebenso führt die Elektrifizierung der Fahrzeuge zu geringeren Unterschieden hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs der Fahrzeuge.

Alles in allem verdeutlichen die Ergebnisse der in diesem Kapitel durchgeführten Analysen, dass sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge aus techno-ökonomischer Sicht kompetitive Optionen zukünftiger Fahrzeugantriebe darstellen. Hinzu kommt, dass neben den Kosten weitere Eigenschaften der Fahrzeuge die Kaufentscheidung beeinflussen können. Somit sind geringe Kostenunterschiede, wie sie zumeist in den vorliegenden Analysen auftreten, kein Ausschlusskriterium einer der beiden Antriebstechnologien.

7 Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors

Die techno-ökonomischen Analysen in diesem Kapitel zielen auf den Verkehrssektor insgesamt ab. Dies umfasst alle für das Gesamtsystem relevanten Verkehrsmittel und somit nicht nur einzelne Fahrzeuge wie im vorigen Kapitel. Der methodische Aufbau des Optimierungsmodells *FINE.Transport*, welches für diese Untersuchungen genutzt wird, ist in Abschnitt 4.2 beschrieben. Im Gegensatz zu den Analysen auf Fahrzeugebene werden gesamte Fahrzeugflotten und deren Transformation im Zeitverlauf betrachtet. Zudem wird innerhalb der Optimierung die Energiebedarfsentwicklung und deren Wechselwirkung mit dem restlichen Energiesystem berücksichtigt. Somit stellen die dargelegten Ergebnisse ein für das jeweilige Betrachtungsjahr kostenoptimiertes Gesamtsystem dar. Diesem liegen die getroffenen Szenarioannahmen sowie Randbedingungen des Markthochlaufs zu Grunde.

Zunächst werden die Resultate des Basisszenarios *StatusQuo-Reference* (vgl. Abschnitt 5.2) detailliert vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der weiteren betrachteten Szenarien miteinander verglichen und dabei Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede herausgestellt. In einem weiteren Abschnitt werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss einzelner Faktoren zu beleuchten. Das Kapitel wird durch eine Einordnung der Erkenntnisse in die Literatur abgerundet.

7.1 Basisszenario *StatusQuo-Reference*

Die Analyse der Ergebnisse des Verkehrssektors erfolgt hinsichtlich der modellseitig abgebildeten Elemente des Verkehrs- und Energiesektors. Dies umfasst vor allem die Verkehrsmittel, bestehend aus den Neuzulassungen sowie der Entwicklung des Verkehrsmittelbestands. Zudem wird die Endenergienachfrage des Verkehrssektors nach den verschiedenen optionalen Kraftstoffen analysiert. Des Weiteren wird der Bedarf an Lade- und Tankstelleninfrastruktur zur Versorgung des Verkehrssektors mit den alternativen Energieträgern bestimmt. Darüber hinaus wird die Produktion der Kraftstoffe sowie der Primärenergiebedarf des gesamten Energiesystems untersucht. Die Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel und die Systemkosten vervollständigen die Analysen des Szenarios. Das Basisszenario *StatusQuo-Ref* umfasst die Basisannahmen der sozio- und der techno-ökonomischen Entwicklung des Verkehrssektors, wie in Abschnitt 5.2 erläutert.

7.1.1 Verkehrsmittel

Innerhalb des Modells werden verschiedene Verkehrsmittel berücksichtigt, wie in Sektion 4.2.3 beschrieben. Diese Sektion beinhaltet die Analyse der endogen berechneten Entwicklung der Anteile der betrachteten Antriebsarten für Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und nationale Luftverkehrsmittel. Insbesondere im Straßenverkehr wird die Analyse nach unterschiedlichen Fahrzeugklassen differenziert durchgeführt.

Pkw

Als erstes wird die Entwicklung der Neuzulassungen und der Bestandsflotte von Pkw im Zeitraum von 2020 bis 2045 untersucht. Dazu sind in Abbildung 7.1 die Antriebsanteile an den beiden genannten Größen veranschaulicht. Die im sozio-ökonomischen Szenario *StatusQuo* angenommene Entwicklung der Verkehrsnachfrage führt zu der im rechten Diagramm der Abbildung aufgezeigten Pkw-Bestandsentwicklung. Im Jahr 2020 umfasst der

modellseitig inkludierte Pkw-Bestand 45,9 Millionen Fahrzeuge. Die Abweichung gegenüber den vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) ausgewiesenen 47,7 Millionen Fahrzeugen am 01.01.2020 resultiert aus den modellseitig vernachlässigten Kraftfahrtbundesamt-Fahrzeugsegmenten der *Wohnmobile* und *Sonstige*. Der betrachtete Fahrzeugbestand wächst aufgrund der steigenden Verkehrsnachfrage bis zum Jahr 2029 auf 48 Millionen Fahrzeuge an. Anschließend führt die verringerte Verkehrsnachfrage, welche unter anderem aus dem angenommenen modalen Shift resultiert, zu einer stetigen Reduktion des Pkw-Bestands auf 45,6 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2045.

Die endogen aus Verkehrsnachfrage und Verschrottung berechnete Entwicklung der Neuzulassungen von Pkw sinkt kontinuierlich von 3,7 Millionen Neufahrzeugen im Jahr 2020 auf 3,2 Millionen neu zugelassene Pkw im Jahr 2045. Dabei ist anzumerken, dass die Coronapandemie sowie der Chipmangel zur Folge hatten, dass die historischen Neuzulassungen in den Jahren 2020 und 2021 jeweils unter 3 Millionen Pkw gesunken sind [41]. Da diese außerordentlichen Effekte modellseitig nicht berücksichtigt werden, sind die berechneten Neuzulassungen in den beiden Jahren auf einem Niveau mit dem historischen Wert aus dem vorherigen Jahr 2019. In diesem wurden 3,6 Millionen Pkw in Deutschland neu zugelassen [41], was vergleichbar zu den berechneten 3,7 Millionen Fahrzeugen ist.

Die neu zugelassenen Pkw im Jahr 2020 sind, wie in Abbildung 7.1 im linken Diagramm zu erkennen, vor allem mit konventioneller Verbrennungsmotorentechnologie ausgestattet. Fast die Hälfte der Neufahrzeuge ist mit einem konventionellen Benzinaggregat versehen. Hinzu kommen 28 % mit Dieselmotor. Das restliche Viertel entfällt zu 11 % auf Hybrid-Elektrofahrzeuge und zu jeweils 7 % auf Plug-In Hybrid- und Batterie-Elektrofahrzeuge. Der Zeitraum von 2020 bis 2025 ist von einem starken Rückgang des Anteils von Verbrennungsmotorfahrzeugen geprägt. Deren Anteil an den neu zugelassenen Pkw sinkt von 75 % auf unter 10 %. Ebenso fällt in diesen fünf Jahren der Anteil der Hybrid-Elektrofahrzeuge von 13 % auf 5 % ab, nachdem er zunächst auf 17 % im Jahr 2021 angewachsen ist. Im Gegenzug steigt der Anteil der Plug-In Hybrid- und Batterie-Elektrofahrzeuge stark an. So werden im Jahr 2024 zum ersten Mal mehr als 1 Million neue Batterie-Elektrofahrzeuge zugelassen, was einem Marktanteil von fast 30 % entspricht. Der Anteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen liegt im gleichen Jahr mit 43 % noch höher. Ab dem Jahr 2022 wächst ebenfalls der Neuzulassungsanteil von Brennstoffzellen- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen, deren Anteil im Jahr 2025 7 % und 4 % beträgt. Dieser starke Wandel der Neuzulassungsanteile in den ersten Jahren des Betrachtungszeitraums resultiert aus der Notwendigkeit die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors gemäß den vorgegebenen Klimaschutzziele zu reduzieren. Da in diesem Zeitraum keine Reduktion der Verkehrsnachfrage erwartet, sondern sogar ein weiterer Anstieg angenommen wird, ist eine Treibhausgasreduktion lediglich mittels technischer Entwicklungen möglich. Aus diesem Grund erhöht sich der Anteil sämtlicher elektrifizierter Antriebsarten mit Ausnahme von Hybrid-Elektrofahrzeugen zwischen 2020 und 2025.

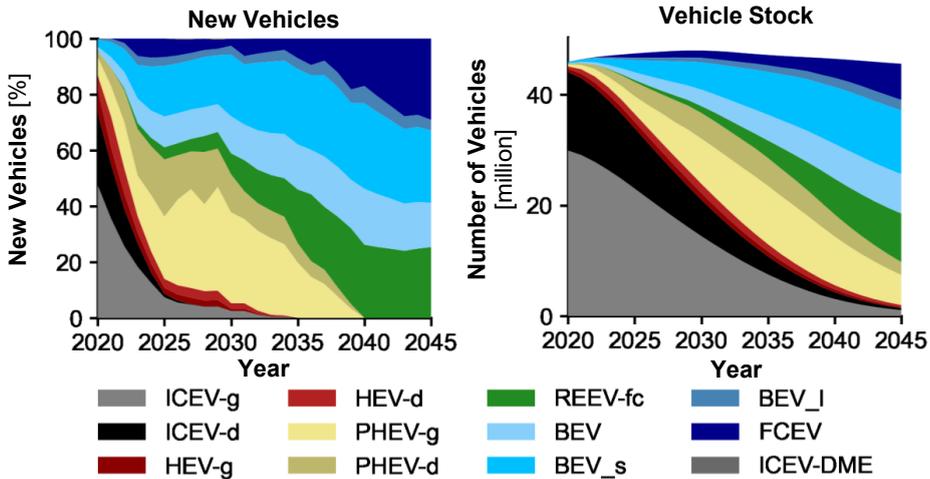


Abbildung 7.1: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Pkw (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

In den darauffolgenden Jahren bis 2030 erfolgt das nahezu vollständige Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeugen. In diesem Zeitraum steigt der Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen um 7 % auf 39 %. Der Anteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen erreicht im Jahr 2029 mit mehr als 51 % seinen Zenit. Während sich der Anteil von Range-Extender-Elektrofahrzeugen von 4 % im Jahr 2025 auf 8 % im Jahr 2030 verdoppelt, schrumpft der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im gleichen Zeitraum um 5 %. Dies resultiert aus den höheren Gesamtbetriebskosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen gegenüber den anderen elektrifizierten Antriebsalternativen in diesem Zeitraum. Zudem bietet der zunehmende Einsatz synthetischer Kraftstoffe ab 2024 die Möglichkeit die Treibhausgasemissionen nicht nur mittels eines Antriebswechsels zu reduzieren. Dies ist der Grund für den zwischenzeitlichen Rückgang des Anteils der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge und den Anstieg der Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge. Zudem nimmt zu dieser Zeit die Elektrifizierung weiterer Straßenverkehrsmittel zu, sodass der Druck zur Defossilisierung in der Pkw-Klasse abnimmt. In den 2030er Jahren fällt der Anteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen kontinuierlich bis diese im Jahr 2040 nicht mehr neu zugelassen werden. Der Wechsel von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen hin zu den vollelektrischen Antriebsformen (REEV-fc, BEV und FCEV) erfolgt im Optimierungsmodell aufgrund des zunehmenden Kostennachteils. Die Analysen in Abschnitt 6.1 haben gezeigt, dass Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge zunächst günstiger als vollelektrische Antriebe sind. Somit stellen sie bis 2030 eine kostengünstige Option zur Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber konventionellen Antriebsarten dar. Anschließend führen die Kostenentwicklungen hinsichtlich Herstellung, Wartung und Kraftstoff zu einem Nachteil von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen. Folglich sind vollelektrische Fahrzeuge in den 2030er Jahren eine kostengünstigere Option zur weiteren Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors. Dieser Anstieg des Marktanteils, gefolgt von einem sinkenden Anteil bis zum vollständigen Ausphasen kennzeichnet Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge als Brückentechnologie im Pkw-

Bereich. Die abfallenden Marktanteile von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen von 2030 bis 2040 werden durch die drei vollelektrischen Antriebsvarianten übernommen. Das Wachstum der Antriebsanteile fällt bei allen drei vollelektrischen Antriebsoptionen nahezu identisch aus (+15 bis +18 %). Ab 2040 führt die positive techno-ökonomische Entwicklung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen und der Wasserstoffproduktion im Energiesektor dazu, dass der Anteil von Batterie- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen bis 2045 um 11 % bzw. 1 % sinkt und sich der Anteil der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge auf fast 30 % der Pkw-Neuzulassungen erhöht.

Innerhalb der Batterie-Elektrofahrzeuge wird modellseitig in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung zwischen drei Batterieoptionen differenziert. Die Optimierungsergebnisse weisen mit einem Anteil zwischen 50 % und 60 % an den gesamten Batterie-Elektrofahrzeugen eine bevorzugte Nutzung der kleinen Batterievariante auf. Stets etwas mehr als ein Drittel entfällt auf die mittlere Option. Nur etwa jedes zehnte Batteriefahrzeug ist mit der größten Batterievariante ausgestattet.

Aus der beschriebenen Entwicklung der Neuzulassungen und der an den historischen Daten orientierten Verschrottung des Altfahrzeugbestands ergibt sich die im rechten Diagramm der Abbildung 7.1 veranschaulichte Zusammensetzung des Pkw-Bestands nach Antriebsart. Ein Vergleich der beiden Diagramme in Abbildung 7.1 zeigt die zeitlich verzögerte Entwicklung des Fahrzeugbestands gegenüber den Neuzulassungen auf. Diese Verzögerung resultiert aus der Lebensdauer von Pkw, welche in Deutschland durchschnittlich 14 Jahre beträgt. Trotz der starken Reduktion des Neuzulassungsanteils von Verbrennungsmotorfahrzeugen bis zum Jahr 2025 auf unter 10 % ist bis zum Jahr 2029 mehr als jeder zweite Pkw im Fahrzeugbestand mit einem solchen konventionellen Antrieb ausgestattet. Erst 2040 schrumpft deren Anteil an der gesamten Flotte auf unter 10 %. Vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis zum Jahr 2045 ist der Einsatz treibhausgasneutraler Flüssigkraftstoffe somit im Pkw-Bereich unabdingbar. Es sei denn, es werden weitere Maßnahmen zur vollständigen Verschrottung des Pkw-Bestands mit Verbrennungsmotor vor 2045 ergriffen.

Der Einsatz von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen als Brückentechnologie wird auch im Pkw-Bestand ersichtlich. Bis Mitte der 2030er Jahre steigt deren Anteil auf ein Drittel, bevor er anschließend bis zum Jahr 2045 auf 17 % fällt. Innerhalb der Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge ist eine verstärkte Nutzung von Ottomotoren zu erkennen, da Dieselmotoren zu erhöhten Herstellungs- und Wartungskosten gegenüber Ottomotoren führen. Daher ist deren Einsatz trotz des höheren Wirkungsgrades und der geringeren Treibhausgasemissionen nur in wenigen Fällen kostenoptimal. Der Anteil aller vollelektrischen Antriebsoptionen steigt über den Betrachtungszeitraum stetig an. Aufgrund der stark wachsenden Neuzulassungen von Batterie-Elektrofahrzeugen ab 2020 wächst deren Bestand bereits früher in erhöhtem Ausmaß als der Bestand der Fahrzeuge mit Brennstoffzelle. Bereits 2026 sind mehr als 5 Millionen Batterie-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bestand. Dennoch wird der von der Bundesregierung ausgegebene Zielwert von 15 Millionen vollelektrischen Pkw im Jahr 2030 nicht erreicht, da aus Kostengründen ebenfalls Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge zur Reduktion der Treibhausgasemissionen genutzt werden, wie zuvor bereits beschreiben. Im Jahr 2030 weisen die Szenarioergebnisse lediglich einen batterieelektrischen Pkw-Bestand in Höhe von 8,7 Millionen Fahrzeugen aus. Hinzu kommen allerdings 12,8 Millionen Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge sowie jeweils 1,2 Millionen Range-Extender- und

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Insgesamt sind folglich 23,9 Millionen Pkw im Jahr 2030 entweder Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge oder vollelektrisch. Dies unterstreicht die hohe Bedeutung von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen als Übergangstechnologie.

Der aus techno-ökonomischen Gründen verspätete Markteintritt von Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen führt dazu, dass erst 2038 bzw. 2043 mehr als 5 Millionen Fahrzeuge mit diesem Antrieb im Pkw-Bestand sind. Diese Bestandsgröße wird erst über 12 Jahre später als bei Batterie-Elektrofahrzeugen erreicht. Trotz des wachsenden Anteils von Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ab 2030 an den Neuzulassungen erreichen sie bis 2045 ein niedrigeres Bestandsniveau als BEV. Zu diesem Zeitpunkt sind 8,8 bzw. 6,5 Millionen Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bestand. Somit ist deren Bestand zusammen kleiner als der Bestand der Batterie-Elektrofahrzeuge, welcher mehr als 20,5 Millionen Fahrzeuge ausweist. Insgesamt sind fast 80 % des Pkw-Bestands im Jahr 2045 vollelektrisch.

Die zuvor analysierten Entwicklungen der Pkw-Neuzulassungen und des Bestands ergeben sich aus den Entwicklungen der vier, modellseitig definierten Pkw-Segmente. Deren Entwicklung ist sowohl von Unterschieden als auch Gemeinsamkeiten geprägt, wie in Abbildung 7.2 zu erkennen. Die Verläufe der Fahrzeugbestände zeigen den fortgeführten Wandel des Fahrzeugbestands insbesondere vom mittleren hin zum SUV-Segment auf. So steigt der Bestand von SUV von 6,4 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2020 auf 15,5 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2045 an. Ab dem Jahr 2036 lösen SUV das mittlere als volumenstärkstes Pkw-Segment hinsichtlich des Gesamtbestands ab.

Diese Entwicklung resultiert aus den höheren Neuzulassungen in diesem Segment ab dem Jahr 2021. Aufgrund des Segmentwechsels hin zu SUV und dem ab 2029 schrumpfenden Gesamtfahrzeugbestand sinkt ebenso der Bestand im kleineren und großen Pkw-Segment. Dennoch ist bei diesen beiden der Segmentwechsel im Vergleich zum mittleren Segment geringer ausgeprägt, weshalb die Bestandsreduktion kleiner ausfällt.

Ebenso wie die Entwicklung des Gesamtbestands sind auch die Anteile der Antriebsarten abhängig vom betrachteten Pkw-Segment. Bei kleineren Pkw werden neben dem konventionellen Antrieb und der geringen Elektrifizierungsvariante der Hybrid-Elektrofahrzeuge weiterhin nur Batterie-Elektrofahrzeuge in den Analysen einbezogen, da sowohl alle weiteren Hybridisierungsstufen, als auch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge aus Bauraumgründen zurzeit als nicht praktikabel erscheinen. Aus diesem Grund vollzieht sich in diesem Segment ein vollständiger Wechsel von den Verbrennungsmotorfahrzeugen hin zu batterieelektrischen Pkw. Infolge der geringen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge ist hierbei vor allem die kleine Batterievariante mit über 60 % Marktanteil bei den Neuzulassungen ab 2035 relevant. Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugsegmenten wird deutlich, dass das Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeugen über einen längeren Zeitraum erfolgt. Zudem erreichen Hybrid-Elektrofahrzeuge insbesondere bis 2025 einen höheren Anteil an den Neuzulassungen. Diese Entwicklung hat mehrere Gründe. Zum einen unterliegt der Markthochlauf von Batterie-Elektrofahrzeugen markttechnischen Grenzen. Zum anderen haben die techno-ökonomischen Analysen von Pkw in Abschnitt 6.1 gezeigt, dass geringere Fahrleistungen den techno-ökonomischen Vorteil von Batterie-Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen schmälern, da der Vorteil maßgeblich von den Wartungs- und Kraftstoffkosten getrieben ist.

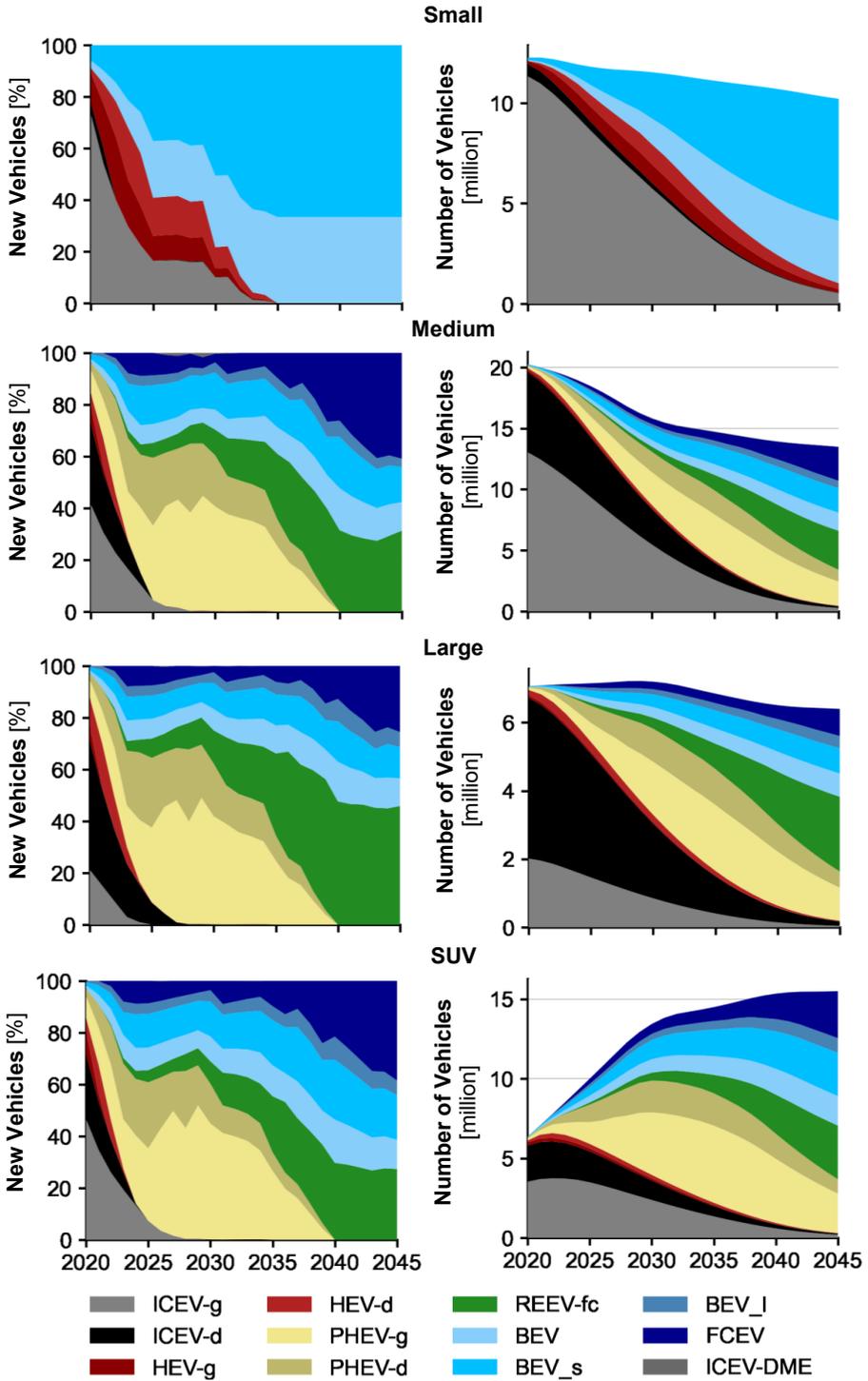


Abbildung 7.2: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung (rechts) der vier betrachteten Pkw-Segmente von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l_: kleine/große Batteriekapazität.

Die drei weiteren Fahrzeugsegmente weisen eine höhere Ähnlichkeit hinsichtlich der Antriebszusammensetzung der Neuzulassungen auf. Hier gelten insgesamt die zuvor anhand des gesamten Fahrzeugbestands erläuterten Mechanismen, weshalb im Folgenden lediglich auf die Unterschiede in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments eingegangen wird. So ist zunächst zu erkennen, dass die historische Zusammensetzung der Neuzulassungen und des Fahrzeugbestands vor allem im Hinblick auf die Anteile der Benzin- und Dieselfahrzeuge differenziert ist. Der Dieselanteil ist im großen Segment mit 50 % der Neuzulassungen und 66 % des Fahrzeugbestands am höchsten. Im kleinen Segment ist hingegen der Benzinmotor mit 73 % bzw. 92 % dominant. Das Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeug-Neuzulassungen ist in den Segmenten *Medium*, *Large* und *SUV* bis spätestens 2027 und somit deutlich schneller als im kleinen Segment abgeschlossen. Ebenso nehmen Hybrid-Elektrofahrzeuge nur eine sehr untergeordnete Rolle ein und werden aufgrund des niedrigeren Niveaus in 2020 noch schneller nicht mehr neu zugelassen. Dies unterstreicht den Vorteil der stärker elektrifizierten Antriebsoptionen in diesen Pkw-Segmenten.

Trotz der insgesamt vergleichbaren Entwicklung der vollelektrifizierten Antriebsarten weist deren Anteil eine signifikante Abhängigkeit vom Fahrzeugsegment auf. Diese resultieren aus den unterschiedlichen Anforderungen an die elektrische Reichweite von Batterie-Elektrofahrzeugen und dem Energiebedarf der Fahrzeuge. Der batterieelektrische Anteil ist im SUV-Segment am höchsten, da diese Pkw einen vergleichsweise hohen Energiebedarf haben und gleichzeitig die angenommenen Reichweitenanforderungen auf einem Niveau mit denen des mittleren Segments sind. Der Anteil der Range-Extender-Elektrofahrzeuge ist im Pkw-Segment *Large* am höchsten, da diese einen höheren Energiebedarf als das Segment *Medium* und die höchsten Reichweitenanforderungen an Batterie-Elektrofahrzeuge aufweisen. Range-Extender-Elektrofahrzeuge bieten den Vorteil einer hohen Antriebsstrangeffizienz gepaart mit einer begrenzten Batteriekapazität, welches am besten zu den Anforderungen in diesem Segment passt. Bei mittleren Pkw (*Medium*) ist im Vergleich zu den anderen Segmenten der Energiebedarf der Fahrzeuge geringer, sodass in diesem Fall der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen höher ausfällt.

Die Antriebszusammensetzung des Fahrzeugbestands weist für SUV den geringsten Anteil von konventionellen Fahrzeugen auf. Dies folgt aus dem Verhältnis zwischen Neuzulassungszahlen und dem Fahrzeugbestand. Bei SUV haben die zukünftigen Neuzulassungen einen höheren Anteil am wachsenden Gesamtbestand, weshalb sich eine schnellere Durchdringung alternativer Antriebe im Bestand dieses Segments ergibt.

In den bisherigen Analysen der Pkw-Entwicklung werden die Antriebsanteile der Neuzulassungen und des Fahrzeugbestands auf die Fahrzeuganzahl bezogen. Darüber hinaus können die Antriebsanteile ebenso hinsichtlich der Fahrleistung analysiert werden. Dazu sind in Abbildung 7.3 die Anteile der untersuchten Antriebsarten am gesamten Pkw-Bestand sowie an der Gesamtfahrleistung der Pkw visualisiert. Insgesamt haben die beiden

Diagramme eine hohe Übereinstimmung. Eine detaillierte Betrachtung deckt jedoch Unterschiede hinsichtlich der beiden Größen auf. Zunächst ist festzuhalten, dass die Zuweisung der historischen Flottenzusammensetzung modellseitig über alle Nutzergruppen aufgrund unzureichender Datengrundlage gleichmäßig erfolgt. Somit sind die Antriebsanteile des historischen Bestands im Bezug auf die Fahrzeuganzahl und die Fahrleistung gleich. Dieses Vorgehen vernachlässigt, dass Dieselfahrzeuge durchschnittlich eine höhere Fahrleistung als Benzinfahrzeuge aufweisen. Aufgrund der abnehmenden Relevanz der konventionellen Antriebsformen im zukünftigen Pkw-Markt verringert sich der Einfluss dieses Effekts. Dies hat insbesondere keine Auswirkungen auf die Entwicklung der elektrifizierten Antriebsarten.

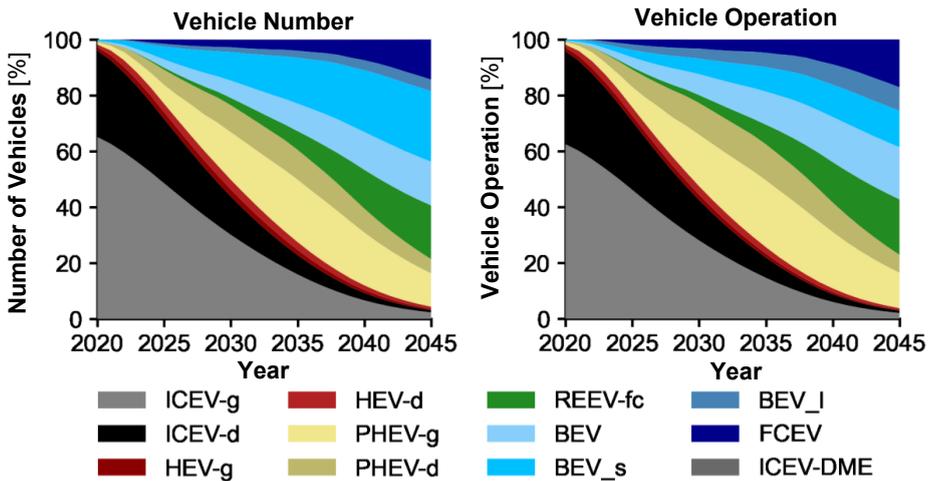


Abbildung 7.3: Fahrzeuganzahl- (links) und fahrleistungsspezifische (rechts) Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, -s/_I: kleine/große Batteriekapazität.

Deren Anteil ist ebenfalls vergleichbar in Bezug auf Fahrzeuganzahl und Fahrleistung. Im Jahr 2045 ist der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen an der Fahrleistung mit 17 % mehr als 3 % höher als der Anteil an den Fahrzeugen. Dies deutet darauf hin, dass Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge bei überdurchschnittlich hohen Fahrleistungen eingesetzt werden. Bei Batterie-Elektrofahrzeugen ist der Anteil an der Fahrleistung hingegen über 5 % niedriger als der Anteil an der Fahrzeuganzahl im Jahr 2045. Dies resultiert insbesondere aus der hohen Nutzung im kleinen Pkw-Segment, welches verglichen mit dem gesamten Pkw-Bestand eine niedrigere durchschnittliche Jahresfahrleistung aufweist. Innerhalb der Batterieoptionen gibt es ebenfalls Verschiebungen. Jeder vierte Pkw ist mit der kleinen Batterievariante ausgestattet. Demgegenüber ist deren Anteil an der Gesamtfahrleistung nahezu halbiert. Auf der anderen Seite verdoppelt sich der Anteil der großen Batterievariante durch den Wechsel der Bezugsgröße. Die Verschiebungen bei den hybriden Antriebsformen sind deutlich geringer ausgeprägt. Daraus ist abzuleiten, dass deren durchschnittliche Fahrleistung nahe der des gesamten Pkw-Bestands liegt.

In Abbildung 7.4 sind die Anteile der vollelektrischen Antriebsoptionen für alle Nutzergruppen (10 Nutzergruppen je Segment) der vier betrachteten Pkw-Segmente im Jahr 2045 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung visualisiert. Die Datenpunkte mit batterieelektrischen Anteilen über 85 % gehören zum kleinen Pkw-Segment. Diese hohen Anteile resultieren aus der Tatsache, dass in diesem Segment keine Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge oder Antriebe mit Brennstoffzelle berücksichtigt werden.

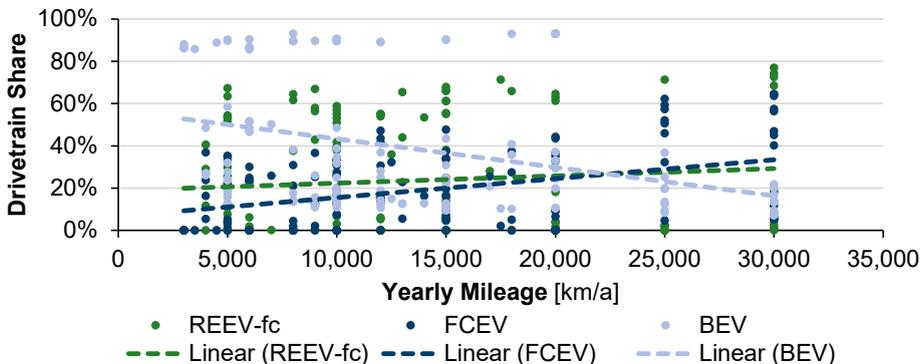


Abbildung 7.4: Anteile der vollelektrischen Antriebsarten bei den Pkw-Nutzergruppen inklusive linearer Interpolation in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung. Datenpunkte entsprechen den Anteilen innerhalb der modellseitig betrachteten Nutzergruppen. Geraden stellen lineare Interpolation dieser Datenpunkte dar. REEV-fc: Range-Extender-Elektrofahrzeug mit Brennstoffzelle, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Die Streuung der Anteile eines Antriebs bei gleicher Fahrleistung deutet darauf hin, dass neben der Fahrleistung weitere Faktoren beeinflussen, welche Antriebsoption in welchem Ausmaß innerhalb der Systemoptimierung genutzt wird. Dazu gehört insbesondere das Fahrprofil der Nutzergruppe, das heißt wie sich die Fahrleistung innerhalb eines Jahres verteilt. Die gleiche Jahresfahrleistung kann auf der einen Seite durch wenige, aber dafür längere Fahrten oder auf der anderen Seite durch viele, aber dafür kürzere Strecken erreicht werden. Längere Fahrten machen eine Zwischenladung zu vom Fahrprofil vorgegebenen Zeiten erforderlich. Dies mindert die Flexibilitätsoptionen des elektrischen Ladens und ist daher nachteilig für Batterie-Elektrofahrzeuge. Neben der Verteilung der Fahrdistanzen können diese zudem zu unterschiedlichen Tageszeiten zurückgelegt werden. Das Nutzerprofil bestimmt dabei, zu welchen Zeiten ein Laden der Fahrzeugbatterie möglich ist. Analysen in Sektion 7.1.3 zeigen, dass die Optimierung das Laden der Fahrzeugbatterien während Zeiten hoher solarer Einstrahlung und somit hoher Erzeugung von elektrischem Strom mittels Photovoltaik anstrebt. Steht das Laden der Fahrzeugbatterie innerhalb eines Fahrprofils zu diesen Zeiten nicht zur Verfügung ist dies folglich nachteilig für Fahrzeuge, die elektrisch geladen werden. Die beschriebenen Effekte begründen die teils hohen Abweichungen der Anteile der Antriebsoptionen bei gleicher Jahresfahrleistung.

Trotz dieser Streuung ist eine Abhängigkeit der Anteile von der Jahresfahrleistung zu erkennen, welche für die einzelnen Antriebsarten unterschiedlich ausfällt. Zur Visualisierung dieser Relation sind in dem Diagramm ebenfalls die mittels linearer Regression ermittelten Geraden eingezeichnet. Der negative Trend der Ausgleichsgeraden der batterieelektrischen Anteile hebt hervor, dass Batterie-Elektrofahrzeuge verstärkt bei niedrigeren Jahresfahrleistungen eingesetzt werden. Die Steigung der Gerade verdeutlicht, dass die

Abhängigkeit des Antriebsanteils von der Jahresfahrleistung bei Batterie-Elektrofahrzeugen stärker als bei den beiden weiteren Antriebsarten ausgeprägt ist. Im Gegensatz zu Batterie-Elektrofahrzeugen wirkt sich eine höhere Jahresfahrleistung positiv auf den Anteil von Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen aus. Vor allem Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge werden bei niedrigen Jahresfahrleistungen seltener von der Optimierung gewählt. Bei Fahrleistungen über 22.000 km/a sind Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge hingegen die Antriebsart, welche am häufigsten genutzt wird. Dies deutet auf den Gesamtvorteil der Antriebstechnologie, insbesondere gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen, bei hohen Fahrleistungen hin, wenngleich die techno-ökonomischen Analysen auf Fahrzeugebene in Sektion 6.5.4 einen Kostenvorteil von Batterie-Elektrofahrzeugen bei steigenden Fahrleistungen herausstellen. Diese abweichenden Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Betrachtung unterschiedlicher Systemebenen bei der Analyse und Bewertung zukunftsfähiger Antriebsoptionen. Auf der einen Seite einzelne Fahrzeuge und auf der anderen Seite die gesamte Fahrzeugflotte inklusive der Interaktion mit dem restlichen Energiesystem.

Neben der Abhängigkeit der Antriebsanteile von der Jahresfahrleistung wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen den Anteilen der vollelektrischen Antriebsvarianten und dem Regionstyp analysiert. Dazu ist in Abbildung 7.5 die statistische Verteilung der Anteile für die einzelnen Regionstypen sowie zum Vergleich für die gesamtdeutsche Fahrzeugflotte veranschaulicht.

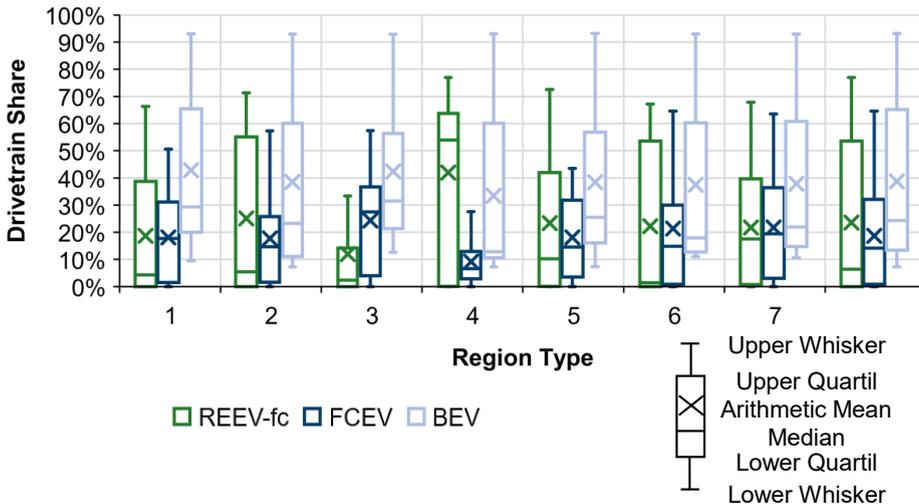


Abbildung 7.5: Boxplot der Antriebsanteilverteilung vollelektrischer Optionen am Pkw-Bestand in den Regionstypen der RegioStaR7-Klassifizierung im Jahr 2045. REEV-fc: Range-Extender-Elektrofahrzeug mit Brennstoffzelle, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Wie zuvor ist auch innerhalb eines Regionstyps eine hohe Streuung der Anteile ersichtlich. Die hohe Streuung bei Batterie-Elektrofahrzeugen resultiert unter anderem aus den bereits erläuterten hohen Anteilen im kleinen Pkw-Segment. Dennoch liegt auch bei Range-Extender-Elektrofahrzeugen eine breite Streuung vor, welche sich insgesamt über den Bereich

von 0 bis 77 % erstreckt. Die Streuung der Anteile der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ist am kleinsten, wenngleich sie mit 65 % ebenfalls einen hohen Wert aufweist.

Der Anteil der Batterie-Elektrofahrzeuge ist in Metropolen (RT 1) mit 43 % am höchsten, da hier der höchste Anteil von kleinen Pkw und zudem geringe Fahrleistungen vorliegen. Im dörflichen Raum einer Stadtregion (RT 4) ist der batterieelektrische Anteil mit 33 % am niedrigsten. Dies ist auf die im Vergleich zu den anderen Regionstypen hohen Fahrleistungen sowie den geringen Anteil von kleinen Pkw zurückzuführen. Die hohe Verfügbarkeit eines privaten Stellplatzes gepaart mit den Anforderungen des Fahrprofils führen zu einem geringen Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen und einem hohen Anteil von Range-Extender-Elektrofahrzeugen in diesem Regionstypen. Da jedoch weniger als 9 % des gesamtdeutschen Fahrzeugbestands auf diesen Regionstyp entfallen, ist der Einfluss auf das Gesamtergebnis von untergeordneter Rolle. Lediglich in zentralen Städten einer ländlichen Region (RT 5) ist der Anteil am gesamten Pkw-Bestand mit 5 % geringer. Den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat der städtische Raum der Stadtregionen (RT 3), auf den fast drei von zehn Pkw in Deutschland entfallen. In diesem Regionstyp werden überdurchschnittlich hohe Jahresfahrleistungen bei unterdurchschnittlichen mittleren Distanzen erreicht [110]. Diese Kombination hat mit mehr als 42 % einen überdurchschnittlich hohen Anteil der Batterie-Elektrofahrzeuge zur Folge, da die Verfügbarkeit eines privaten Stellplatzes mit 84 % ebenfalls hoch ist (vgl. Sektion 4.2.4). Der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen liegt in diesem Regionstyp ebenso 6 % über dem Durchschnittswert. Range-Extender-Elektrofahrzeuge weisen in diesem Regionstyp mit lediglich 12 % hingegen einen unterdurchschnittlichen Wert auf.

Die Analysen der Antriebsanteile in Abhängigkeit des Regionstyps stellen heraus, dass regionale Tendenzen hinsichtlich der Antriebswahl innerhalb der Optimierung bestehen. So werden in den Stadtregionen (RT 1-4) verstärkt Batterie- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge genutzt. In diesen Regionen liegt deren Anteil im Durchschnitt bei 39 % und 24 % und somit jeweils ca. 2 % über dem Anteil im ländlichen Raum (RT 5-7). Im ländlichen Raum ist im Gegenzug der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen höher. Dennoch unterstreicht die hohe Streuung innerhalb der einzelnen Regionstypen sowie die geringe Differenz der Mittelwerte zwischen den Regionen, dass neben dem Regionstypen weitere Faktoren einen hohen Einfluss auf die Antriebswahl haben.

Busse

Vergleichbar zu Pkw werden Busse modellseitig mittels vier Fahrzeugsegmenten (vgl. Sektion 4.1.1) abgebildet. In Abbildung 7.6 sind die Entwicklungen der Neuzulassungen und des Fahrzeugbestands über die modellierten Fahrzeugsegmente aufsummiert dargestellt. Der Anteil der elektrifizierten Antriebe steigt stetig an, wie zuvor bei Pkw. Jedoch verläuft die Reduktion des Anteils des konventionellen Antriebs langsamer. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass Plug-In Hybrid-Elektrobusse endogen nicht als Option zur Verfügung stehen. Insgesamt werden nach 2035 keine Busse mit Verbrennungsmotor neu zugelassen. Der Anteil von Hybrid-Elektrobussen wächst zunächst bis 2022 auf fast 20 % an, bevor die Antriebsoption anschließend bis 2032 aus dem Neufahrzeugmarkt ausläuft. Ab 2030 ist jeder vierte neue Bus als batterieelektrischer Gelegenheitslader (O-BEV) ausgeführt. Dieses Niveau bleibt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums bestehen. Gelegenheitslader mit Brennstoffzelle (O-FCEV) spielen über den gesamten Zeithorizont mit maximal 5 %

Neuzulassungsanteil im Jahr 2026 eine untergeordnete Rolle. Insbesondere bei 18 m-Stadtbussen erreichen Gelegenheitslader mit mehr als 40 % einen überdurchschnittlich hohen Anteil. Bei kleineren Überlandbussen sowie im Segment der Reisebusse ist deren Anteil hingegen deutlich niedriger. Der Neuzulassungsanteil von Batterie-Elektrobussen steigt stärker als der von Gelegenheitsladern (O-BEV) an und erzielt im Jahr 2038 mit 45 % sein Maximum. Danach schrumpft der Anteil der Batterie-Elektrobusse bis 2045 auf 33 %. Dieser Rückgang ist in der gesteigerten Konkurrenzfähigkeit von Brennstoffzellen-Elektrobussen begründet. Bis 2038 liegt deren Anteil stets unter 10 % der neu zugelassenen Busse. Ab 2040 wird hingegen mehr als jeder vierte Bus als Brennstoffzellen-Elektrobus ausgeführt. Der Anstieg der Brennstoffzellen-Elektrobus-Neuzulassungen tritt in allen Bussegmenten auf. Hervorzuheben sind dabei Reisebusse, bei denen Brennstoffzellen-Elektrobusse nach 2040 einen Neuzulassungsanteil von über 60 % erreichen. Dies zeigt den Vorteil von Brennstoffzellen-Elektrobussen hinsichtlich eines Einsatzprofils mit hohen erforderlichen Reichweiten. Die Kombination aus Batterie und Brennstoffzelle mit 200 km elektrischer Reichweite (REEV-fc) erlangt über alle Busse hinweg ebenfalls Anteile über 20 %. Insbesondere im Bereich kleiner Überlandbusse steigt deren Neuzulassungsanteil zwischen 2034 und 2038 auf über 40 %. Dadurch wird unterstrichen, dass eine Begrenzung der batterieelektrischen Reichweite in Kombination mit einer Reichweitenverlängerung mittels Brennstoffzelle eine geeignete Antriebsoption bei Überlandbussen darstellt. Ab 2038 sinkt der Anteil von Range-Extender-Elektrobussen vergleichbar zu dem bereits beschriebenen Effekt bei Batterie-Elektrobussen. Dies verdeutlicht die gesteigerte Konkurrenzfähigkeit von Brennstoffzellen-Elektrobussen ab der zweiten Hälfte der 2030er Jahre gegenüber den batteriedominierten Antriebsoptionen (REEV und BEV).

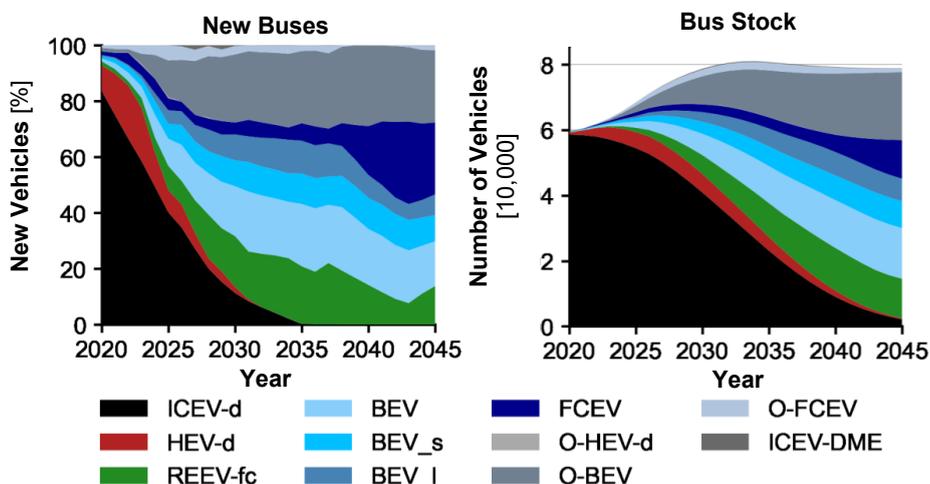


Abbildung 7.6: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Bussen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorbus, HEV: Hybrid-Elektrobus, REEV: Range-Extender-Elektrobus, BEV: Batterie-Elektrobus, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrobus, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität, O-: Gelegenheitslader.

Der modale Shift vom Individual- zum öffentlichen Verkehr (vgl. Sektion 2.3.1) führt zu dem im rechten Diagramm der Abbildung 7.6 visualisierten Wachstum der Busflotte. Bis 2034

erhöht sich der Busbestand um 36 % auf über 81.000 Fahrzeuge an. Antriebsseitig ergibt sich auch in der Bestandsentwicklung eine zunehmende Elektrifizierung der Busflotte. Da die Lebensdauer von Bussen und Pkw vergleichbar ist, wird auch bei Bussen die Zeitverzögerung zwischen der Bestandsumwandlung und dem Antriebswechsel innerhalb der Neuzulassungen ersichtlich. Bis 2032 erzielen die vollelektrischen Antriebe einen Anteil am Fahrzeugbestand von über 50 %. Die Neuzulassung von Verbrennungsmotorfahrzeugen bis 2035 hat zur Folge, dass diese bis 2045 noch einen sehr kleinen Anteil (3 %) des Fahrzeugbestands antreiben. Im Jahr 2045 sind fast 40 % der Busse als batterieelektrisch ausgeführt. Zudem ist jeder vierte Bus zu diesem Zeitpunkt ein Gelegenheitslader (O-BEV). Aufgrund des verspäteten Markthochlaufs von Brennstoffzellen-Elektrobussen erreichen diese einen geringeren Anteil von 15 %. Ebenso sind 15 % des Busbestands als Range-Extender-Elektrofahrzeuge ausgeführt, wobei diese durch den früheren Markthochlauf bereits Ende der 2030er Jahre ein solches Bestandsniveau erlangen.

Da der Einfluss von Bussen auf den gesamten Verkehrssektor verglichen mit Pkw deutlich kleiner ausfällt, wird an dieser Stelle auf eine segmentspezifische Darstellung der Resultate verzichtet. Zur vollständigen Dokumentation der detaillierten Ergebnisse sind diese in Abbildung G.4 bis Abbildung G.7 in Anhang G visualisiert. Insgesamt untermauern die Analysen, dass bei Bussen in Zukunft ein Mix der vollelektrischen Antriebsoptionen entsteht. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Anforderungen der Busanwendungen hinsichtlich Fahrleistung, Reichweite und Energiebedarf.

Nutzfahrzeuge

Neben dem zuvor analysierten straßengebundenen Personenverkehr ist ebenfalls der Straßengüterverkehr in den Untersuchungen enthalten. Modellseitig ist dieser in die in Tabelle 4.1 aufgezeigten Fahrzeugklassen unterteilt. Die Untersuchungen in diesem Abschnitt fokussieren leichte Nutzfahrzeuge der Klasse N1 sowie Sattelzugmaschinen, da diese beiden Fahrzeugklassen den höchsten Anteil am Energiebedarf aufweisen. Zusammen repräsentieren die beiden genannten Fahrzeugklassen im Jahr 2020 mehr als 77 % des Energiebedarfs des Straßengüterverkehrs.

Sowohl der Fahrzeugbestand als auch die Neuzulassungen von leichten Nutzfahrzeugen sind im Jahr 2020 von konventionellen Dieselfahrzeugen dominiert. Mehr als 90 % der historischen Neuzulassungen im Jahr 2020 sind in dieser Fahrzeugklasse mit einem konventionellen Antrieb ausgestattet. Dennoch ist auch hier in den vergangenen Jahren bereits ein steigender Anteil der elektrischen Antriebsformen zu beobachten, welche im Jahr 2020 mehr als 3 % betragen haben. Dieser Trend setzt sich in den Modellergebnissen in den darauffolgenden Jahren fort. Insgesamt weist die Antriebszusammensetzung eine hohe Ähnlichkeit zu den zuvor analysierten Pkw auf. Dies betrifft insbesondere das Ausphasen der konventionellen Antriebstechnologie bis zum Jahr 2030. Ebenso steigt bis 2025 der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen und sinkt anschließend bis 2035 wieder. Dieser Effekt resultiert aus dem bereits erwähnten hohen Druck zur Dekarbonisierung innerhalb des Verkehrssektors, welcher die Nutzung sämtlicher Elektrifizierungsoptionen zu Beginn des Optimierungszeitraums erforderlich macht.

Im Vergleich zu Pkw ist die anschließende Aufteilung zwischen den elektrifizierten Antriebsoptionen different. Dank der für Batterie-Elektrofahrzeuge vorteilhaften Anforderungen der leichten Nutzfahrzeuge werden in dieser Fahrzeugklasse vor allem Batterie-

Elektrofahrzeuge eingesetzt. Bereits 2028 ist mehr als jedes zweite neu zugelassene Fahrzeug dieser Klasse ein Batterie-Elektrofahrzeug. Der Grund hierfür ist die höhere Planbarkeit der Reichweitenanforderung verglichen mit Pkw. Im Pkw-Bereich werden infolge des Komforts und der Entwicklungen der letzten Jahre höhere Reichweiten angenommen. Leichte Nutzfahrzeuge können hingegen besser auf die tatsächlichen Reichweitenanforderungen aufgrund des Einsatzgebietes ausgelegt werden. In dieser Fahrzeugklasse können mit einer Reichweite von 230 km bereits mehr als 90 % der täglichen Fahrten abgedeckt werden. Zudem ist die tägliche Standzeit der Fahrzeuge infolge der Arbeitszeiten ausreichend lang, um die Batterie für den nächsten Einsatz zu laden. Weiterhin werden neun von zehn Fahrzeugen auf einem Betriebsgelände geparkt [112]. Daher kann die Verfügbarkeit der notwendigen Ladeinfrastruktur sichergestellt werden.

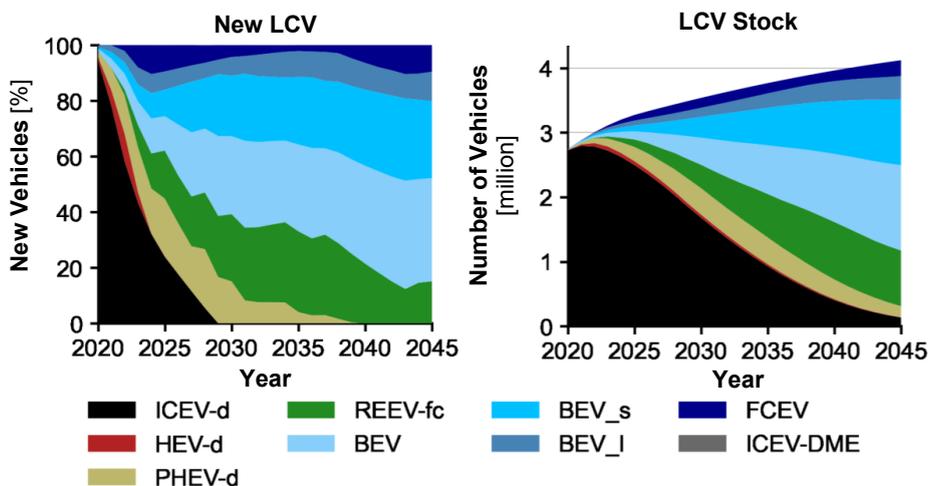


Abbildung 7.7: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von leichten Nutzfahrzeugen (LCV) (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

Neben der hohen Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen ist im Jahr 2030 zudem jedes Dritte neu zugelassene leichte Nutzfahrzeuge als Range-Extender-Elektrofahrzeug ausgeführt. Deren Anteil erreicht im Jahr 2032 sein Maximum. Anschließend wird diese Antriebsoption vermehrt durch zusätzliche Batterie-Elektrofahrzeuge sowie ab 2035 in zunehmendem Maße auch von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen verdrängt. Im Jahr 2045 sind schließlich jeweils 10 % der Neuzulassungen Brennstoffzellen- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge. Deren Nutzung erfolgt vor allem dort, wo hohe Reichweiten und somit die größte Batterievariante bei Batterie-Elektrofahrzeugen nachgefragt werden.

Aus der erläuterten Entwicklung der Neuzulassungen sowie der modellendogenen Verschrottung des Altbestands resultiert der im rechten Diagramm der Abbildung 7.7 gezeigte Verlauf des Bestands leichter Nutzfahrzeuge. Unter anderem infolge des weiter zunehmenden Onlinehandels wird im zugrundeliegenden Szenario ein wachsender Fahrzeugbestand der leichten Nutzfahrzeuge erwartet. Insgesamt steigt dieser von 2,7 Millionen im Jahr 2020 auf 4,1 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2045 um mehr als 50 % an. Im Jahr 2031 sind mehr

als die Hälfte des Fahrzeugbestands elektrifiziert. Bei den Neuzulassungen wird dieser Wert bereits acht Jahre früher erreicht. Dieser Zusammenhang verdeutlicht den zeitlichen Verzug zwischen Neuzulassungen und Bestandsumwandlung. Des Weiteren führt die teils hohe Lebensdauer dazu, dass im Jahr 2045 noch mehr als 300.000 Fahrzeuge (7,5 %) dieser Klasse mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind. Aus diesem Grund ist der Einsatz treibhausgasneutraler Flüssigkraftstoffe zur vollständigen Dekarbonisierung unausweichlich, sofern nicht weitere Maßnahmen ergriffen werden.

Im Gegensatz zu leichten Nutzfahrzeugen weisen Sattelzugmaschinen nicht nur ein höheres Gesamtgewicht und folglich höhere Energiebedarfe auf, sondern erfordern zudem höhere Reichweiten, da sie verstärkt im Fernverkehr eingesetzt werden. Während bei leichten Nutzfahrzeugen fast 90 % der Tagesfahrleistungen unter 200 km liegen, sind es bei Sattelzugmaschinen nur 20 %. Zudem ist mehr als jede zweite Tagesroute über 400 km und etwa 20 % sogar über 600 km lang. Der hohe Energiebedarf gepaart mit den hohen Anforderungen an die Reichweite der Fahrzeuge führt bei Batterie-Elektrofahrzeugen zu großen Batteriekapazitäten und folglich hohen Herstellungskosten (vgl. Kapitel 6). Die zu Beginn größere Kostendifferenz zwischen den vollelektrifizierten Antrieben und Verbrennungsmotor- sowie Hybrid-Elektrofahrzeugen hat zur Folge, dass das Ausphasen im Vergleich zu den bisher analysierten Fahrzeugklassen länger andauert. Darüber hinaus ist die Marktverfügbarkeit der vollelektrischen Antriebsformen in dieser Fahrzeugklasse zu Beginn des Betrachtungszeitraums stark eingeschränkt (vgl. Abschnitt 5.2), weshalb der Markthochlauf verzögert beginnt, wie im linken Diagramm der Abbildung 7.8 zu erkennen.

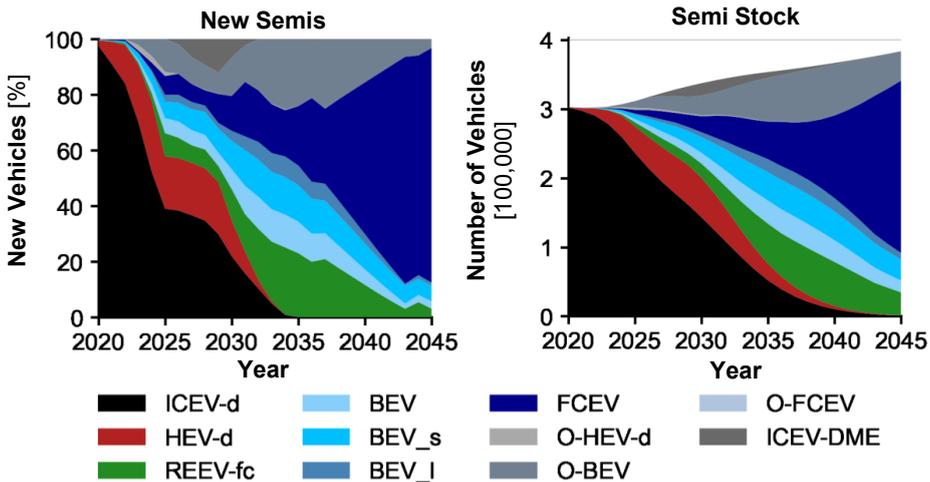


Abbildung 7.8: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Sattelzugmaschinen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität, O: Oberleitungs-.

Aus diesem Grund steigt der Marktanteil von Hybrid-Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen bis 2024 auf 26 % an, um dennoch Effizienzgewinne zu erzielen und somit die Treibhausgasemissionen zu senken. Anschließend sinkt deren Anteil allerdings wieder, da die vollelektrifizierten Optionen an Bedeutung gewinnen und im Jahr 2027 mehr als jedes

zweite Neufahrzeug vollelektrisch ist. Dabei erreichen alle vier vollelektrischen Antriebsvarianten (O-BEV, BEV, REEV-fc und FCEV) bis 2030 einen Marktanteil zwischen 10 % und 20 %. Daher ist zunächst kein eindeutiger Vorteil einer Technologie ersichtlich. Die Gesamtbetriebskosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen sinken in dieser Fahrzeugklasse bis 2030 am stärksten (vgl. Sektion 6.3.1). Diese Kostenreduktion führt in den dargestellten sektoralen Optimierungsergebnissen zu einem ab 2030 stark steigenden Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen. Der Anteil von Oberleitungs-Elektrofahrzeugen sinkt hingegen ab 2035. Dies lässt sich ebenfalls anhand der durchgeführten techno-ökonomischen Analysen auf Fahrzeugebene in Kapitel 6 begründen. Zunächst sind Oberleitungs-Elektrofahrzeuge die günstigste vollelektrische Antriebsform. Anschließend steigende Marktanteile senken die Kosten von Brennstoffzellen- und Batterie-Elektrofahrzeugen jedoch stärker, sodass Oberleitungs-Elektrofahrzeuge aus techno-ökonomischer Sicht aufgrund der hohen Infrastrukturkosten im Nachteil sind. Der sinkende Anteil der Oberleitungs-Elektrofahrzeuge in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums sollte bei der Entscheidung zum Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur berücksichtigt werden. Vergleichbares gilt für den Einsatz von Dimethylethern in Sattelzugmaschinen Ende der 2020er Jahre. Infolgedessen wird in Sektion 7.3.5 eine Sensitivitätsanalyse zum Ausschluss der beiden zuvor genannten Antriebsoptionen (Oberleitung, Dimethylether) durchgeführt.

Ebenso wie bei Oberleitungs-Elektrofahrzeugen erreicht auch der Marktanteil von Range-Extender-Elektrofahrzeugen Anfang der 2030er Jahre sein Maximum und wird bei den Neuzulassungen bis 2042 vollständig von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ersetzt. Da die Tankstellen- und Ladeinfrastruktur von Range-Extender-Elektrofahrzeugen jedoch weiterhin von Batterie- bzw. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen genutzt wird, kann diese Antriebstechnologie im Gegensatz zu Oberleitungs-Elektrofahrzeugen als sinnvolle Brückentechnologie erachtet werden. Insgesamt sind im Jahr 2045 mehr als 80 % der neu zugelassenen Sattelzugmaschinen brennstoffzellenelektrisch ausgeführt. Im Fahrzeugbestand erzielen sie mit 65 % einen niedrigeren Anteil, was auf den zeitlichen Versatz zwischen Neuzulassungen und Bestandsumwandlung zurückzuführen ist. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass diese Verzögerung bei Sattelzugmaschinen aufgrund der kürzeren Fahrzeuglebensdauer kleiner als bei allen anderen Fahrzeugklassen ausfällt. Dies gilt trotz der Berücksichtigung der in Deutschland verkehrenden ausländischen Fahrzeuge, welche eine höhere durchschnittliche Lebensdauer als in Deutschland zugelassene Sattelzugmaschinen aufweisen (vgl. Sektion 4.2.3). Aufgrund der kürzeren Lebensdauer und der daraus resultierenden höheren Geschwindigkeit der Bestandsumwandlung wird bei Sattelzugmaschinen sogar ein fast vollständiges Ausphasen von Verbrennungsmotoren aus dem Bestand erreicht. In dieser Fahrzeugklasse sind im Jahr 2045 lediglich 1.200 Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet, was weniger als 0,4 % des Gesamtbestands entspricht und somit vernachlässigbar gering ist. Eine Kraftstoffversorgung eines so kleinen Fahrzeugbestands mit Verbrennungsmotor führt zu überdurchschnittlich hohen Kosten, weshalb es denkbar ist, dass dieser Restbestand frühzeitig aus dem Markt austritt.

Insgesamt stellt die Analyse der beiden Nutzfahrzeugklassen die Abhängigkeit der Antriebswahl von den beiden Faktoren Fahrzeugmasse und Reichweitenanforderung heraus. Die in Abbildung G.8 bis Abbildung G.12 in Anhang G dargestellten Ergebnisse für die weiteren betrachteten Straßennutzfahrzeugtypen unterstreichen ebenso, dass steigende

Fahrzeugmassen und höhere Reichweitenanforderungen zu einer verstärkten Marktdurchdringung von Brennstoffzellen- gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen führen. In allen Fällen weisen die Optimierungsergebnisse einen Mix aus den vollelektrischen Antriebsarten und keine ausschließliche Nutzung einer der Antriebsarten auf. Dies verdeutlicht, dass die Antriebswahl nicht nur von der Fahrzeugklasse, sondern darüber hinaus von weiteren Faktoren bestimmt wird.

Schienerverkehr

Nach den Analysen der Straßenverkehrsmittel folgt die Erläuterung der Optimierungsergebnisse im Schienenverkehr. Dieser umfasst fünf verschiedene Zuggattungen im Personenverkehr sowie den Güterverkehr. In Abbildung 7.9 sind die Fahrleistungen der einzelnen Zugarten für die Jahre 2020, 2030 und 2045 nach Traktionsart visualisiert.

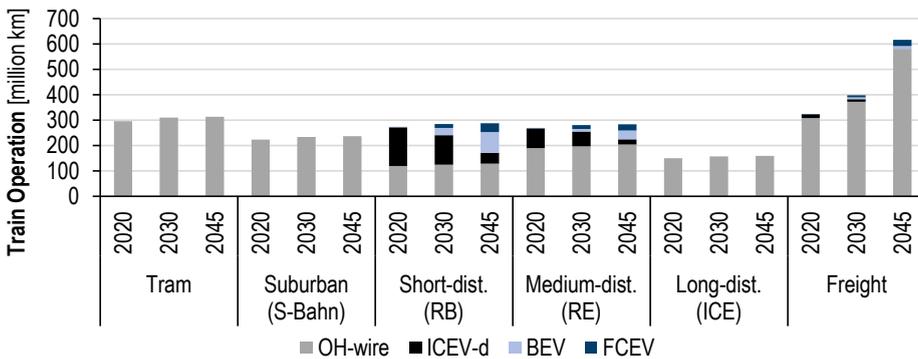


Abbildung 7.9: Antriebspezifische Fahrleistung der betrachteten Zuggattungen in den Jahren 2020, 2030 und 2045. OH-wire: Oberleitungszug, ICEV-d: Verbrennungsmotorzug (Diesel), BEV: Batterie-Elektrozug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrozug.

Das Wachstum der Personenverkehrsleistung infolge des im Szenario angenommenen modalen Shifts wird gemäß dem historischen Anteil der jeweiligen Zuggattung an der Verkehrsleistung auf diese verteilt. Daraus resultieren steigende Fahrleistungen der einzelnen Zuggattungen. Im Fernverkehr fällt der Anstieg der Fahrleistung im Vergleich zu den anderen Zuggattungen geringer aus, da auf Basis der historischen Entwicklung in Zukunft höhere Passagierkapazitäten der Langstreckenzüge erwartet werden. Straßen-, U- und S-Bahnen sowie Fernverkehrszüge werden stets vollständig oberleitungsgebunden betrieben. Im Kurz- und Mittelstreckenverkehr sowie im Güterverkehr erfolgt der Betrieb hingegen in Teilen auf nicht elektrifizierten Strecken. Zwar wird im Personenverkehr ein Anstieg der elektrifizierten Strecken von 2 % im Kurz- und Mittelstreckenverkehr angenommen, jedoch bleibt weiterhin ein Anteil nicht elektrifizierter Strecken von über 50 % bzw. 28 % bestehen. Trotz zunehmender Elektrifizierung der Züge wird dieser Verkehr auch im Jahr 2030 noch maßgeblich mit Dieselnügen erbracht. Bis 2045 wird der Anteil von Dieselnügen auf 15 % im Kurz- und 7 % im Mittelstreckenverkehr reduziert. Die Fahrleistung von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrozügen steigt hingegen kontinuierlich an. Im Kurzstreckenverkehr fällt der Anteil von Batterie-Elektrozügen mit 29 % deutlich höher als der von Brennstoffzellen-Elektrozügen (12 %) aus. Im Gegensatz dazu sind die Anteile im Mittelstreckenverkehr mit 12 % Batterie- und 9 % Brennstoffzellen-Elektrozügen ausgeglichener. Dies ist auf die abweichenden Anforderungen an die Batteriekapazität aufgrund

des Energiebedarfs und der Reichweite zurückzuführen, welche vor allem im Kurzstreckenverkehr vorteilhafter für Batterie-Elektrozüge sind.

Im Güterverkehr ist der Anteil des elektrifizierten Verkehrs an der Verkehrsleistung mit über 90 % sehr hoch. Da modellseitig nicht zwischen Rangier- und Güterfernverkehr differenziert wird, ist der Anteil an der Verkehrsleistung und der im Diagramm gezeigten Fahrleistung identisch. Aufgrund des überdurchschnittlichen Anteils von Dieselmotoren im Rangierverkehr, wird die Fahrleistung von Dieselmotoren in diesem Bereich unterschätzt. Somit besteht insbesondere im Rangierverkehr ein Potential zur zusätzlichen Elektrifizierung, welches nicht ausgewiesen wird.

Binnen- und Küstenschiffgüterverkehr

Ebenso wie im Schienenverkehr steigt auch im Schiffverkehr die Verkehrsleistung bis 2045 aufgrund des angenommenen modalen Shifts im Güterverkehr (vgl. Abschnitt 5.2) an. Die Zunahme der Verkehrsleistung hat, wie im rechten Diagramm der Abbildung 7.10 zu erkennen ist, ein Wachstum der Schiffsflotte um 75 % zur Folge, da die Kapazität und Auslastung der Schiffe konstant angenommen wird. Im Jahr 2020 wird der gesamte Schiffsbestand von konventionellen Verbrennungsmotoren angetrieben. Diese dominieren zunächst ebenfalls die Neuflotte. Der Anteil des konventionellen Antriebs sinkt in den Optimierungsergebnissen jedoch stetig bis er ab 2033 vernachlässigbar gering ist. Im Gegenzug steigt insbesondere der Anteil von Flüssigerdgas stark an. Der Einsatz von Wasserstoff spielt bis Anfang der 2040er Jahre eine untergeordnete Rolle bei neu gebauten Schiffen. Anschließend führen die Kostenreduktionen der Brennstoffzelle, des Wasserstofftanks und des Wasserstoffs zu einem stark wachsenden Anteil, der im Jahr 2045 bereits 29 % beträgt. Zudem erhöht sich der Anteil des verbrennungsmotorischen Einsatzes von Wasserstoff auf 18 %. Im Bestand macht sich der späte Markthochlauf der beiden Wasserstoffantriebe im Betrachtungszeitraum hingegen kaum bemerkbar. Dies resultiert aus der geringen Umwandlungsgeschwindigkeit der Bestandsflotte infolge der hohen Lebensdauer der Schiffe. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls der Grund für den auch in Zukunft hohen Anteil konventioneller Verbrennungsmotoren. Trotz des Ausphasens dieser Antriebstechnologie bis 2033 sind im Jahr 2045 noch fast vier von zehn Schiffen mit konventionellen Verbrennungsmotoren ausgestattet.

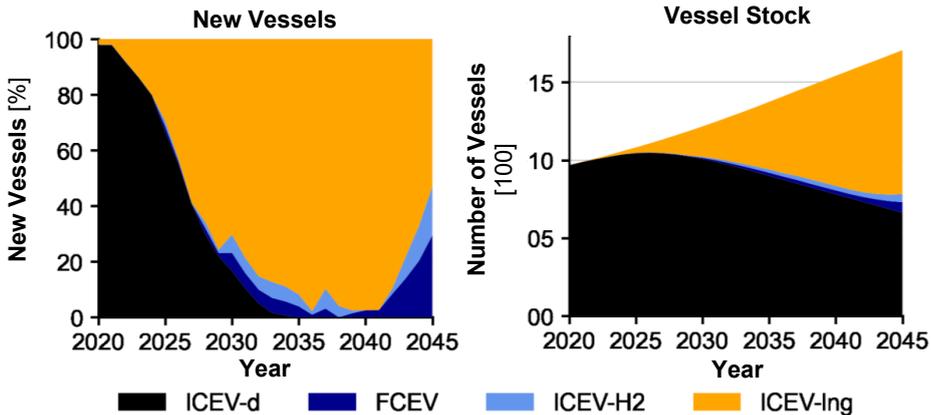


Abbildung 7.10: Anteile der Antriebsarten an den neuen Binnengüterschiffen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Binnengüterschiffen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorschiff, FCEV: Brennstoffzellen-Elektroschiff, -d: Diesel, -H2: Wasserstoff, -Ing: Flüssigerdgas.

Die Umrüstung der Bestandsflotte zur Nutzung alternativer Kraftstoffe stellt eine Möglichkeit zur schnelleren Umwandlung des Schiffbestands dar. Diese Option wird innerhalb des Modells jedoch nicht berücksichtigt, sodass ein Kraftstoff- bzw. Antriebswechsel nur mittels des Neubaus von Schiffen und der Verschrottung des Altbestands möglich ist.

Nationaler Luftverkehr

Innerhalb der Basisszenarien wird lediglich der nationale Schiff- und Luftverkehr betrachtet, da diese in Bezug auf die Treibhausgasbilanzierung eines Landes relevant sind [2]. Dennoch wird diskutiert, inwiefern der internationale Schiff- und Flugverkehr in diese Bilanzen einbezogen werden muss. Daher wird in Sektion 7.3.1 eine Sensitivitätsanalyse inklusive des internationalen Schiff- und Flugverkehrs durchgeführt.

Abbildung 7.11 zeigt die Anteile der Antriebe an den neuen Flugzeugen sowie deren Bestand in den Jahren 2020, 2030 und 2045. Diese verdeutlichen die heutige und zukünftige Dominanz des konventionellen Turboantriebs. Dennoch ist insbesondere bei Flugzeugen der Kennzeichenklasse C (vgl. Sektion 4.1.1) ab 2030 ein zunehmender Anteil von Brennstoffzellen-Elektroflugzeugen zu erkennen. Dieser steigt von 2 % an den neu gebauten Flugzeugen im Jahr 2030 auf mehr als ein Drittel im Jahr 2045 an. Die hohe Lebensdauer der Flugzeuge führt jedoch dazu, dass deren Anteil am Bestand mit 5 % im Jahr 2045 deutlich kleiner ausfällt.

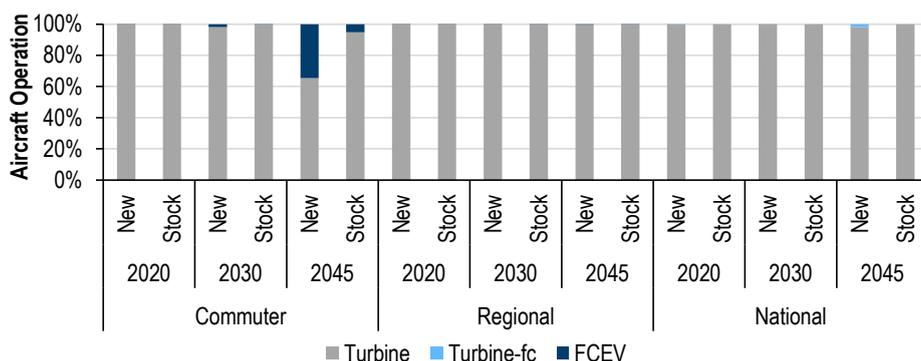


Abbildung 7.11: Antriebsanteile an neuen Flugzeugen und dem Flugzeugbestand der betrachteten Flugarten in den Jahren 2020, 2030 und 2045. Turbine-fc: Turboantrieb inklusive Bordstromversorgung per Brennstoffzelle, FCEV: Brennstoffzellen-Elektroflugzeug.

Bei Regionalflügen unter 400 km bleibt der Anteil von Brennstoffzellen-Elektroflugzeugen stets unter 1 %. Demgegenüber werden neue Flugzeuge, welche auf längeren Distanzen eingesetzt werden, ab 2040 zunehmend mit einem Hybridantrieb aus Turbine und Brennstoffzelle ausgestattet. Dennoch erreichen sie im Jahr 2045 lediglich einen Anteil von 2 % der neu gebauten Flugzeuge für diesen Einsatzfall.

In Bezug auf die vorgestellten Ergebnisse des Flugverkehrs sei angemerkt, dass die Kostendaten der einzelnen Varianten im Vergleich zu den anderen Verkehrsmitteln einer hohen Unsicherheit unterliegen. Aus diesem Grund umfassen die geschilderten Optimierungsergebnisse zwar grundsätzliche Entwicklungen, die quantitative Ausprägung der Antriebsanteile ist jedoch mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

Zwischenfazit der Analyse der Verkehrsmittel

Alles in allem zeigen die Analysen der einzelnen Verkehrsmittelarten die Auswirkungen der unterschiedlichen Anforderungen und Eigenschaften auf die Entwicklung der verschiedenen Antriebsoptionen. Im Straßenverkehr erfolgt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr eine zunehmende Elektrifizierung mittels Batterie und Brennstoffzelle. In allen Fahrzeugklassen ergeben sich in Abhängigkeit der spezifischen Anforderungen Einsatzfälle für Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, sodass keine der beiden Antriebstechnologien in bestimmten Fahrzeugklassen unbeachtet bleibt. Im Schienenverkehr werden Dieselszüge, welche auf nicht oberleitungselektrifizierten Strecken verkehren, zukünftig verstärkt durch Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrozüge ersetzt. Die Binnen- und Küstenschifffahrt wird hingegen zunehmend mit Flüssigerdgas versorgt. Ab 2040 werden zudem neue Schiffe mit Brennstoffzellenantrieb ausgestattet. Im Flugverkehr bleibt der konventionelle Turboantrieb hingegen im gesamten Betrachtungszeitraum dominant, sodass dessen Dekarbonisierung mittels treibhausgasneutralen Kerosins erfolgen muss. Aufgrund der Lebensdauern der Verkehrsmittel müssen auch bei allen anderen Verkehrsmitteln treibhausgasneutrale Flüssigkraftstoffe eingesetzt werden, um den bis 2045 bestehenden Verkehrsmittelbestand mit konventionellem Verbrennungsmotor ebenfalls zu defossilisieren. Die Menge des Restbestands hängt dabei sowohl vom Markteintritt der alternativen Antriebe als auch von der Umwandlungsgeschwindigkeit des Bestands ab, welche maßgeblich von der Lebensdauer der Verkehrsmittel bestimmt wird.

7.1.2 Endenergiebedarf des Verkehrssektors

Die Zusammensetzung des Verkehrsmittelbestands und dessen Nutzung sind grundlegende Faktoren, die den Endenergiebedarf des Verkehrssektors beeinflussen. Innerhalb der Analysen werden dabei nicht nur Kraftstoffbedarfsveränderungen aufgrund eines Antriebswechsels, sondern auch Effizienzentwicklungen der Antriebe und Verkehrsmittel selbst berücksichtigt, wie in Sektion 4.1.3 erläutert.

Die in der vorigen Sektion analysierte antriebsseitige Entwicklung der Verkehrsmittel verdeutlicht die insbesondere im Straßen- und Schienenverkehr zunehmende Elektrifizierung. Dieser Antriebswechsel hat einen Wechsel des Energieträgers zur Folge, der in Abbildung 7.12 veranschaulicht ist. Dabei ist anzumerken, dass der Energiebedarf des internationalen See- und Luftverkehrs nicht inkludiert ist. Dessen Einfluss wird in Sektion 7.3.1 analysiert.

Die allgemeinen Effizienzentwicklungen der Verkehrsmittel sowie insbesondere der höhere Antriebswirkungsgrad der elektrifizierten Antriebe führt zu einer Halbierung des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors bis 2038. Insgesamt wird der Kraftstoffbedarf bis 2045 um 59 % auf 251 TWh reduziert. Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors verschiebt sich im Betrachtungszeitraum grundlegend von rohölbasiertem Otto- und Dieselmotorkraftstoff hin zu elektrischer Energie und Wasserstoff. Im Jahr 2020 entfällt mehr als die Hälfte des Energiebedarfs im Verkehrssektor auf Diesel- und fast 40 % auf Ottokraftstoff. Im Jahr 2045 erreicht elektrische Energie einen Anteil von 46 % und Wasserstoff 32 %. Der restliche Bedarf entsteht an biobasierten und synthetischen Kraftstoffen, sodass insgesamt eine vollständige Defossilisierung erzielt wird. Flüssigerdgas-Kraftstoff, welcher im Schiffsverkehr eingesetzt wird, spielt trotz der stetig steigenden Nachfrage auf fast 4 TWh im Jahr 2045 insgesamt nur eine untergeordnete Rolle im Kraftstoffmix des Verkehrssektors.

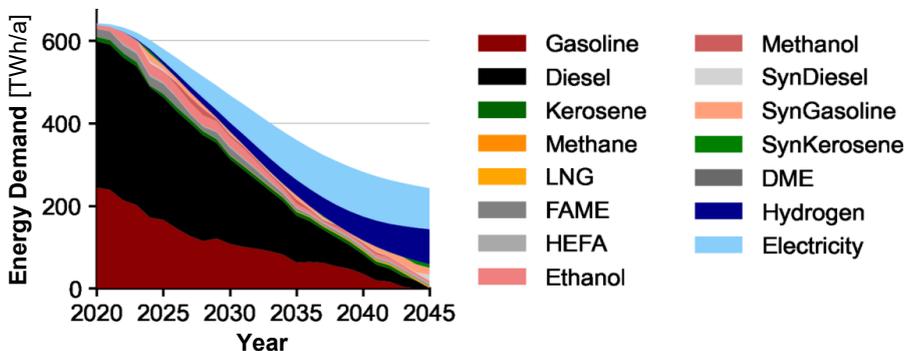


Abbildung 7.12: Entwicklung des Kraftstoffbedarfs im Verkehrssektor aufgeteilt nach Energieträger im Zeitraum von 2020 bis 20245. LNG: Flüssigerdgas, FAME: Fettsäuremethylester, HEFA: Hydroprozessierte Ester und Fettsäuren, DME: Dimethylether.

Die Nachfrage nach Biokraftstoffen erreicht im Jahr 2025 mit über 50 TWh ihr Maximum. Anschließend wird der Biokraftstoffbedarf reduziert und bleibt ab 2035 auf einem Niveau von etwa 15 TWh/a, was ungefähr der Hälfte des heutigen Biokraftstoffbedarfs entspricht. Der verminderte Einsatz von Biokraftstoffen resultiert aus der verstärkten Nutzung von Biomasse in den anderen Sektoren des Energiesystems. Obwohl die gesamte Diesel- und Ottokraftstoffnachfrage aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung abnimmt, steigt der

Anteil der Biokraftstoffe an diesen insbesondere ab 2040 an. Im Jahr 2045 erzielt Ethanol einen Anteil von 23 % an der Ottokraftstoffnachfrage. Dies unterstreicht, dass neu zugelassene Fahrzeuge, welche nach 2040 noch im Bestand sind, eine höhere Biokraftstoffverträglichkeit besitzen sollten als heutige im Markt befindliche Pkw, welche lediglich eine Nutzung von E10-Kraftstoff erlauben. Ist diese Biokraftstoffverträglichkeit zukünftig nicht gegeben, muss an Stelle des Biokraftstoffs verstärkt synthetischer Kraftstoff genutzt werden, welcher ohne fahrzeugseitige Anpassungen eingesetzt werden kann.

Insbesondere ab 2040 steigt die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen stark an, um die Nutzung von Verbrennungsmotoren im Verkehrsmittelbestand sowie den Flugverkehr zu defossilisieren. Im Jahr 2045 werden 32 TWh synthetischer Otto- und Dieselmotorkraftstoff benötigt. Hinzu kommen 8,4 TWh synthetisches Kerosin zur Defossilisierung des nationalen Flugverkehrs. Die Notwendigkeit die Treibhausgasemissionsreduktionsziele im Verkehrssektor im Zeitraum bis 2030 zu erreichen, führt im Optimierungsmodell in den Jahren 2024 bis 2028 ebenfalls zu einer Verwendung synthetischer Otto- und Dieselmotorkraftstoffs. Dieser frühzeitige Einsatz resultiert aus zwei grundlegenden Einschränkungen der Elektrifizierung der Verkehrsmittel. Zum einen unterliegt der Aufbau der erneuerbaren Energien sowie der Elektrolyseure ebenfalls markttechnischen Randbedingungen. Aus diesem Grund ist die inländische Produktion von grünem Strom und Wasserstoff in den ersten Jahren des Betrachtungszeitraums beschränkt. Zum anderen erfolgt der Markthochlauf der elektrifizierten Antriebe nur mit einer beschränkten Geschwindigkeit, da diese markttechnischen Randbedingungen unterliegt und zu Beginn des Betrachtungszeitraums Mehrkosten der elektrifizierten Antriebe entstehen. Zudem führt der Antriebswechsel bei den Neuzulassungen zu einer zeitverzögerten Umwandlung des Verkehrsmittelbestands, wie in Sektion 7.1.1 erläutert. Daher wird zur Erzielung der notwendigen Treibhausgasreduktion synthetischer Kraftstoff im Fahrzeugbestand genutzt. Jedoch ist auch hierbei zu beachten, dass dessen Verfügbarkeit vom Aufbau der erforderlichen Produktionsanlagen im Ausland abhängt. Die Auswirkungen einer nicht vorhandenen Importverfügbarkeit von synthetischen Kraftstoffen bis 2030 sind Gegenstand der Sensitivitätsanalyse in Sektion 7.3.5.

Die abnehmende Entwicklung der Nachfrage nach Otto- und Dieselmotorkraftstoff wird in den beiden Diagrammen der Abbildung 7.13 deutlich. Die Ottokraftstoffnachfrage, welche im Jahr 2020 über 250 TWh beträgt, entsteht in Deutschland nahezu ausschließlich im Pkw-Bereich. Demgegenüber ist der Kraftstoffbedarf der Zweiräder mit weniger als 0,5 TWh sehr gering. Die zunehmende Elektrifizierung sowie Effizienzsteigerung innerhalb des Fahrzeugbestands führen zu einer Halbierung der Ottokraftstoffnachfrage bis 2032. Im Jahr 2045 beträgt die Nachfrage des Restbestands von Pkw mit Ottomotor 22 TWh, was weniger als 10 % der Nachfrage im Jahr 2020 entspricht.

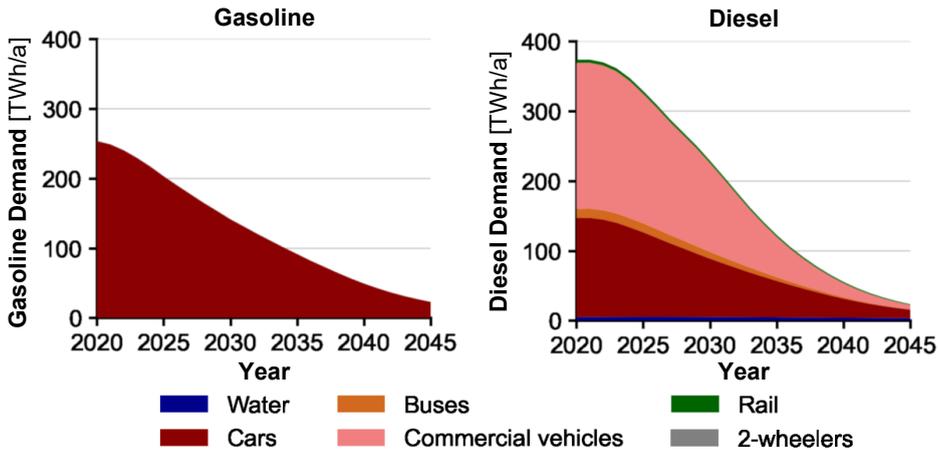


Abbildung 7.13: Otto- (links) und Dieselmotorkraftstoffnachfrage (rechts) unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045.

Vergleichbar zum Ottokraftstoff halbiert sich auch die Dieselmotorkraftstoffnachfrage des Verkehrssektors bis 2032. Allerdings entsteht der Dieselmotorkraftstoffbedarf nicht ausschließlich im Pkw-Bereich. Insbesondere Straßennutzfahrzeuge sind ein Treiber der Dieselmotorkraftstoffnachfrage. Im Jahr 2020 liegt ihr Anteil mit 56 % sogar über dem der Pkw mit 38 %. Die Nachfrage der Busse entspricht 3 % des Gesamtbedarfs, sodass der Straßenverkehr einen Anteil von über 97 % an der Dieselmotorkraftstoffnachfrage im Jahr 2020 besitzt. Dies unterstreicht die hohe Relevanz des Straßenverkehrs in Bezug auf den Endenergiebedarf des Verkehrssektors. Schienen- und Binnenschiffverkehr nehmen hinsichtlich der Kraftstoffnachfrage eine untergeordnete Stellung ein. Infolge der hohen Lebensdauer von Zügen und Schiffen läuft die Bestandsumwandlung jedoch langsamer als bei Straßenfahrzeugen ab, wie in Sektion 7.1.1 aufgezeigt. Daher nimmt deren Anteil an der Dieselmotorkraftstoffnachfrage zukünftig auf fast 21 % im Jahr 2045 zu. Dennoch verringert sich die absolute Dieselmotorkraftstoffnachfrage auch in diesen Verkehrsbereichen aufgrund des Antriebswechsels auf unter 5 TWh im Jahr 2045. Die schnellere Umwandlung des Nutzfahrzeugbestands hat zur Folge, dass deren Dieselmotorkraftstoffbedarf trotz steigender Fahrleistungen vor allem ab 2030 schneller als die Dieselmotorkraftstoffnachfrage von Pkw sinkt.

Im Gegensatz zum Bedarf an konventionellen Flüssigkraftstoffen zeigt der Trend der Strom- und Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors aufwärts, wie in Abbildung 7.14 visualisiert. Im Jahr 2020 ist die Stromnachfrage des Verkehrssektors jedoch mit weniger als 14 TWh deutlich geringer als die nach den oben dargestellten Flüssigkraftstoffen. Der Großteil wird dabei durch Oberleitungszüge nachgefragt. Der Anstieg des Strombedarfs des Verkehrssektors wird vor allem durch die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs getrieben, wie im linken Diagramm ersichtlich. Diese führt zu einer Stromnachfrage von fast 85 TWh im Jahr 2030 und wächst bis zum Jahr 2040 auf 135 TWh an. Effizienzentwicklungen, die Reduktion der Pkw-Verkehrsleistung sowie insbesondere die zunehmende Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bei Sattelzugmaschinen lassen die Nachfrage anschließend auf 122 TWh im Jahr 2045 sinken. Ab 2025 entfällt mehr als die Hälfte des Strombedarfs auf den Pkw-Bereich. Weitere ungefähr 30 % der Nachfrage entstehen ab 2030 im Straßennutzfahrzeugbereich. Der Anteil der Busse an der

Stromnachfrage ist aufgrund der deutlich kleineren Fahrzeugflotte stets kleiner als 5 %. Die restlichen 10 % bis 15 % der Stromnachfrage des Verkehrssektors nach 2030 entfallen auf den Schienenverkehr, welcher im Vergleich zu den anderen Verkehrsmitteln einen höheren historischen Elektrifizierungsgrad aufweist.

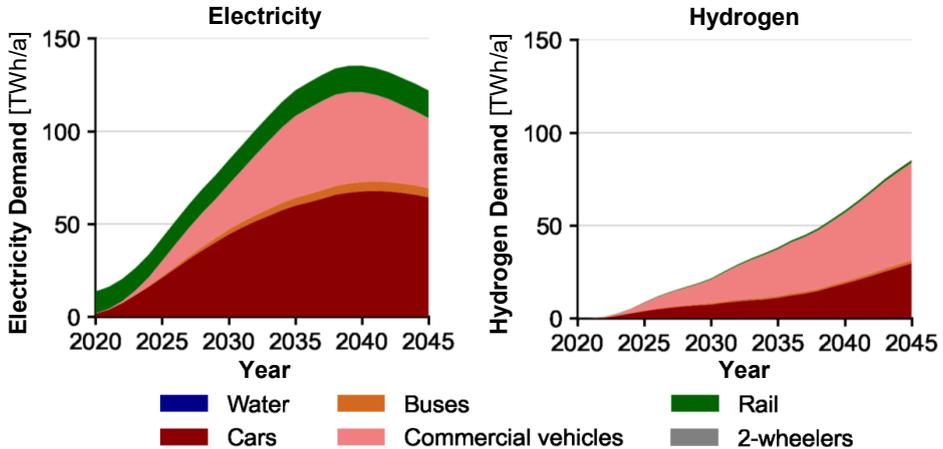


Abbildung 7.14: Strom- (links) und Wasserstoffnachfrage (rechts) unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045.

Die Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors ist im Jahr 2020 vernachlässigbar gering. Vergleichbar zum Strombedarf nimmt diese jedoch zukünftig aufgrund des zunehmenden Brennstoffzelleneinsatzes in den verschiedenen Bereichen des Verkehrssektors stark zu. Bis zum Jahr 2045 wächst der Wasserstoffbedarf stetig auf 85 TWh.

Die Nachfrageentwicklung der beiden visualisierten Energieträger weist Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede auf. In beiden Fällen ist der Straßenverkehr der wesentliche Treiber der zukünftigen Nachfrage. Jedoch wird die Wasserstoffnachfrage gegenüber dem Strombedarf verstärkt vom Nutzfahrzeugbereich geprägt. Dessen Anteil liegt ab 2029 bei über 60 % und erreicht im Jahr 2045 absolut über 52 TWh. Ein weiterer Unterschied in der Bedarfsentwicklung des Wasserstoffs ist der verspätete Anstieg. Die Stromnachfrage steigt aufgrund des früheren Markthochlaufs von Batterie-Elektrofahrzeugen bereits ab 2020 an. Der Wasserstoffbedarf erreicht hingegen erst 2027 das Niveau der Stromnachfrage aus dem Jahr 2020. Zudem wächst diese bis 2037 langsamer an. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Wasserstoffnachfrage 44 % des Strombedarfs. Der anschließende Markthochlauf von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen, allen voran bei Sattelzugmaschinen und im SUV-Segment, führt zu einem verstärkten Anstieg des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor. Da die Stromnachfrage zudem sinkt, entspricht der Wasserstoffbedarf im Jahr 2045 fast 70 % des Strombedarfs.

Insgesamt verdeutlichen die Analysen des Endenergiebedarfs die grundlegenden Auswirkungen der Elektrifizierung. Die positiven Effizienzentwicklungen im Zuge der Elektrifizierung mindern den Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Betrachtungszeitraum um fast 60 %. Zudem unterstreichen die Optimierungsergebnisse den Wandel der Energieträger von fossilen Flüssigkraftstoffen insbesondere hin zu elektrischer Energie und Wasserstoff. Die Wasserstoffnachfrage steigt dabei im Vergleich zum Strombedarf zeitlich verzögert an.

Im Jahr 2045 decken die beiden Energieträger zusammen 78 % des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor. Der Restbestand verbrennungsmotorisch betriebener Verkehrsmittel sowie der Schiff- und Flugverkehr erfordern zusätzlich den Einsatz von biobasierten sowie synthetischen Flüssigkraftstoffen, um eine vollständige Defossilisierung des Verkehrssektors zu erzielen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Nachfrage um ein Vielfaches geringer als der heutige Bedarf an fossilen Flüssigkraftstoffen ist. Der aufgezeigte Kraftstoffwechsel hat Auswirkungen auf den Energiesektor, welcher zukünftig andere Energieträger für den Verkehrssektor bereitstellen muss. Diese Effekte auf den Energiesektor werden in den nachfolgenden Sektionen thematisiert.

7.1.3 Lade- und Tankstelleninfrastruktur

Die Bereitstellung der Energieträger für den Verkehrssektor erfolgt mittels öffentlicher und nicht-öffentlicher Tank- und Ladeinfrastruktur. Aufgrund der Elektrifizierung, insbesondere der des Straßenverkehrs, ist der Aufbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur sowie einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur notwendig. Der in Anlehnung an den berechneten Markthochlauf elektrifizierter Antriebe resultierende Bedarf an dieser Infrastruktur wird im Folgenden analysiert. Die zugrundeliegenden Szenarioannahmen zum Verhältnis zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur sind in Abbildung 4.28 für Pkw dargestellt und für alle weiteren Straßenverkehrsmittel in Tabelle D.16 und Tabelle D.17 in Anhang D zusammengefasst.

Der in Sektion 7.1.1 aufgezeigte Markthochlauf von Plug-In Fahrzeugen im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich macht den in Abbildung 7.15 veranschaulichten Ausbau der elektrischen Ladeinfrastruktur erforderlich.

Infolge des großen Pkw-Bestands und der im Vergleich zu ausschließlich flüssig oder gasförmig betankten Fahrzeugen geringen Anzahl von Plug-In Fahrzeugen je Versorgungspunkt wird eine verglichen mit der heutigen Zahl der Tankstellen (Zapfsäulen) deutlich größere Anzahl von Ladepunkten benötigt. Insgesamt steigt der Bedarf auf 24 Millionen Ladepunkte bis zum Jahr 2040 an. Das anschließende leichte Absinken der erforderlichen Ladeinfrastruktur resultiert aus der Sättigung des batterieelektrischen Fahrzeugbestands. Da bei geringer Marktdurchdringung mehr Ladepunkte je Fahrzeug erforderlich sind (vgl. Sektion 4.2.4), werden bereits 2030 mehr als 15 Millionen Ladepunkte benötigt. Davon entfallen 1 Millionen Ladepunkte auf den öffentlichen Bereich. Dies entspricht dem von der Bundesregierung ausgegebenen Ziel zum Aufbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur [63].

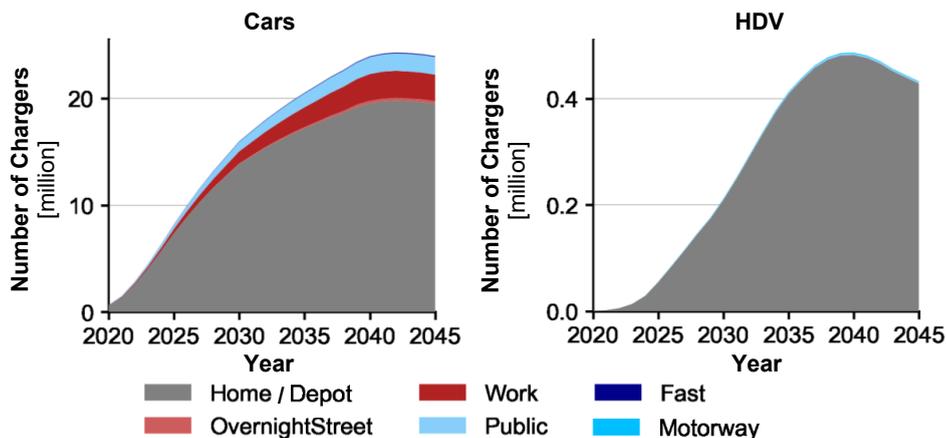


Abbildung 7.15: Ausbau der Ladeinfrastruktur für Pkw (links) und Nutzfahrzeuge (HDV) (rechts) unterteilt nach Art des Ladepunktes im Zeitraum von 2020 bis 2045.

Im Jahr 2020 sind mehr als 90 % der Ladepunkte im privaten Bereich verortet. Wenngleich der Anteil der Heimplader auch bis 2045 mehr als 80 % der Ladepunkte im Pkw-Bereich ausmacht, so deutet die Reduktion des Verhältnisses auf den zunehmenden Einfluss der Ladepunkte an weiteren Orten hin. Ein Grund ist das steigende Verhältnis von Pkw je Ladepunkt am Heimatort infolge der zunehmenden Elektrifizierung mehrerer Fahrzeuge eines Haushalts. Zudem steigt die Anzahl von Batterie-Elektrofahrzeugen, welche gegenüber Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen verstärkt auf öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen sind. Darüber hinaus weisen die Optimierungsergebnisse zu Beginn des Betrachtungszeitraums eine Vollelektrifizierung von Pkw mit geringeren Fahrleistungen auf. Da zunehmend ebenso Pkw mit erhöhten Fahrleistungen als Batterie-Elektrofahrzeuge ausgeführt werden und deren Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur aufgrund des höheren Anteils längerer Fahrten stärker ausgeprägt ist, erfolgt eine Verstärkung der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Der Anteil der Schnelllader an der öffentlichen Ladeinfrastruktur bewegt sich während des Betrachtungszeitraums zwischen 4 % und 7 %. Dies entspricht mehr als 76.000 Schnellladern im Jahr 2045. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass dies auf die Szenarioannahmen zurückzuführen ist. Ein höherer Anteil der Schnellladeinfrastruktur zur Steigerung des Komforts ist denkbar und wird in der Literatur diskutiert [64]. Ebenso wird innerhalb des Szenarios ein steigender Anteil der Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz angenommen, woraus ab 2037 mehr als 2 Millionen Ladepunkte an Arbeitsstätten resultieren. Nur etwa 1 % der Ladestationen sind sogenannte Laternenlader, welche folglich von untergeordneter Bedeutung sind. Fahrzeuge ohne privaten Stellplatz nutzen stattdessen Langsam- und Schnelllader an anderen öffentlichen Orten sowie an der Arbeitsstätte.

Neben dem Aufbau einer Ladeinfrastruktur für die Pkw-Flotte ist diese ebenso im Nutzfahrzeugsbereich infolge der Elektrifizierung notwendig. Insbesondere bei schwereren Fahrzeugen werden dabei Ladepunkte mit höheren Ladeleistungen erforderlich, um eine ausreichende Ladegeschwindigkeit der größeren Batteriekapazitäten sicherzustellen. Der im Vergleich zu Pkw kleinere Nutzfahrzeugbestand hat zur Folge, dass die Anzahl der Ladepunkte mit maximal 480.000 Ladepunkten um ein Vielfaches geringer ausfällt. Aufgrund

der zunehmenden Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen wird das Maximum 2040 erreicht und fällt anschließend ab. Ein weiterer Unterschied zur Ladeinfrastruktur von Pkw ist der geringere Anteil der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Insbesondere im Kurz- und Mittelstreckenverkehr ist eine hohe Abdeckung der täglichen Fahrleistungen mittels einer Batterieladung möglich. Somit ist in diesem Bereich der im Depot angenommene Ladepunkt je Fahrzeug für nahezu alle Fahrten ausreichend. Da im Fernverkehr weniger Batterie-Elektrofahrzeuge und stattdessen verstärkt Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge eingesetzt werden, werden insgesamt nur 4.500 öffentliche Ladepunkte für Nutzfahrzeuge benötigt. Dies entspricht 1 % der gesamten Ladepunkte. Der Ladeinfrastrukturbedarf von Bussen entwickelt sich vergleichbar zu dem der Straßengüterfahrzeuge (vgl. Abbildung G.13). Jedoch erfolgt ab 2040 keine Abschwung, sondern es bildet sich vergleichbar zum Pkw-Ladeinfrastrukturbedarf ein Plateau infolge der Sättigung des batterieelektrischen Fahrzeugbestands. Der noch kleinere Fahrzeugbestand als der von Nutzfahrzeugen führt dazu, dass für Busse lediglich ca. 40.000 Ladepunkte in den Depots errichtet werden müssen.

Der zeitliche Verlauf des elektrischen Ladens ist ein weiterer relevanter Indikator für die Anforderungen an den Energiesektor, welche sich aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors ergeben. Auf Basis der Nachfrageprofile ist bekannt, zu welchen Zeiten die Fahrzeuge an welchen Orten sind und somit gegebenenfalls ein Laden der elektrischen Fahrzeuge möglich ist (vgl. Sektion 4.2.4). Abbildung 7.16 zeigt die berechneten kumulierten Ladezeitreihen von Pkw für die Jahre 2022 und 2045.

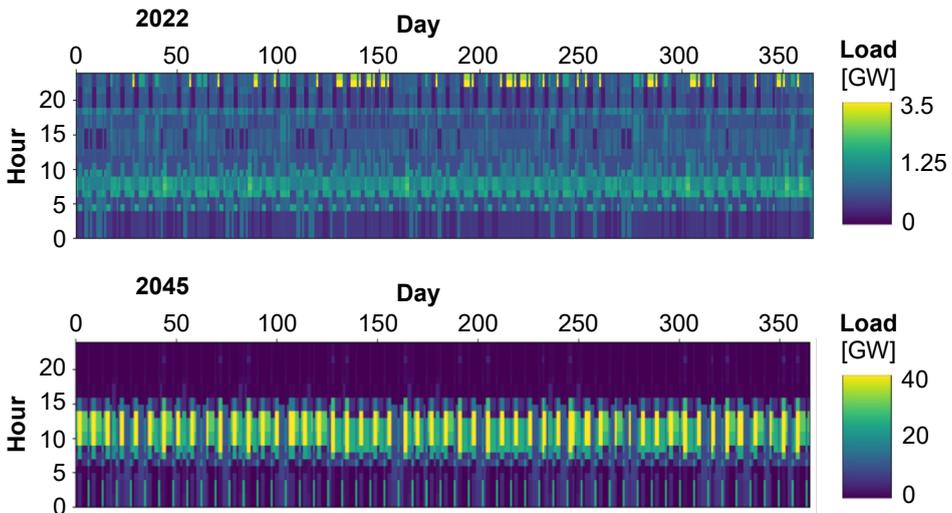


Abbildung 7.16: Kumuliertes Stromnachfrageprofil elektrifizierter Pkw im Jahr 2022 (oben) und 2045 (unten).

Darin wird ersichtlich, wie der Wandel der Stromerzeugungstechnologien Einfluss auf die Ladezeitreihe nimmt. Im Jahr 2022 werden batterieelektrische Pkw vor allem morgens zwischen 6 und 8 Uhr sowie abends ab 18 Uhr geladen. Demgegenüber verschiebt sich das Laden der Pkw im Jahr 2045 insbesondere auf die sonnenreichen Stunden zwischen 8 und 16 Uhr. Zu diesen Zeiten steht ein Großteil der Pkw entweder an der Arbeitsstätte oder zuhause und kann folglich an einen Ladepunkt angeschlossen werden. Zudem führt die

hohe solare Einstrahlung zu dieser Tageszeit zu einer hohen Produktion von grünem Photovoltaikstrom. Weitere Stromverbraucher im Gebäude- und Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor weisen in diesen Stunden jedoch geringe Lasten auf, sodass ein Potential zur Nutzung des überschüssigen Photovoltaikstroms zum Laden der Batteriefahrzeuge besteht. Dieser Zusammenhang hebt den Nutzen des Ausbaus der Ladeinfrastruktur an Arbeitsstätten hervor, da zwischen 8 und 16 Uhr montags bis freitags durchschnittlich 20 % der Pkw an diesem Ort stehen [110]. In Sektion 7.3.4 wird eine tieferegehende Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Ladeinfrastruktur an der Arbeitsstätte durchgeführt.

Des Weiteren zeigt ein Vergleich der beiden Diagramme die steigende Spitzenlast des elektrischen Ladens als Folge der zunehmenden Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge auf. Im Jahr 2045 beträgt die berechnete Spitzenlast mit fast 40 GW ein Vielfaches dessen, was heutzutage erreicht wird. Diese hohe Volatilität der Last deutet ebenso auf die zukünftig höheren Erzeugungsspitzen aufgrund des zunehmenden Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien hin, welche durch intelligentes Lademanagement direkt genutzt werden können, anstatt diese abzuregeln.

Unter anderem die beschriebene zeitliche Ausprägung des elektrischen Ladens führt zu einer ortsabhängigen Nutzung der Ladeinfrastruktur. Daher entspricht der Anteil der Ladestationen an der geladenen elektrischen Energie nicht dem Verhältnis der Ladepunkte, wie in Abbildung 7.17 visualisiert.

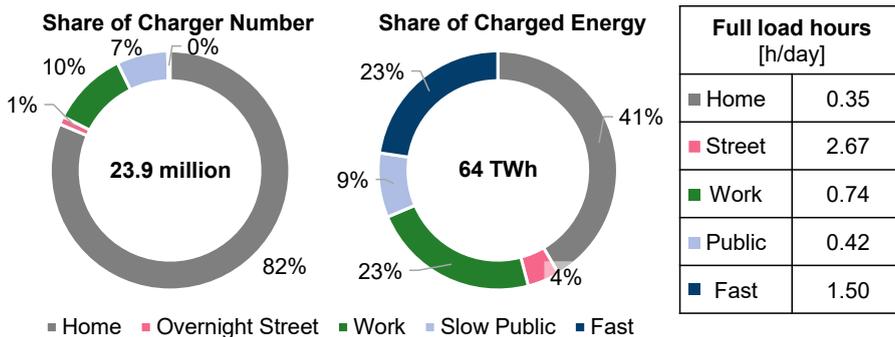


Abbildung 7.17: Anteil der Ladepunktarten elektrifizierter Pkw an der Anzahl der Ladepunkte (rechts) und der geladenen Energie (rechts) im Jahr 2045.

Allen voran der energetische Anteil der Heimladungen weicht mit 41 % deutlich von den 82 % in Bezug auf die Anzahl der Ladepunkte im Jahr 2045 ab. Heimlader weisen mit 125 Volllaststunden im Jahr (0,34 h/d) insgesamt die geringste Auslastung auf. Hierbei ist anzumerken, dass die Volllaststunden der Heimlader bei gleicher Ladeleistung über den Betrachtungszeitraum abnehmen, da der Energiebedarf der Fahrzeuge sinkt. Die Auslastung von Übernachtladern ist fast acht Mal so hoch und damit am höchsten unter den abgebildeten Ladepunktarten. Trotz der, verglichen mit den anderen Ladepunktarten, deutlich geringeren Anzahl der Schnellladepunkte wird hier mehr als ein Fünftel der elektrischen Energie von batterieelektrischen Pkw nachgefragt. Dies resultiert zum einen aus der höheren Ladeleistung dieser Ladepunkte. Zum anderen haben Schnelllader mit 1,5 Volllaststunden pro Tag eine höhere Auslastung als öffentliche Langsam-lader (0,4 h pro Tag).

Da Wasserstofftankstellen einen höheren Energiefluss im Vergleich zur elektrischen Ladeinfrastruktur bereitstellen, kann eine Tankstelle mehr Fahrzeuge bedienen als ein elektrischer Ladepunkt. Somit ist die Anzahl der benötigten Wasserstofftankstellen deutlich geringer als die der Ladepunkte. Abbildung 7.18 zeigt den im Betrachtungszeitraum wachsenden Bedarf an Wasserstofftankstellen für den Straßenverkehr, welcher aus der zunehmenden Marktdurchdringung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen resultiert. Insgesamt werden bis 2045 mehr als 9.400 Wasserstofftankstellen zur Versorgung des Straßenverkehrs benötigt. Auf den Pkw-Bereich entfallen davon fast 6.400 Tankstellen, was unterhalb der heutigen Tankstellenanzahl für Flüssigkraftstoffe (ca. 14.000 in 2021 [49]) liegt. Da bei einer niedrigeren Marktdurchdringung mehr Tankstellen je Fahrzeug für eine flächendeckende Versorgung erforderlich sind, müssen bis 2030 bereits fast 40 % der Tankstellen errichtet sein. Diese sind allerdings zu Beginn mit einer niedrigeren Kapazität und Dispenseranzahl ausgestattet. Ab 2032 steigt der Bedarf an Wasserstofftankstellen im Pkw-Bereich erneut stärker an, da zu diesem Zeitpunkt der Markthochlauf von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen beginnt. Zuvor bestimmen vor allem Range-Extender-Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle die Nachfrage. Da bei diesen lediglich ein Teil der Energienachfrage auf Wasserstoff entfällt, ist der Bedarf an Wasserstofftankstellen je Fahrzeug geringer als bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen.

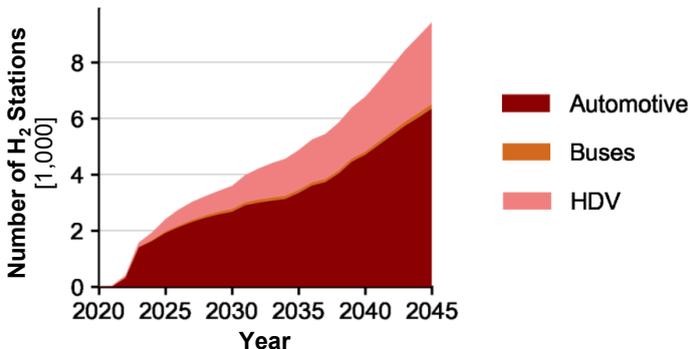


Abbildung 7.18: Ausbau der Wasserstofftankstellen unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045. HDV: Nutzfahrzeuge.

Im Nutzfahrzeugbereich werden bis 2030 mehr als 800 Wasserstofftankstellen benötigt. Vergleichbar zum Pkw-Bereich zieht die Nachfrage aufgrund des Hochlaufs von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bei Sattelzugmaschinen ab 2032 stark an. Bis 2045 werden ca. 3.000 Wasserstofftankstellen für Nutzfahrzeuge in Deutschland erforderlich. Aufgrund der niedrigeren Marktdurchdringung von brennstoffzellenelektrischen Nahverkehrsbussen und der insgesamt kleineren Fahrzeuganzahl verglichen mit dem Pkw- und Nutzfahrzeugbestand fällt der Bedarf an erforderlichen Wasserstofftankstellen für Busse deutlich niedriger aus. Weniger als 2 % der zukünftigen Wasserstofftankstellen werden für die Versorgung von Nahverkehrsbussen genutzt. Zur Erzeugung von Synergien bei Wasserstofftankstellen der betrachteten Verkehrsmittel werden in der Literatur Hybridtankstellen diskutiert, welche die Betankung verschiedener Fahrzeugklassen leisten können [57]. Solche Hybridtankstellen können die erforderliche Tankstellenanzahl reduzieren und deren spezifische Kosten senken, werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Zusammengefasst verdeutlicht die Analyse der Lade- und Tankstelleninfrastruktur den steigenden Bedarf, welcher durch den Markthochlauf der elektrifizierten Antriebe im Straßenverkehr getrieben ist. Unter heutigen Randbedingungen ist der geschilderte Ausbau der Versorgungsinfrastruktur für eine zunehmende Elektrifizierung des Fahrzeugbestands erforderlich. Zudem unterstreichen die Ergebnisse, dass die Anzahl der notwendigen elektrischen Ladepunkte die der Wasserstofftankstellen um ein Vielfaches übersteigt. Das Verhältnis beträgt hierbei ca. 2.500 Ladestationen zu einer Wasserstofftankstelle.

7.1.4 Herstellung der Energieträger

Der zuvor erläuterte Wandel des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor erfordert nicht nur einen Ausbau der Versorgungsinfrastruktur, sondern darüber hinaus die Erzeugung der nachgefragten Energieträger im Energiesektor in ausreichender Menge. Der Energiesektor wird ebenfalls innerhalb des Modells abgebildet (vgl. Sektion 4.2.5). Zudem wird dabei nicht nur der Endenergiebedarf des Verkehrssektors, sondern ebenfalls die energieträgerspezifische Nachfrage der weiteren Sektoren des Energiesystems einbezogen. Der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten sowie der Wasserstoffherzeugungstechnologien erfolgt in Anlehnung an die Analysen nach Stolten et al. [234]. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine tiefere Analyse dieser verzichtet und sowohl auf Anhang G als auch auf die Literatur verwiesen [234].

Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse der Kraftstoffproduktion den Einfluss des Kraftstoffwechsels im Verkehrssektor auf den Energiesektor. Zur Bereitstellung treibhausgasarmer Energieträger müssen im Energiesektor insbesondere erneuerbare Energien sowie Elektrolysekapazitäten ausgebaut werden. Zudem muss der Import von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen zur Deckung der Nachfrage im Verkehrssektor und den weiteren Sektoren sichergestellt werden. Da die Elektrifizierung der Verkehrsmittel die entstehenden Treibhausgasemissionen vom Tank-to-Wheel zum Well-to-Wheel-Bereich in den Energiesektor verschiebt, hängt der resultierende Effekt auf die Gesamtemissionen des Energiesystems maßgeblich vom Ausbau der erneuerbaren Energien und der Erzeugung grünen Wasserstoffs ab.

7.1.5 Primärenergiebedarf

Zur Erzeugung der Sekundärenergieträger, wie in der vorigen Sektion beschrieben, wird Primärenergie benötigt. Der Bedarf stellt ebenfalls eine grundlegende Eigenschaft des Energiesystems dar, weshalb die Entwicklung des Primärenergiebedarfs im Zuge der Transformation des Energiesystems inklusive des Verkehrssektors im Folgenden analysiert wird. Darüber hinaus hebt dieser die modellendogene Betrachtung der Sektorenkopplung und insbesondere die Berücksichtigung der Nutzungskonkurrenz hinsichtlich begrenzter Potentiale hervor.

In Abbildung 7.19 ist die berechnete Nachfrage im Betrachtungszeitraum aufgeschlüsselt nach Primärenergieträger visualisiert. Da der Endenergiebedarf infolge der Elektrifizierung und Effizienzmaßnahmen sowohl im Verkehrssektor als auch in den weiteren Sektoren sinkt, ist für den Primärenergiebedarf des gesamten Energiesystems ebenfalls ein Abwärtstrend zu erkennen. Bis 2045 wird eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um fast 40 % erzielt. Neben dem rückläufigen Gesamttrend werden zwei grundlegende Veränderungen

hinsichtlich des Primärenergiebedarfs mittels der dargestellten Linien im Diagramm verdeutlicht.

Erstens steigt der Anteil von erneuerbaren Energien über den Betrachtungszeitraum von unter 20 % im Jahr 2020 auf nahezu 100 % im Jahr 2045 an. Die Differenz zur ausschließlichen Nutzung erneuerbarer Energien entsteht aufgrund des berücksichtigten nicht-energetischen Einsatzes von Rohöl und Erdgas im Industriesektor. Vor allem der Ausbau der Windenergie und Photovoltaik führt zu einem Wachstum der erneuerbaren Energien. Hinzu kommt die vollständige Ausnutzung inländischer Biomassepotentiale. Diese werden jedoch weniger zur Biokraftstoffproduktion, sondern insbesondere zur Herstellung von Biogas bzw. Biokohle für den Einsatz im Industrie- und Energiesektor verwendet.

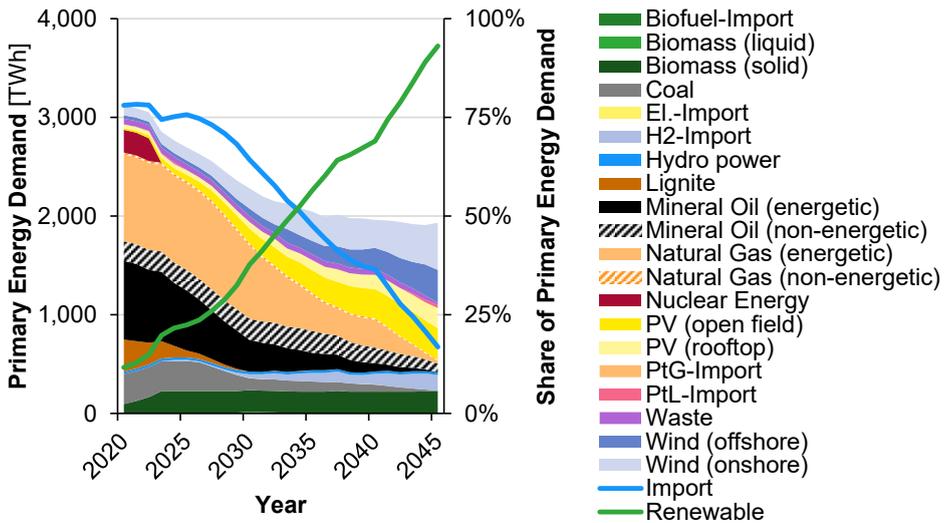


Abbildung 7.19: Primärenergiebedarf unterteilt nach Primärenergieträger sowie der Anteil des Imports und der erneuerbaren Energien von 2020 bis 2045. PV: Photovoltaik, PtG: Power-to-Gas, PtL: Power-to-Liquid.

Die Veränderung des Importanteils ist die zweite grundlegende Veränderung hinsichtlich des Primärenergiebedarfs. Infolge des zunehmenden Anteils der erneuerbaren Energien, allen voran Windenergie und Photovoltaik, und des damit einhergehenden Rückgangs fossiler Energieträger ergibt sich ein absinkender Trend des Importanteils des Primärenergiebedarfs. Insgesamt fällt der Importanteil von 78 % im Jahr 2020 auf 17 % im Jahr 2045 ab. Bis 2026 decken Importe über 75 % des Primärenergiebedarfs, bevor deren Anteil anschließend nahezu linear bis 2045 sinkt. Dies resultiert aus dem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre.

Alles in allem wird durch die Kombination von Effizienzmaßnahmen, insbesondere aufgrund der Elektrifizierung in den Nachfragesektoren, und dem Ausbau der erneuerbaren Energien zur Erzeugung treibhausgasfreier elektrischer Energie ein hinsichtlich des energetischen Bedarfs vollständig defossilisiertes Energiesystem bis 2045 erreicht. Als Teil des Gesamtenergiesystems gilt dies folglich ebenso für den Verkehrssektor.

7.1.6 Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel

Die aufgezeigte Defossilisierung des Energiesystems führt zu veränderten spezifischen Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel. Diese sind abhängig vom Verkehrsmittel sowie der genutzten Antriebsform. Im Folgenden werden die spezifischen Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel über den Betrachtungszeitraum analysiert. Dazu werden sowohl die Well-to-Tank-, als auch die Tank-to-Wheel-Emissionen einbezogen. Erstere sind insbesondere bei der Nutzung von Wasserstoff und elektrischer Energie relevant, letztere hingegen bei fossilen Flüssigkraftstoffen.

Zunächst wird der Einfluss der Antriebsart auf die spezifischen Treibhausgasemissionen untersucht. Dazu sind in Abbildung 7.20 im linken Diagramm die spezifischen Treibhausgasemissionen der relevantesten Antriebsarten eines neuen Mittelklasse-Pkw im Betrachtungszeitraum visualisiert. Für alle Antriebsarten ist ein Rückgang der spezifischen Treibhausgasemissionen zu erkennen. Dieser resultiert zum einen aus steigenden Effizienzen der Antriebe. Zum anderen führt der sinkende Einsatz fossiler Primärenergie zur Herstellung der genutzten Sekundärenergieträger zu reduzierten Treibhausgasemissionen. Die Schwankungen der veranschaulichten Emissionen entstehen infolge eines schwankenden Anteils defossilisierter Primärenergieträger am verwendeten Sekundärenergieträger. Der Einsatz von biobasierten und synthetischen Flüssigkraftstoffen unterliegt innerhalb des Betrachtungszeitraums Fluktuationen (vgl. Sektion 7.1.2). Im Fall von wasserstoffbasierten Antrieben werden insbesondere bis 2026 größere Ausschläge der ausgewiesenen spezifischen Emissionen erkennbar. Diese resultieren aus der insgesamt niedrigen Wasserstoffnachfrage zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Geringe absolute Veränderungen seitens der Wasserstoffproduktionsrouten haben daher größere relative Veränderungen zur Folge, welche die spezifischen durchschnittlichen Treibhausgasemissionen des Wasserstoffs beeinflussen. Aufgrund der vollständigen Herstellung defossilisierter Energieträger sinken die spezifischen Treibhausgasemissionen aller gezeigten Antriebsarten bis 2044 auf $0 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{km}$. Zuvor ist über den gesamten Betrachtungszeitraum der positive Einfluss der Elektrifizierung auf die spezifischen Treibhausgasemissionen deutlich festzustellen. Dabei gilt, dass die Treibhausgasemissionen mit steigendem Elektrifizierungsgrad stärker abnehmen. Bereits der Strommix im Jahr 2020 führt dazu, dass Batterie-Elektrofahrzeuge eine Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen um fast 75 % gegenüber Verbrennungsmotorfahrzeugen erzielen. Die spezifischen Emissionen eines Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugs erreichen trotz des höheren Energiebedarfs im Vergleich zu Batterie-Elektrofahrzeugen bereits vor 2025 das gleiche Emissionsniveau wie Batterie-Elektrofahrzeuge, da die Well-to-Tank-Emissionen der Wasserstoffherstellung geringer ausfallen. Zu den spezifischen Emissionen von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen sei angemerkt, dass diese grundlegend vom Anteil des elektrischen Fahrens beeinflusst werden. Die ausgewiesenen Emissionen ergeben sich aus der modellseitigen Annahme, welche einem durchschnittlichen elektrischen Fahranteil von 60 % entspricht.

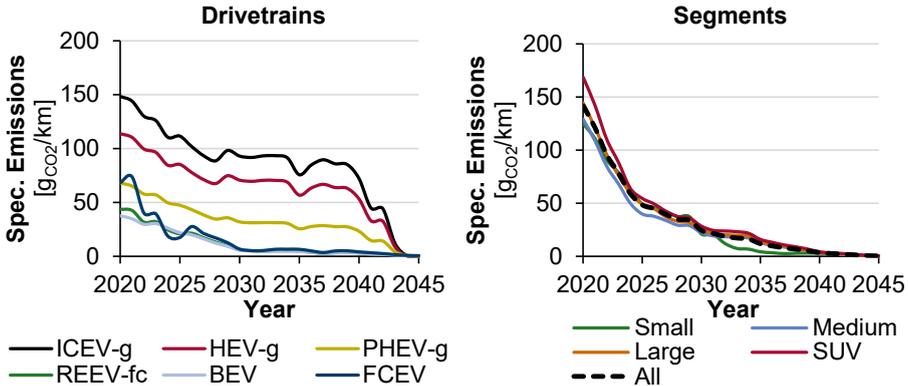


Abbildung 7.20: Fahrleistungsspezifische Emissionen neu zugelassener Pkw unterteilt nach Antriebsart (links) und Segment (rechts) von 2020 bis 2045. Verschiedene Pkw-Segmente (links) bzw. Antriebsoptionen (rechts) sind gemäß ihren endogen berechneten Anteilen gewichtet. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Neben dem Antriebsstrang ist das Pkw-Segment ein weiterer Einflussfaktor der spezifischen Treibhausgasemissionen, da der Energiebedarf in Abhängigkeit der Fahrzeugeigenschaften variiert. Der Vergleich der segmentabhängigen Emissionen der endogen berechneten Neufahrzeugflotte im rechten Diagramm der Abbildung 7.20 zeigt den positiven Einfluss der in Sektion 7.1.1 erläuterten zunehmenden Elektrifizierung der Pkw-Neuzulassungen. Aufgrund der starken Elektrifizierung sinken die Emissionen von neu zugelassenen Pkw bereits bis 2030 auf durchschnittlich unter 25 g_{CO2}/km und somit um mehr als 80 % gegenüber 2020. Des Weiteren weist das Diagramm bis 2030 eine höhere Minderung der Emissionen von Mittelklasse-Pkw gegenüber Kleinwagen auf. Anschließend sinken die Emissionen der Kleinwagen stärker als die der anderen Segmente. Dies unterstreicht, dass die Emissionsentwicklung mehr vom Elektrifizierungsgrad der Neufahrzeugflotte als von der Fahrzeuggröße abhängt. Bis 2030 steigt der endogen berechnete Anteil von elektrifizierten Fahrzeugen bei Mittelklasse-Pkw und SUV stärker als bei Kleinwagen. Nachfolgend übersteigt der Anteil der vollelektrifizierten Antriebe bei kleinen Pkw den der anderen Segmente, bei denen bis 2040 ein Teil der Neufahrzeuge als Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge ausgeführt wird.

Vergleichbar zum energetischen und ökonomischen Vergleich in Abschnitt 6.4 wird nachstehend ein intermodaler Vergleich der spezifischen Emissionen im Personen- und Güterverkehr auf Basis der berechneten Entwicklung der Verkehrsmittelflotte durchgeführt. Dazu sind in Abbildung 7.21 die verkehrsleistungsspezifischen Emissionen der Neufahrzeugflotte und des Verkehrsmittelbestands im Personenverkehr visualisiert. Dabei werden die durchschnittlichen Auslastungen der Verkehrsmittel in Deutschland im Jahr 2019 zugrunde gelegt. Beide Diagramme weisen zu Beginn einen Nachteil des straßengebundenen Verkehrs gegenüber dem Schienenverkehr auf. Der vollelektrifizierte urbane und der Langstreckenschienenverkehr führt zu den geringsten Treibhausgasemissionen. Die höchsten spezifischen Emissionen entstehen durch Pkw. Die Elektrifizierung der Pkw-Neufahrzeuge bis 2025 hat zur Folge, dass deren Emissionen das Niveau der Busneuzulassungen erreichen.

Anschließend vergrößert sich der Abstand jedoch wieder, da bei Bussen ein höherer Anteil vollelektrischer Neufahrzeuge und nicht wie bei Pkw ebenso Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge genutzt werden. Im Schienenverkehr führt die Elektrifizierung der neuen Züge ebenfalls zu sinkenden spezifischen Emissionen.

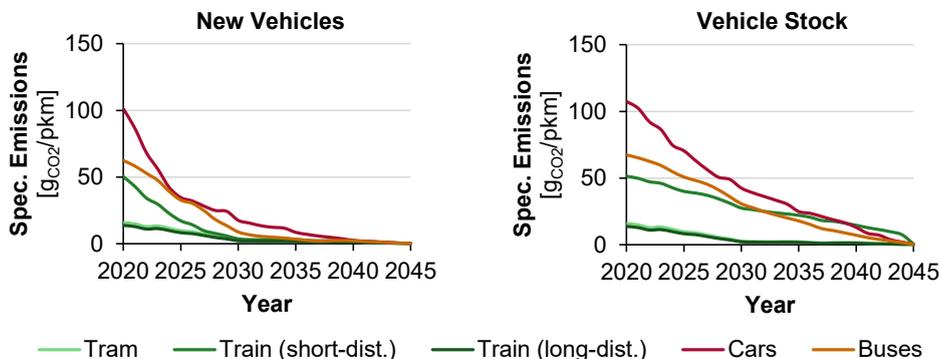


Abbildung 7.21: Verkehrsleistungsspezifische Emissionen neuer Verkehrsmittel (links) und des Bestands (rechts) im Personenverkehr. Verschiedene Antriebsoptionen sind gemäß ihren endogenen berechneten Anteilen gewichtet.

Da die Lebensdauer von Pkw und Bussen jedoch kürzer als die der Züge ist, fallen die spezifischen Emissionen des straßengebundenen Verkehrsmittelbestands stärker als die der Züge, wie im rechten Diagramm zu erkennen. Insbesondere im Schienennahverkehr erfolgt die Flottenumstellung auf elektrifizierte Antriebe langsamer als bei Bussen und Pkw. Daher unterschreiten die durchschnittlichen spezifischen Emissionen von Bussen und Pkw ab 2032 bzw. 2040 die der Nahverkehrszüge. Gegenüber elektrifizierten Zügen bleibt der Nachteil hingegen über den gesamten Betrachtungszeitraum bestehen.

Im Güterverkehr zeigen die Ergebnisse ein vergleichbares Verhältnis zwischen dem Straßen- und Schienenverkehr auf (vgl. Abbildung G.14). Aufgrund einer kleineren Kapazität weisen leichte Nutzfahrzeuge die höchsten spezifischen Emissionen im Güterverkehr auf. Da der Anteil elektrifizierter Antriebe an den Neuzulassungen in diesem Bereich bis 2030 stark ansteigt, sinken die spezifischen Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge auf das Niveau von schweren Nutzfahrzeugen. Die Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Diese übersteigen die der betrachteten Verkehrsmittel im gesamten Betrachtungszeitraum deutlich. Vor allem Kurzstreckenflüge sind mit hohen spezifischen Emissionen verbunden. Da die Defossilisierung des Flugverkehrs maßgeblich durch den wachsenden Anteil synthetischen Kerosins erfolgt, ist die Emissionsreduktion weniger von der Lebensdauer der Flugzeuge abhängig. Zudem erfolgt die Senkung der Emissionen des nationalen Flugverkehrs erst ab 2040 und somit später als bei den diskutierten Verkehrsmitteln.

Die durchgeführten Analysen der Treibhausgasemissionen verdeutlichen erneut die hohe Bedeutung der Elektrifizierungsgeschwindigkeit und damit insbesondere den negativen Einfluss langer Lebensdauern auf die Flottenumstellung.

7.1.7 Systemkosten

Die Kosten der Defossilisierung des Energiesystems sind ein bedeutsamer Faktor der Umsetzbarkeit der Transformation. Daher werden im Folgenden die endogen berechneten Kosten der Transformation analysiert. Es sei angemerkt, dass modellseitig die annualisierten Kosten berücksichtigt werden. Diese sind in Abbildung 7.22 für den Betrachtungszeitraum ausgewiesen. Darin wird deutlich, dass mit 50 % der Großteil der Kosten auf die Verkehrsmittel entfällt. Des Weiteren veranschaulicht das Diagramm, dass die Transformation des Energiesystems zur Erreichung der Klimaschutzziele mit Mehrkosten gegenüber dem heutigen Energiesystem verbunden ist. Bereits bis 2030 wachsen die jährlichen Kosten um mehr als 20 % gegenüber 2020 an. Das vollständig defossilisierte System im Jahr 2045 führt zu Mehrkosten von fast 93 Milliarden Euro, was einer Erhöhung um 31 % entspricht.

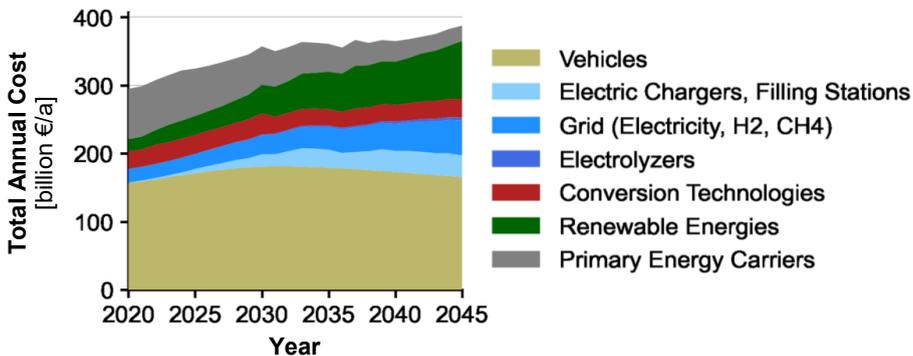


Abbildung 7.22: Annualisierte Gesamtkosten unterteilt nach Komponenten des betrachteten Energiesystems von 2020 bis 2045.

Der Kostenanstieg resultiert aus mehreren Effekten. Der Wechsel von fossilen Primärenergieträgern auf erneuerbare Energien führt zu Mehrkosten. Insbesondere die erforderliche Kapazitätssteigerung der Windenergie und Photovoltaik ist höher als die Einsparungen seitens der Primärenergieträger. Zudem erfordert der zunehmende Strombedarf sowie der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur Investitionen in die Netzinfrastruktur, welche die Transportkosten von fossilen Flüssigkraftstoffen und Erdgas im heutigen Energiesystem übersteigen. Im Jahr 2045 sind die Netzkosten mit über 50 Milliarden Euro mehr als doppelt so hoch wie im Jahr 2020. Des Weiteren betragen die Kosten des Lade- und Tankstellennetzausbaus im Jahr 2045 mehr als 30 Milliarden Euro. Zwar nehmen ebenso die Elektrolyseurkosten über den Betrachtungszeitraum zu, jedoch bleibt deren Anteil am Gesamtsystem mit maximal 1,2 % von untergeordneter Bedeutung.

Die Kosten der Verkehrsmittel wachsen zunächst bis 2031. Dies resultiert zum einen aus den höheren Herstellungskosten elektrifizierter Verkehrsmittel im Vergleich zum konventionellen Antrieb. Zum anderen wächst der Pkw-Bestand bis 2029 (vgl. Sektion 7.1.1). Anschließend sinken die Kosten der Verkehrsmittel kontinuierlich bis 2045 infolge der Pkw-Bestandsreduktion und der Kostendegression elektrifizierter Antriebe. Dennoch liegen die Kosten der Verkehrsmittel im Jahr 2045 mit 6 % geringfügig über denen zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Unter Einbezug der erforderlichen Lade- und Tankstelleninfrastruktur fällt der Kostenanstieg mit mehr als 25 % sogar signifikant aus.

Der hohe Anteil der Kosten, welche in Bezug zum Verkehrssektor stehen, unterstreicht die große Bedeutung des Verkehrssektors innerhalb des gesamten Energiesystems. So führt die zunehmende Elektrifizierung der Verkehrsmittel sowie der sich daraus ergebende steigende Bedarf an defossilisierten Kraftstoffen nicht nur zu einem Wandel im Verkehrssektor selbst, sondern verändert ebenso die Anforderungen an den Energiesektor inklusive der notwendigen Versorgungsinfrastruktur.

7.2 Vergleich der Szenarien

Zum Aufspannen eines Szenario-raumes, welcher verschiedene potenzielle sozio- und techno-ökonomische Entwicklungen im Verkehrssektor beinhaltet, werden im Rahmen dieser Arbeit die sechs in Abschnitt 5.2 eingeführten Szenarien analysiert. Der Fokus wird in den Untersuchungen auf das Jahr 2045 gelegt, da dies das Zieljahr des zeitlichen Betrachtungshorizontes ist und die vollständige Entwicklung der Auswirkungen der Szenarioannahmen beinhaltet. An geeigneten Stellen wird darüber hinaus der zeitliche Verlauf betrachtet, um mögliche abweichende Entwicklungen innerhalb des Betrachtungszeitraums darzustellen. Vergleichbar zu den Analysen des Basisszenarios im vorigen Abschnitt werden die Ergebnisse des Verkehrsmittelbestands, des Endenergiebedarfs sowie weiterer den Energiesektor betreffenden Größen erläutert.

7.2.1 Verkehrsmittel

Die Analyse der Verkehrsmittel wird nach den verschiedenen Verkehrsarten gegliedert. Dies umfasst den Personen- und den Güterverkehr sowie den Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und Luftverkehr.

Pkw

Die beiden sozio-ökonomischen Szenarien *StatusQuo* und *Progressive* beinhalten abweichende Annahmen zur Entwicklung des modalen Splits sowie der segmentspezifischen Zusammensetzung der Pkw-Flotte. Der stärkere modale Shift vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr auf der Straße und Schiene im Szenario *Progressive* führt zu dem in Abbildung 7.23 visualisierten geringeren Pkw-Bestand im Jahr 2045.

Der Pkw-Bestand besteht im Jahr 2045 aus 42,9 Millionen Fahrzeugen und ist somit um 2,7 Millionen Fahrzeuge kleiner als der des Szenarios *StatusQuo*. Das Schrumpfen des Fahrzeugbestands beginnt im Szenario *Progressive* bereits ab 2024 und somit fünf Jahre früher als im Szenario *StatusQuo*. Der Vergleich der beiden Szenarien *StatusQuo-Ref* und *Progressive-Ref* zeigt, dass die veränderten sozio-ökonomischen Annahmen hinsichtlich der Verkehrsnachfrage eine geringere Marktdurchdringung der beiden wasserstoffbetriebenen Antriebsalternativen (REEV-fc und FCEV) aufweisen. Dies resultiert aus dem verspäteten Markthochlauf der beiden Antriebsoptionen gegenüber Batterie-Elektrofahrzeugen. Da die Neuzulassungen im Szenario *Progressive* über den Betrachtungszeitraum von fast 3,7 Millionen Pkw im Jahr 2020 auf 3,0 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2045 zurückgehen, sinkt der Einfluss später zugelassener Fahrzeuge. Darüber hinaus schrumpft der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen im Jahr 2045 von 29 % auf 23 %. Dieser verringerte Neuzulassungsanteil ist durch den kleineren Anteil größerer Fahrzeuge begründet, welche überdurchschnittlich oft als Brennstoffzellen- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge ausgeführt sind.

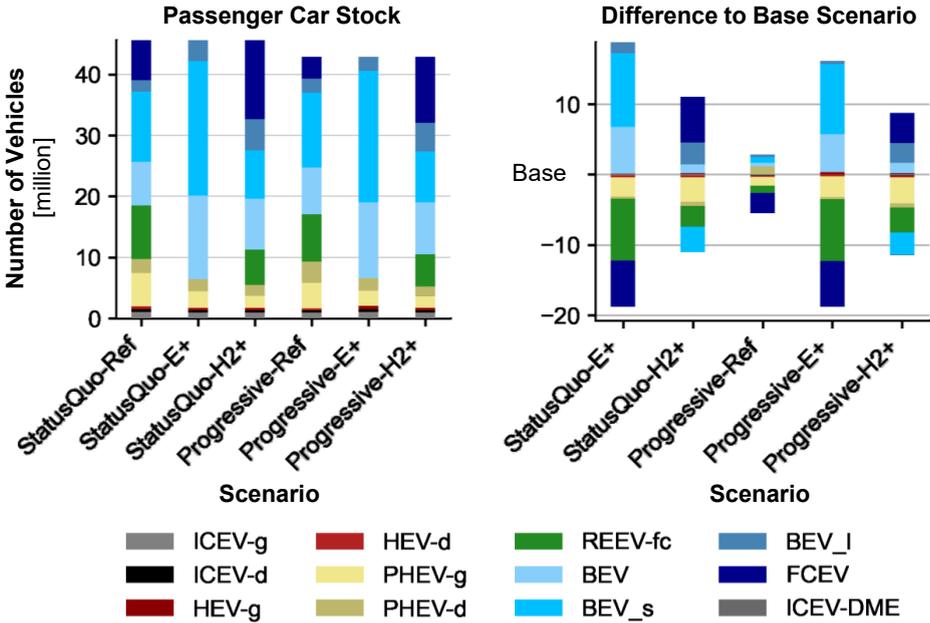


Abbildung 7.23: Antriebspezifischer Pkw-Bestand im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

Die techno-ökonomischen Szenarien beeinflussen die antriebspezifische Zusammensetzung des Pkw-Bestands stärker als die veränderte Verkehrsnachfrage, wie im rechten Diagramm der Abbildung 7.23 zu erkennen. Da im Szenario *E+* keine Wasserstoffnutzung im Straßenverkehr zugelassen wird, wird dessen Anteil durch Batterie-Elektrofahrzeuge ersetzt. Zudem werden mehr Batterie- anstatt Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge eingesetzt. Dies folgt zum einen aus einer verstärkten Kostendegression der Batterietechnologie und zum anderen aus der reduzierten Energiebedarfsentwicklung von Batterie-Elektrofahrzeugen gegenüber dem Szenario *Reference*. Des Weiteren haben die geringeren Anforderungen der Nutzer an die Reichweite der Fahrzeuge im Szenario *E+* zur Folge, dass vor allem die kleinere und mittlere Batterievariante zunimmt. Demgegenüber sinkt der Anteil der kleinen Batterieoption im Szenario *H₂+* aufgrund des entgegengesetzt angenommenen Trends der Anforderungen. Daraus ergeben sich im Szenario *H₂+* im Vergleich zum Szenario *Reference* größere Fahrzeugbestände, in welchen die mittlere und größere Batterie verbaut sind. Weiterhin steigt der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen infolge der verbesserten techno-ökonomischen Entwicklungen der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks. Im Gegenzug fällt jedoch nicht der Anteil der Batterie-Elektrofahrzeuge ab, sondern der von Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen. Der nahezu unveränderte batterieelektrische Fahrzeugbestand über alle Batterievarianten hinweg verdeutlicht, dass eine verbesserte Entwicklung der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge vor allem potenzielle Anwendungsfelder von hybriden Antrieben einnimmt.

Die in Abbildung 7.24 visualisierte Differenz des antriebspezifischen Pkw-Bestands im Szenario *StatusQuo-E+* und *StatusQuo-H₂+* im Vergleich zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* im zeitlichen Verlauf liefert weitere Informationen.

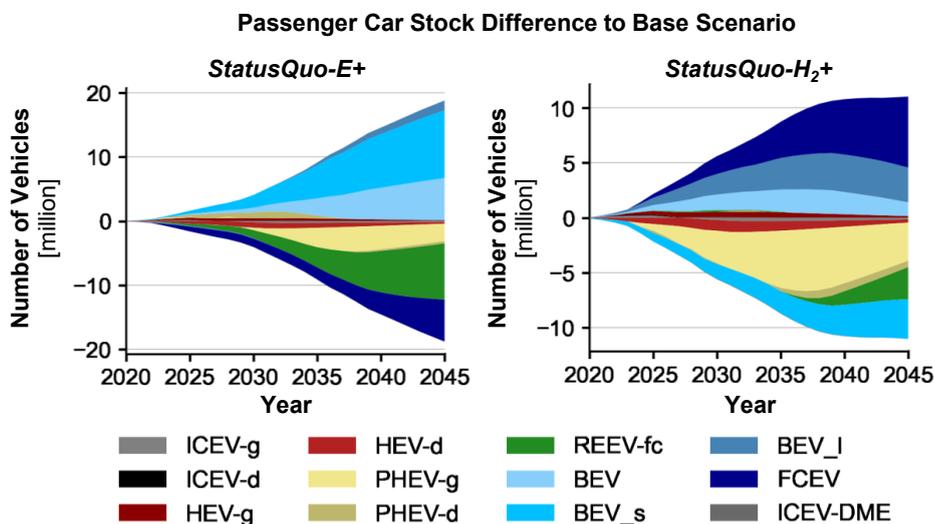


Abbildung 7.24: Antriebspezifische Differenz des Pkw-Bestands im Szenario *StatusQuo-E+* (links) und *StatusQuo-H₂+* (rechts) gegenüber dem Basisszenario *StatusQuo-Ref* von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, -s/_I: kleine/große Batteriekapazität.

Im Szenario *StatusQuo-E+* treten die Abweichungen maßgeblich nach 2030 auf, da zuvor nur ein geringer Anteil der Pkw als Range-Extender- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug ausgeführt wird. Zudem führt die verstärkte Kostendegression der Batterie zu einer kürzeren und geringeren Nutzung der Hybridantriebe als Brückentechnologie.

Dies gilt ebenso im Szenario *StatusQuo-H₂+* infolge der verbesserten Entwicklung der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks. Die geringeren Kosten und der niedrigere Energiebedarf von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen führen nicht nur zu einer höheren, sondern auch zu einer früheren Marktdurchdringung. Die Marke von zwei Millionen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Pkw-Bestand wird schon im Jahr 2028 und nicht erst im Jahr 2036 erreicht. Darüber hinaus sind im Jahr 2045 mehr als 13 Millionen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in Betrieb und somit doppelt so viele wie im Szenario *Reference*. Des Weiteren sinkt ab 2035 der Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen von 58 % auf unter 40 % im Jahr 2045, da Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ab diesem Zeitpunkt vermehrt ebenso in Anwendungsfelder vordringen, welche zuvor von Batterie-Elektrofahrzeugen bedient werden.

Nutzfahrzeuge

Die szenariobasierten antriebspezifischen Änderungen bei Sattelzugmaschinen sind insbesondere aufgrund des Verbots von Batterie-Elektrofahrzeugen im Szenario *H₂+* unterschiedlich zu den zuvor beschriebenen Entwicklungen im Pkw-Bereich. Im

Basisszenario *StatusQuo-Ref* besteht der Fahrzeugbestand im Jahr 2045 aus einem Mix der vollelektrischen Antriebsalternativen. Der im Szenario *Progressive* unterstellte modale Shift führt jedoch nicht wie bei Bussen zu einem Wachstum der Fahrzeugflotte, sondern zu einem Rückgang gegenüber dem Szenario *StatusQuo*. Ähnlich zu den erläuterten Veränderungen bei Pkw werden bei Sattelzugmaschinen ebenfalls weniger Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge infolge des verringerten Bestands eingesetzt. Entgegen den Entwicklungen bei Pkw hat die kurze Lebensdauer von Sattelzugmaschinen zur Folge, dass in allen Szenarien bis 2045 eine vollständige Elektrifizierung des Fahrzeugbestands erreicht wird.

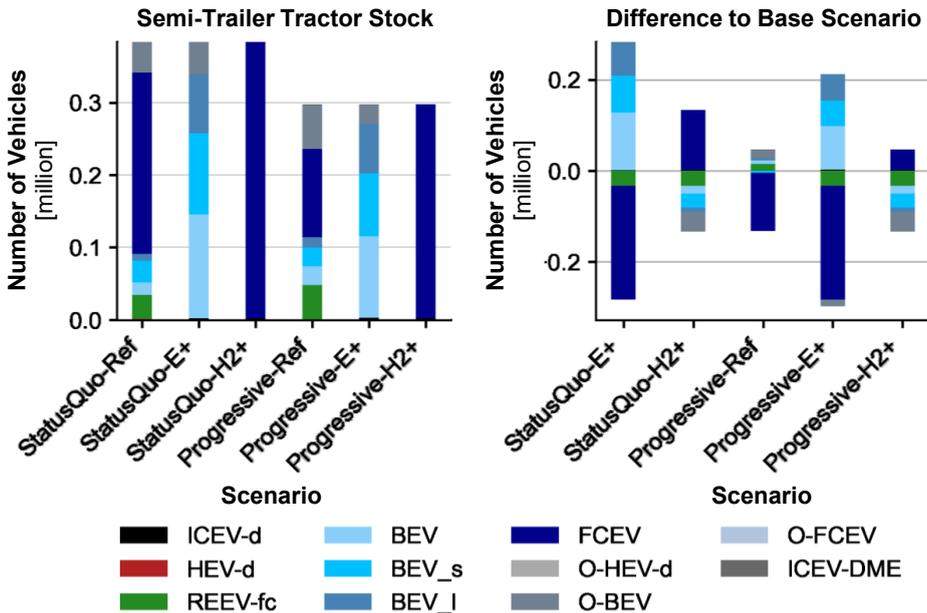


Abbildung 7.25: Antriebspezifischer Bestand von Sattelzugmaschinen im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität, O-: Oberleitungs-.

In den Szenarien *E+* und *H₂₊* ist die Nutzung von wasserstoff- bzw. strombasierten Antrieben bei schweren Nutzfahrzeugen exogen untersagt. Infolgedessen werden die strombasierten Antriebsarten im Szenario *H₂₊* vollständig durch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt. Im Szenario *E+* erfolgt der Ersatz von wasserstoffbasierten Antrieben mittels Batterie-Elektrofahrzeugen. Der Anteil von Oberleitungs-Elektrofahrzeugen nimmt im Szenario *E+* hingegen nicht zu, sondern fällt sogar kleiner aus. Dieser Effekt entsteht aufgrund der stärkeren positiven Auswirkungen der Batterieentwicklung auf Batterie-Elektrofahrzeuge infolge des Lerneffekts, welche aus der größeren Batteriekapazität im Vergleich zu Oberleitungs-Elektrofahrzeugen resultiert.

Der in Abbildung 7.26 visualisierte zeitliche Verlauf der Differenz der Neuzulassungen in den beiden techno-ökonomischen Szenarien gegenüber dem Basisszenario gibt weiteren Aufschluss über die Änderungen, welche in den Szenarien auftreten.

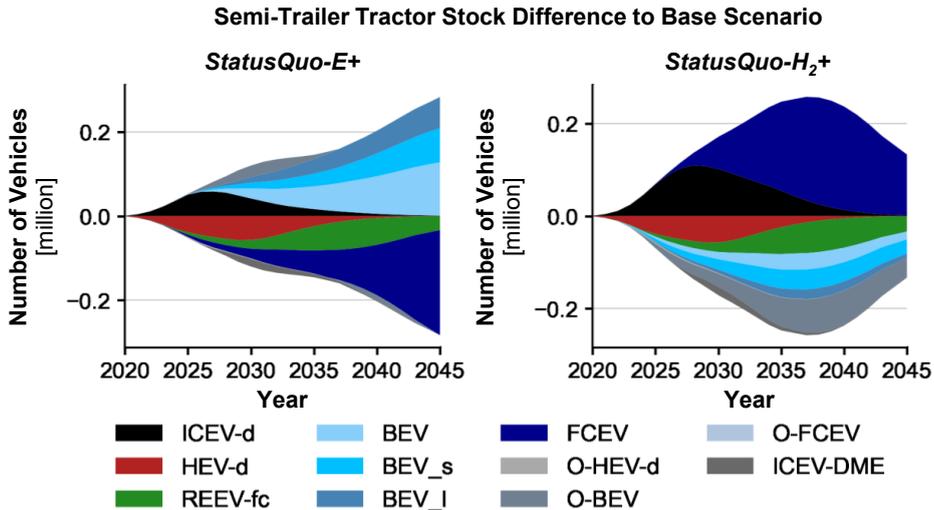


Abbildung 7.26: Antriebsspezifische Differenz des Bestands von Sattelzugmaschinen im Szenario *StatusQuo-E+* (links) und *StatusQuo-H₂+* (rechts) gegenüber dem Basisszenario *StatusQuo-Ref* von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität, O-: Oberleitungs-.

In beiden Szenarien können keine Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge genutzt werden, weshalb diese zu Beginn durch ein verzögertes Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeugen sowie später entweder durch Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt werden. Der differenzierte Verlauf der beiden Diagramme deutet auf einen wesentlichen Unterschied der Änderungen hin. Im Szenario *StatusQuo-E+* steigt die Differenz zum Basisszenario über den Betrachtungszeitraum an und ist im Jahr 2045 am größten. Demgegenüber ist die Abweichung vom Basisszenario im Szenario *StatusQuo-H₂+* im Jahr 2038 am höchsten. Die beiden Verläufe entstehen infolge der gleichen Ursache. Im Basisszenario liegt der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Jahr 2045 bei fast 85 %. Somit führt die ausschließliche Neuzulassung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Szenario *H₂+* nur zu einer moderaten Änderung gegenüber dem Basisszenario. Der Markthochlauf von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen beginnt im Szenario *H₂+* jedoch bereits früher, da die Kostenparität mit Verbrennungsmotorfahrzeugen eher erzielt wird. Daher erreichen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 bereits einen Anteil von 62 % an den Neufahrzeugen gegenüber 13 % im Basisszenario. Im Szenario *StatusQuo-E+* müssen alle im Basisszenario zugelassenen Brennstoffzellen- durch Batterie-Elektrofahrzeuge ersetzt werden. Da deren Anteil im Basisszenario über der Zeit wächst, ergibt sich folglich eine ansteigende Differenz zwischen den beiden Szenarien.

Die szenariobasierten antriebsspezifischen Änderungen bei Sattelzugmaschinen sind vergleichbar zu denen bei Bussen. Daher wird auf die Erläuterung der Szenarioergebnisse im Busbereich verzichtet.

Schienerverkehr

Da der im Szenario *Progressive* angenommene verstärkte modale Shift vor allem vom motorisierten Straßen- zum öffentlichen Verkehr erfolgt, ergibt sich im Schienenverkehr eine entgegengesetzte Entwicklung gegenüber dem Straßengüterverkehr. Sowohl die Zugverkehrsleistung als auch der Zugbestand steigen verglichen mit dem Szenario *StatusQuo* an. Die beiden techno-ökonomischen Szenarien *E+* und *H₂₊* beeinflussen lediglich den Schiennahverkehr mit Regionalbahnen (RB) und Regionalexpress (RE) sowie den Güterverkehr, da alle weiteren Schienenverkehrsarten in allen Szenarien mit Oberleitungen vollelektrifiziert angenommen werden.

Die Auswirkungen werden anhand der in Abbildung 7.27 dargestellten Veränderungen bei Regionalbahnen erläutert.

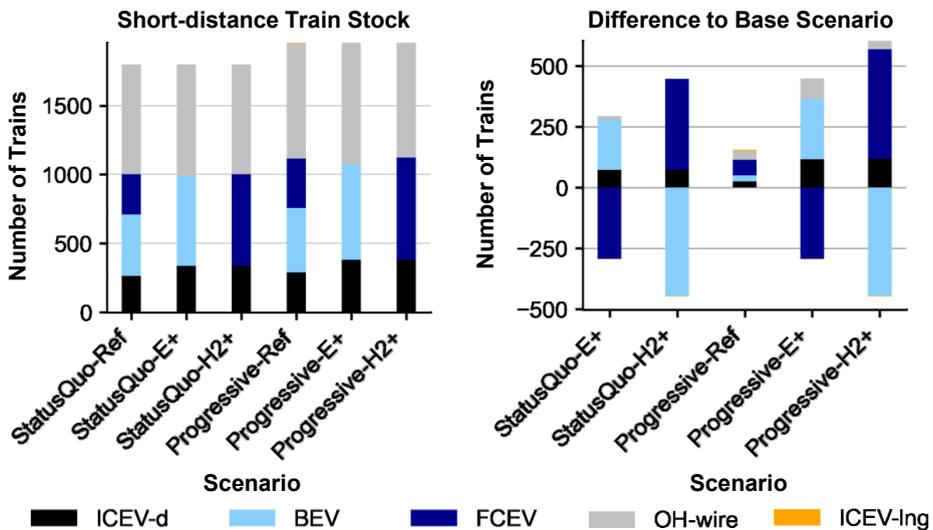


Abbildung 7.27: Antriebspezifischer Bestand von Nahverkehrszügen (RB) im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). ICEV: Verbrennungsmotorzug, BEV: Batterie-Elektrozug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrozug, OH-wire: Oberleitungszug, -d: Diesel, -Ing: Flüssigerdgas.

In allen betrachteten Szenarien sind im Jahr 2045 noch Dieselmotoren im Zugbestand, weshalb der Einsatz von synthetischem Dieselmotorkraftstoff im Zugverkehr stets zur vollständigen Defossilisierung erforderlich ist. Der Verzicht auf eine der beiden Optionen (Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrozug) hat aufgrund des modellseitig restriktiven Markthochlaufs der Antriebstechnologien zur Folge, dass gegenüber dem Basisszenario, in welchem beide Optionen zugelassen werden, ein verlangsamtes Ausphasen des Dieselantriebs auftritt. Daher ist der Anteil des Dieselantriebs im Jahr 2045 in den Szenarien *StatusQuo-E+* und *StatusQuo-H₂₊* im Vergleich zum Basisszenario um 4 % größer.

Der gesteigerte Zugverkehr bei gleichbleibenden techno-ökonomischen Annahmen (Szenario *Progressive-Ref*) wird vor allem durch einen Mix aus Oberleitungs-, Batterie- und Brennstoffzellenzügen abgedeckt. Der Zuwachs der Brennstoffzellenzüge fällt dabei geringfügig größer als bei den anderen beiden Antriebsoptionen aus. Ein Grund hierfür ist der

kleinere Bestand der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr in diesem Szenario, woraus sich eine höhere Verfügbarkeit des Wasserstoffs für andere Bereiche des Energiesystems ergibt.

Binnen- und Küstenschifffahrt

Die hohe Lebensdauer der Binnenschiffe führt wie im Zugverkehr dazu, dass in allen Szenarien ein Restbestand des Dieselantriebs bestehen bleibt. Da die Lebensdauer von Schiffen höher als die von Zügen ist, der Anteil des Dieselantriebs an der Flotte im Jahr 2020 höher ist und zudem noch länger Dieselschiffe neu in Betrieb genommen werden, beträgt deren Anteil am Schiffsbestand im Jahr 2045 etwa 40 % und ist folglich deutlich höher als bei Zügen.

Abbildung 7.28 verdeutlicht, dass die Differenz zum Basisszenario in den beiden weiteren *StatusQuo*-Szenarien größer als bei den Szenarien *Progressive* ausfällt. Dieser Effekt resultiert aus dem höheren Druck die Treibhausgasemissionen auch im Schiffsverkehr frühzeitig umfangreicher zu reduzieren, da in den anderen Bereichen des Verkehrssektors eine geringere Reduktion der Emissionen erzielt wird.

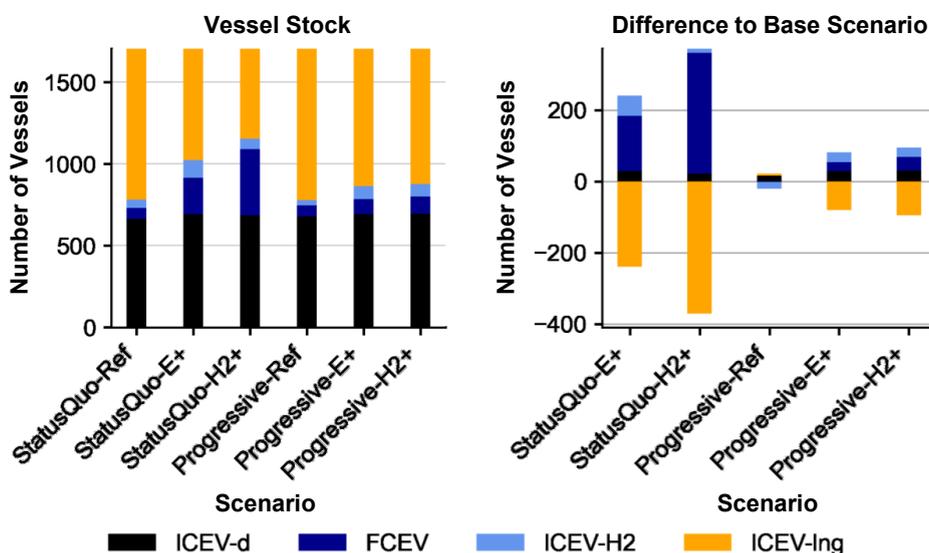


Abbildung 7.28: Antriebsspezifischer Bestand von Binnengüterschiffen im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). ICEV: Verbrennungsmotorschiff, FCEV: Brennstoffzellen-Elektroschiff, -d: Diesel, -H2: Wasserstoff, -Ing: Flüssigerdgas.

Im Szenario *Progressive* führt der intensivierte modale Shift hingegen vor allem im Straßenverkehr zu einer stärkeren Dekarbonisierung, weshalb in der Binnenschifffahrt länger fossiles Flüssigerdgas genutzt werden kann. Die verbesserte techno-ökonomische Entwicklung der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks im Szenario *H2+* hat zur Folge, dass der Markthochlauf der wasserstoffbetriebenen Antriebsalternativen bereits früher beginnt. Daher erreichen diese im Szenario *StatusQuo-H2+* bereits vor 2035 zusammen einen Anteil von 50 % an den neuen Schiffen. Der frühere und stärkere Markthochlauf führt zu dem in Abbildung 7.28 zu erkennenden größeren brennstoffzellenelektrischen Schiffbestand im

Jahr 2045. In den beiden Szenarien *E+* werden infolge des geringeren Wasserstoffeinsatzes im Straßenverkehr ebenfalls mehr Wasserstoffverbrennungsmotor- und Brennstoffzellen-Elektroschiffe genutzt.

Da die Veränderungen innerhalb der Szenarien im Flugverkehr sehr gering ausfallen, wird auf eine Analyse dessen verzichtet.

Zwischenfazit der Analyse der Verkehrsmittel

Der Vergleich der unterschiedlichen Entwicklungen der Verkehrsmittel in den Szenarien hat diverse Auswirkungen differenzierter sozio- und techno-ökonomischer Annahmen aufgezeigt. Ein verstärkter modaler Shift im Personen- und Güterverkehr bietet die Möglichkeit einer langsameren Reduktion der Emissionen in schwer zu dekarbonisierenden Bereichen des Verkehrssektors, wie z. B. der Binnenschifffahrt. Zudem werden im Straßenverkehr bis 2045 weniger Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge eingesetzt, da deren Markthochlauf zu einem späteren Zeitpunkt als der von Batterie-Elektrofahrzeugen beginnt. Eine verbesserte techno-ökonomische Entwicklung von Brennstoffzellen und Wasserstofftanks führt hingegen zu einem steigenden Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in allen Bereichen des Verkehrs. Ähnliches gilt umgekehrt im Fall einer verstärkt positiven Entwicklung der Batterietechnologie. Um den Einfluss der Kostenentwicklung losgelöst von den weiteren Annahmen in den Szenarien *E+* und *H₂₊* zu untersuchen, wird in Sektion 7.3.2 eine Sensitivitätsanalyse zu den Kostenannahmen durchgeführt.

7.2.2 Endenergiebedarf des Verkehrssektors

Aus den dargelegten szenariobasierten Entwicklungen der Verkehrsmittel ergeben sich differenzierte Endenergiebedarfe des Verkehrssektors. Diese werden im Folgenden erläutert und sind in Abbildung 7.29 für das Jahr 2045 veranschaulicht.

Insgesamt liegt der Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien zwischen 203 und 268 TWh und somit 59 % bis 69 % niedriger als im Jahr 2020. Der geringste Endenergiebedarf entsteht im Szenario *Progressive-E+*, da in diesem Szenario der stärkere modale Shift mit der größten Nutzung von Batterie-Elektrofahrzeugen kombiniert auftritt. Dies unterstreicht den positiven Einfluss eines verminderten Individual- und Straßengüterverkehrs sowie des batterieelektrischen Antriebs in Bezug auf die Energiebedarfsreduktion im Verkehrssektor. Der höchste Endenergiebedarf entsteht aufgrund des niedrigen Anteils von Batterie-Elektrofahrzeugen im Szenario *StatusQuo-H₂₊*. Dennoch ist die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* mit +1,2 % sehr gering. Der im Vergleich zu den anderen Szenarien hohe Endenergiebedarf im Basisszenario *StatusQuo-Ref* deutet darauf hin, dass eine möglichst starke Minderung des Endenergiebedarfs nicht dem Kostenoptimum unter Beachtung aller technologischer Optionen entspricht.

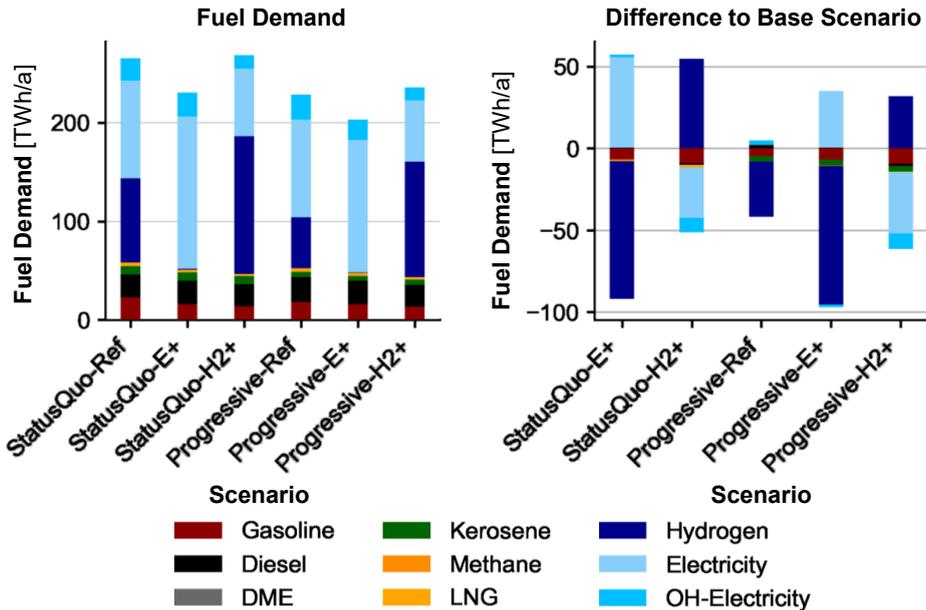


Abbildung 7.29: Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffart im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). DME: Dimethylether, LNG: Flüssigerdgas, OH-: Oberleitungs-.

Die Nachfrage des Verkehrssektors nach Flüssigkraftstoffen liegt im Jahr 2045 in allen betrachteten Szenarien zwischen 43 und 58 TWh, was weniger als 10 % des Bedarfs im Jahr 2020 entspricht. Darüber hinaus ist die Ottokraftstoffnachfrage in allen Szenarien geringer als im Basisszenario *StatusQuo-Ref*, da das Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeugen im Pkw-Bereich in diesem Szenario langsamer voranschreitet. In den Szenarien *Progressive* ist die geringere Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr eine weitere Ursache des niedrigeren Bedarfs. Infolge des geringeren Flugverkehrs und des höheren Einsatzes von Wasserstoff im Schiffs- und Flugverkehr im Szenario *Progressive-H2+* ist der Flüssigkraftstoffbedarf in diesem Szenario am kleinsten. Im Basisszenario *StatusQuo-Ref* tritt der gegenteilige Effekt auf.

Im Szenario *Progressive-Ref* wird aufgrund der in Sektion 7.2.1 erläuterten geringeren Anzahl an Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich weniger Wasserstoff nachgefragt. Der modale Shift vom Straßen- zum Schienenverkehr führt des Weiteren zu einem steigenden Bedarf an elektrischem Strom mittels Oberleitung. In den Szenarien *E+* wird kein Wasserstoff im Straßen- und Schienenverkehr eingesetzt. Im Gegenzug wird vermehrt elektrischer Strom nachgefragt. Da die Effizienz des batterieelektrischen Antriebsstrangs jedoch höher als die der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ist, fällt der Anstieg der Stromnachfrage geringer aus als die Reduktion des Wasserstoffbedarfs. In den Szenarien *H2+* führt das Verbot von Batterie-Elektrofahrzeugen im Straßen- und Schienenverkehr mit Ausnahme von Pkw zu gegenläufigem Verhalten.

Zur tiefergehenden Analyse der Strom- und Wasserstoffnachfrage in den Szenarien ist in Abbildung 7.30 deren zeitlicher Verlauf dargestellt.

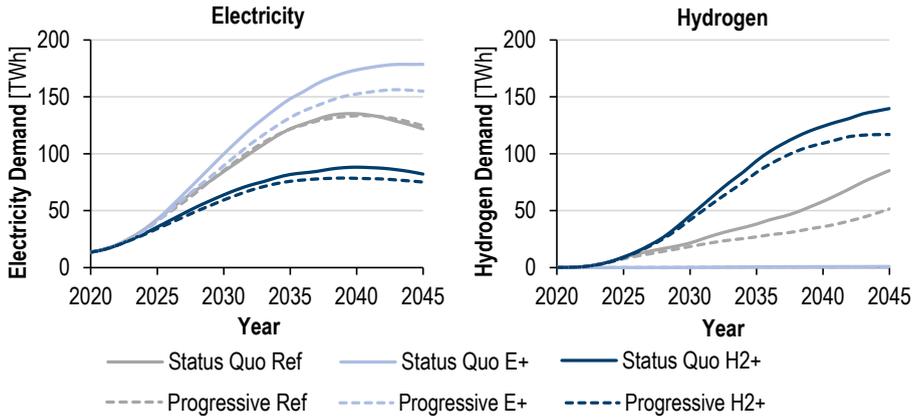


Abbildung 7.30: Strom- (links) und Wasserstoffbedarf (rechts) des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 in den betrachteten Szenarien.

Es ist zu erkennen, dass die absoluten Abweichungen der Szenarien über den Betrachtungszeitraum zunehmen. Im Jahr 2045 liegt der Strombedarf in den untersuchten Szenarien zwischen 75 und 123 TWh. Das linke Diagramm weist zudem für beide Szenarien *Reference* einen nahezu identischen Verlauf der Stromnachfrage auf. Dies bedeutet, dass der unterschiedlich stark ausgeprägte modale Shift zwischen den beiden Szenarien keine nennenswerte Auswirkung auf die Gesamtstromnachfrage hat. Der sinkende Strombedarf im Straßenverkehr wird durch den höheren Strombedarf im Schienenverkehr ausgeglichen. Diese Balance entsteht trotz des niedrigeren verkehrsleistungsspezifischen Energiebedarfs des Schienenverkehrs, da der Anteil des oberleitungs- und batterieelektrischen Antriebs am Schienenverkehr höher als der am Straßenverkehr ist. Aufgrund der veränderten Antriebsanteile in den Szenarien *E+* und *H₂+* führt der modale Shift in diesen Fällen zu einer niedrigeren Stromnachfrage. Da im Szenario *E+* eine nahezu ausschließliche Nutzung strombasierter Antriebe im Straßen- und Schienenverkehr vorliegt, fällt die absolute Differenz zwischen den Szenarien *StatusQuo* und *Progressive* hier größer aus. Aufgrund des Rückgangs des Pkw-Bestands ist die Stromnachfrage in den Szenarien *Reference* und *H₂+* ab Anfang der 2040er Jahre rückläufig. Lediglich im Szenario *StatusQuo-E+* überwiegt der zunehmende Strombedarf in den weiteren Bereichen des Straßen- und Schienenverkehrs, sodass kein Rückgang der Stromnachfrage innerhalb des Betrachtungszeitraum auftritt.

Die Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors weist eine breitere Streuung als der Strombedarf auf. Im Jahr 2045 liegt diese zwischen 0,6 TWh im Szenario *Progressive-E+* und 140 TWh im Szenario *StatusQuo-H₂+*. Infolge der höheren Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in den Szenarien *H₂+* ist die Wasserstoffnachfrage in diesen Szenarien am höchsten. Zudem übersteigt die Wasserstoffnachfrage den Strombedarf in diesen beiden Szenarien ab 2034. In allen anderen Fällen ist die Stromnachfrage stets höher als der Wasserstoffbedarf. Der modale Shift hat in den Szenarien *Reference* einen größeren Einfluss auf die Wasserstoffnachfrage, da der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrozügen in diesen Szenarien geringer als in den Szenarien *H₂+* ist.

Der Otto- und Dieselkraftstoffbedarf sind in Abbildung 7.31 veranschaulicht.

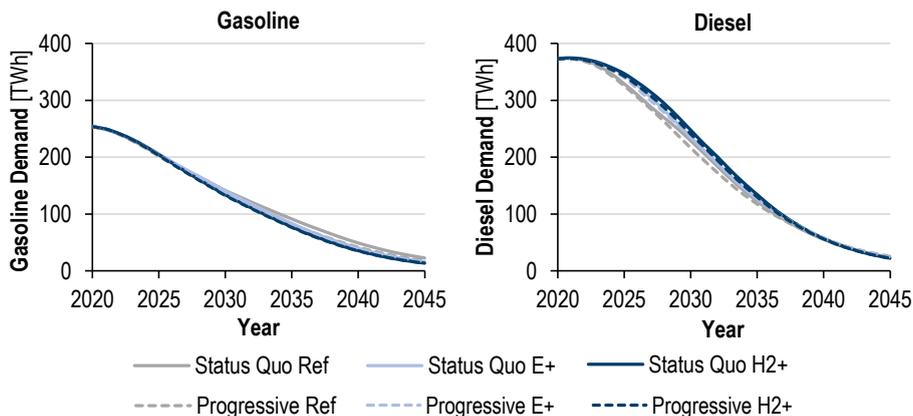


Abbildung 7.31: Otto- (links) und Dieseldieselkraftstoffbedarf (rechts) des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 in den betrachteten Szenarien.

Insgesamt wird das Ausphasen der beiden Kraftstoffe nur unwesentlich von den verschiedenen Szenarioannahmen beeinflusst. Dennoch lassen sich kleinere Effekte ausmachen. So sinkt die Nachfrage im Basisszenario *StatusQuo-Ref* am langsamsten, da die Vollelektifizierung von Pkw in allen weiteren betrachteten Szenarien früher startet und stärker ausgeprägt ist.

Die Dieselnachfrage ist hingegen bis Anfang der 2040er Jahre in den Szenarien *E+* und *H₂+* trotz der niedrigeren Nachfrage durch Pkw geringfügig erhöht. Dieser Effekt resultiert daraus, dass der Dieselbedarf maßgeblich von Nutzfahrzeugen getrieben wird. Da dort in den genannten Szenarien zusätzlich zum Markthochlauf der vollelektrischen Antriebe zu Beginn des Betrachtungszeitraums keine Hybridisierung erfolgt, sinkt der Dieselbedarf langsamer. Dieser Zusammenhang unterstreicht, dass eine Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren einen Beitrag zur kurz- bis mittelfristigen Reduktion des fossilen Energiebedarfs leistet.

Insgesamt ist der Strom- sowie vor allem der Wasserstoffbedarf deutlich mehr von den Szenarioannahmen abhängig. Zudem zeigen die Analysen, dass die Wasserstoff- stärker als die Stromnachfrage von der Ausprägung des modalen Shift beeinflusst wird.

7.2.3 Lade- und Tankstelleninfrastruktur

Die in Sektion 7.2.1 erläuterten szenariobasierten Entwicklungen der Verkehrsmittel haben nicht nur Auswirkungen auf den Energiebedarf, sondern auch auf die notwendige Lade- und Tankstelleninfrastruktur der Energieträger Strom und Wasserstoff. Der Infrastrukturbedarf in den betrachteten Szenarien im Jahr 2045 ist in Abbildung 7.32 veranschaulicht.

Der Ladeinfrastrukturbedarf von Pkw liegt in allen Szenarien zwischen 19,2 und 28,4 Millionen Ladepunkten. Die Abweichung des Ladeinfrastrukturbedarfs innerhalb der Szenarien nimmt über der Zeit stetig zu. Bis 2030 werden in allen Szenarien 13,5 bis 16 Millionen Ladepunkte erforderlich, von denen zwischen 0,9 und 1,0 Millionen öffentlich sind. Der maximale Ladeinfrastrukturbedarf entsteht im Szenario *StatusQuo-E+*, da dort der höchste Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen erreicht und zugleich ein geringerer modaler Shift als in den Szenarien *Progressive* angenommen wird. Der niedrigste Ladeinfrastrukturbedarf

resultiert im Szenario *Progressive-H₂+* aufgrund der gegenläufigen Ausprägungen hinsichtlich batterieelektrischem Anteil und modalem Shift. In den beiden Szenarien *Reference* entsteht nahezu der gleiche Ladeinfrastrukturbedarf. Dabei heben sich zwei entgegengesetzte Effekte auf. Auf der einen Seite sinkt der Pkw-Bestand im Szenario *Progressive*, weshalb tendenziell weniger elektrische Ladeinfrastruktur erforderlich wird. Auf der anderen Seite steigt jedoch der Anteil des kleineren Pkw-Segments, in welchem verglichen mit den anderen Segmenten verstärkt Batterie-Elektrofahrzeuge genutzt werden. Die Anteile der betrachteten Arten der Ladepunkte unterliegen innerhalb der Szenarien nur geringfügigen Änderungen.

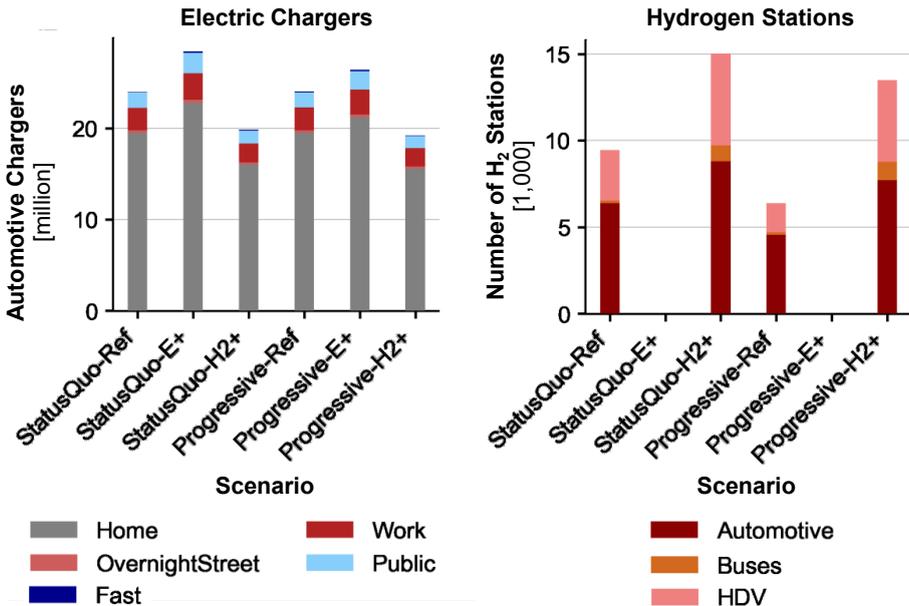


Abbildung 7.32: Ausbaubedarf der Pkw-Ladeinfrastruktur nach Ladepunktart (links) und Wasserstofftankstelleninfrastruktur nach Verkehrsmittel (rechts) im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien. HDV: Schwere Nutzfahrzeuge.

Der Bedarf an Wasserstofftankstellen ist in den Szenarien aufgrund der abweichenden Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in den betrachteten Straßenverkehrsmitteln ebenso unterschiedlich. In den beiden Szenarien *E+* wird im Straßenverkehr kein Wasserstoff eingesetzt, weshalb keine Wasserstofftankstellen benötigt werden. Da in den Szenarien *H₂+* der Bestand der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge bei Pkw, Bussen und Nutzfahrzeugen am höchsten ist, ergibt sich folglich der höchste Wasserstofftankstellenbedarf mit insgesamt bis zu 15.000 Tankstellen im Jahr 2045. Fast 9.000 Tankstellen entfallen auf die Pkw-, mehr als 5.000 auf die Nutzfahrzeug- und weitere 900 auf die Busanwendung. Der höhere Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bei Nutzfahrzeugen und Bussen im Szenario *H₂+* steigert deren Tankstellenanteil gegenüber den Szenarien *Reference*.

Insgesamt ist der Einfluss von Nutzfahrzeugen auf die erforderliche Anzahl von Wasserstofftankstellen größer als auf die benötigten Ladepunkte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Nutzfahrzeuge ein Treiber der Wasserstoffnachfrage sind (vgl. Sektion 7.2.2).

Demgegenüber wird die Stromnachfrage vor allem vom Pkw-Bereich bestimmt. Darüber hinaus ist das Verhältnis zwischen Pkw je Wasserstofftankstelle und Pkw je Ladepunkt größer als die Relation bei Nutzfahrzeugen. Insbesondere kann eine Wasserstofftankstelle mehr Pkw als Nutzfahrzeuge bedienen.

7.2.4 Herstellung der Energieträger

Die unterschiedlichen Endenergiebedarfe des Verkehrssektors innerhalb der betrachteten Szenarien haben Auswirkungen auf den Energiesektor inklusive der Herstellung der Sekundärenergieträger. Da die Abweichungen des Strom- und Wasserstoffbedarfs zwischen den Szenarien am größten sind, wird deren Herstellung innerhalb dieser Sektion fokussiert. Dies umfasst zum einen die Stromerzeugungskapazitäten sowie den Ausbau der Elektrolyse. Die Veränderungen der installierten Kapazitäten gegenüber dem in Abschnitt 7.1 analysierten Basisszenario *StatusQuo-Ref* treten sowohl im Strom- als auch im Wasserstoffbereich nach 2035 auf. Daher wird auf eine Darstellung der installierten Kapazitäten über den Betrachtungszeitraum verzichtet und in Abbildung 7.33 die installierten Strom- und Wasserstoffherzeugungskapazitäten im Jahr 2045 für die betrachteten Szenarien veranschaulicht.

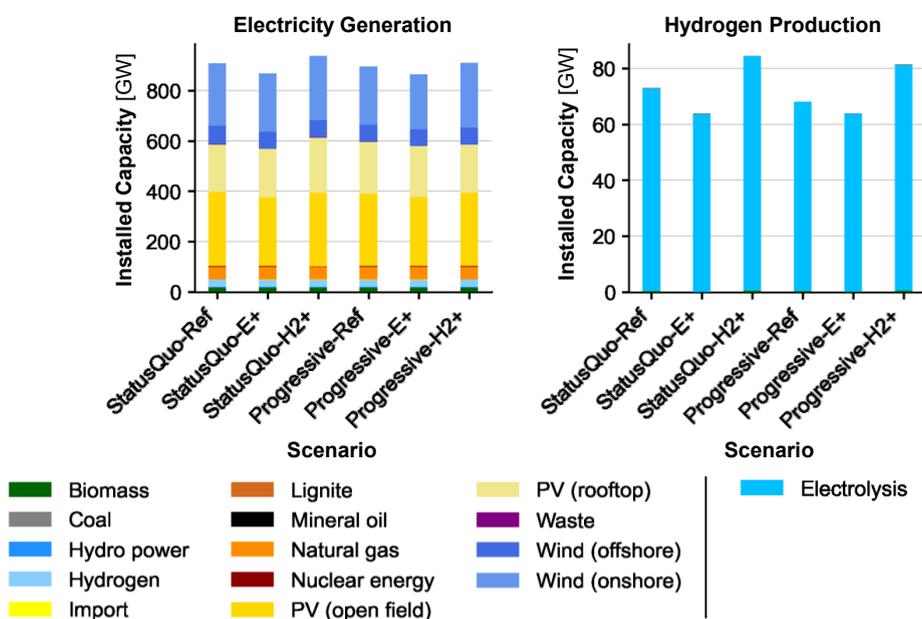


Abbildung 7.33: Installierte Leistung der Strom- (links) und Wasserstoffherzeugung (rechts) nach Technologie im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien. PV: Photovoltaik.

Insgesamt liegt der Ausbau der Stromerzeugungstechnologien zwischen 863 GW und 937 GW, was einer kleinen Spannweite von weniger als 8 % entspricht. Diese geringe Differenz zwischen den Szenarien resultiert unter anderem daraus, dass der Verkehrssektor nur einen Teil der Endenergienachfrage innerhalb des Energiesystems verursacht. Der niedrigste Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten entsteht im Szenario *Progressive-E+*. Dies ist auf den geringeren Straßenverkehr sowie die verstärkte Effizienzentwicklung bei Batterie-Elektrofahrzeugen zurückzuführen. Trotz der höheren direkten Stromnachfrage in

den Szenarien *E+* infolge der höheren Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen ist der Ausbaubedarf der Stromerzeugungstechnologien in diesen Szenarien am niedrigsten. Da die Well-to-Wheel-Effizienz bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen geringer als bei Batterie-Elektrofahrzeugen ausfällt, ist in den anderen Szenarien ein höherer Zubau der Stromerzeugungstechnologien erforderlich. Die abweichenden installierten Kapazitäten entstehen sowohl im Bereich der Photovoltaik als auch der Windenergie. Ein Blick auf die Stromherstellung zeigt jedoch, dass die Volllaststunden der Windenergie insbesondere in den Szenarien *E+* rückläufig sind, da deren Erzeugungsspitzen weniger durch Elektrolyseure ausgenutzt werden. Zudem verstärkt eine erhöhte Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen die Photovoltaik, da deren Erzeugungsprofil Synergien mit den potenziellen Ladezeiten der Fahrzeuge an der Arbeitsstätte bietet. Weiterhin nimmt die Rückverstromung von Wasserstoff aufgrund der höheren Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in den Szenarien *H₂₊* um fast 10 TWh ab. Anstatt der Rückverstromung im Energiesektor wird der Wasserstoff in diesen Szenarien direkt im Verkehrssektor genutzt.

Die in Sektion 7.2.2 erläuterte abweichende Wasserstoffnachfrage in den betrachteten Szenarien führt zu den im rechten Diagramm der Abbildung 7.33 visualisierten Veränderungen der Elektrolysekapazitäten. Diese liegen zwischen 64 GW im Szenario *Progressive-E+* und 84 GW im Szenario *StatusQuo-H₂₊*. Dabei besteht eine Korrelation zwischen der Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors und der installierten Elektrolysekapazität, welche wie zuvor beschrieben ebenfalls für die installierte Elektrolysekapazität und den Ausbau der erneuerbaren Energien vorliegt.

Insgesamt verdeutlicht die Analyse, dass ein höherer Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Verkehrssektor einen verstärkten Ausbau der Elektrolyseure erfordert. Zudem führt die daraus entstehende Stromnachfrage zu einem geringfügig erhöhten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien. Des Weiteren weisen die Untersuchungen eine steigende Rückverstromung im Fall einer höheren batterieelektrischen Marktdurchdringung auf. Die aufgezeigten Effekte unterstreichen die Auswirkungen der Sektorenkopplung zwischen dem Verkehrs- und dem Energiesektor.

7.2.5 Primärenergiebedarf

Die herausgestellten Veränderungen des Endenergiebedarfs und der Herstellung der Sekundärenergieträger haben ebenfalls unterschiedliche Entwicklungen des Primärenergiebedarfs innerhalb der betrachteten Szenarien zur Folge. Zur Analyse dieser Auswirkungen ist in Abbildung 7.34 der szenarioabhängige Primärenergiebedarf im Jahr 2045 sowie die Differenz zum Basisszenario veranschaulicht. Insgesamt liegt der Primärenergiebedarf in allen Szenarien zwischen 1.831 TWh und 1.934 TWh, was einer geringen Differenz von unter 6 % entspricht. Dennoch lassen die Unterschiede Rückschlüsse auf die Effekte der Sektorenkopplung zu.

Die zu erkennenden Veränderungen resultieren im Wesentlichen aus den in Sektion 7.2.2 erläuterten Veränderungen des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor. Zum einen macht sich der höhere Systemwirkungsgrad der direkten Stromnutzung in den Szenarien *E+* durch einen verminderten Primärenergiebedarf bemerkbar. Zum anderen hat der verstärkte modale Shift sowie die insgesamt verringerte Verkehrsnachfrage in den

Szenarien *Progressive* einen positiven Effekt auf den Primärenergiebedarf. Weniger Verkehr erfordert weniger End- und Primärenergie.

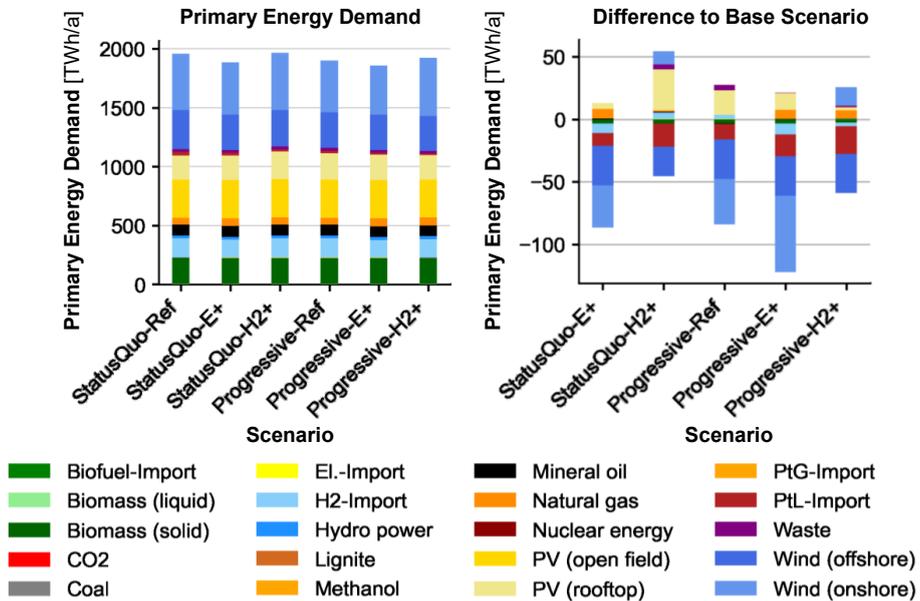


Abbildung 7.34: Primärenergiebedarf unterteilt nach Primärenergieträgern im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* (rechts). PV: Photovoltaik, PtG: Power-to-Gas, PtL: Power-to-Liquid.

Darüber hinaus sinkt der Power-to-Liquid (PtL)-Import in den Szenarien *E+* und *H2+*, da die Vollelektrifizierung des Verkehrsmittelbestands schneller voranschreitet. In den Szenarien *Progressive* sinkt der Power-to-Liquid-Import zudem infolge des verringerten Flugverkehrs. Die Stromerzeugung mittels Windenergie fällt in allen Szenarien im Vergleich zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* ab, wie in der vorigen Sektion erläutert. Des Weiteren führt die niedrigere Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors in den Szenarien *E+* zu geringeren Importmengen von Wasserstoff. Im Jahr 2035 ist die Differenz des Wasserstoffimports zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* größer als im rechten Diagramm der Abbildung 7.34 für das Jahr 2045 gezeigt. Dies folgt daraus, dass die verstärkte Rückverstromung von Wasserstoff erst bei höheren Anteilen der Batterie-Elektrofahrzeuge einsetzt, welche nach 2035 auftreten. Variationen hinsichtlich der Importquote oder des Anteils erneuerbarer Energien entstehen innerhalb der Szenarien nur in vernachlässigbar geringem Maß.

Wenngleich die Differenzen des Primärenergiebedarfs in den Szenarien klein ausfallen, zeigen diese die grundlegenden Auswirkungen höherer Anteile von Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen sowie einer veränderten Verkehrsnachfrage. Ein höherer batterieelektrischer Anteil sowie eine geringere Verkehrsnachfrage erfordern einen niedrigeren Primärenergieeinsatz. Der hohe Primärenergiebedarf des Basisszenarios *StatusQuo-Ref*, in welchem keine Technologie eingeschränkt und somit eine technologieoffene Kostenoptimierung stattfindet, zeigt jedoch, dass das Streben nach einem möglichst hohen Systemwirkungsgrad nicht zwingend dem Kostenoptimum entspricht.

7.2.6 Systemkosten

Die Szenarioannahmen und die daraus resultierende Antriebswahl inklusive der Auswirkungen auf den Verkehrs- und Energiesektor ergeben unterschiedliche Kosten des Transformationspfads hin zu einem vollständig defossilisierten Energiesystem im Jahr 2045. Der Vergleich der aufsummierten jährlichen Systemkosten über den Betrachtungszeitraum in Abbildung 7.35 verdeutlicht, dass diese zwischen 8,7 Billionen Euro und 9,1 Billionen Euro liegen. Die relative Differenz zwischen allen betrachteten Szenarien fällt mit unter 5 % vernachlässigbar gering aus. Zudem wird ersichtlich, dass der Einfluss der veränderten techno-ökonomischen Szenarien auf die Gesamtkosten geringer ist als die Auswirkung einer veränderten Verkehrsnachfrage. Die Differenz der Szenarien *E+* und *H2+* gegenüber den Szenarien *Reference* liegt unter 1 %. Demgegenüber beträgt der Kostenunterschied zwischen den sozio-ökonomischen Szenarien *StatusQuo* und *Progressive* bis zu 4 %. Die größere Differenz resultiert aus dem forcierten modalen Shift und dem dadurch reduzierten Bestand von Pkw und Straßengüterfahrzeugen sowie der insgesamt verringerten Verkehrsnachfrage.

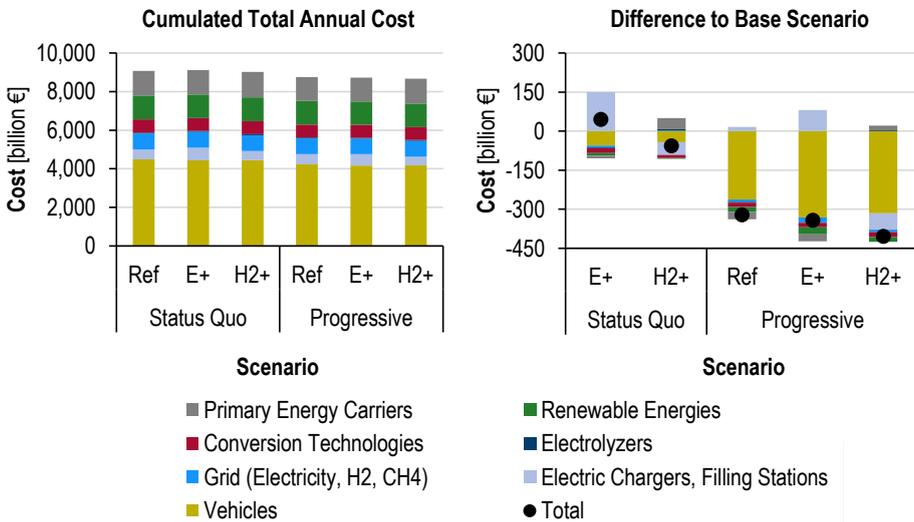


Abbildung 7.35: Summe der annualisierten Gesamtsystemkosten nach Komponente über den Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2045 in den analysierten Szenarien (links) und die Differenz zum Basiszenario *StatusQuo-Ref* (rechts).

In allen Szenarien erfolgt eine vernachlässigbar kleine Verschiebung der Kostenanteile. Die höhere Kostendegression der Batterie im Szenario *E+* sowie der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks im Szenario *H2+* führt zu niedrigeren Kosten der Verkehrsmittel im Vergleich zum Szenario *Reference*. In den Szenarien *Progressive* fällt die Kostenreduktion der Verkehrsmittel aufgrund der zuvor beschriebenen Effekte jedoch deutlich stärker aus. In den Szenarien *H2+* steigen die Kosten der Primärenergieträger infolge des steigenden Wasserstoffimports. Die Szenarien *E+* führen aufgrund des wachsenden Ladeinfrastrukturbedarfs zu höheren Kosten der Versorgungsinfrastruktur. Demgegenüber sinken diese Kosten in den Szenarien *H2+*, was die Vorteile von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen hinsichtlich der Versorgungsinfrastruktur unterstreicht. Die Kosten der Netze und des

Kraftwerksparks bleiben in allen Szenarien nahezu unverändert. Die in Sektion 7.2.4 aufgeführten geringen Auswirkungen der veränderten Szenarioannahmen auf die installierte Leistung erneuerbarer Energien und Elektrolyseure resultieren in den dargestellten Kostenveränderungen dieser.

Insgesamt ist das Szenario *StatusQuo-H₂+* aufgrund der höheren Kostendegression von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen günstiger als das Basisszenario *StatusQuo-Ref*, in welchem keine Einschränkung der verfügbaren Antriebs- und Kraftstoffoptionen vorgenommen wird. Das Szenario *StatusQuo-E+* ist trotz der verstärkt positiven Batterieannahmen geringfügig teurer als das Basisszenario *StatusQuo-Ref*. Dies zeigt, dass eine vollständige Elektrifizierung des Straßen- und Schienenverkehrs mittels batterieelektrischer Verkehrsmittel zwar möglich ist, allerdings aufgrund der erhöhten Infrastrukturkosten nicht dem Kostenoptimum entspricht.

Zwischenfazit des Szenariovergleichs

Alles in allem lassen die in diesem Abschnitt durchgeführten Szenarioanalysen verschiedene grundlegende Schlussfolgerungen zu. Eine verstärkt positive Entwicklung der wesentlichen Komponenten vollelektrifizierter Verkehrsmittel - Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank - beschleunigt den Umstieg auf diese Antriebsoptionen im Straßenverkehr. Insbesondere werden Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge bei einer positiven Entwicklung der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks vermehrt durch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt. Oberleitungs-Elektrofahrzeuge nehmen hingegen in allen betrachteten Szenarien eine untergeordnete Rolle bei Bussen und im Schwerlastverkehr ein. Dies resultiert unter anderem aus den stärkeren positiven Auswirkungen einer verbesserten Entwicklung von Batterien auf Batterie-Elektrofahrzeuge. Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors wird signifikant vom Anteil der vollelektrischen Antriebsoptionen sowie der Verkehrsnachfrage beeinflusst. Diese prägen ebenfalls den Ausbaubedarf der Lade- und Tankstelleninfrastruktur, wobei der Ladeinfrastrukturbedarf von Pkw bis 2030 nur moderat vom betrachteten Szenario abhängt. Wengleich die Szenarioergebnisse einen höheren Systemwirkungsgrad bei einer direkten Stromnutzung im Verkehrssektor aufzeigen, ist der Einfluss der Szenarien auf die installierten Stromerzeugungskapazitäten sowie den Primärenergiebedarf gering. Dies gilt ebenso für die Gesamtkosten des analysierten Energiesystems. Deren Analyse unterstreicht, dass die unterschiedlichen getroffenen techno-ökonomischen Annahmen und Marktdurchdringungen der Antriebsoptionen in den Szenarien zu einer vernachlässigbar kleinen Kostenänderung führen. Demgegenüber ist der Einfluss der sozio-ökonomischen Annahmen in Bezug auf die Verkehrsnachfrage inklusive des verstärkten modalen Shifts vor allem aufgrund des kleineren Verkehrsmittelbestands größer.

7.3 Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss zentraler Annahmen auf die Ergebnisse analysieren zu können, werden im Folgenden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die isolierte Veränderung einzelner Annahmen ermöglicht es im Vergleich zu den im vorigen Abschnitt durchgeführten Szenarioanalysen Erkenntnisse losgelöst von weiteren Parametervariationen generieren zu können. Die Sensitivitätsanalysen fokussieren die Auswirkungen des internationalen Verkehrs, der Fahrzeugkosten, Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur sowie die Verfügbarkeit von

alternativen Energieträgern. Die gewählten Sensitivitäten entsprechen entweder fundamentaler Rahmenbedingungen (Internationaler Verkehr, Verfügbarkeit alternativer Energieträger) oder bedeutenden Eingangsparametern (Fahrzeugkosten, Ausbaustrategien Ladeinfrastruktur).

7.3.1 Internationaler Luft- und Seeverkehr

Der internationale Luft- und Seeverkehr wird nicht in die Treibhausgasbilanz eines Landes zur internationalen Berichterstattung einbezogen [1]. In der vorliegenden Analyse wird der abgehende internationale Luft- und Seeverkehr dennoch in der endogenen Treibhausgasbilanz berücksichtigt, um dessen Einfluss zu untersuchen. Dazu werden zunächst Mehrmissionen gegenüber dem Referenzpfad zugelassen (vgl. Abbildung 7.36). Diese führen jedoch zu modellendogenen Kosten in Höhe von 1.000 €/tCO₂ (Annahme), sodass modellseitig eine Reduktion der Mehrmissionen in wenigen Jahren unter den weiteren Randbedingungen des Modells, z. B. zum Markthochlauf der Antriebsalternativen, erzielt wird.

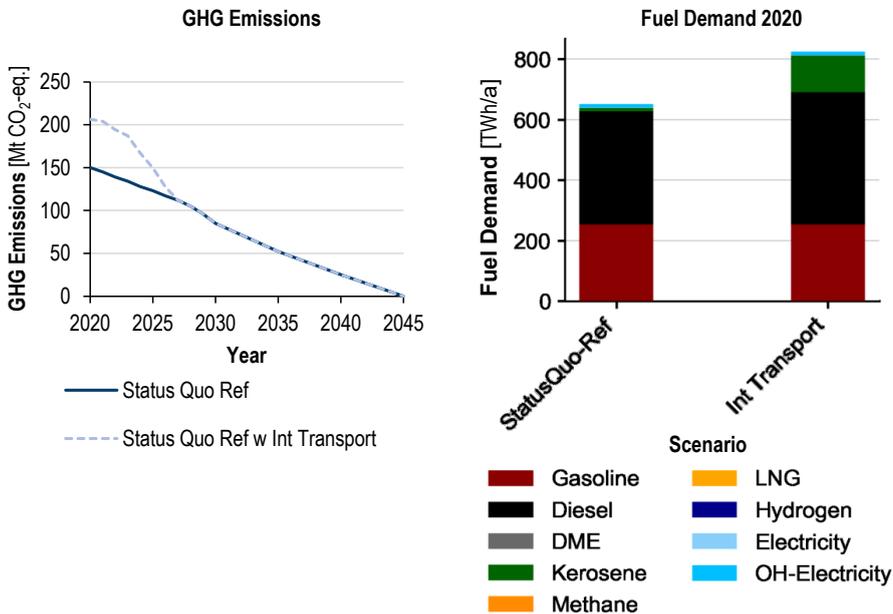


Abbildung 7.36: Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 (links) und Endenergiebedarf im Jahr 2020 nach Energieträger (rechts) exklusiv und inklusive des internationalen Verkehrs. DME: Dimethylether, LNG: Flüssigerdgas, OH-: Oberleitungs-.

Durch den abgehenden internationalen Seeverkehr entsteht im Jahr 2020 ein zusätzlicher Kraftstoffbedarf in Höhe von 63 TWh. Zudem entfallen auf den abgehenden internationalen Flugverkehr 110 TWh Kerosinbedarf, welcher im rechten Diagramm der Abbildung 7.36 durch den höheren Kerosinbedarf gegenüber dem Basisszenario *StatusQuo-Ref* ersichtlich wird. Dabei ist anzumerken, dass die endogen berechnete Nachfrage aufgrund nicht berücksichtigter Effekte der Coronapandemie von den tatsächlich entstandenen Bedarfen abweicht. Der zusätzliche Energiebedarf durch den abgehenden internationalen Verkehr führt im Jahr 2020 zu Mehrmissionen von 56,5 Mt CO₂-äq. Infolge der Bilanzierung des abgehenden internationalen Verkehrs entstehen bis 2027 Mehrmission im Verkehrssektor

gegenüber dem Referenzpfad des Klimaschutzgesetzes, wie im linken Diagramm der Abbildung 7.36 veranschaulicht. Die über das Basisszenario hinausgehenden getroffenen Defossilisierungsmaßnahmen ermöglichen es die Zielwerte zu erreichen, obwohl der abgehende internationale Verkehr mit in die Treibhausgasbilanz einfließt. Insbesondere ab 2024 ist eine stärkere Reduktion der Mehrmissionen zu erkennen.

Diese verstärkte Minderung resultiert aus dem in Abbildung 7.37 erkennbaren Einsatz synthetischer Kraftstoffe ab diesem Zeitpunkt. Zuvor ist innerhalb des Modells keine signifikante Nutzung synthetischer Kraftstoffe zugelassen, da aktuell keine nennenswerte Produktion solcher defossilisierter Flüssigkraftstoffe vorliegt. Das Erreichen des Treibhausgaszielpfades im Jahr 2027 führt zu dem in der Abbildung 7.37 erkennbaren zwischenzeitlichen Rückgang des Anteils der synthetischen Kraftstoffe.

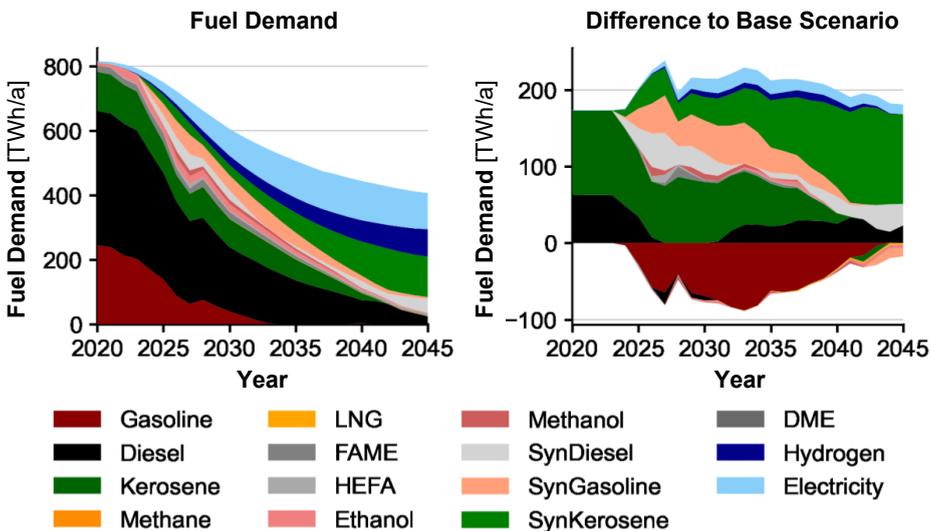


Abbildung 7.37: Endenergiebedarf des Verkehrssektors inklusive des internationalen Verkehrs nach Energieträger von 2020 bis 2045 sowie die Differenz zum Basisszenario exklusive des internationalen Verkehrs. LNG: Flüssigerdgas, FAME: Fettsäuremethylester, HEFA: Hydroprozessierte Ester und Fettsäuren, DME: Dimethylether.

Das rechte Diagramm verdeutlicht, dass im Vergleich zum Basisszenario *StatusQuo-Ref* ein erhöhter Endenergiebedarf des Verkehrssektors entsteht. Dieser entfällt zunächst auf fossile Flüssigkraftstoffe. Ab 2024 ist der erläuterte forcierte Einsatz synthetischer Kraftstoffe zu erkennen. Im Gegenzug wird fossiler Ottokraftstoff bereits im Jahr 2032 und somit verglichen mit dem Basisszenario *StatusQuo-Ref* zehn Jahre früher vollständig ausgephast. Darüber hinaus wird ab 2027 mehr elektrischer Strom und Wasserstoff nachgefragt. Im Jahr 2045 entsteht jedoch kein erhöhter Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor. Die beschriebene Entwicklung deutet darauf hin, dass die Bilanzierung des abgehenden internationalen Verkehrs nicht nur zu einem zusätzlichen Flüssigkraftstoffbedarf führt, welcher zukünftig verstärkt synthetisch ist, sondern ebenso eine verstärkte Elektrifizierung in anderen Verkehrsmitteln folgt.

Insbesondere im Straßenverkehr wird der Flüssigkraftstoffbedarf durch die verstärkte Nutzung vollelektrischer Antriebe reduziert. Das linke Diagramm der Abbildung 7.38 zeigt, dass

im Vergleich zum Basisszenario weniger Plug-In Hybrid- und mehr Batterie- sowie Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bereich eingesetzt werden, welche eine stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors erzielen. Zudem wird im rechten Diagramm ersichtlich, dass der Dieselfahrzeugbestand bei Sattelzugmaschinen insbesondere bis zum Anfang der 2030er Jahre verstärkt durch (O-)BEV ersetzt wird, um auch in diesem Bereich des Verkehrssektors eine intensiviertere Senkung der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Ende der 2030er Jahre werden Range-Extender- durch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt. Nach dem Jahr 2041 ist der Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen jedoch infolge der höheren Effizienz von Batterie-Elektrofahrzeugen reduziert. Insgesamt werden im Jahr 2045 verglichen mit dem Basisszenario *StatusQuo-Ref* 20.000 Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge weniger eingesetzt.

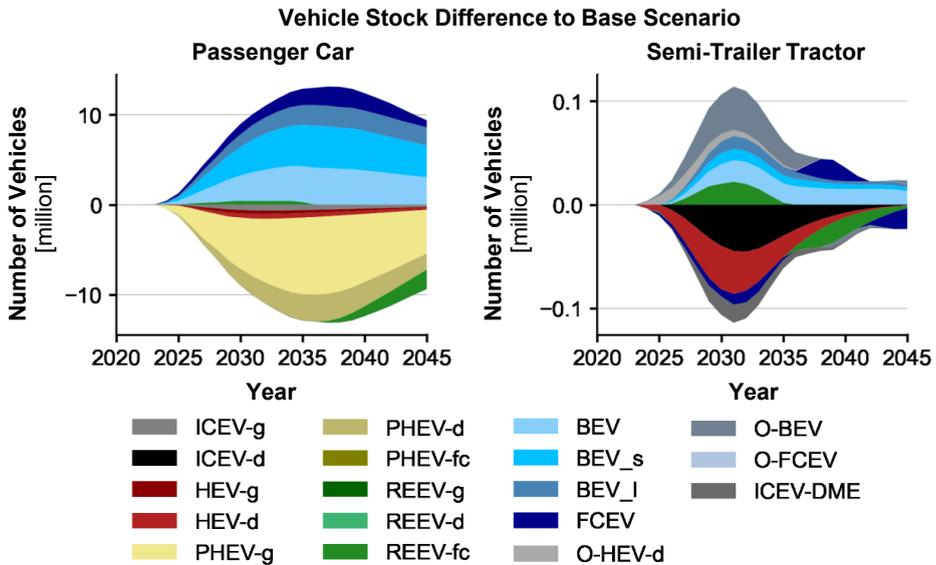


Abbildung 7.38: Differenz des Bestands von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) von 2020 bis 2045 in der Sensitivitätsanalyse inklusive des internationalen Verkehrs im Vergleich zum Basisszenario exklusive des internationalen Verkehrs.

Eine vergleichbare Entwicklung ergibt sich ebenfalls im Busbereich. Auch dort werden weniger Fahrzeuge mit Brennstoffzelle und stattdessen batterieelektrisch ausgeführt. In der Binnenschifffahrt hat der Einbezug des abgehenden internationalen Verkehrs zur Folge, dass mehr Wasserstoff und weniger Flüssigerdgas genutzt wird. Ebenso werden im nicht oberleitungselektrifizierten Schienenverkehr verstärkt Brennstoffzellen- anstatt Batterie-Elektrozüge eingesetzt. Die Wasserstoffnutzung innerhalb des Verkehrssektors verschiebt sich also von der Straße auf die Schiene und das Wasser.

Insgesamt zeigen die Analysen, dass infolge der Bilanzierung des abgehenden internationalen Verkehrs nicht nur ein erhöhter Energiebedarf entsteht, welcher mittels synthetischer Kraftstoffe gedeckt wird, sondern darüber hinaus andere Bereiche des Verkehrs frühzeitiger eine stärkere Elektrifizierung erfahren. Im Straßenverkehr werden vermehrt Batterie-Elektrofahrzeuge genutzt, wohingegen im Schienen- und Binnenschiffverkehr mehr Wasserstoff eingesetzt wird. Der um 13 TWh erhöhte Strombedarf des Verkehrssektors im Jahr 2045

führt vor allem zu einer vermehrten Rückverstromung von Wasserstoff. Dies wiederum steigert den Wasserstoffimport um 20 TWh. Der Wasserstoffbedarf des Verkehrssektors bleibt hingegen unverändert.

7.3.2 Fahrzeugkosten

Eine weitere Sensitivitätsanalyse wird hinsichtlich der Herstellungs- und Wartungskosten der Verkehrsmittel durchgeführt. Diese werden wie in den techno-ökonomischen Szenarien $E+$ und H_2+ (vgl. Sektion 5.2.2) variiert. Dazu werden das zugrundeliegende Weltmarktszenario sowie die Lernrate gegenüber dem Szenario *Reference* verändert. Somit wird der Einfluss der Fahrzeugkosten losgelöst von weiteren Veränderungen in den Szenarien $E+$ und H_2+ (z. B. spezifischer Energiebedarf) analysiert.

Die stärkere Kostendegression von Batterien im Kostenszenario $E+$ senkt insbesondere die Herstellungs- und Wartungskosten von Batterie- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen, weil deren Kosten am stärksten von den Batteriekosten abhängen. Da der Einfluss bei Batterie-Elektrofahrzeugen größer als bei Range-Extender-Elektrofahrzeugen ist, werden im Kostenszenario $E+$ ab Ende der 2030er Jahre jährlich 0,5 Millionen mehr Batterie-Elektrofahrzeuge neu zugelassen. Im Gegenzug werden ab 2030 weniger Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge zugelassen. Zuvor resultiert aus der früheren Kostenparität von Batterie-Elektrofahrzeugen mit Verbrennungsmotor- und Hybrid-Elektrofahrzeugen ein früheres Ausphasen von Pkw mit Verbrennungsmotoren. Insgesamt haben die erläuterten Entwicklungen zur Folge, dass im Jahr 2045 fünf Millionen mehr Batterie-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bestand sind (vgl. linkes Diagramm Abbildung 7.39). Zudem sind eine Million mehr Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge zugelassen.

Die Veränderungen im Kostenszenario H_2+ fallen mit insgesamt 4,5 Millionen Pkw geringer aus. Die stärkere Kostendegression von Brennstoffzellen und Wasserstofftanks senkt den Anteil von Range-Extender-Elektrofahrzeugen in den Neuzulassungen und im Bestand (-4 Millionen REEV-fc). Diese werden jedoch nicht nur durch Brennstoffzellen-, sondern auch durch Batterie-Elektrofahrzeuge ersetzt. Der batterieelektrische Fahrzeugbestand wächst um zwei Millionen Pkw. Diese Entwicklung, welche entgegen den erwarteten Auswirkungen einer Kostenreduktion der Komponenten der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ist, resultiert aus Antriebsveränderungen bei den weiteren Verkehrsmitteln sowie der geringeren Stromnachfrage infolge der Reduktion von Range-Extender-Elektrofahrzeugen. Eine Kostensenkung verringert den Anteil von Hybridfahrzeugen und steigert den Anteil der rein wasserstoff- bzw. batterieelektrisch betriebenen Varianten.

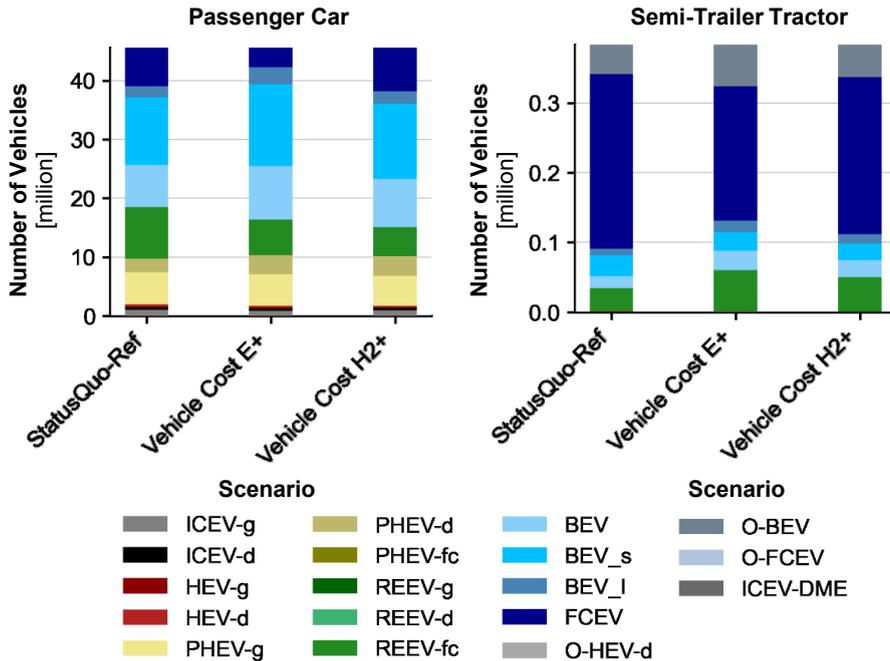


Abbildung 7.39: Antriebsspezifischer Bestand von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie den beiden Kostensensitivitätsanalysen. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/l_: kleine/große Batteriekapazität.

Die veränderten Fahrzeugkosten führen bei Sattelzugmaschinen in beiden Sensitivitäten dazu, dass im Jahr 2045 mehr (O-)BEV und Range-Extender-Elektrofahrzeuge anstatt Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Fahrzeugbestand sind. Die Verschiebung fällt im Kostenszenario $E+$ mit 16 % der Fahrzeugflotte größer aus als im Szenario H_2+ , in dem 8 % der Sattelzugmaschinen einen anderen Antrieb aufweisen. Dennoch sind Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in allen durchgeführten Analysen bei Sattelzugmaschinen mit mehr als 50 % des Fahrzeugbestands im Jahr 2045 die dominante Antriebsform.

Der größere Bestand der Batterie-Elektrofahrzeuge bei Pkw und Sattelzugmaschinen im Kostenszenario H_2+ ergibt sich aus dem verstärkten Einsatz des Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektroantriebs bei Bussen, allen weiteren nicht veranschaulichten Nutzfahrzeugklassen sowie Zügen. Zwar fallen die Veränderungen bei diesen Verkehrsmitteln mit jeweils unter 5 % des Bestands im Jahr 2045 gering aus, jedoch hat der dadurch entstehende Wasserstoffbedarf zur Folge, dass dieser bei Sattelzugmaschinen im Gegenzug um 2,4 TWh/a gegenüber dem Basisszenario abfällt. Insgesamt sind die Veränderungen des Endenergiebedarfs im Kostenszenario H_2+ vernachlässigbar gering, wie in Abbildung 7.40 zu erkennen. Dies verdeutlicht die beschriebene Verschiebung der Energieträger Strom und Wasserstoff innerhalb des Verkehrssektors. Geringere Kosten von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen führen zu einem steigenden Anteil dieser bei Pkw, Bussen und Zügen. Daher wird vermehrt Wasserstoff in diesen Verkehrsmitteln genutzt und der Einsatz

in Sattelzugmaschinen sinkt. Der infolgedessen niedrigere Strombedarf, allen voran im Pkw-Bereich, hat zur Folge, dass bei Sattelzugmaschinen mehr Range-Extender- anstatt Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge genutzt werden können.

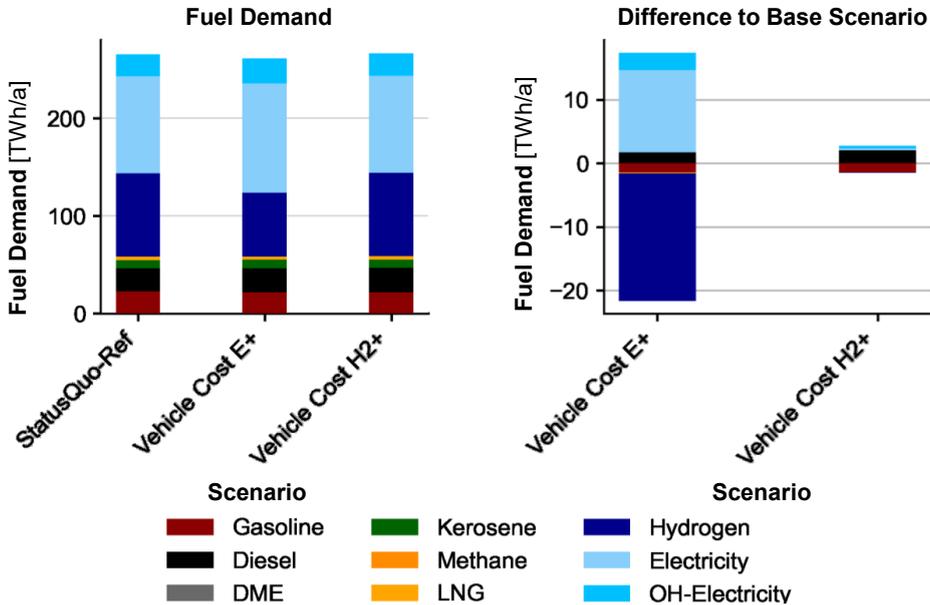


Abbildung 7.40: Endenergiebedarf des Verkehrssektors (links) sowie die Differenz zum Basisszenario (rechts) nach Energieträger im Jahr 2045 in den beiden Kostensensitivitätsanalysen. DME: Dimethylether, LNG: Flüssigerdgas, OH-: Oberleitungs-.

Im Szenario *E+* fällt die Veränderung des Endenergiebedarfs größer aus, wie in Abbildung 7.40 visualisiert. Dennoch ist diese mit 8 % ebenfalls gering. Der um 16 TWh erhöhte Strombedarf ergibt sich aufgrund der verstärkten Wahl von Batterie-Elektrofahrzeugen in allen Straßen- und Schienenverkehrsmitteln.

Insgesamt zeigen die durchgeführten Sensitivitätsanalysen der Fahrzeugkosten, dass veränderte Batteriekosten einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse haben als niedrigere Brennstoffzellen- und Wasserstofftankkosten. Letztere haben insbesondere keinen Anstieg des Wasserstoffbedarfs zur Folge, sondern führen zu einer Verschiebung der Allokation des Wasserstoffs von Sattelzugmaschinen zu allen weiteren Straßen- und Schienenverkehrsmitteln.

7.3.3 Vehicle-to-Grid

Die intensivierete Netzintegration von Batterie-Elektrofahrzeugen ist einer der in Abschnitt 2.3 eingeführten, erwarteten Trends. Vehicle-to-Grid (V2G) stellt das höchste Level der Netzintegration dar und wird in Wissenschaft und Wirtschaft weiterentwickelt. In der folgenden Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von Vehicle-to-Grid auf die Transformation des Verkehrssektors untersucht. Dazu besteht ab dem Jahr 2030 die Möglichkeit in Fahrzeugbatterien gespeicherte Energie in das Stromnetz einzuspeisen (vgl. Sektion 4.2.4). Diese Option steht modellseitig bei allen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen, welche als Range-Extender- oder Batterie-Elektrofahrzeuge ausgeführt sind, an ihrem Heim-

bzw. Depotladepunkt zur Verfügung. Da zudem keine Betriebskosten der Technologie oder die zusätzliche Alterung der Batterien berücksichtigt wird, ist die Analyse als eine Abschätzung des maximalen Potentials zu verstehen.

Als Erstes werden die Auswirkungen auf die Ladezeitreihe der Fahrzeuge analysiert. Dazu ist in Abbildung 7.41 die kumulierte Ladezeitreihe der Vehicle-to-Grid-fähigen Fahrzeuge im Jahr 2045 dargestellt. Ein Vergleich zur Abbildung 7.16, welche die Ladezeitreihe im Basisszenario zeigt, verdeutlicht die Ausweitung der Ladezeitpunkte. In der Sensitivitätsrechnung mit der Vehicle-to-Grid-Option wird zunehmend nachts zu Zeiten erhöhter Windenergie geladen. Darüber hinaus wird die Ladung tagsüber ausgeweitet, sodass das Potential der Photovoltaik vermehrt genutzt wird.

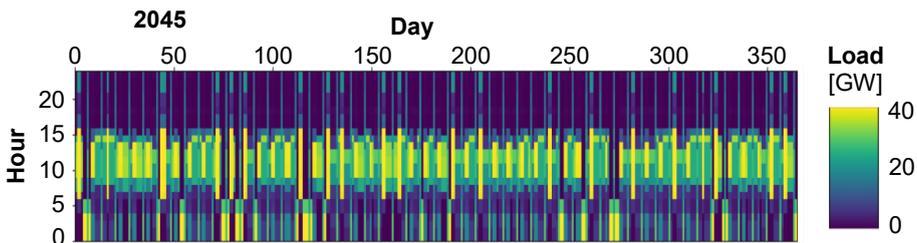


Abbildung 7.41: Kumuliertes Stromnachfrageprofil von elektrifizierten Pkw inklusive der V2G-Option im Jahr 2045.

Die Zeitpunkte der Netzeinspeisung konzentrieren sich auf Lastspitzen, welche am Morgen vor der Arbeit und am Abend nach der Arbeit auftreten. Insgesamt werden in der Sensitivitätsrechnung im Jahr 2045 mehr als 39 TWh über die Vehicle-to-Grid-Option in Fahrzeugbatterien zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt in das Netz gespeist. Die Zeitreihen unterstreichen, dass Vehicle-to-Grid dazu beitragen kann die Potentiale volatiler erneuerbarer Energien stärker auszunutzen, indem die zeitliche Differenz zwischen Erzeugungs- und Lastspitzen ausgeglichen wird. Dazu stehen im Jahr 2045 mehr als 2,2 TWh Batteriekapazität, welche in Fahrzeugen verbaut ist, zur Verfügung.

Die Vehicle-to-Grid-Option führt nicht nur zu einer Veränderung hinsichtlich der Ladezeitreihe, sondern auch zu veränderten Antriebsanteilen. In der Sensitivitätsrechnung wird in allen Straßenverkehrsmitteln verstärkt die Batterietechnologie genutzt, wie in Abbildung 7.42 veranschaulicht.

Im Pkw-Bereich befinden sich im Jahr 2045 fünf Millionen mehr Batterie- anstatt Brennstoffzellen- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge im Fahrzeugbestand, da die Vehicle-to-Grid-Option einen Vorteil für Batterie-Elektrofahrzeuge hinsichtlich der Nutzung erneuerbarer Energien zu kostengünstigen Zeiten zur Folge hat. Die Möglichkeit elektrische Energie in den Fahrzeugbatterien zwischenzuspeichern, diese später in das Netz einzuspeisen und somit unter anderem auch weitere Verkehrsmittel zu versorgen, resultiert auch bei Bussen und Nutzfahrzeugen in einem höheren Anteil von (O-)BEV und Range-Extender-Elektrofahrzeugen. Bei Sattelzugmaschinen ist der brennstoffzellenelektrische Fahrzeugbestand im Jahr 2045 nahezu halbiert.

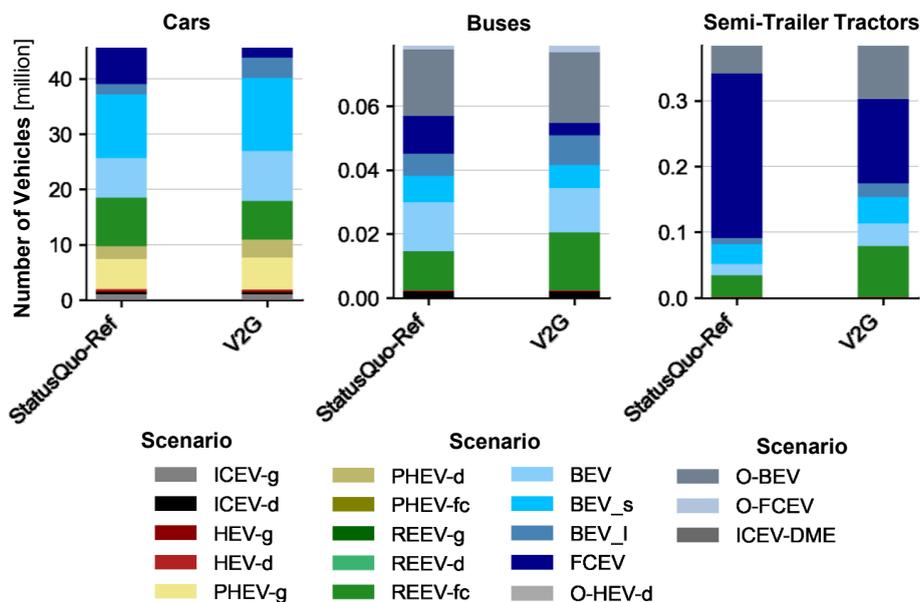


Abbildung 7.42: Antriebsspezifischer Bestand von Pkw (links), Bussen (Mitte) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie der Sensitivitätsanalyse inklusive der Vehicle-to-Grid-Option (V2G). ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

Trotz der verstärkten Nutzung von Wasserstoff im Schienen- und Schiffverkehr sinkt der Wasserstoffbedarf des Verkehrssektors infolge der veränderten Antriebswahl im Straßenverkehr im Jahr 2045 um 38 % auf 53 TWh. Der Strombedarf nimmt hingegen auf über 140 TWh zu.

Insgesamt unterstreicht die Sensitivitätsanalyse das Potential der Vehicle-to-Grid-Technologie die zeitliche Differenz zwischen Erzeugungs- und Lastspitzen auszugleichen. Darüber hinaus kann Vehicle-to-Grid einen Vorteil für Batterie-Elektrofahrzeuge in Straßenverkehrsmitteln erzeugen, sodass sich das Verhältnis zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in Richtung der Batterietechnologie verschiebt.

7.3.4 Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur

Hinsichtlich der Ausbaustrategie der elektrischen Ladeinfrastruktur werden gegenüber den Basisannahmen zwei Variationen analysiert. Zum einen wird untersucht, inwiefern die Ladeinfrastruktur an der Arbeitsstätte die Optimierungsergebnisse beeinflusst. Dazu wird in der Sensitivitätsanalyse keine Ladeinfrastruktur an Arbeitsstätten ausgebaut. Zum anderen zielt die zweite Variation auf das Verhältnis der öffentlichen Langsam- und Schnellladeinfrastruktur im Pkw- und Sattelzugmaschinenbereich ab. Dazu wird gegenüber den Basisannahmen das Verhältnis in Richtung der Schnellladeinfrastruktur geschoben, da dies zu geringeren Ladeinfrastrukturkosten führt (vgl. Sektion 6.5.6). Im Pkw-Bereich dient das Szenario 4 nach einer Studie der *Nationalen Plattform Mobilität* zur bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur [64] als Basis der Annahmen. Dadurch wird die Anzahl der Pkw je

Schnelllader von 250 Fahrzeugen auf 175 Fahrzeuge reduziert. Im Gegenzug steigt die Anzahl der Fahrzeuge je öffentlichem Langsamladepunkt von 20 Pkw auf 70 Pkw. Bei Sattelzugmaschinen wird die Annahme von einem Fahrzeug je Depotlader auf zwei verändert. Im Gegenzug wird angenommen, dass nicht mehr 15 % der Fahrzeuge, sondern 25 % der Fahrzeuge auf einen Schnelllader angewiesen sind.

Zunächst wird analysiert, welche Auswirkungen der Entfall der Ladeoption an der Arbeitsstätte auf die Ladezeitreihe sowie das energetische Ladeverhältnis der übrigen Ladepunktarten hat. Abbildung 7.43 zeigt die resultierende kumulierte Ladezeitreihe von Pkw.

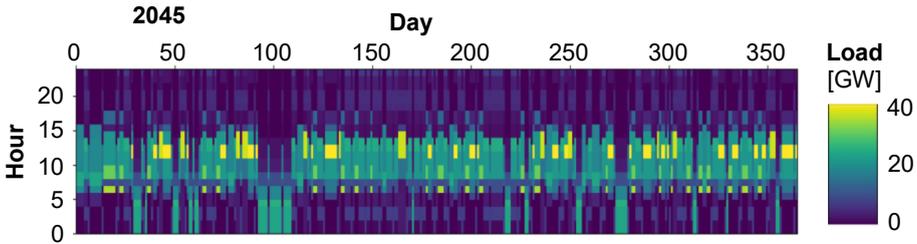


Abbildung 7.43: Kumuliertes Stromnachfrageprofil von elektrifizierten Pkw exklusive der Ladeoption an der Arbeitsstätte im Jahr 2045.

Verglichen mit Abbildung 7.16 wird ersichtlich, dass die tagsüber entstehenden Erzeugungsspitzen der Photovoltaik aufgrund des Entfalls der Ladeoption an der Arbeitsstätte nicht mehr in dem Maße ausgenutzt werden können, wie es im Basisszenario der Fall ist. Zwar dominiert weiterhin das Laden am Tag, da die öffentliche Ladeinfrastruktur diese Option bietet und ebenso ein signifikanter Anteil der Pkw tagsüber zuhause geladen werden kann. Dennoch ist insgesamt ein Shift des Ladens der Pkw von den Tag- in die Nachtstunden zu erkennen.

Der in Abbildung 7.44 visualisierte Vergleich des Anteils der betrachteten Ladepunktarten in Bezug auf den geladenen Strom stellt die Auswirkungen des Entfalls der Ladepunkte an der Arbeitsstätte auf die weiteren Ladepunktarten heraus.

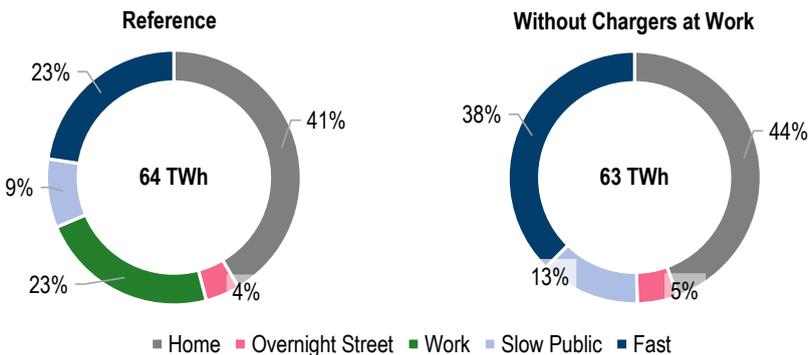


Abbildung 7.44: Anteil der Ladepunktarten an der geladenen Energie elektrifizierter Pkw im Jahr 2045 im Basisszenario (links) und in der Sensitivitätsanalyse exklusive der Ladeoption an der Arbeitsstätte (rechts).

Mit 15 % steigt der Anteil der Schnelllader am stärksten, da diese insbesondere Fahrzeugen ohne Heimladepunkt eine schnelle Ladung ermöglichen. Die öffentlichen Langsamladepunkte sowie die Heimladepunkte verzeichnen einen Zuwachs um 3 % bis 4 %. Der geringste Anstieg entsteht bei Laternenladepunkten, da diese insgesamt eine begrenzte Kapazität besitzen.

Insgesamt führt der Entfall der Ladepunkte an der Arbeitsstätte zu einem Anstieg der öffentlichen Ladeinfrastruktur von 36 % auf 56 %. Dieser signifikante Unterschied sowie der Einfluss auf die zeitliche Verteilung des Ladens von Pkw untermauern die Bedeutung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz.

Im Folgenden werden darüber hinaus die Auswirkungen der beiden Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Ausbaustrategie der Ladeinfrastruktur in Bezug auf die Antriebswahl bei Pkw und Sattelzugmaschinen untersucht. Dazu ist in Abbildung 7.45 der antriebspezifische Pkw- und Sattelzugmaschinenbestand in den Sensitivitätsanalysen sowie im Basisszenario veranschaulicht.

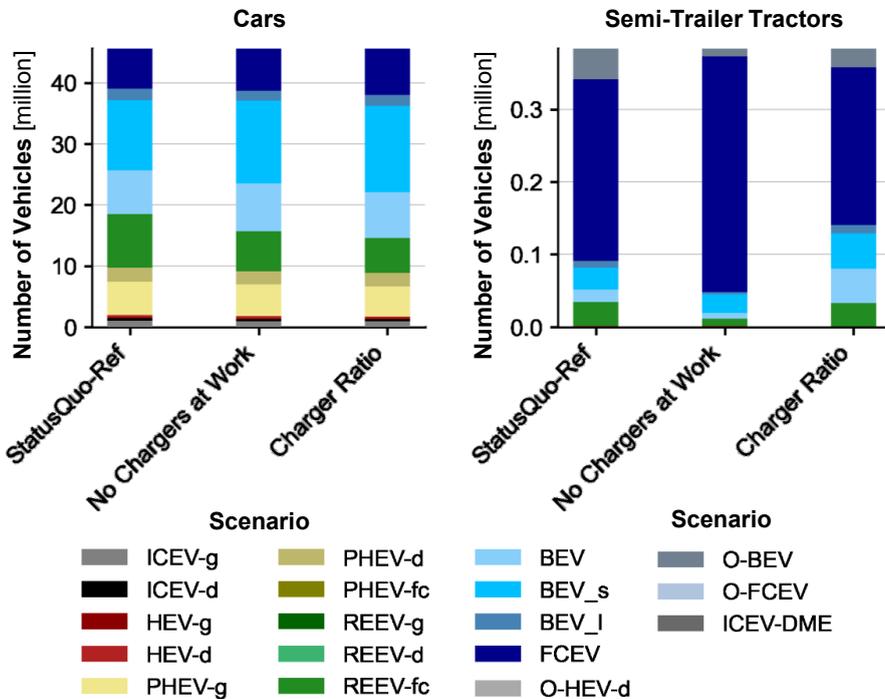


Abbildung 7.45: Antriebspezifischer Bestand von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie der beiden Sensitivitätsanalyse verschiedener Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur (Exklusive Ladeoption an der Arbeitsstätte und fokussierter Ausbau der Schnellladeinfrastruktur). ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, -s/_I_: kleine/große Batteriekapazität.

Infolge des Entfalls der Lademöglichkeit an der Arbeitsstätte werden mehr Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bereich genutzt. Im Gegenzug wird der Anteil

von Range-Extender-Elektrofahrzeugen reduziert. Dabei ist jedoch anzumerken, dass mehr Batterie-Elektrofahrzeuge mit der kleinen Batterieoption gewählt werden, da bei diesen der Einfluss der Ladeinfrastrukturkosten höher ausfällt. Bei Pkw, welche wenig fahren, führt die Ladeinfrastruktur an der Arbeitsstätte zu Mehrkosten. Somit ist der Entfall dieser Mehrkosten hier als positiv zu erachten. Batterie-Elektrofahrzeuge mit der größeren Batterieoptionen werden dementsprechend vermehrt durch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt. Der Entfall der Ladepunkte an der Arbeitsstätte wirkt sich ebenfalls negativ auf den Einsatz von (O-)BEV bei Sattelzugmaschinen aus, da die batterieelektrischen Pkw nicht mehr so flexibel geladen werden können und somit zu manchen Zeiten weniger Strom für andere Verkehrsmittel bei gleichen installierten Erzeugungskapazitäten zur Verfügung steht. Insgesamt sinkt der Strombedarf durch den verminderten Einsatz von batterieelektrischen Sattelzugmaschinen sowie der Nutzung von Batterie-Elektrofahrzeugen bei Pkw mit geringeren Fahrleistungen um 5 TWh, was jedoch lediglich 4 % der gesamten Stromnachfrage des Verkehrssektors entspricht. Der Wasserstoffbedarf steigt im Gegenzug um 11 TWh/a.

Der Einfluss des Verhältnisses der öffentlichen Langsam- und Schnellladeinfrastruktur ist ebenso in Abbildung 7.45 visualisiert. Im Pkw-Bereich führt die Reduktion der Infrastrukturkosten erneut zu einer verstärkten Nutzung von Batterie-Elektrofahrzeugen mit kleiner Batterie. Diese ersetzen Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge, welche den Vorteil besitzen nicht so sehr wie Batterie-Elektrofahrzeuge auf die öffentliche Schnellladeinfrastruktur angewiesen zu sein. Da dieser Vorteil in der Sensitivitätsanalyse schwindet, werden sie vermehrt von Batterie-Elektrofahrzeugen verdrängt. Bei Sattelzugmaschinen ist ebenfalls der positive Einfluss einer Fokussierung der Schnellladeinfrastruktur auf den Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen zu erkennen. Deren Anteil steigt von 15 % auf 28 %, wobei vor allem der Anteil der kleinen und mittleren Batterieoption zunimmt. Die Auswirkungen auf den Strom- (+3 TWh) und Wasserstoffbedarf (-5 TWh) des Verkehrssektors infolge der Änderungen der Antriebswahl sind in dieser Sensitivitätsanalyse erneut sehr gering.

Trotz des geringen Einflusses auf den Endenergiebedarf des Verkehrssektors verdeutlichen die Analysen der unterschiedlichen Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur die Auswirkungen auf die Antriebswahl und die resultierende Ladezeitreihe. In Bezug auf die Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen wirkt die Fokussierung der Schnellladeinfrastruktur unterstützend. Der Ausbau der Ladeinfrastruktur hat einen positiven Einfluss hinsichtlich der Ausnutzung der Photovoltaik.

7.3.5 Verfügbarkeit der Energieträger

Eine weitere Sensitivitätsanalyse wird hinsichtlich der Verfügbarkeit der Energieträger durchgeführt, um die Auswirkungen einer eingeschränkten Verfügbarkeit alternativer Energieträger aufzuzeigen. Dazu werden Kraftstoffe, welche im Basisszenario einen vernachlässigbaren Anteil des Endenergiebedarfs ausmachen, exogen als Option verboten. Dies umfasst Erdgas, Methanol und Dimethylether. Zudem wird keine Oberleitungsinfrastruktur entlang der Autobahnen ausgebaut, da Oberleitungs-Elektrofahrzeuge keine nachhaltige Lösung im Basisszenario darstellen, sondern deren Neuzulassungen ab Mitte der 2030er Jahre rückläufig sind. Dies macht den Aufbau der zwingend erforderlichen Infrastruktur unwirtschaftlich. Des Weiteren ist der Import synthetischer Flüssigkraftstoffe innerhalb der Sensitivitätsanalyse erst ab 2030 möglich. Somit wird die Abhängigkeit der

Dekarbonisierung des deutschen Verkehrssektors bis 2030 vom Aufbau eines internationalen Power-to-Liquid-Handels losgelöst.

Der nicht vorhandene Import synthetischer Flüssigkraftstoffe führt zu einer schnelleren Voll-elektrifizierung im Straßenverkehr, wie in Abbildung 7.46 zu erkennen.

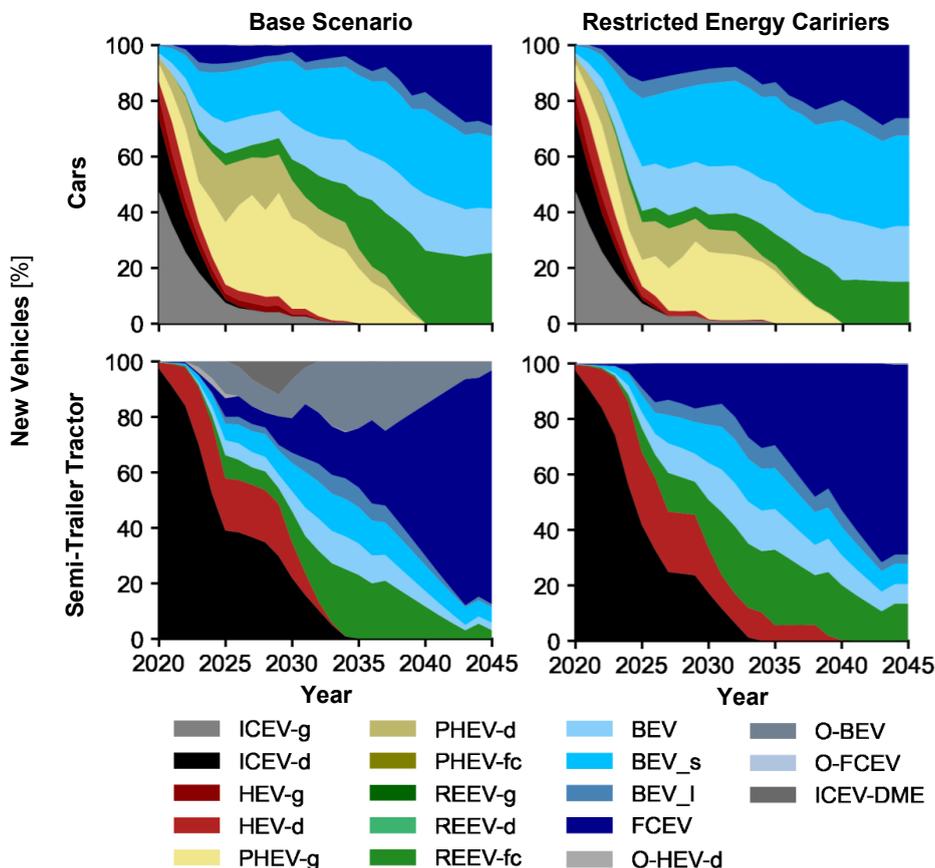


Abbildung 7.46: Anteile der Antriebsarten an den neu zugelassenen Pkw (oben) und Sattelzugmaschinen (unten) im Basisszenario (links) und in der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich einer beschränkten Verfügbarkeit von Energieträgern (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, -s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

Dies bedeutet, dass weniger Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge als Brückentechnologie im Pkw-Bereich genutzt werden, da deren Treibhausgasreduktionspotential niedriger ausfällt als das der vollelektrischen Antriebsarten. Während Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge im Basisszenario *StatusQuo-Ref* im Jahr 2025 einen Anteil von 43 % an den Neuzulassungen erreichen, sind es in der Sensitivitätsanalyse lediglich 23 %. Stattdessen ist der Markthochlauf vor allem von Batterie- (+14 %), aber auch von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (+6 %) verstärkt.

Ein Vergleich der unteren beiden Diagramme hebt hervor, dass die veränderte Verfügbarkeit der Energieträger sowie die nicht vorhandene Option der Oberleitungselektrifizierung ebenfalls Auswirkungen auf die Entwicklung der antriebsspezifischen Neuzulassungen von Sattelzugmaschinen hat. Das Ausphasen von Verbrennungsmotorfahrzeugen erfolgt früher. Demgegenüber werden Hybrid-Elektrofahrzeuge länger als Brückentechnologie genutzt. Zudem ist insbesondere der Markthochlauf von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen verstärkt. Nicht erst im Jahr 2030, sondern schon 2026 ist mehr als jede zehnte neu zugelassene Sattelzugmaschine mit diesem Antrieb ausgestattet. Zudem werden ab 2025 mehr Batterie- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge gegenüber dem Basisszenario zugelassen, sodass sich der Marktanteil von Oberleitungs-Elektrofahrzeugen auf alle weiteren vollelektrischen Antriebsoptionen verteilt. Eine ähnliche Entwicklung liegt bei Bussen und allen nicht gezeigten Nutzfahrzeugklassen vor.

Insgesamt verschiebt sich der Kraftstoffbedarf im Jahr 2045 aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit der Energieträger nur vernachlässigbar gering von synthetischen Flüssigkraftstoffen zu Strom und Wasserstoff. Dennoch unterstreicht die Analyse, dass insbesondere die verspätete Verfügbarkeit des synthetischen Kraftstoffimports eine frühere Vollelektrifizierung des Straßenverkehrs erforderlich macht, um die Treibhausgasemissionsreduktionsziele einzuhalten.

Zwischenfazit der Sensitivitätsanalysen

Alles in allem unterstreichen die durchgeführten Sensitivitätsanalysen den hohen Einfluss der getroffenen Randbedingungen. Die Auswirkungen infolge der veränderten Fahrzeugkosten sind im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren gering. Sowohl die Bilanzierung des internationalen Luft- und Seeverkehrs als auch die eingeschränkte Verfügbarkeit treibhausgasneutraler Flüssigkraftstoffe führen zu einem schnelleren Antriebswechsel hin zu den vollelektrifizierten Optionen. Die Nutzung von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen als Brückentechnologie im Pkw ist in diesen Sensitivitätsanalysen deutlich weniger ausgeprägt. Darüber hinaus hat die Ausbaustrategie der Ladeinfrastruktur sowie die Vehicle-to-Grid-Technologie nicht nur einen Einfluss auf die Ladezeitreihe, sondern resultiert zudem in verschobenen Antriebsverhältnissen. Vehicle-to-Grid und die Fokussierung der Schnellladeinfrastruktur bei Pkw und Nutzfahrzeugen sind vorteilhaft für die Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen.

7.4 Vergleich mit der Literatur

Um die Szenarioergebnisse der vorliegenden Arbeit in die Literatur einordnen zu können, werden die Resultate für das Jahr 2045 im Folgenden mit Werten aus der Literatur verglichen. Dazu werden zum einen die Antriebsanteile am Pkw-Bestand herangezogen, da diese das zentrale Verkehrsmittel in Bezug auf die Verkehrsleistung und Energienachfrage darstellen. Zum anderen wird der Endenergiebedarf des Verkehrssektors aufgeschlüsselt nach Energieträger verglichen, sodass Rückschlüsse auf die ausgewiesene allgemeine Entwicklung des Verkehrssektors innerhalb der Szenarien möglich sind. Die berücksichtigten Szenarien umfassen die in Sektion 3.4.5 vorgestellten Szenarien *eMobil 2050*, *Renewability* und die des *Umweltbundesamtes*, welche den Verkehrssektor fokussieren. Zudem sind weitere Szenarien im Literaturvergleich inkludiert, welche das gesamte Energiesystem einbeziehen [166], [234]–[237]. Da die Szenarioanalysen im Rahmen der

vorliegenden Arbeit den Verkehrssektor fokussieren, jedoch ebenso Aspekte der Sektorenkopplung (insbesondere die zum Energiesektor) beinhaltet, sind die Untersuchungen zwischen den beiden Szenariowelten angeordnet. Die im weiteren Verlauf dargestellten Literaturdaten beziehen sich je nach Zieljahr des jeweiligen Szenarios entweder auf das Jahr 2045 oder 2050. Die Antriebszusammensetzung bei Pkw wird bei den Szenarien nach Kasten et al. [240] („UBA 2016“) nicht für den Bestand, sondern für die Neuzulassungen ausgewiesen.

7.4.1 Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand

In fast allen Szenarien, die in Abbildung 7.47 inkludiert sind, entfällt der größte Pkw-Anteil auf Batterie-Elektrofahrzeuge. Ausnahme bilden lediglich die Szenarien *Technologieoffenheit*, *FI+* sowie *Fokus Kraftstoffe*. Diese analysieren die Auswirkungen der verstärkten Nutzung synthetischer Kraftstoffe. Zudem sind in allen Szenarien, mit Ausnahme der Szenarien *Suffizienz*, *Inakzeptanz* und *Referenz* vom Fraunhofer ISE, Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren im Fahrzeugbestand des Zieljahres. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Nutzung synthetischer Kraftstoffe zur Erzielung der vollständigen Treibhausgasneutralität des Pkw-Verkehrs. Des Weiteren wird ersichtlich, dass der Anteil vollelektrischer Antriebe mit steigender Treibhausgasreduktion zunimmt. Der Einsatz von Erdgas-Verbrennungsmotoren im Pkw-Bereich ist lediglich in drei Szenarien aus den Jahren 2016 und 2018 Teil der Lösung.

Range-Extender-Elektrofahrzeuge, welche im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Szenarien im Pkw-Bereich genutzt werden, sind darüber hinaus lediglich in den beiden Szenarien *eMobil 2050* im Pkw-Bestand des Zieljahres vertreten. Es ist jedoch möglich, dass in den anderen Szenarien keine Differenzierung zwischen Plug-In Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeugen vorgenommen wird, und diese somit lediglich nicht separat ausgewiesen werden. Die in den Szenarien der vorliegenden Studie berechneten Anteile von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen liegen am oberen Rand der Literatur. Im Szenario *H₂+* vom Umweltbundesamt handelt es sich lediglich um eine exogene Annahme. Dabei wird deutlich, dass Szenarien, welche das gesamte Energiesystem in den Analysen einbeziehen, einen höheren Anteil von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ausweisen als solche ohne Berücksichtigung der Sektorenkopplung.

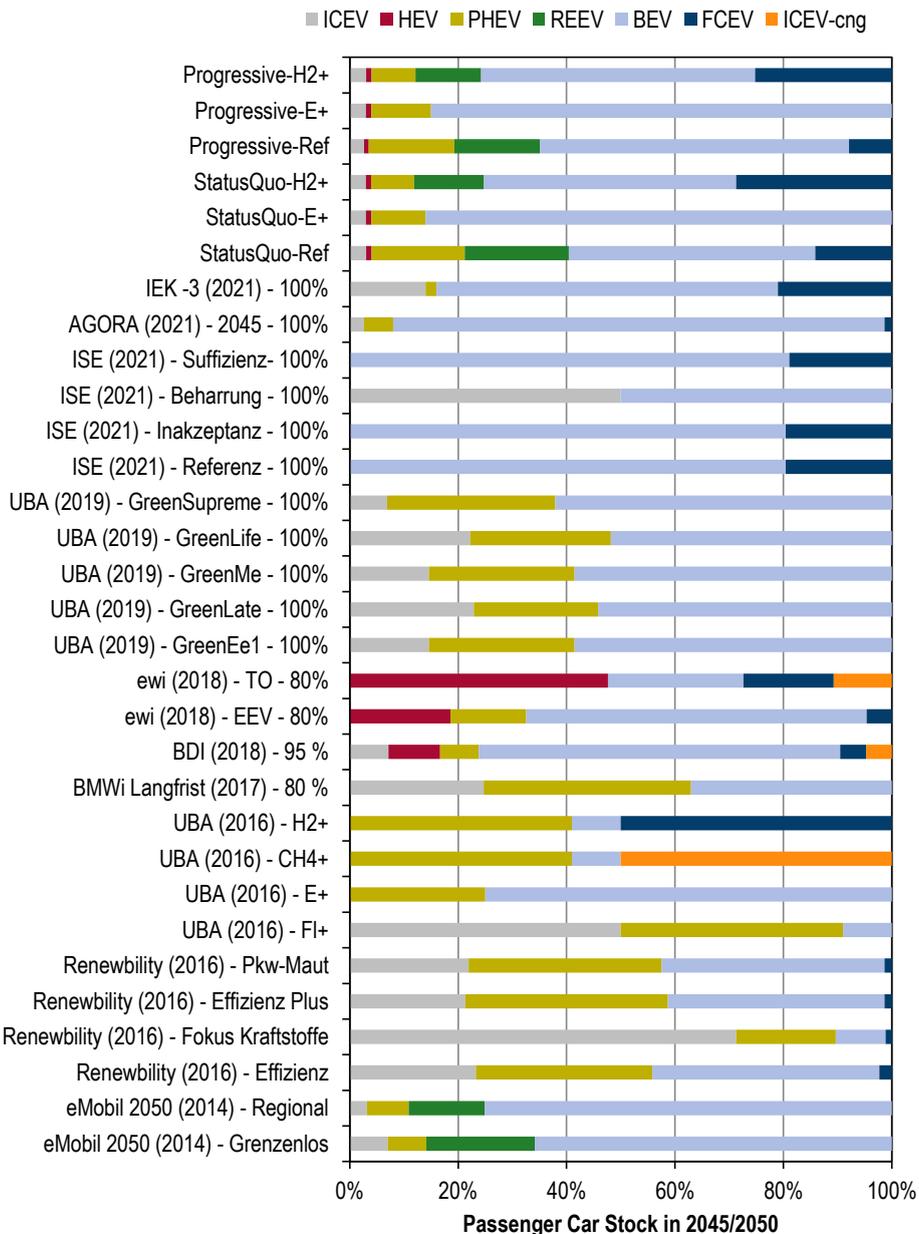


Abbildung 7.47: Vergleich der Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand im Jahr 2045 in den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Szenarien mit verschiedenen Szenarien aus der Literatur [46], [47], [166], [234]–[240]. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -cng: Erdgas.

Ein weiterer Grund für die höheren Anteile von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in dieser Arbeit kann die in Abschnitt 6.6 aufgezeigte geringere Kostendegression von

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in der deutschen Literatur im Vergleich zur internationalen Literatur sein. Dennoch weisen die Szenarien dieser Arbeit eine Übereinstimmung der grundlegenden Entwicklungen im Pkw-Bestand mit der Literatur auf. Zum einen umfasst dies den Restbestand von Verbrennungsmotor- und Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen, welche als Brückentechnologie genutzt werden. Zum anderen entfällt der Großteil des Pkw-Bestands im Zieljahr auf vollelektrische Antriebe und dabei insbesondere Batterie-Elektrofahrzeuge.

7.4.2 Energiebedarf des Verkehrssektors

Vergleichbar lässt sich ebenso der Endenergiebedarf, welcher in Abbildung 7.48 visualisiert ist, in die Literatur einordnen. In den Szenarien *Renewability* [47] und denen des Umweltbundesamtes [236] werden Power-to-X-Kraftstoffe zusammen ausgewiesen, sodass keine Aufteilung in Wasserstoff oder synthetische Flüssigkraftstoffe möglich ist. Die Szenarien des Umweltbundesamtes [240] und des Fraunhofer ISE [239] weisen im Vergleich zu allen anderen Szenarien einen höheren Endenergiebedarf aus. Dies ist auf die Bilanzierung des internationalen Luft- und Schiffverkehrs zurückzuführen. Aufgrund dessen entsteht ein um 164 TWh höherer Endenergiebedarf (vgl. Sektion 7.3.1), welcher auf synthetische Flüssigkraftstoffe entfällt. Zudem weisen die Szenarien *Beharrung*, *CH4+* und *F1+* infolge des in Abbildung 7.47 veranschaulichten hohen Anteils von Verbrennungsmotorfahrzeugen im Pkw den höchsten Endenergiebedarf auf.

Wird nur der nationale Verkehr einbezogen, liegt der Endenergiebedarf bei mehr als der Hälfte der Literaturszenarien zwischen 200 und 300 TWh. Da in den Szenarien dieser Arbeit ein Endenergiebedarf zwischen 203 und 268 TWh ermittelt wird, ist eine hohe Übereinstimmung des berechneten energetischen Reduktionspotentials vorhanden. Der durchschnittliche Strombedarf liegt mit 105 TWh ebenfalls innerhalb der Grenzwerte, welche in den Szenarien der vorliegenden Studie auftreten. Der durchschnittliche Wasserstoffbedarf ist in der Literatur mit 62 TWh jedoch unterhalb der Nachfrage, welche in dieser Arbeit berechnet wird. Dies ist zum einen auf den bereits erläuterten geringeren Anteil der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in der Literatur zurückzuführen. Zum anderen resultiert dieser aus der nicht vorhandenen Unterscheidung zwischen synthetischen Flüssigkraftstoffen und Wasserstoff in manchen Szenarien. Dennoch stellt die Höhe des Wasserstoffbedarfs im Rahmen dieser Arbeit keinen Ausreißer nach oben dar, da weitere Szenarien einen noch höheren Wasserstoffbedarf aufweisen.

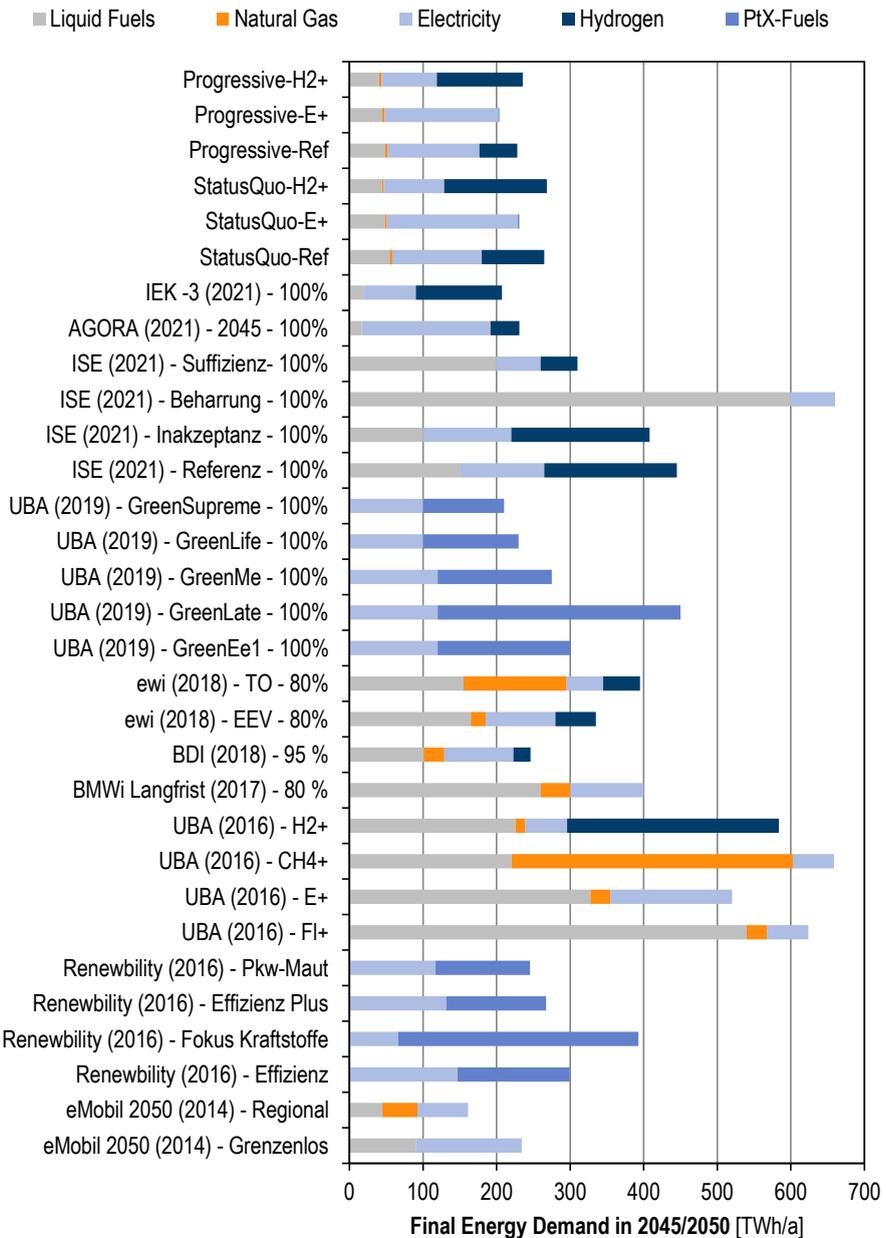


Abbildung 7.48: Vergleich des energieträgerspezifischen Endenergiebedarfs des Verkehrssektors im Jahr 2045 in den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Szenarien mit verschiedenen Szenarien aus der Literatur [46], [47], [166], [234]–[240]. PtX: Power-to-X.

Zwischenfazit des Vergleichs mit der Literatur

Insgesamt zeigen die in dieser Arbeit entwickelten Szenarien eine hohe Übereinstimmung mit der Literatur. Dies umfasst die Dominanz vollelektrischer Antriebe sowie die

Energiereduktionspotentiale infolge der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors. Ein Unterschied zur Literatur besteht in dem verstärkten Einsatz von Range-Extender- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Pkw-Bereich sowie des Wasserstoffs insgesamt. Ein möglicher Grund für diese Differenz besteht in der Berücksichtigung der Sektorenkopplung, insbesondere der zum Energiesektor inklusive der Abbildung der Volatilität erneuerbarer Energien. Weiterhin kann die im Vergleich zur weiteren deutschen Literatur berechnete stärkere Kostendegression der Komponenten des brennstoffzellenelektrischen Antriebs (vgl. Abschnitt 6.6) eine Ursache für die höhere Nutzung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr sein, wie die in Sektion 7.3.2 ausgearbeitete Sensitivitätsanalyse andeutet.

7.5 Fazit der Transformationsanalysen des Verkehrssektors

Alles in allem zeigen die in diesem Kapitel dargelegten szenariobasierten Transformationsanalysen vielschichtige Entwicklungen innerhalb des Verkehrssektors auf. Darüber hinaus wirken sich diese Entwicklungen infolge der Sektorenkopplung auf die weiteren Teile des Energiesystems aus. Zudem unterstreichen die Sensitivitätsanalysen den hohen Einfluss der betrachteten Veränderungen grundlegender Randbedingungen auf.

1. Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden den Straßenverkehr dominieren.

Die zunehmende Elektrifizierung der Verkehrsmittel, insbesondere im Straßenverkehr, stellt die Basis zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors dar. Die Analysen zeigen, dass Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge im Pkw-Bereich insbesondere bis zum Jahr 2030 genutzt werden, da diese zunächst einen Kostenvorteil gegenüber den vollelektrischen Antrieben aufweisen. Die stärkere Kostendegression der vollelektrifizierten Fahrzeuge führt anschließend zu einem Rückgang von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen und zu einer Vollelektrifizierung der neu zugelassenen Pkw bis 2040. Somit stellen Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge eine Brückentechnologie der Elektrifizierung bei leichten Straßenfahrzeugen dar. Die Anteile der drei vollelektrifizierten Antriebsarten –Range-Extender-Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge – sind abhängig vom Einsatzprofil. Insgesamt wird mehr als jeder zweite neu zugelassene Pkw bis 2045 als Batterie-Elektrofahrzeug ausgeführt. Eine hohe Fahrleistung führt zu steigenden Anteilen von Range-Extender- und insbesondere Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Vergleichbar werden Nahverkehrsbusse vermehrt mittels batterieelektrischem und Fernverkehrsbusse mittels Brennstoffzellenantrieb elektrifiziert. Im Straßengüterverkehr steigt der Anteil von Batterie-Elektrofahrzeugen ebenso bei leichteren Nutzfahrzeugen, welche vor allem im Nahverkehr eingesetzt werden. Der Schwerlastfernverkehr wird hingegen ab den 2030er Jahren vom Brennstoffzellenantrieb dominiert, welche im Jahr 2045 bei Sattelzugmaschinen einen Neuzulassungsanteil über 80 % erreichen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse in allen Fahrzeugklassen einen Mix der vollelektrischen Antrieboptionen.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen unterstreichen, dass sowohl die Bilanzierung des internationalen See- und Flugverkehrs als auch die Nutzung der Vehicle-to-Grid-Technologie zu einer intensivierten Nutzung des batterieelektrischen Antriebs führen. Aufgrund des Einbezugs des internationalen Verkehrs ab 2020 in die Treibhausgasbilanz im Rahmen der Sensitivitätsanalyse, wird zudem frühzeitiger auf vollelektrische Antriebe im Straßenverkehr

umgestellt. Der verstärkte Einsatz von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen als Brückentechnologie bleibt daher in diesem Fall aus.

2. Dauer der Bestandelektrifizierung macht synthetische Kraftstoffe zur vollständigen Defossilisierung bis 2045 in allen Verkehrsmittelarten erforderlich.

Zwar sind die Neuzulassungen aller betrachteten Straßenverkehrsmittel im Basisszenario spätestens ab 2040 vollelektrisch ausgeführt, jedoch findet die Bestandsumstellung infolge der Lebensdauer der Fahrzeuge zeitverzögert statt. Somit sind in allen untersuchten Verkehrsmitteln verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge bis 2045 im Bestand. Die kürzere Lebensdauer von Sattelzugmaschinen ist hinsichtlich der Geschwindigkeit der Bestandsumwandlung im Vergleich zu allen anderen Verkehrsmitteln vorteilhaft. Dennoch sind auch in dieser Fahrzeugklasse solche Fahrzeuge aufgrund des späteren Ausstiegs aus der Verbrennungsmotortechnologie bis 2045 im Bestand. Daher ist in allen Verkehrsmitteln vom Pkw bis zum Binnengüterschiff der Einsatz synthetischer Flüssigkraftstoffe bis 2045 unausweichlich, um eine vollständige Defossilisierung des Verkehrssektors im Einklang mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dennoch ist der zukünftige Bedarf an Flüssigkraftstoffen um ein Vielfaches niedriger als die heutige Nachfrage. Allein die vorzeitige Verschrottung der Fahrzeuge oder im Fall von Zügen und Schiffen die Umrüstung des Restbestands auf vollelektrische Antriebe, ermöglicht einen vollständigen Verzicht auf synthetische Flüssigkraftstoffe fernab des Flugverkehrs.

3. Elektrische Energie und Wasserstoff sind die Energieträger der Zukunft im Verkehrssektor.

Trotz des beschriebenen zukünftig verbleibenden Bedarfs an Flüssigkraftstoffen führt die zunehmende Elektrifizierung zu einer Dominanz von elektrischer Energie und Wasserstoff als Energieträger des Verkehrssektors. Der Strombedarf wird maßgeblich durch Pkw getrieben, wohingegen die Wasserstoffnachfrage verstärkt im Straßengüterverkehr entsteht. Der höhere Antriebswirkungsgrad der elektrifizierten Antriebe führt bis 2045 zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor um fast 60 % gegenüber dem Jahr 2020. Daher fällt der Strombedarf mit 122 TWh und der Wasserstoffbedarf mit 85 TWh im Jahr 2045 deutlich kleiner als die heutige Otto- und Dieselmotornachfrage aus. Die Szenarioanalysen zeigen, dass der Strombedarf geringere Streuungen als die Wasserstoffnachfrage aufweist.

Der Wechsel des Energieträgers im Verkehrssektor führt ebenfalls zu veränderten Anforderungen an den Energiesektor. Dies umfasst sowohl den erforderlichen Ausbau der Lade- und Tankstelleninfrastruktur als auch die Herstellung der Energieträger. Insbesondere im Pkw-Bereich müssen bis 2040 mehr als 24 Millionen private und öffentliche Ladepunkte errichtet werden, da die Anzahl der Fahrzeuge je Ladepunkt deutlich kleiner ausfällt als die Anzahl der Fahrzeuge je Wasserstofftankstelle. Vergleichbares gilt für den Nutzfahrzeugbereich, wobei der geringere Fahrzeugbestand zu absolut niedrigeren Stückzahlen führt. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Fokussierung der Schnellladeinfrastruktur sowohl im Pkw- als auch im Nutzfahrzeugbereich einen positiven Einfluss auf den Marktanteil von Batterie-Elektrofahrzeugen hat, da die Infrastrukturkosten gesenkt werden. Zur Herstellung von grünem Strom und Wasserstoff steigt die installierte Leistung erneuerbarer Energien massiv bis 2045 an. Der zunehmende Anteil erneuerbarer Energien führt außerdem zu einer geringeren Importabhängigkeit des Primärenergiebedarfs.

4. Die Kosten des Transformationspfads hängen stärker vom sozialen als vom technologischen Wandel ab.

Neben den Ergebnissen in Bezug auf die genannten technologischen Entwicklungen und Abhängigkeiten weisen die Szenarioanalysen ebenfalls die jährlichen Kosten in Abhängigkeit der Szenarioannahmen auf. Die Defossilisierung des Verkehrssektors führt in allen untersuchten Szenarien zu Mehrkosten des Energiesystems über den Betrachtungszeitraum. Diese resultieren vor allem aus den steigenden Infrastrukturkosten infolge des Kraftstoffwechsels. Zudem unterstreichen die Ergebnisse, dass die Kosten des Transformationspfads insbesondere vom sozialen und weniger vom technologischen Wandel abhängen. Der verstärkte modale Shift und die insgesamt verringerte Verkehrsnachfrage im Szenario *Progressive* senken die Kosten des betrachteten Energiesystems mehr als eine positive techno-ökonomische Entwicklung der bedeutsamsten Antriebskomponenten vollelektrischer Antriebe in den Szenarien *E+* und *H₂₊*. Alles in allem fällt die Kostendifferenz der betrachteten Szenarien jedoch sehr gering aus.

8 Diskussion

In diesem Kapitel werden sowohl der methodische Ansatz als auch die Resultate der Analysen diskutiert. Dies umfasst eine Einordnung der Ergebnisse in die Literatur, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufweist, sowie potenzielle weiterführende Untersuchungen.

Das methodische Konzept der Untersuchungen auf Fahrzeugebene basiert in dieser Arbeit auf der Analyse Gesamtbetriebskosten. Das Konzept der Gesamtbetriebskosten zur Analyse der techno-ökonomischen Entwicklung von Verkehrsmitteln wird vielfach in der Literatur genutzt [150], [158], [161]. Jedoch werden die Fahrzeuge in der Literatur zumeist mittels exogener Annahmen konfiguriert [47], [150], [241]. In der vorliegenden Studie wird die Antriebsleistung von Pkw hingegen auf Basis der Leistungsparameter Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeit endogen berechnet und dabei die Fahrzeugmasse einbezogen. Ebenso bestimmt die definierte Reichweite die Batteriekapazität der Fahrzeuge. Des Weiteren greift die Literatur hinsichtlich der Energiebedarfe der Verkehrsmittel zumeist auf exogene Annahmen zurück [47], [148], [150], [161]. Demgegenüber werden die Energiebedarfe im Rahmen dieser Arbeit basierend auf der zukünftigen Entwicklung von antriebs- und fahrzeugspezifischen Parametern mittels Fahrzyklussimulationen berechnet. Vergleichbar zum Energiebedarf werden die spezifischen Komponentenkosten in der Literatur ebenfalls zumeist exogen angenommen [150], [164], [241]. Im Gegensatz dazu werden die spezifischen Kosten der Komponenten elektrifizierter Fahrzeuge im entwickelten Modell auf Basis eines Lernkurvenansatzes und einem verkehrsmittelübergreifenden Weltmarktszenario endogen bestimmt. Die spezifischen Komponentenkosten werden darüber hinaus zur endogenen Berechnung der Wartungskosten genutzt, welche in der Literatur ein exogener Parameter sind [150], [171], [240]. Der verkehrsmittelübergreifende Ansatz des entwickelten Modells mittels des gemeinsamen Weltmarktszenarios zur Ableitung der Lernkurven (vgl. Sektion 4.1.4) ist in der vorliegenden Literatur ebenfalls nicht vorhanden.

Die erläuterten Punkte zeigen, dass das Grundkonzept der Analyse der Gesamtbetriebskosten zur techno-ökonomischen Bewertung der Verkehrsmittel weit verbreitet ist. Jedoch werden die Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten im Rahmen dieser Studie im Vergleich zur Literatur tiefergehend bestimmt. Dennoch sind Weiterentwicklungen des Modells möglich. Der genutzte Lernkurvenansatz ermöglicht es nicht Auswirkungen von veränderten Rohstoffkosten, welche vermehrt in den Fokus von Untersuchungen rücken [48], auf die spezifischen Komponentenkosten analysieren zu können. Zudem werden die Komponentenwirkungsgrade innerhalb der Fahrzyklussimulation als konstant angenommen. Somit wird die Lastabhängigkeit der Effizienzen modellseitig vereinfacht dargestellt.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Analysen der Gesamtbetriebskosten der Verkehrsmittel weisen eine vorteilhafte Kostenentwicklung vollständig elektrifizierter Antriebe auf. Im Einklang mit der Literatur werden Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in allen betrachteten Anwendungen günstiger als Verbrennungsmotorfahrzeuge [158], [171], [174], [241]. Die auf Basis des Lernkurvenansatzes bestimmten zukünftigen spezifischen Kosten der Batterie, der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks ordnen sich in die Literatur ein (vgl. Abbildung 6.32). Allerdings ist die berechnete Kostenentwicklung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen bei Pkw sowie insbesondere bei Sattelzugmaschinen

im Vergleich zur deutschen Literatur deutlich stärker ausgeprägt [171], [176], [241] (vgl. Abbildung 6.33). Dies resultiert aus der geringeren exogen angenommenen Kostendegression der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks in der deutschen [171], [176], [241] im Vergleich zur weiteren Literatur [156], [158], [175]. Die im Rahmen dieser Arbeit endogen berechneten spezifischen Komponentenkosten liegen insbesondere im Vergleich zu älterer Literatur am unteren Rand. Dies ist auf die rasante Entwicklung der Komponenten elektrifizierter Antriebe in den letzten Jahren zurückzuführen. Überdies werden vor allem die Kosten der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks in der deutschen Literatur im internationalen Vergleich hoch angenommen. In der vorliegenden Analyse liegen die berechneten Kosten auf dem Niveau der internationalen Literatur. Ähnliches gilt ebenso für die Herstellungskosten der Fahrzeuge. Die Differenz der Herstellungskosten von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen wird in dieser Arbeit stetig kleiner und ist ab 2030 vernachlässigbar gering. Demgegenüber erwartet die deutsche Literatur weiterhin einen signifikanten Vorteil von Batterie-Elektrofahrzeugen, welcher zum einen aus den genannten Kostenentwicklungen der Komponenten folgt. Zum anderen werden in der deutschen Literatur geringere Reichweiten der Fahrzeuge angenommen [171], [176], [241]. Demgegenüber spiegeln die in diesen Untersuchungen erwarteten steigenden batterieelektrischen Reichweiten den aktuellen Trend am Fahrzeugmarkt wider.

Der intermodale Vergleich verdeutlicht die Bedeutung der Auslastung der Verkehrsmittel. Insbesondere aufgrund der Elektrifizierung verringert sich der energetische Vorteil des öffentlichen Verkehrs gegenüber dem Pkw, sodass die Auslastung der Verkehrsmittel noch stärker in den Fokus rückt (vgl. Abbildung 6.15). Schäfer und Yeh weisen in ihren Analysen ebenfalls auf die hohe Bedeutung der Auslastung im energetischen Vergleich der Verkehrsmittel hin und unterstreichen, dass deren Auswirkung den technologischen Einfluss übersteigt [249]. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen wird in dieser Studie ein Vorteil des öffentlichen Verkehrs ausgewiesen. Demgegenüber zeigen Schäfer und Yeh hinsichtlich des Energiebedarfs sowie auch in Bezug auf die Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel ein vergleichbares Niveau dieser auf. Diese abweichenden Ergebnisse sind in der unterschiedlichen Elektrifizierung der Bahnstrecken begründet. Schäfer und Yeh betrachten den Bahnverkehr in den USA, Kanada und Indien, welcher deutlich niedrigere Elektrifizierungsraten aufweist als der in der vorliegenden Analyse betrachtete Bahnverkehr in Deutschland.

Das Optimierungsmodell, welches in dieser Arbeit zur Untersuchung der Entwicklungen des gesamten deutschen Verkehrssektors entwickelt und genutzt wird, bildet sowohl den Verkehrs- als auch den Energiesektor ab. Folglich werden Effekte der Sektorenkopplung im Gegensatz zu den in Sektion 3.4.5 vorgestellten Szenarien zum deutschen Verkehrssektor endogen einbezogen. Die Relevanz des Energiesektors für Analysen des Verkehrssektors nimmt zukünftig zu, da sich die Emissionen infolge der zunehmenden Elektrifizierung vom Tank-to-Wheel- zum Well-to-Tank-Abschnitt verschieben. Zudem gewinnt die zeitliche Verteilung der Nachfrage an Bedeutung. Im Gegensatz zur Literatur entscheidet das Optimierungsmodell endogen, welche Mengen an Power-to-X-Kraftstoffen importiert oder innerhalb Deutschlands hergestellt werden. Des Weiteren wird mittels der vielfältigen Nachfrageprofile und der detaillierten Information zu den Lademöglichkeiten die Modellierung der Auswirkungen batterieelektrischer Pkw auf den Energiesektor im Vergleich zur Literatur verbessert. Neben der Abhängigkeit vom Regionstyp stellt die stündliche Auflösung der

Profile in diesem Zusammenhang einen bedeutenden Faktor dar. In den in Abschnitt 3.4 analysierten Verkehrssektormodellen stehen die Energieträger hingegen zumeist unabhängig von Ort und Zeit zu konstanten Kosten zur Verfügung, was eine starke Vereinfachung gegenüber der Realität ist.

In allen berechneten Szenarien werden Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge zukünftig den Straßenverkehr dominieren. Diese Elektrifizierung der Verkehrsmittel deckt sich mit der in Abschnitt 7.4 analysierten Literatur. Dennoch zeigt sich, dass Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Rahmen dieser Arbeit einen höheren Anteil bis 2045 erreichen. Dies ist zum einen in der zuvor erläuterten stärkeren Kostendegression von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Vergleich zur weiteren deutschen Literatur begründet. Zum anderen ist diese Entwicklung eine Folge des modellseitigen Einbezugs des Energiesektors, da eine verstärkte Wasserstoffnutzung systemdienlich ist. Neben der zunehmenden Elektrifizierung unterstreichen die Analysen im Einklang mit der Literatur, dass ein Restbestand von Verbrennungsmotorfahrzeugen im Pkw-Bestand bis 2045 dazu führt, dass synthetische Kraftstoffe eingesetzt werden müssen, um eine vollständige Defossilisierung des Verkehrssektors zu erreichen. Die *Renewability* Szenarien weisen mit 21-72 % einen höheren Restanteil auf. Dies ist auf die positive Entwicklung der Batterietechnik in den letzten Jahren zurückzuführen, welche eine stärkere Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen zur Folge hat. Weitergehende Untersuchungen könnten die Auswirkungen potenzieller politischer Maßnahmen zur vollständigen Elektrifizierung des Fahrzeugbestands bis 2045 thematisieren. Sowohl die durchgeführten Fahrzeug- als auch die Sektoranalysen weisen ein signifikantes Potential für Range-Extender Fahrzeuge (REEV) aus. Dieses Konzept wird in der Literatur, wie in Abschnitt 3.4 aufgezeigt, nur unzureichend berücksichtigt und sollte intensiver in zukünftigen Analysen aufgegriffen werden.

Fernab der aufgezeigten Ergebnisse der technologischen Entwicklungen stellen die Szenarienergebnisse heraus, dass die Kosten des Transformationspfads stärker vom sozialen als vom technologischen Wandel abhängen. Insbesondere führen veränderte Anteile von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr zu vernachlässigbar geringen Kostenunterschieden. Dies steht den Analysen von Mottschall et al. entgegen, welche in ihrem Szenario *H₂+* mit einem intensivierten Einsatz von Wasserstoff signifikant höhere Mehrkosten gegenüber den weiteren Szenarien ausweisen [241]. Dieser Unterschied folgt aus den bereits geschilderten geringeren Kosten von Batterie- gegenüber Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen nach Mottschall et al., welche in der angenommenen Reichweite und den Komponentenkosten begründet sind.

Zukünftige Analysen sollten die Kapazität der Verkehrsnetze und den möglichen entstehenden Ausbaubedarf der Verkehrsnetze infolge einer veränderten modalen Verkehrsnachfrage aufgreifen. Darüber hinaus bietet die Umlegung der Verkehrsnachfrage auf die Verkehrsnetze das Potenzial zur verbesserten Bestimmung des Versorgungsinfrastrukturbedarfs, welcher wie in Sektion 7.3.4 analysiert, einen entscheidenden Faktor hinsichtlich der gesamtsystemkostenoptimalen Antriebsanteile darstellen kann.

9 Zusammenfassung

Die deutsche Bundesregierung hat das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 ausgegeben, welches ebenso den Verkehrssektor als Teil des Energiesystems umfasst. Die Optionen die Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors zu erreichen sind heute mit ausreichendem technischem Reifegrad verfügbar. Dennoch ist der Verkehrssektor der einzige Sektor des deutschen Energiesystems, welcher bis zum Jahr 2021 keine nachhaltige Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 erreicht hat. Das für das Jahr 2020 gesteckte Treibhausgasreduktionsziel wurde im Verkehrssektor lediglich aufgrund der infolge der Coronapandemie signifikant reduzierten Verkehrsnachfrage erreicht.

Als Beitrag die zukünftigen Klimaschutzziele einzuhalten ist das Ziel dieser Arbeit eine techno-ökonomische Analyse der Optionen zur Defossilisierung des Verkehrssektors. Dies umfasst die Analyse der zukünftigen Kostenentwicklung der Verkehrsmittel inklusive entscheidender Einflussfaktoren sowie den intermodalen Vergleich der Verkehrsmittel. Darüber hinaus werden im Rahmen der vorliegenden Studie Transformationspfade des deutschen Verkehrssektors unter Einhaltung der Klimaschutzziele entwickelt. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen der Sektorenkopplung berücksichtigt.

Zur techno-ökonomischen Bewertung der Antriebsoptionen auf Fahrzeugebene sowie des intermodalen Vergleichs stellt die Analyse der *Total Cost of Ownership* ein geeignetes Werkzeug dar. Die Literaturanalyse hat herausgestellt, dass die Kostenbestandteile innerhalb der Studien zumeist auf Basis von Literaturwerten oder Expertenschätzungen exogen angenommen werden. Ein weiterer Schwachpunkt der deutschen Literatur ist, dass oft eine geringe Reichweite batterieelektrischer Pkw von 150 oder 300 km unterstellt wird, welche der aktuellen Entwicklung in Richtung höherer und weiter steigender Reichweiten aufgrund der Kundenanforderungen entgegensteht. In der Literatur sind Ansätze bekannt, welche die methodische Vorgehensweise verbessern. Diese Ansätze lassen eine deutlich fundiertere Bestimmung der Kostenarten zu. Die zukünftigen Herstellungskosten werden komponentenbasiert auf Basis des Lernkurvenansatzes bestimmt. Die daraus resultierenden Komponentenkosten finden ebenso Eingang in die Berechnung der Wartungskosten, welche des Weiteren insbesondere von der Lebensdauer der Komponenten abhängen. Die Energiebedarfe der Straßenverkehrsmittel werden mittels Fahrzyklussimulationen berechnet. Somit erlauben die genannten Methoden eine detailliertere Modellierung als der Status Quo der Studienlage.

Aus der durchgeführten Literaturanalyse zu Modellierungskonzepten sowie insbesondere der Lücken bisheriger Studien folgt der methodische Ansatz in der vorliegenden Arbeit. Die Herstellungs- und Wartungskosten werden komponentenbasiert mittels des Lernkurvenansatzes bestimmt. Zudem erfolgt eine methodisch fundierte Konfiguration der Antriebskomponenten in Abhängigkeit der Anforderungen an Leistungsparameter sowie die Reichweite der Fahrzeuge. Dabei werden unter anderem die mittels Fahrzyklussimulationen bestimmten Energiebedarfe genutzt, welche die zukünftige Entwicklung diverser antriebs- und fahrzeugspezifischer Parameter inkludiert. Die detaillierte Berechnungsmethodik erlaubt die gezielte Analyse der entscheidenden Einflussparameter.

In Bezug auf die techno-ökonomische Analyse von Straßenfahrzeugen wird zwischen Pkw, Bussen und Nutzfahrzeugen differenziert. Für jede dieser Fahrzeugarten werden mehrere

typische Anwendungsfälle untersucht. Zudem werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss der entscheidenden Parameter auf die techno-ökonomische Entwicklung zu analysieren.

Die ausgeführten techno-ökonomischen Analysen von Verkehrsmitteln zeigen insbesondere die komponentenbasierte Entwicklung der Herstellungskosten und der Gesamtbetriebskosten (TCO) von 2020 bis 2050 auf. Die antriebsspezifische Betrachtung führt zu den nachstehenden Schlussfolgerungen:

- Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden günstiger als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb. Dieser Vorteil der vollelektrischen Antriebsoptionen ergibt sich unabhängig von der Fahrzeugklasse sowie der spezifischen Anwendung. Die Anwendung hat jedoch Einfluss auf den Zeitpunkt der Kostenparität zum konventionellen Antrieb. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen tritt diese insbesondere bei kleineren Fahrzeugen, welche im urbanen Gebiet eingesetzt werden, früher als bei Langstrecken Anwendungen auf.
- Die Differenz der Gesamtbetriebskosten von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen wird in allen Anwendungen über der Zeit geringer. Dies ist unter anderem eine Folge der stärkeren Kostendegression der Brennstoffzellenfahrzeuge sowie dem Vorteil der Wasserstoffversorgungsinfrastruktur bei höheren Marktdurchdringungen. Welche der beiden vollelektrischen Antriebsvarianten zukünftig die günstigste Option darstellt ist nicht nur abhängig von der Fahrzeugklasse, sondern auch von weiteren Parametern.
- Der Energiebedarf, die Reichweite und die Fahrleistung sind die entscheidenden Kriterien, ob Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge günstiger sind. Daher ist das spezifische Einsatzgebiet des Fahrzeugs und nicht nur die Fahrzeugklasse bei der Wahl des Antriebs zu berücksichtigen. Im Fernverkehr haben insbesondere die Kraftstoffkosten einen großen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten. Aufgrund der hohen Fahrleistungen im Fernverkehr nimmt der Anteil der Herstellungskosten an den Gesamtbetriebskosten trotz der steigenden Reichweitenanforderungen ab. Im Gegenzug wächst der Anteil der Kraftstoffkosten an.
- Der intermodale Vergleich zeigt, dass die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs den energetischen Vorteil des öffentlichen Verkehrs reduziert. Damit wird die Verkehrsmittelauslastung zum entscheidenden Faktor des modalen Vergleichs.

Die Entwicklung von Transformationspfaden des deutschen Verkehrssektors, welche die Klimaschutzziele einhalten, erfolgt methodisch und inhaltlich verknüpft mit den zuvor beschriebenen techno-ökonomischen Analysen auf Fahrzeugebene. Die Transformationspfade bauen auf der historischen Struktur des Verkehrssektors auf. Die Ausführungen unterstreichen in Bezug auf den modalen Split die aktuelle Dominanz des Straßenverkehrs sowie antriebsseitig die der Verbrennungsmotoren. Infolgedessen entfielen mehr als 94 % des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors im Jahr 2019 auf fossile Flüssigkraftstoffe, sodass der Verkehrssektor zurzeit nur sehr untergeordnete Auswirkungen auf die Stromproduktion oder weitere Teile des Energiesektors fernab der Ölindustrie hat. Trotz der Dominanz konventioneller Antriebe ist der einsetzende Markthochlauf elektrifizierter Antriebe bereits in den Pkw-Neuzulassungszahlen ersichtlich. Zur Entwicklung eines Transformationspfades werden heute ersichtliche Trends des Verkehrssektors erörtert. Diese

umfassen den modalen Shift, den Antriebs- und Kraftstoffwechsel inklusive der Netzintegration batterieelektrischer Fahrzeuge, die Shared Mobility sowie das automatisierte und vernetzte Fahren.

Auf Sektorebene existiert eine Vielzahl nationaler und internationaler Analysen, welche eine breite Abdeckung der heute diskutierten Treibhausgasminderungsoptionen hinsichtlich der Verkehrsmittel, Antriebsarten und Kraftstoffe aufweist. Dennoch ist hier ein Fokus auf batterieelektrische Pkw zu erkennen. Allerdings werden das Konzept der Range-Extender-Fahrzeuge sowie die Nutzung synthetischer Kraftstoffe vielfach nicht in den Analysen berücksichtigt. Zudem ist die zeitliche Auflösung zumeist jährlich, sodass Effekte der Sektorenkopplung unter anderem infolge der Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge nicht ausreichend abgebildet werden können. Die zuvor geschilderten Schwachpunkte der techno-ökonomischen Analyse der Verkehrsmittel haben ebenfalls Auswirkungen auf die Untersuchungen auf Sektorebene, da die resultierenden Parameter (Kosten, Energiebedarfe der Fahrzeuge) entscheidende Faktoren der Sektoranalysen sind.

Die detaillierten Ergebnisse der Fahrzeuganalysen stellen Eingangsparameter für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verkehrssektormodell *FINE.Transport* dar. Zur Analyse von Transformationspfaden des Verkehrssektors bis 2045 wird der myopische Ansatz verwendet. Der gegenüber dem Stand der in der Literatur dokumentierten Modellansätze höhere Detailgrad der Verkehrsnachfrageprofile, vor allem von Pkw, die stündliche Auflösung des Modells sowie die modellseitige Abbildung des Energiesektors erlauben eine fundierte Analyse der Effekte der Sektorenkopplung infolge der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors. Der gesamtheitliche Ansatz des Kostenoptimierungsmodells inkludiert nicht nur Aspekte, welche die Verkehrsmittel betreffen, sondern darüber hinaus auch Auswirkungen auf die Energieträgerbereitstellung inklusive Herstellung und Versorgungsinfrastruktur.

Die Szenarien zur Sektoranalyse setzen sich aus sozio- und techno-ökonomischen Entwicklungen zusammen. Insgesamt entstehen durch die Kombination der beiden sozio-ökonomischen Szenarien *Status Quo* und *Progressive* sowie der drei techno-ökonomischen Szenarien *Reference*, *Electricity+* und *Hydrogen+* sechs Szenarien, welche in den Transformationsanalysen des Verkehrssektors betrachtet werden. Auf Basis der Szenarioergebnisse werden darüber hinaus Sensitivitätsanalysen der kritischsten Einflussparameter abgeleitet, deren Ergebnisse weiterführende Erkenntnisse liefern.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen der Szenarioanalysen zur Transformation des deutschen Verkehrssektors vom heutigen Status Quo hin zu einem treibhausgasneutralen System im Jahr 2045 sind:

- Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden den Straßenverkehr dominieren. Die Analysen verdeutlichen des Weiteren, dass Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeuge in der Pkw-Klasse als Brückentechnologie genutzt werden. Anschließend erfolgt der vollständige Wandel der Neuzulassungen hin zu vollelektrischen Antrieben. Der Anteil der vollelektrischen Antriebsoptionen ist dabei abhängig vom Fahrzeugsegment, der Jahresfahrleistung sowie dem Regionstyp. Insgesamt entfällt im Basisszenario im Jahr 2045 ein Anteil von 46 % der Neuzulassungen auf Batterie-Elektrofahrzeuge, 29 % auf Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge und 25 % auf Range-Extender-Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle. Mit einem Marktanteil von 59 % bzw. 75 % im

Jahr 2045 erreichen Batterie-Elektrofahrzeuge bei Bussen und leichten Nutzfahrzeugen infolge der geringeren Reichweitenanforderungen eine stärkere Durchdringung. Der Markthochlauf der Antriebsoptionen mit Brennstoffzelle tritt bei den genannten Fahrzeugklassen aufgrund der techno-ökonomischen Entwicklungen im Vergleich zu Batterie-Elektrofahrzeugen verspätet ein. Die hohen Reichweitenanforderungen von Sattelzugmaschinen haben zur Folge, dass deren Neuzulassungen insbesondere ab 2035 von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen dominiert sind.

- Trotz der beschriebenen vollständigen Elektrifizierung der neu zugelassenen Straßenfahrzeuge im Betrachtungszeitraum führt die Lebensdauer zu einer zeitverzögerten Bestandelektrifizierung. Somit sind synthetische Kraftstoffe zur vollständigen Defossilisierung bis 2045 in allen Verkehrsmitteln erforderlich, da bei allen ein Restbestand nicht elektrifizierter Verkehrsmittel bestehen bleibt. Dennoch ist zu beachten, dass der Bedarf an synthetischen Flüssigkraftstoffen mit 55 TWh im Jahr 2045 weniger als 9 % der heutigen Flüssigkraftstoffnachfrage entspricht.
- Aufgrund der Elektrifizierung sind elektrische Energie und Wasserstoff die Energieträger der Zukunft im Verkehrssektor. Im Basisszenario steigt deren Nachfrage bis 2045 auf über 85 TWh Wasserstoff und 122 TWh elektrischer Energie an. Während die Stromnachfrage vor allem von Pkw getrieben wird, entsteht der Wasserstoffbedarf insbesondere durch Sattelzugmaschinen. Die Untersuchungen zeigen, dass der Wechsel des Energieträgers einen Ausbau der Versorgungsinfrastruktur in allen Bereichen des Verkehrssektors notwendig macht.
- Die kumulierten Kosten des Transformationspfads hängen mehr vom sozialen als vom technologischen Wandel ab. Die Kostendifferenz der techno-ökonomischen Szenarien liegt unter 1 %, wohingegen die sozio-ökonomischen Szenarien aufgrund des verstärkten modalen Shifts und der daraus resultierenden Reduktion des Fahrzeugbestands im Straßenverkehr zu einer Differenz von 4 % führen.

Die darüber hinaus durchgeführten Sensitivitätsanalysen weisen zunächst die hohe Bedeutung der Bilanzierung des internationalen Luft- und Seeverkehrs für die Geschwindigkeit der Elektrifizierung im Straßenverkehr aus. Insbesondere erfolgt eine frühere Vollelektrifizierung und infolgedessen ein reduzierter Einsatz von Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen als Brückentechnologie. Vergleichbares gilt weiterhin, wenn keine synthetischen Flüssigkraftstoffe vor 2030 importiert werden können. Zudem haben Vehicle-to-Grid sowie die Fokussierung der Schnell- gegenüber der Langsamlader einen positiven Einfluss auf die Marktdurchdringung von Batterie-Elektrofahrzeugen, da sie techno-ökonomische Vorteile für den batterieelektrischen Antrieb generieren.

Anhang

A Grundlagen des Verkehrssektors

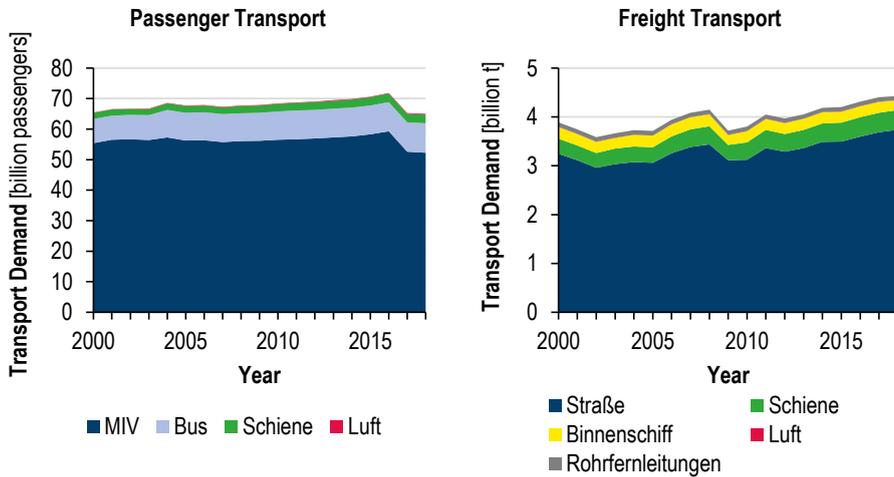


Abbildung A.1: Historische Entwicklung des Personen- und Güterverkehrsaufkommens 2000-2020, angelehnt an [12]. MIV: Motorisierter Individualverkehr.

B Grundlegende Datenquellen zum deutschen Verkehrssektor

Die Qualität der Modellierung des Verkehrssektors hängt unter anderem von den zur Verfügung stehenden Daten ab. Detaillierte Daten erlauben eine detaillierte Modellierung. Soll trotz nicht vorhandener Daten eine hochaufgelöste Modellierung erfolgen, müssen Annahmen getroffen werden. Dadurch wird jedoch die Aussagekraft der Modellergebnisse geschmälert. Eine andere Möglichkeit stellt die vereinfachte Modellierung dar, welche hingegen den Detailgrad der Modellergebnisse reduziert. Im Folgenden werden grundlegende Datenerhebungen zum deutschen Verkehrssektor beschrieben, welche im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden. Dazu werden diese zunächst einzeln erläutert. In Tabelle B.1 werden abschließend einige Eigenschaften der Datenerhebungen verglichen. Die Datenerhebungen beziehen sich zumeist auf verschiedene Größen der Verkehrsnachfrage sowie des Verkehrsmittelbestands.

Mobilität in Deutschland (MiD) [110]

Im Rahmen der *Mobilität in Deutschland* Studie werden bundesweit Haushalte zu ihrem alltäglichen Verkehrsverhalten befragt. Die zuletzt 2017 durchgeführte Befragung erfolgte zuvor in den Jahren 2002 und 2008 sowie in ähnlicher Form bereits 1976, 1982 und 1989. Die nächste Durchführung ist für das Jahr 2023 angekündigt, um ebenfalls Effekte der Coronapandemie zu überprüfen. Die Studie *Mobilität in Deutschland* liefert nicht nur Ergebnisse für das gesamte Bundesgebiet, sondern darüber hinaus auch für Bundesländer und einzelne Regionen. Dazu wurden im Rahmen der letzten Studie im Jahr 2017 deutschlandweit insgesamt über 155.000 Haushalte befragt, womit sie die größte bundesweite Erhebung sowie eine der weltweit größten Erhebungen zur Alltagsmobilität darstellt.

Die Daten der Studie *Mobilität in Deutschland* beinhalten Informationen zu Haushalten, Personen und Wegen. Wegeinformationen sind unter anderem Wegelänge, -dauer und -zweck. Der Wegezweck ist eine wichtige Information, welche nur mit einer „klassischen“ Statistik wie der Studie *Mobilität in Deutschland* erfasst werden kann. Mobilfunk- oder GPS-Daten können diese Information hingegen nicht ausweisen. Da der Wegezweck jedoch ein grundlegender Parameter der aktivitätsbasierten Modellierung der Personenverkehrsnachfrage (z.B. mit *MO|DE*) ist, handelt es sich hierbei um eine entscheidende Information. Die Befragung der Haushalte im Rahmen der Studie *Mobilität in Deutschland* erfolgt zu einem Stichtag, weshalb die Studie als Querschnittsstudie bezeichnet wird. Aufgrund der Betrachtung des gesamten Personenverkehrs, können mittels der Daten ebenfalls Aussagen zur Modalwahl in Abhängigkeit weiterer Parameter getroffen werden.

Deutsches Mobilitätspanel (MOP) [111]

Im Gegensatz zur Studie *Mobilität in Deutschland* ist das *deutsche Mobilitätspanel* eine Längsschnittstudie, da die seit 1994 jährlich durchgeführte Befragung der Haushalte zu einem Zeitraum von einer Woche erfolgt. Darüber hinaus werden über drei Jahre dieselben repräsentativ ausgewählten Personen und Haushalte zu ihrem Mobilitätsverhalten befragt, sodass Entwicklungen über der Zeit erfasst werden. Somit ergänzen sich die Studie *Mobilität in Deutschland* als Quer- und das *deutsche Mobilitätspanel* als Längsschnittstudie als Erhebungen zur deutschen Alltagsmobilität und bilden eine fundierte Datenbasis zur Modellierung des Personenverkehrs. Der Umfang des *deutschen Mobilitätspanels* ist mit rund 1.850 Haushalten kleiner als bei der Studie *Mobilität in Deutschland*.

Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) [112]

Die Studie zum *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* ist vergleichbar mit der Studie *Mobilität in Deutschland*. Der wesentliche Unterschied der beiden Studien besteht darin, dass die Studie *Mobilität in Deutschland* lediglich die Mobilität von Personen umfasst, wohingegen die Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland* den Einsatz von Kraftfahrzeugen unabhängig, ob im Personen- oder Güterverkehr, erfasst. Die Datenerhebung erfolgt für mehr als 100.000 repräsentativ ausgewählte Kraftfahrzeuge. Wie bei der Studie *Mobilität in Deutschland* sind die Daten räumlich und zeitlich hoch aufgelöst (Gemeindeverbandsebene, minutlich) und beinhalten Informationen zum Fahrzeug, Halter und den Wegen. Somit stellt die Studie eine bedeutsame Datenquelle zur Modellierung des Güterverkehrs in Deutschland dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird sie insbesondere innerhalb des Güterverkehrsnachfragemodells *FRE|MOD* und zur weiteren Parametrierung der fahrzeug- und sektorbezogenen Analysen verwendet.

Verkehr in Zahlen (ViZ) [12]

Das jährlich veröffentlichte Kompendium *Verkehr in Zahlen* beinhaltet seit mehr als 40 Jahren aktuelle Zahlen und Zeitreihen zu verschiedenen Aspekten der Mobilität und des Verkehrs. Die Besonderheit der Statistik ist die ausführliche Aggregation verschiedener vorausgehender Verkehrsstudien. *Verkehr in Zahlen* umfasst sowohl Investitionen als auch Daten zum Verkehrsaufkommen und -leistung. Darüber hinaus sind Informationen zum täglichen Mobilitätsverhalten der Deutschen sowie ein Vergleich verschiedener Kennzahlen im europäischen Kontext enthalten. Der Statistik werden im Rahmen dieser Arbeit unter anderem historische Kennzahlen der Güterverkehrsnachfrage als Ausgangsbasis der Modellierung der zukünftigen Nachfrage entnommen.

Verkehrsverflechtungsprognose [109]

Im Gegensatz zu den anderen in diesem Kapitel vorgestellten Datenquellen sind die Daten der *Verkehrsverflechtungsprognose* keiner Datenerhebung entsprungen, sondern ein Modellierungsergebnis. Darüber hinaus besteht hinsichtlich des Zeitbezugs der Daten ein weiterer Unterschied. Während alle anderen Daten auf das Erhebungsjahr referenzieren, stellen die Daten der Verkehrsverflechtungsprognose eine Prognose für das Jahr 2030 dar. Zur Analyse verschiedener Entwicklungen werden die Daten zudem für das Jahr 2010 berechnet.

Grundlegendes Ziel der Prognose ist die Ermittlung wie viele Personen und Güter mit welchem Verkehrsmittel von wo nach wo fahren bzw. transportiert werden. Dazu werden auf Gemeindeverbandsebene sogenannte Quelle-Ziel-Matrizen bestimmt. Diese beinhalten Informationen zum Straßen-, Schienen-, Schiff- und Flugverkehr. Dabei wird nicht nur der Inlandsverkehr, sondern ebenfalls der grenzüberschreitende Verkehr betrachtet. Die Prognose berücksichtigt sozio-demographische und sozio-ökonomische Entwicklungen sowie die Entwicklung der Nutzerkosten und der ordnungspolitischen Rahmenbedingungen. Des Weiteren wird die Entwicklung der Verkehrsnetze einbezogen. Zur Bestimmung der sozio-ökonomischen Entwicklung beinhaltet die Verkehrsverflechtungsprognose eine fundierte regionalisierte Strukturdatenprognose.

Die Daten der Verkehrsverflechtungsprognose werden im Rahmen dieser Arbeit vor allem zur Modellierung der Güterverkehrsnachfrage verwendet. Dies umfasst die Nutzung der

Strukturdatenprognose zur Bestimmung des Verkehrsaufkommens sowie die Ermittlung der gütergruppen- und modusspezifischen Transportdistanzen auf Basis der Quelle-Ziel-Matrizen.

Fahrleistungserhebung (FLE) [28]

Die *Fahrleistungserhebung* besteht aus zwei Bausteinen, deren Ziel die Bestimmung einer zentralen Kenngröße ist - der Fahrzeugfahrleistung. Der eine Bestandteil ist eine Halterbefragung und der andere eine bundesweite Verkehrszählung. Die Halterbefragung umfasst eine zweimalige Abfrage des Tachostands einer zufälligen Stichprobe auf Basis des Zentralen Fahrzeugregisters. Somit können diese Angaben ganzjährig auf den Gesamtfahrzeugbestand hochgerechnet und die Fahrleistungen in Abhängigkeit verschiedener Halter- und Fahrzeugeigenschaften ausgewiesen werden. Da die Befragung nur deutsche Kraftfahrzeuge umfasst, resultiert daraus insgesamt die Inländerfahrleistung. Dies ist die von Inländern erbrachte Fahrleistung im In- und Ausland.

Die bundesweite Verkehrszählung erfolgt auf einer Stichprobe von Zählstellen auf Autobahnen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen. Im Gegensatz zur Halterbefragung wird hiermit die Inlandsfahrleistung bestimmt. Diese umfasst die Fahrleistung von deutschen und ausländischen Fahrzeugen in Deutschland. Insgesamt beinhalten die Daten Jahresfahrleistungen von Pkw, Lkw und Bussen sowie weiteren Straßenfahrzeugen in Abhängigkeit verschiedener Halter- und Fahrzeugeigenschaften. Somit erstellt die Fahrleistungserhebung eine geeignete Datenbasis der Verkehrsnachfragemodellierung des deutschen Straßenverkehrs. Aufgrund der Erhebung der Daten in den Jahren 1990, 1993, 2002 und 2014 kann darüber hinaus eine Entwicklung der Nachfrageeigenschaften über der Zeit abgeleitet werden.

Luftverkehr auf allen Flugplätzen [37]

Die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Daten zum *Luftverkehr auf allen Flugplätzen* beinhalten Informationen zu Haupt- und Nebenverkehrsflughäfen in Deutschland. Diese enthalten flugzeug- und passagier- bzw. frachtbezogene Daten. Die jährlich aggregierten Quelle-Ziel-Matrizen erlauben die Ableitung distanzabhängiger Aussagen. Die beschriebene Statistik bildet die Grundlage der Luftverkehrsmodellierung in dieser Arbeit. Dies umfasst beispielsweise die Gliederung in verschiedene Distanzklassen und Informationen zu Betriebsgrößen wie der Auslastung und der Kapazität der Flugzeuge.

Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes [14], [15], [20], [21], [25]

Abgerundet werden die Datenquellen zum deutschen Verkehrssektor von diversen Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes. Diese beinhalten über 40 monatliche und jährliche Datensätze zu Eigenschaften von Fahrzeugen, Fahrern sowie des Verkehrs. Durch die regelmäßige Erhebung und Veröffentlichung der Daten können unter anderem antriebspezifische Entwicklungen des Fahrzeugbestandes und der Neuzulassungen ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere Beobachtungen zum Markthochlauf der Elektromobilität. Die Daten werden z.B. in der Modellierung des historischen Fahrzeugbestands genutzt.

Fazit

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Verfügbarkeit von Daten zum Verkehr in Deutschland im internationalen Vergleich überdurchschnittlich ist. Dies betrifft insbesondere den

Straßenverkehr. Eine Längsschnittstudie vergleichbar zum MOP hinsichtlich des Personenverkehrs wäre auch zum Güterverkehr wünschenswert, um Informationen zur Güterverkehrsnachfrage über einen längeren Zeitraum als einen Tag zu erhalten. Alles in allem erlauben die räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Daten inklusive der Erhebung über mehrere Jahre die Durchführung tiefergehender Analysen mittels einer detaillierten Modellierung.

Vergleich der Datenquellen

Tabelle B.1: Vergleich verschiedener im Rahmen dieser Arbeit genutzten Datenerhebungen bzw. -quellen.

Bezeichnung	Mobilität in Deutschland (MID) 2017	Mobilitätspanel (MOP) 2021	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KID) 2010	Verkehrsvorhersage 2014	Verkehr in Zahlen (VIZ) 2021	Fahrleistungserhebung (FLE) 2014	Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2019
Letztes Erscheinungsjahr	2017	2021	2010	2014	2021	2014	2019
Veröffentlichungsrhythmus	Unregelmäßig, mehrere Jahre	Jährlich	Unregelmäßig, mehrere Jahre	Unregelmäßig, mehrere Jahre	Jährlich	Unregelmäßig, mehrere Jahre	Jährlich bis 2019
Räumliche Auflösung	Bundesland, Gemeindeverband oder 500x500 m	Raumtyp	Gemeindeverband	Gemeindeverband	National	National	Flughafenspezifisch
Zeitliche Auflösung	Minütlich	Minütlich	Minütlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich
Zeithorizont	1 Stichtag	1 Woche	1 Stichtag	1 Jahr	1 Jahr	1 Stichtag	1 Jahr
Personenverkehr	x	x	x	x	x	x	x
Güterverkehr			x	x	x	x	x
Straße	x	x	x	x	x	x	
Schiene	x	x		x	x		
Wasser	x	x		x	x		
Luft	x			x	x		x
Grundlegende enthaltene Informationen	Haushalte, Personen, Wege	Haushalte, Personen, Wege	Zulassungen, Fahrzeug- und Fahrtendaten	Verkehrsleistung, -aufkommen	Verkehrsleistung, -aufkommen	Fahrleistung, Bestand	Verkehrsleistung und -aufkommen, Kapazität
Umfang	156.420 Haushalte	1.957 Haushalte	100.000 Kraftfahrzeuge	Gesamtverkehr	Gesamtbestand	163.000 Fahrzeuge	Alle Starts und Landungen auf deutschen Flughäfen

C Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors

Tabelle C.1: Informationen zu den im Literaturrückblick betrachteten Modellen.

Model / Author	Ref	Spatial Scope			Temporal Scope			Spatial Resolution			Temporal Resolution			Sectoral Scope			
		Region	national	multi-country	global	< 2050	-2050	> 2050	< State level	State level	> Country level	< hours	hourly	Yearly	Passenger and Freight	Passenger only	Freight only
Renewability III	[47]	Germany	x							x					x		
ASTRA-DE	[198]	Germany	x			x									x		
VECTOR21	[193]	Germany	x			x				x					x		
VM-SIM	[194]	Germany	x			x				x					x		
Shell	[195]	Germany	x			x				x					x		
TraM	[199]	Germany	x					x									
TEMPS	[46]	Germany	x					x									
Trost	[200]	Germany	x					x									
Belmonte et al.	[201]	Germany	x					x									
SERAPIS	[202]	Austria	x					x									
UKTCM	[203]	UK	x					x									
STEAM	[217]	Scotland	x														
DTRem-LV	[196]	Latvia	x														
UniSyD	[204]	Iceland	x														

Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors

Model / Author	Ref	Spatial Scope			Temporal Scope			Spatial Resolution				Temporal Resolution			Sectoral Scope			
		Region	national	multi-country	global	< 2050	2050	> 2050	< State level	State level	Country level	> Country level	< hours	hourly	yearly	Passenger and Freight	Passenger only	Freight only
Shepherd et al.	[205]	UK	x			x				x						x		
TMOTEC	[206]	China	x			x				x						x		
MA3T	[207]	US	x			x										x		
ParaChoice	[208]	US	x			x										x		
ADOPT	[209]	US	x			x										x		
CPREG	[210]	China	x			x										x		
Hao et al.	[211]	China	x			x										x		
LEAP	[212]	China	x			x										x		
Palencia et al.	[213]	Japan	x			x										x		
Gambhir et al.	[214]	China	x			x										x		
Ou et al.	[215]	China	x			x										x		
Yabe et al.	[216]	Japan	x			x										x		
TRAN	[197]	US	x															
PTTMAM	[218]	EU		x														
ASTRA-EC	[198]	EU		x														

Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors

Model / Author	Ref	Spatial Scope			Temporal Scope			Spatial Resolution			Temporal Resolution			Sectoral Scope				
		Region	national	multi-country	global	< 2050	-2050	> 2050	< State level	State level	Country level	> Country level	< hours	hourly	yearly	Passenger and Freight	Passenger only	Freight only
TE3	[219]	Germany, France, India, Japan, China, US	x			x			x							x		
HIGH-TOOL	[220]	EU	x			x			x							x		
PRIMES-TREMOVE	[222]	EU	x			x			x							x		
TRIMODE	[221]	EU	x			x			x	(x)						x		
TRAVEL	[228]	global			x				x							x		
AIM/Transport	[229]	global			x				x							x		
MOVEET	[223]	global			x				x							x		
MoMo	[230]	global			x				x							x		
RoadMap	[224]	global			x				x	(x)						x		
ITEDD	[225]	global			x				x							x		
Khalili et al.	[226]	global			x				x							x		
ForFITS	[227]	global			x				x	(x)						x		

D Methodischer Ansatz

Modellsteckbriefe

Tabelle D.1: Steckbriefe der im Rahmen der Arbeit entwickelten Modelle. Steckbrief des Modells *FINE.Transport* in Tabelle 4.7.

Modellname	VE Cost	VE Energy	FRE MOD
Programmiersprache	Python	Python	Python
Modellansatz	Komponentenbasiert (Lernkurven)	Längsdynamikmodell (Straßenfahrzeuge)	Vier-Stufen-Modell (ohne Verkehrs-umlegung)
Zielgrößen	Kosten Verkehrsmittel (Herstellung, Wartung, Kraftstoff, Gesamtbetriebskosten)	Energiebedarf Verkehrsmittel	Güterverkehrs-nachfrage (Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung, Modaler Split)
Schrittweite	1 Jahr	1 Jahr	1 Jahr
Zeitlicher Horizont	2020 – 2050	2020-2050	2020-2045
Räumlicher Horizont	Deutschland	Deutschland	Deutschland

Konfiguration der Verkehrsmittel

Tabelle D.2: Kapazität, Auslastung und Lebensdauer der Verkehrsmittel in Anlehnung an [18] [19] [37]

Verkehrsart	Verkehrsmittel	Kapazität [Personen oder t]	Auslastung [%]	Lebensdauer [Jahre]
Personenverkehr	Pkw	5	30	12
	Small Bus	30	21	14
	Medium Bus	60	21	14
	Large Bus	80	21	14
	Coach	55	60	14
	Tram/Metro	315	19	30
	Train (S-Bahn)	250	27	30
	Train (RB)	250	27	30
	Train (RE)	300	27	30
	Train (ICE)	750	56	30
	Aircraft (Commuter)	20	62	30
	Aircraft (Regional)	80	62	30
	Aircraft (National)	130	62	30
	Aircraft (Short-haul)	135	76	30
	Aircraft (Medium-haul)	175	84	30
Aircraft (Long-haul)	260	80	30	
Güterverkehr	LCV	1,17	32	13
	MDV	5,2	32	10

Methodischer Ansatz

Verkehrsart	Verkehrsmittel	Kapazität [Personen oder t]	Auslastung [%]	Lebensdauer [Jahre]
	HDV	12	35	10
	HDV (Semi-Trailer)	27	45	11
	Abfallsammelfahrzeug	12	35	10
	Train	1.000	57	30
	Ship (national)	905	50	40
	Ship (international)	3.000	80	40
	Aircraft (national)	13	17	30
	Aircraft (international)	52	51	30

Tabelle D.3: Segmentabhängige Reichweite von batterieelektrischen Pkw. Zwischen den Stützjahren wird die Reichweite mittels linearer Interpolation bestimmt. BEV: Batterie-Elektrofahrzeug.

Pkw-Segment	Batterievariante (Bezeichnung)	Reichweite [km]			
		2020	2030	2040	2050
Klein	Klein (BEV_s)	150	250	300	350
	Mittel (BEV_m)	200	300	350	400
	Groß (BEV_l)	400	500	550	600
Medium/SUV	Klein (BEV_s)	200	350	450	500
	Mittel (BEV_m)	300	450	550	600
	Groß (BEV_l)	500	650	750	850
Groß	Klein (BEV_s)	400	550	650	750
	Mittel (BEV_m)	500	650	750	850
	Groß (BEV_l)	600	750	850	950

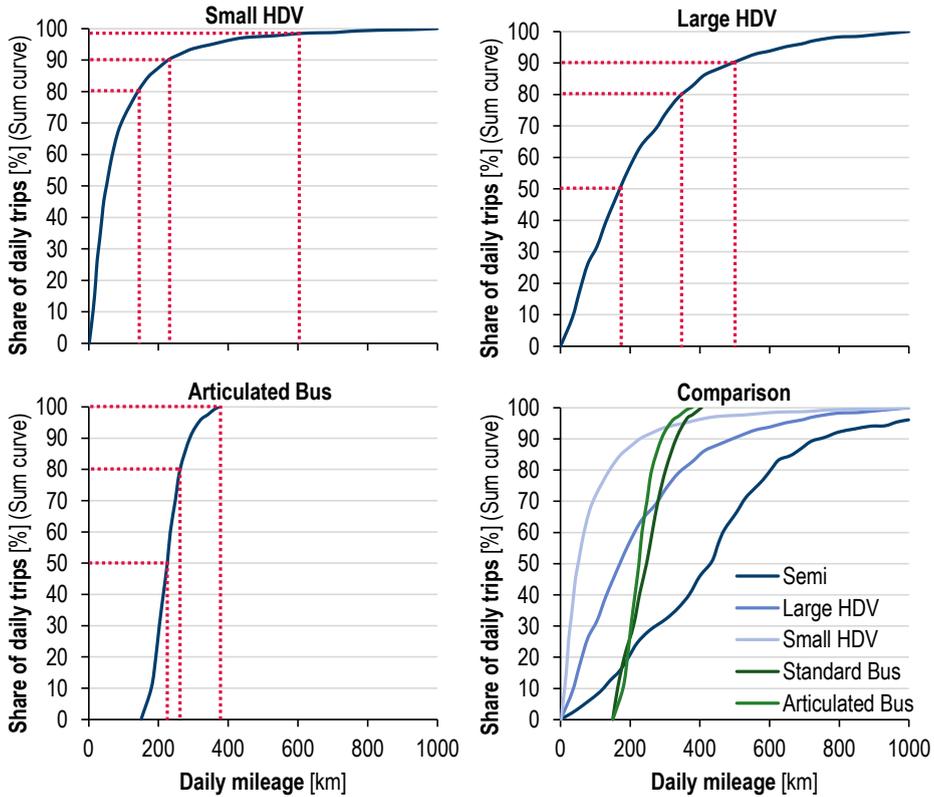


Abbildung D.1: Tägliche Fahrleistung der verschiedenen Nutzfahrzeugtypen und Busse nach [59], [112]. HDV: Nutzfahrzeug.

Komponenteneigenschaften

Tabelle D.4: Leistungs-/Energiedichten der Antriebskomponenten in Anlehnung an [127] [128] [129] [130].

ICE: Verbrennungsmotor, -g: Benzin, -d: Diesel, -cng: Erdgas, BZ: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz)

Komponente	2020	2030	2040	2050	Einheit
ICE-g	0,91	0,84	0,84	0,84	kW/kg
ICE-d	0,60	0,53	0,53	0,53	kW/kg
ICE-cng	0,63	0,59	0,58	0,58	kW/kg
E-Motor	1,40	1,75	1,90	2,00	kW/kg
Brennstoffzelle	0,65	0,68	0,73	0,78	kW/kg
Batterie	0,20	0,28	0,29	0,30	kWh/kg
Leistungsbatterie	0,12	0,145	0,165	0,18	kWh/kg
Wasserstofftank	1,50	1,85	2,10	2,20	kWh/kg
Methantank	6,7	6,7	6,7	6,7	kWh/kg
Benzin-/Dieseltank	13	13	13	13	kWh/kg

Mech. Übertragung	1,33	1,33	1,33	1,33	kW/kg
Inverter	1,33	1,33	1,33	1,33	kW/kg
DCDC (Batterie, BZ)	17	16,7	16,7	16,7	kW/kg
DCDC-LV	25	25	25	25	kW/kg
On-Board Lader	25	25	25	25	kW/kg
Abgasnachbehandlung	1,2	5	5	5	kW/kg

Tabelle D.5: Lebensdauer der Antriebskomponenten von Pkw. BZ: Brennstoffzelle, LV: Niederspannung (Bordnetz)

Komponente	Verkehrsmittel	2020	2030	2040	2050	Einheit
E-Motor	Alle	1.000.000	1.500.000	2.000.000	2.500.000	km
Brennstoffzelle	Automotive	400.000	500.000	600.000	700.000	km
	Busse, Nfz	1.000.000	1.500.000	1.700.000	1.900.000	km
Batterie	Automotive	400.000	500.000	600.000	700.000	km
	Busse, Nfz	1.000.000	1.500.000	1.700.000	1.900.000	km
Leistungsbatterie	Automotive	300.000	400.000	500.000	600.000	km
	Busse, Nfz	500.000	700.000	900.000	1.100.000	km
Wasserstofftank	Automotive	483.000	583.000	683.000	783.000	km
	Busse, Nfz	1.000.000	1.500.000	1.700.000	1.900.000	km
Inverter	Alle	1.000.000	1.500.000	2.000.000	2.500.000	km
DCDC (Batterie, BZ, LV)	Alle	1.000.000	1.500.000	2.000.000	2.500.000	km
On-Board Lader	Alle	1.000.000	1.500.000	2.000.000	2.500.000	km

Tabelle D.6: Kosten der Antriebskomponenten. LV: Niederspannung (Bordnetz), EATS: Abgasnachbehandlungssystem, FC: Brennstoffzelle, ICE: Verbrennungsmotor, -cng: Erdgas, -d: Diesel, -g: Benzin, EV: Elektrofahrzeug.

Verkehrsmittel	Komponente	2020	2030	2040	2050	Einheit
Alle	DCDC	3	2.4	2.1	1.9	€/kW
	DCDC-LV	45	29.3	23.1	20.2	€/kW
	EATS	11	13	15	17	€/kW
	Hydrogen Tank	18	9.4	6.5	5.5	€/kWh
	Inverter	3	2.4	2.1	1.9	€/kW
Automotive	Battery	150	77.3	51.2	41.1	€/kWh
	E-Motor	8	6.3	5.5	5.1	€/kW
	FC	140	51.0	28.0	21.0	€/kW
	ICE-cng	25	30	31	32	€/kW
	ICE-d	25	35	36	37	€/kW
	ICE-g	20	30	31	32	€/kW
	Methane Tank	12.5	11.0	10.2	9.8	€/kWh
	On-Board-Charger	45	29.4	23.0	20.3	€/kW
	Power Battery	650	316.2	208.8	165.8	€/kWh
	Transmission-EV	6	6	6	6	€/kW
Transmission-ICE	14	14	14	14	€/kW	
Busse	Battery	150	77.3	51.2	41.1	€/kWh

	E-Motor	17	13.3	11.6	10.8	€/kW
	FC	300	109.3	60.0	45.0	€/kW
	ICE-cng/Ing	103.5	109.3	115	120.8	€/kW
	ICE-d	90	95	100	105	€/kW
	Methane Tank	3.3	2.9	2.7	2.6	€/kWh
	Pantograph	6000	4000	3000	2500	€/Stück
	Power Battery	300	145.9	96.4	76.5	€/kWh
	Transmission-EV	18	18	18	18	€/kW
	Transmission-ICE	42	42	42	42	€/kW
Züge	Battery	1300	669.8	443.9	355.9	€/kWh
	E-Motor	30	23.5	20.5	19.0	€/kW
	FC	2000	728.5	399.9	300.1	€/kW
	ICE-cng/Ing	103.5	109.3	115	120.8	€/kW
	ICE-d	90	95	100	105	€/kW
	Methane Tank	3.3	2.9	2.7	2.6	€/kWh
	Pantograph	42000	17500	17500	17500	€/Stück
	Power Battery	1950	948.5	626.3	497.3	€/kWh
Nutzfahrzeuge	Battery	150	77.3	51.2	41.1	€/kWh
	E-Motor	17	13.3	11.6	10.8	€/kW
	FC	300	109.3	60.0	45.0	€/kW
	ICE-cng/Ing	103.5	109.3	115	120.8	€/kW
	ICE-d	90	95	100	105	€/kW
	Methane Tank	3.3	2.9	2.7	2.6	€/kWh
	Pantograph	42000	17500	17500	17500	€/Stück
	Power Battery	300	145.9	96.4	76.5	€/kWh
	Transmission-EV	18	18	18	18	€/kW
	Transmission-ICE	42	42	42	42	€/kW
Schiffe	Battery	150	77.3	51.2	41.1	€/kWh
	E-Motor	30	23.5	20.5	19.0	€/kW
	FC	2000	728.5	399.9	300.1	€/kW
	ICE-d	90	95	100	105	€/kW
	Methane Tank	3.3	2.9	2.7	2.6	€/kWh
	Power Battery	300	145.9	96.4	76.5	€/kWh

Berechnung des Energiebedarfs

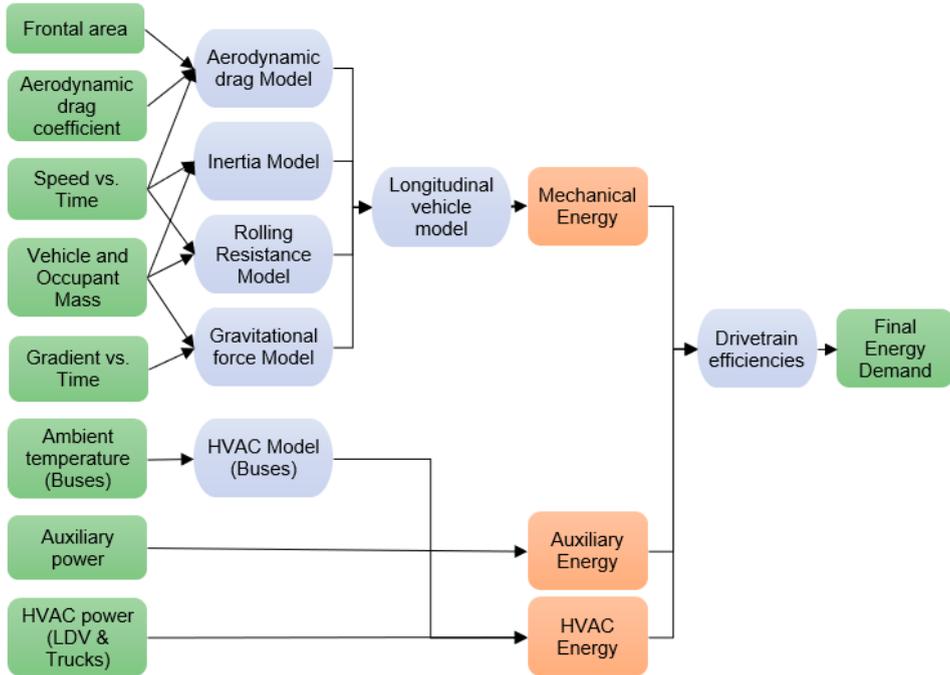


Abbildung D.2: Aufbau des Longitudinalmodells [126].

Verwendete Fahrzyklen

Worldwide harmonized Heavy-duty vehicles Test Cycle (WHVC)

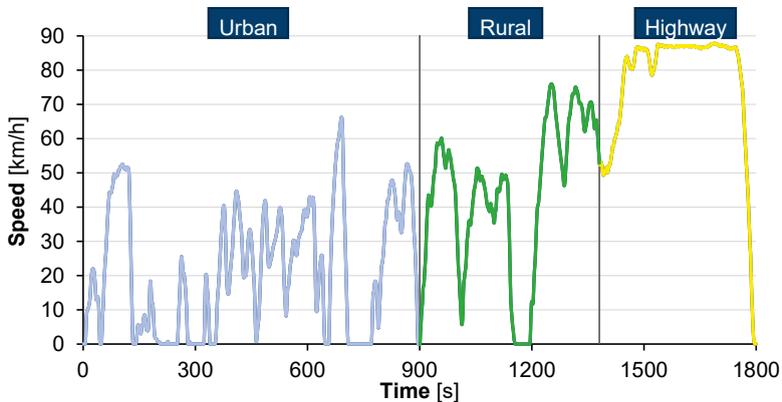


Abbildung D.3: Fahrprofil des Worldwide harmonized Heavy-duty vehicle Test Cycle (WHVC) [132].

Braunschweig City Driving Cycle

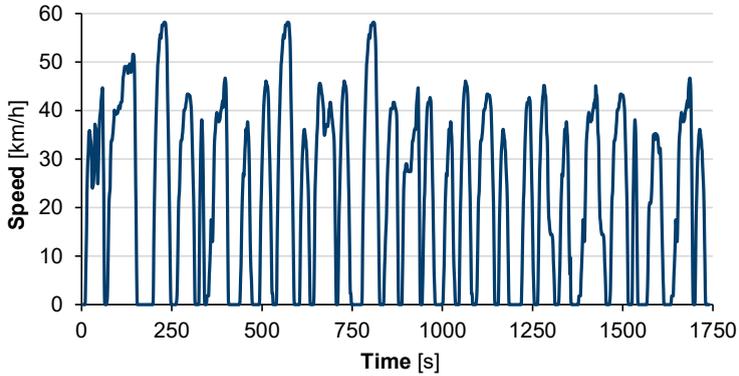


Abbildung D.4: Fahrprofil des Braunschweig City Driving Cycle [133].

Neighborhood Refuse Truck Cycle (NRTC)

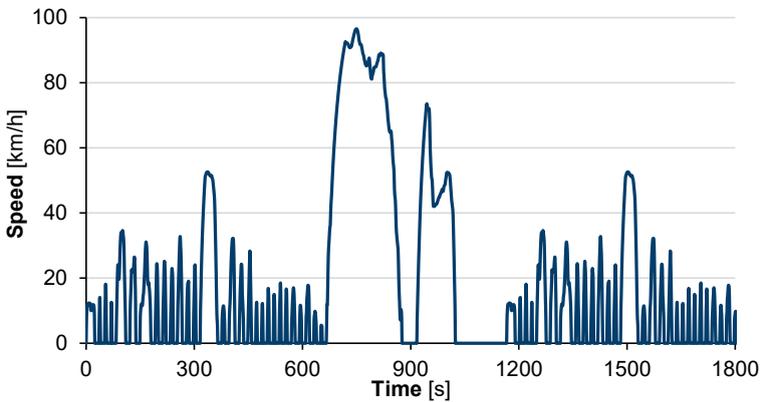


Abbildung D.5: Fahrprofil des Neighborhood Refuse Truck Cycle (NRTC) [134].

Aerodynamische Eigenschaften von Straßenfahrzeugen

Tabelle D.7: Aerodynamische Parameter von Pkw. LCV: Leichtes Nutzfahrzeug.

Mode	A_f [m ²]	c_a [-]			
		2020	2030	2040	2050
Small Car	2,16	0,309	0,286	0,245	0,239
Medium Car	2,25	0,271	0,251	0,215	0,210
Large Car	2,21	0,262	0,242	0,208	0,203
SUV	2,45	0,327	0,302	0,259	0,253
LCV	3,17	0,349	0,322	0,276	0,270

Tabelle D.8: Aerodynamische Parameter von Bussen.

Mode	A_f [m ²]	c_a [-]			
		2020	2030	2040	2050
Small Bus	4,00	0,36	0,33	0,30	0,28
Medium Bus	7,79	0,65	0,60	0,55	0,50
Large Bus	7,85	0,65	0,60	0,55	0,50
Coach	9,50	0,45	0,40	0,35	0,30

Tabelle D.9: Aerodynamische Parameter von Lkw.

Mode	Auxiliary power [kW]	A_f [m ²]	c_a (-)			
			2020	2030	2040	2050
Small truck	1,77	3,90	0,65	0,6	0,55	0,50
Medium truck	2,83	4,90	0,65	0,6	0,55	0,50
Large truck	6,13	7,93	0,65	0,6	0,55	0,50
Semi-truck	9,43	8,38	0,65	0,6	0,55	0,50

Energiebedarf

Tabelle D.10: Berechneter Energiebedarf von Pkw. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, (s)/(l): kleine/große Batteriekapazität.

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energieträger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
Pkw (groß)	BEV	Strom	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,14	0,13	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,19	0,17	0,16	0,15	0,13	0,13	0,12	kWh/km
	FCEV	H ₂	0,32	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,19	kWh/km
	HEV-d	Diesel	0,49	0,41	0,35	0,32	0,28	0,27	0,26	kWh/km
	HEV-g	Benzin	0,49	0,43	0,39	0,35	0,31	0,29	0,28	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	0,66	0,59	0,53	0,48	0,44	0,42	0,40	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	0,65	0,54	0,47	0,43	0,39	0,38	0,36	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	0,65	0,58	0,51	0,47	0,43	0,41	0,39	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,11	0,10	kWh/km
		Strom	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	kWh/km
		H ₂	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	kWh/km
	PHEV-g	Strom	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	kWh/km
		Benzin	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,12	0,11	kWh/km
REEV-d	Diesel	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	kWh/km	
	Strom	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	kWh/km	

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
	REEV-fc	Strom	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	kWh/km
		H ₂	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	kWh/km
	REEV-g	Strom	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	kWh/km
		Benzin	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	kWh/km
Pkw (mittel)	BEV	Strom	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,12	0,12	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	kWh/km
	FCEV	H ₂	0,29	0,26	0,24	0,21	0,19	0,18	0,17	kWh/km
	HEV-d	Diesel	0,44	0,37	0,32	0,29	0,26	0,25	0,24	kWh/km
	HEV-g	Benzin	0,45	0,40	0,35	0,31	0,28	0,27	0,26	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	0,59	0,52	0,47	0,43	0,39	0,37	0,36	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	0,58	0,48	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	0,58	0,52	0,46	0,42	0,38	0,37	0,35	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	0,18	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,09	kWh/km
		Strom	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
		H ₂	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	kWh/km
	PHEV-g	Strom	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	kWh/km
		Benzin	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,11	0,10	kWh/km
	REEV-d	Diesel	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	kWh/km
		Strom	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	kWh/km
		H ₂	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	kWh/km
	REEV-g	Strom	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	kWh/km
Benzin		0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	kWh/km	
Pkw (klein)	BEV	Strom	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	kWh/km
	FCEV	H ₂	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,17	kWh/km
	HEV-d	Diesel	0,41	0,35	0,30	0,27	0,24	0,23	0,22	kWh/km
	HEV-g	Benzin	0,42	0,37	0,33	0,30	0,27	0,25	0,24	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	0,55	0,48	0,43	0,39	0,35	0,34	0,32	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	0,53	0,44	0,38	0,34	0,31	0,30	0,29	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	0,54	0,48	0,43	0,39	0,35	0,34	0,32	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	kWh/km
		Strom	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
		H ₂	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
	PHEV-g	Strom	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
		Benzin	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	kWh/km
	REEV-d	Diesel	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	kWh/km
		Strom	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	kWh/km
		H ₂	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	kWh/km
	REEV-g	Strom	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	kWh/km
Benzin		0,09	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	kWh/km	

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energieträger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
SUV	BEV	Strom	0,22	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,23	0,21	0,19	0,18	0,16	0,16	0,15	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,15	0,14	kWh/km
	FCEV	H ₂	0,37	0,33	0,30	0,27	0,24	0,23	0,22	kWh/km
	HEV-d	Diesel	0,58	0,48	0,41	0,37	0,33	0,32	0,30	kWh/km
	HEV-g	Benzin	0,58	0,51	0,45	0,41	0,36	0,35	0,33	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	0,77	0,68	0,61	0,55	0,50	0,48	0,46	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	0,75	0,63	0,54	0,49	0,45	0,43	0,41	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	0,76	0,67	0,60	0,54	0,49	0,47	0,45	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,13	0,12	kWh/km
		Strom	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	kWh/km
		H ₂	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	kWh/km
	PHEV-g	Strom	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	kWh/km
		Benzin	0,23	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	kWh/km
	REEV-d	Diesel	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	kWh/km
		Strom	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	kWh/km
		H ₂	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	kWh/km
	REEV-g	Strom	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	kWh/km
Benzin		0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km	

Tabelle D.11: Berechneter Energiebedarf von Bussen. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, (s)/(l): kleine/große Batteriekapazität.

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energieträger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
Bus (groß)	BEV	Strom	2,22	2,05	1,90	1,80	1,70	1,62	1,55	kWh/km
	BEV (l)	Strom	2,26	2,08	1,92	1,82	1,72	1,64	1,56	kWh/km
	BEV (s)	Strom	2,18	2,02	1,88	1,78	1,68	1,60	1,53	kWh/km
	FCEV	H ₂	3,56	3,24	2,96	2,74	2,53	2,41	2,29	kWh/km
	HEV-d	Diesel	3,55	3,15	2,81	2,61	2,42	2,28	2,15	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	6,13	5,50	4,97	4,70	4,44	4,26	4,09	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	5,31	4,82	4,39	4,16	3,95	3,79	3,64	kWh/km
	ICEV-Ing	LNG	6,12	5,50	4,97	4,70	4,44	4,26	4,08	kWh/km
	O-BEV	Strom	2,16	2,01	1,87	1,77	1,68	1,60	1,53	kWh/km
	O-FCEV	Strom	1,70	1,59	1,48	1,40	1,33	1,27	1,21	kWh/km
		H ₂	0,74	0,67	0,62	0,57	0,53	0,50	0,48	kWh/km
	O-HEV-d	Diesel	0,77	0,68	0,61	0,57	0,53	0,50	0,47	kWh/km
		Strom	1,44	1,33	1,24	1,16	1,09	1,03	0,97	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	2,50	2,24	2,01	1,88	1,76	1,67	1,59	kWh/km
		Strom	0,78	0,72	0,67	0,64	0,60	0,57	0,54	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,85	0,80	0,74	0,70	0,66	0,63	0,61	kWh/km
		H ₂	2,22	2,03	1,85	1,72	1,59	1,52	1,44	kWh/km

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
	REEV-d	Diesel	1,62	1,44	1,28	1,19	1,11	1,06	1,00	kWh/km
		Strom	1,14	1,05	0,97	0,91	0,86	0,81	0,77	kWh/km
	REEV-fc	Strom	1,30	1,21	1,12	1,06	1,00	0,96	0,91	kWh/km
		H ₂	1,50	1,36	1,24	1,15	1,07	1,02	0,97	kWh/km
Bus (mittel)	BEV	Strom	1,55	1,43	1,32	1,25	1,18	1,12	1,07	kWh/km
	BEV (l)	Strom	1,59	1,46	1,34	1,27	1,20	1,14	1,08	kWh/km
	BEV (s)	Strom	1,52	1,40	1,30	1,23	1,16	1,10	1,05	kWh/km
	FCEV	H ₂	2,48	2,25	2,05	1,89	1,75	1,66	1,57	kWh/km
	HEV-d	Diesel	2,59	2,31	2,06	1,91	1,78	1,68	1,58	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	4,41	3,96	3,58	3,39	3,21	3,07	2,95	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	3,83	3,47	3,16	3,00	2,85	2,73	2,62	kWh/km
	ICEV-lng	LNG	4,41	3,96	3,58	3,38	3,20	3,07	2,94	kWh/km
	O-BEV	Strom	1,50	1,39	1,29	1,22	1,16	1,10	1,05	kWh/km
	O-FCEV	Strom	1,19	1,11	1,03	0,98	0,92	0,88	0,84	kWh/km
		H ₂	0,52	0,47	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	kWh/km
	O-HEV-d	Diesel	0,56	0,50	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	kWh/km
		Strom	1,05	0,97	0,90	0,84	0,79	0,75	0,71	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	1,77	1,58	1,42	1,33	1,24	1,18	1,11	kWh/km
		Strom	0,55	0,51	0,48	0,45	0,42	0,40	0,38	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,60	0,55	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42	kWh/km
		H ₂	1,54	1,40	1,28	1,18	1,10	1,04	0,99	kWh/km
	REEV-d	Diesel	1,16	1,03	0,91	0,85	0,80	0,75	0,71	kWh/km
		Strom	0,81	0,75	0,69	0,65	0,61	0,58	0,55	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,91	0,84	0,78	0,73	0,69	0,66	0,63	kWh/km
H ₂		1,04	0,95	0,86	0,80	0,74	0,70	0,66	kWh/km	
Bus (klein)	BEV	Strom	0,77	0,71	0,66	0,62	0,59	0,57	0,54	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,80	0,73	0,67	0,64	0,60	0,58	0,55	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,75	0,70	0,65	0,61	0,58	0,55	0,53	kWh/km
	FCEV	H ₂	1,21	1,11	1,01	0,94	0,87	0,83	0,79	kWh/km
	HEV-d	Diesel	1,38	1,24	1,11	1,04	0,98	0,93	0,88	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	2,17	1,96	1,78	1,69	1,61	1,55	1,50	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	1,95	1,78	1,63	1,56	1,48	1,43	1,38	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	0,90	0,81	0,73	0,68	0,64	0,61	0,58	kWh/km
		Strom	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	kWh/km
		H ₂	0,76	0,69	0,63	0,59	0,55	0,52	0,50	kWh/km
	REEV-d	Diesel	0,60	0,53	0,48	0,45	0,42	0,40	0,38	kWh/km
		Strom	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32	0,31	0,29	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,45	0,42	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	kWh/km
H ₂		0,51	0,47	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	kWh/km	
Reisebus	BEV	Strom	1,87	1,75	1,63	1,54	1,46	1,40	1,35	kWh/km
	BEV (l)	Strom	1,89	1,76	1,64	1,56	1,47	1,41	1,35	kWh/km
	BEV (s)	Strom	1,85	1,73	1,62	1,53	1,45	1,39	1,34	kWh/km
	FCEV	H ₂	3,03	2,78	2,55	2,36	2,19	2,09	2,00	kWh/km
	HEV-d	Diesel	3,69	3,33	3,01	2,82	2,64	2,53	2,42	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	4,94	4,40	3,93	3,69	3,46	3,31	3,17	kWh/km

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
	ICEV-d	Diesel	4,28	3,84	3,47	3,26	3,06	2,94	2,82	kWh/km
	O-BEV	Strom	2,22	2,09	1,97	1,88	1,79	1,72	1,65	kWh/km
	O-FCEV	Strom	1,72	1,63	1,54	1,47	1,40	1,35	1,29	kWh/km
		H ₂	0,75	0,69	0,64	0,60	0,56	0,54	0,51	kWh/km
	O-HEV-d	Diesel	0,89	0,81	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	kWh/km
		Strom	1,66	1,57	1,48	1,41	1,34	1,29	1,23	kWh/km
	REEV-fc	Strom	1,11	1,04	0,97	0,92	0,87	0,83	0,80	kWh/km
		H ₂	1,29	1,18	1,08	1,01	0,93	0,89	0,86	kWh/km

Tabelle D.12: Berechneter Energiebedarf von Nutzfahrzeugen. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, (s)/(l): kleine/große Batteriekapazität.

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
Sattelzugmaschine	BEV	Strom	1,34	1,21	1,09	1,01	0,93	0,86	0,79	kWh/km
	BEV (l)	Strom	1,35	1,22	1,10	1,02	0,93	0,86	0,79	kWh/km
	BEV (s)	Strom	1,33	1,20	1,08	1,00	0,92	0,85	0,78	kWh/km
	FCEV	H ₂	2,19	1,94	1,71	1,55	1,40	1,29	1,17	kWh/km
	HEV-d	Diesel	2,76	2,40	2,09	1,92	1,75	1,62	1,48	kWh/km
	ICEV-H ₂	H ₂	3,26	2,85	2,49	2,30	2,12	1,97	1,82	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	3,98	3,43	2,97	2,68	2,42	2,23	2,05	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	3,25	2,84	2,49	2,30	2,12	1,97	1,82	kWh/km
	ICEV-Ing	LNG	3,98	3,43	2,97	2,68	2,42	2,23	2,04	kWh/km
	O-BEV	Strom	1,56	1,45	1,35	1,26	1,18	1,11	1,04	kWh/km
	O-FCEV	Strom	1,24	1,16	1,08	1,01	0,94	0,88	0,83	kWh/km
		H ₂	0,52	0,47	0,43	0,40	0,36	0,34	0,32	kWh/km
	O-HEV-d	Diesel	0,73	0,64	0,57	0,53	0,49	0,46	0,43	kWh/km
		Strom	1,24	1,16	1,08	1,01	0,95	0,89	0,83	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	1,94	1,69	1,47	1,35	1,23	1,13	1,04	kWh/km
		Strom	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,26	0,23	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,40	0,36	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	kWh/km
		H ₂	1,55	1,38	1,22	1,10	1,00	0,92	0,84	kWh/km
	REEV-d	Diesel	1,39	1,21	1,05	0,96	0,88	0,81	0,74	kWh/km
		Strom	0,66	0,60	0,54	0,50	0,46	0,43	0,39	kWh/km
REEV-fc	Strom	0,66	0,60	0,54	0,50	0,46	0,43	0,39	kWh/km	
	H ₂	1,12	0,99	0,87	0,79	0,71	0,66	0,60	kWh/km	
Nutzfahrzeug (schwer)	BEV	Strom	1,05	0,97	0,89	0,83	0,78	0,73	0,69	kWh/km
	BEV (l)	Strom	1,07	0,98	0,90	0,84	0,79	0,74	0,70	kWh/km
	BEV (s)	Strom	1,03	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,68	kWh/km
	FCEV	H ₂	1,67	1,52	1,38	1,26	1,16	1,09	1,02	kWh/km
	HEV-d	Diesel	2,12	1,89	1,69	1,58	1,47	1,38	1,29	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	3,38	3,00	2,69	2,48	2,29	2,17	2,05	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	2,76	2,49	2,25	2,13	2,01	1,92	1,83	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	3,16	2,83	2,54	2,39	2,25	2,15	2,04	kWh/km

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Einheit
	ICEV-Ing	LNG	3,37	3,00	2,68	2,48	2,29	2,17	2,05	kWh/km
	PHEV-d	Diesel	1,49	1,33	1,19	1,11	1,03	0,97	0,91	kWh/km
		Strom	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,20	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22	0,20	kWh/km
		H ₂	1,20	1,09	0,99	0,90	0,83	0,78	0,73	kWh/km
	REEV-d	Diesel	1,08	0,96	0,86	0,80	0,74	0,69	0,65	kWh/km
		Strom	0,51	0,48	0,44	0,41	0,39	0,36	0,34	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,51	0,47	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	kWh/km
		H ₂	0,87	0,78	0,71	0,65	0,60	0,56	0,53	kWh/km
	Nutzfahr- zeug (mittel)	BEV	Strom	0,70	0,63	0,57	0,54	0,52	0,49	0,47
BEV (l)		Strom	0,71	0,65	0,58	0,55	0,52	0,50	0,47	kWh/km
BEV (s)		Strom	0,69	0,63	0,57	0,54	0,51	0,49	0,46	kWh/km
FCEV		H ₂	1,14	1,01	0,90	0,84	0,78	0,74	0,70	kWh/km
HEV-d		Diesel	1,43	1,25	1,10	1,04	0,97	0,92	0,88	kWh/km
ICEV-cng		CNG	2,24	1,96	1,72	1,60	1,49	1,42	1,35	kWh/km
ICEV-d		Diesel	1,82	1,62	1,44	1,37	1,30	1,25	1,20	kWh/km
ICEV-g		Benzin	2,09	1,83	1,62	1,53	1,46	1,39	1,33	kWh/km
		Diesel	1,01	0,88	0,77	0,73	0,68	0,65	0,61	kWh/km
PHEV-d		Strom	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	kWh/km
		H ₂	0,81	0,72	0,64	0,59	0,55	0,52	0,49	kWh/km
PHEV-fc		Strom	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	kWh/km
		H ₂	0,81	0,72	0,64	0,59	0,55	0,52	0,49	kWh/km
REEV-d		Diesel	0,72	0,63	0,55	0,52	0,49	0,46	0,44	kWh/km
		Strom	0,35	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,23	kWh/km
REEV-fc		Strom	0,35	0,31	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23	kWh/km
	H ₂	0,58	0,52	0,46	0,43	0,40	0,37	0,35	kWh/km	
Nutzfahr- zeug (leicht)	BEV	Strom	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	kWh/km
	BEV (l)	Strom	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,18	0,17	kWh/km
	BEV (s)	Strom	0,24	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,17	kWh/km
	FCEV	H ₂	0,41	0,37	0,34	0,30	0,27	0,26	0,25	kWh/km
	HEV-d	Diesel	0,63	0,53	0,45	0,41	0,37	0,35	0,34	kWh/km
	ICEV-cng	CNG	0,83	0,73	0,66	0,59	0,54	0,52	0,50	kWh/km
	ICEV-d	Diesel	0,80	0,67	0,58	0,53	0,48	0,46	0,45	kWh/km
	ICEV-g	Benzin	0,82	0,73	0,65	0,59	0,53	0,51	0,50	kWh/km
		Diesel	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,14	kWh/km
	PHEV-d	Strom	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	kWh/km
		H ₂	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10	kWh/km
	PHEV-fc	Strom	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	kWh/km
		H ₂	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10	kWh/km
	REEV-d	Diesel	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	kWh/km
		Strom	0,20	0,18	0,17	0,16	0,14	0,14	0,14	kWh/km
	REEV-fc	Strom	0,20	0,18	0,17	0,16	0,14	0,14	0,13	kWh/km
H ₂		0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	kWh/km	

Tabelle D.13: Berechneter Energiebedarf von allen weiteren betrachteten Verkehrsmitteln in kWh/pkm oder kWh/tkm. ICEV: Verbrennungsmotorantrieb, BEV: Batterie-Elektroantrieb, FCEV: Brennstoffzellen-Elektroantrieb, -d: Diesel, -cng: Erdgas, -lng: Flüssigerdgas.

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Zug (ICE/IC)	Oberleitung	Strom	0,064	0,055	0,048	0,043	0,038	0,033	0,030
Zug (RE)	BEV	Strom	0,087	0,082	0,077	0,073	0,069	0,066	0,062
	FCEV	H ₂	0,132	0,122	0,112	0,105	0,097	0,091	0,085
	ICEV-cng	CNG	0,179	0,169	0,159	0,151	0,143	0,135	0,127
	ICEV-d	Diesel	0,179	0,169	0,159	0,151	0,143	0,135	0,127
	ICEV-lng	LNG	0,179	0,169	0,159	0,151	0,143	0,135	0,127
	Oberleitung	Strom	0,087	0,082	0,077	0,073	0,069	0,066	0,062
Zug (RB)	BEV	Strom	0,075	0,073	0,071	0,070	0,069	0,068	0,067
	FCEV	H ₂	0,114	0,108	0,103	0,100	0,096	0,094	0,093
	ICEV-cng	CNG	0,242	0,227	0,211	0,205	0,200	0,197	0,194
	ICEV-d	Diesel	0,242	0,227	0,211	0,205	0,200	0,197	0,194
	ICEV-lng	LNG	0,242	0,227	0,211	0,205	0,200	0,197	0,194
	Oberleitung	Strom	0,075	0,073	0,071	0,070	0,069	0,068	0,067
Zug (S-Bahn)	Oberleitung	Strom	0,075	0,073	0,071	0,070	0,069	0,068	0,067
Straßen-/U-Bahn	Oberleitung	Strom	0,074	0,072	0,070	0,069	0,068	0,067	0,066
Güterzug	BEV	Strom	0,037	0,035	0,033	0,032	0,031	0,031	0,030
	FCEV	H ₂	0,080	0,077	0,074	0,073	0,072	0,071	0,070
	ICEV-cng	CNG	0,115	0,112	0,109	0,107	0,104	0,101	0,098
	ICEV-d	Diesel	0,115	0,112	0,109	0,107	0,104	0,101	0,098
	ICEV-lng	LNG	0,115	0,112	0,109	0,107	0,104	0,101	0,098
	Oberleitung	Strom	0,037	0,035	0,033	0,032	0,031	0,031	0,030
Güterschiff (international)	ICEV-H ₂	H ₂	0,022	0,020	0,018	0,016	0,015	0,013	0,012
	ICEV-d	Diesel	0,022	0,020	0,018	0,016	0,015	0,013	0,012
	ICEV-lng	LNG	0,022	0,020	0,018	0,016	0,015	0,013	0,012
Güterschiff (national)	BEV	Strom	0,052	0,047	0,043	0,039	0,035	0,032	0,028
	FCEV	H ₂	0,078	0,071	0,064	0,058	0,052	0,047	0,043
	ICEV-H ₂	H ₂	0,098	0,089	0,080	0,072	0,065	0,059	0,053
	ICEV-d	Diesel	0,098	0,089	0,080	0,072	0,065	0,059	0,053
	ICEV-lng	LNG	0,098	0,089	0,080	0,072	0,065	0,059	0,053
Flugzeug (Langstrecke)	Turbine	Kerosin	0,340	0,323	0,306	0,291	0,275	0,261	0,248
	Turbine-H ₂	H ₂	0,483	0,458	0,434	0,413	0,391	0,371	0,352
Flugzeug (Mittelstrecke)	Turbine	Kerosin	0,286	0,272	0,257	0,245	0,232	0,220	0,208
	Turbine-H ₂	H ₂	0,349	0,331	0,314	0,298	0,283	0,268	0,254
Flugzeug (Kurzstrecke)	Turbine	Kerosin	0,350	0,332	0,315	0,299	0,283	0,269	0,255
	Turbine-fc	H ₂	0,336	0,319	0,302	0,287	0,272	0,258	0,245
Flugzeug (National)	Turbine	Kerosin	0,589	0,560	0,530	0,504	0,477	0,453	0,430
	Turbine-fc	H ₂	0,566	0,537	0,509	0,484	0,458	0,435	0,412
Flugzeug (Regional)	BEV	Strom	0,734	0,697	0,661	0,628	0,595	0,565	0,535
	FCEV	H ₂	0,734	0,697	0,661	0,628	0,595	0,565	0,535
	Turbine	Kerosin	0,798	0,758	0,718	0,682	0,646	0,614	0,582
Flugzeug (Zubringer)	BEV	Strom	1,081	1,027	0,973	0,924	0,875	0,832	0,788
	FCEV	H ₂	1,081	1,027	0,973	0,924	0,875	0,832	0,788

Verkehrsmittel	Antriebsart	Energie-träger	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Turbine	Kerosin	1,201	1,141	1,081	1,027	0,973	0,924	0,875
Fracht-flugzeug (international)	Turbine	Kerosin	3,96	3,77	3,57	3,39	3,21	3,05	2,89
	Turbine-H ₂	H ₂	4,84	4,60	4,35	4,14	3,92	3,72	3,53
Fracht-flugzeug (national)	Turbine	Kerosin	18,89	17,95	17,00	16,15	15,30	14,54	13,77
	Turbine-fc	H ₂	18,14	17,23	16,32	15,51	14,69	13,96	13,22

Personenverkehrsnachfrage

Tabelle D.14: Angenommene Verteilung der Jahresfahrleistung [km/a] von Bussen nach Größe.

Größe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Klein	36.000	39.375	45.000	50.625	54.000	58.500	61.875	65.250	72.000	81.000
Mittel	36.000	39.375	45.000	50.625	54.000	58.500	61.875	65.250	72.000	81.000
Groß	38.250	41.625	45.000	47.250	49.500	51.750	54.000	57.375	61.875	73.125

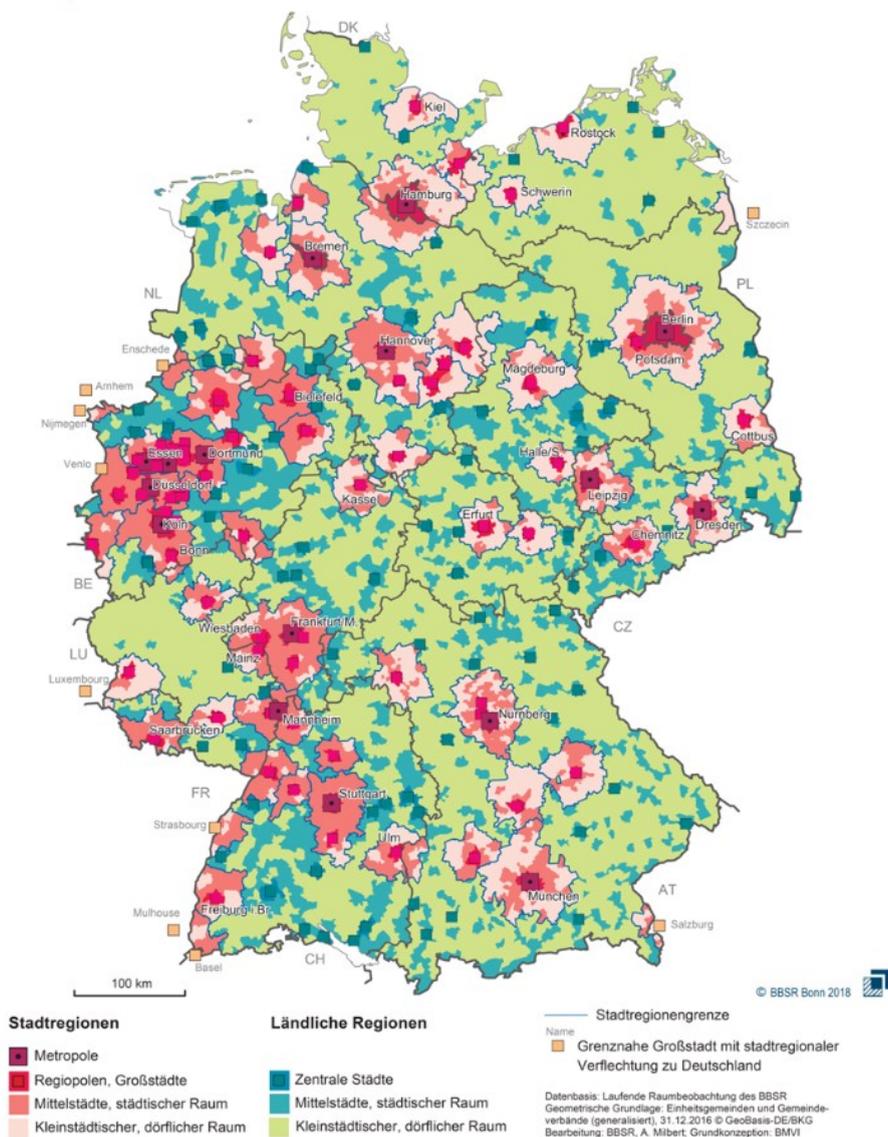


Abbildung D.6: RegioStaR 7 Klassifizierung der Gemeinden Deutschlands [120].

Güterverkehrsnachfrage

Tabelle D.15: Güterklassen nach der NST-07 [114].

Abteilung	Bezeichnung	Zusammenfassung B1-B10
1	Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei	Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Rohstoffe
2	Kohle, rohes Erdöl und Erdgas	Kohle, rohes Erdöl und Erdgas
3	Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse
4	Nahrungs- und Genussmittel	Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch, Holzwaren
5	Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren	
6	Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse	
7	Kokerei- und Mineralölzeugnisse	Kokerei- und Mineralölzeugnisse
8	Chemische Erzeugnisse etc.	Chemische Erzeugnisse, Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips etc.)
9	Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips, etc.)	
10	Metalle und Metallerzeugnisse	Metalle und Metallerzeugnisse
11	Maschinen und Ausrüstungen, langlebige Konsumgüter	Maschinen und Ausrüstungen, langlebige Konsumgüter
12	Fahrzeuge	
13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte, Spielwaren und sonstige Erzeugnisse	
14	Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.	
15	Sekundärrohstoffe, Abfälle	Sekundärrohstoffe, Abfälle
16	Post, Pakete	Sonstige Produkte
17	Geräte und Material für die Güterbeförderung	
18	Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	
19	Sammelgut	
20	Sonstige Güter	

Versorgungsinfrastruktur

Tabelle D.16: Eigenschaften der Ladeinfrastruktur für Busse und Sattelzugmaschinen.

Verkehrsmittel	Laderart	Ladeleistung [kW]	Fahrzeuge je Ladepunkt				Basierend auf
			2020	2030	2040	2050	
Bus	Depot	100	1	1,11	1,11	1,11	[59]
Bus (O-BEV)	Depot	40	1	1,11	1,11	1,11	[59]
	Zwischenlader	350	4	4	4	4	[59]
Sattelzugma- schine	Depot	150	0,91	0,95	0,98	1	[40]
	Schnelllader	750	5	10	10	10	[40]

Tabelle D.17: Fahrzeuge je Wasserstofftankstelle bei Bussen und Sattelzugmaschinen.

Verkehrsmittel	Fahrzeuge je Wasserstofftankstelle				Basierend auf
	2020	2030	2040	2050	
Bus	20	40	70	70	Eigene Annahme
Sattelzugmaschine	20	110	140	150	[40]

E Szenarioannahmen

Verkehrsnachfrage

Tabelle E.1: Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmittel im Szenario *Status Quo*.

Verkehrsart	Verkehrsmittel	Verkehrsleistung [Mrd. pkm oder Mrd. tkm]			
		2020	2030	2040	2050
Personen	Motorrad	9,7	9,7	9,7	9,7
	Pkw (klein)	240,7	225,8	209,6	194,0
	Pkw (mittel)	397,2	310,5	273,4	255,8
	Pkw (groß)	138,5	141,1	127,6	123,5
	SUV	124,7	263,4	300,8	308,7
	Bus (klein)	2,9	3,8	3,8	3,9
	Bus (mittel)	17,4	22,9	23,1	23,2
	Bus (groß)	14,5	19,1	19,2	19,3
	Reisebus	23,6	31,2	31,4	31,6
	Straßen-/U-Bahn	17,7	18,5	18,8	18,7
	S-Bahn	12,0	12,6	12,8	12,7
	Zug (RB)	14,7	15,4	15,6	15,5
	Zug (RE)	21,7	22,7	23,0	22,9
	Zug (ICE)	44,7	46,8	47,4	47,2
	Flugzeug (Zubringer)	0,6	0,6	0,6	0,6
	Flugzeug (Regional)	1,8	1,8	1,8	1,8
	Flugzeug (National)	8,3	8,3	8,3	8,3
	Flugzeug (Kurzstrecke)	37,3	44,8	52,2	56,0
	Flugzeug (Mittelstrecke)	75,4	90,5	105,6	113,1
	Flugzeug (Langstrecke)	131,3	157,6	183,8	197,0
Güter	Nutzfahrzeug (leicht)	19,0	25,0	28,0	30,0
	Nutzfahrzeug (mittel)	4,8	4,8	4,8	4,8
	Nutzfahrzeug (schwer)	30,8	30,8	30,8	30,8
	Abfallsammelfahrzeug	1,8	2,0	2,0	2,0
	Kipper (Baustellenfahrzeug)	9,9	9,9	9,9	9,9
	Kommunalfahrzeug	0,8	0,8	0,8	0,8
	Sattelzugmaschinen	418,9	466,9	507,5	559,9
	Zug	129,2	159,1	213,1	288,7
	Schiff (Binnen)	50,9	63,9	81,0	98,0
	Schiff (international)	2.900,0	2.900,0	2.900,0	2.900,0
	Flugzeug (national)	0,1	0,1	0,1	0,1
	Flugzeug (international)	12,4	12,4	12,4	12,4

Tabelle E.2: Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmittel im Szenario *Progressive*.

Verkehrsart	Verkehrsmittel	Verkehrsleistung [Mrd. pkm oder Mrd. tkm]			
		2020	2030	2040	2050
Personen	Motorrad	9,7	9,7	9,7	9,7
	Pkw (klein)	240,7	225,4	241,5	247,0
	Pkw (mittel)	397,2	324,6	336,3	354,0
	Pkw (groß)	138,5	126,2	112,1	98,8
	SUV	124,7	225,4	172,5	123,5
	Bus (klein)	2,9	4,2	4,6	5,0
	Bus (mittel)	17,4	25,0	27,4	29,8
	Bus (groß)	14,5	20,8	22,8	24,8
	Reisebus	23,6	34,0	37,2	40,5
	Straßen-/U-Bahn	17,7	20,1	21,1	22,0
	S-Bahn	12,0	13,7	14,3	15,0
	Zug (RB)	14,7	16,7	17,5	18,3
	Zug (RE)	21,7	24,7	25,9	27,0
	Zug (ICE)	44,7	50,8	53,2	55,7
	Flugzeug (Zubringer)	0,6	0,6	0,6	0,6
	Flugzeug (Regional)	1,8	1,5	0,9	0,5
	Flugzeug (National)	8,3	7,1	4,2	2,5
	Flugzeug (Kurzstrecke)	37,3	42,9	46,6	48,5
	Flugzeug (Mittelstrecke)	75,4	86,7	94,3	98,0
	Flugzeug (Langstrecke)	131,3	151,0	164,1	170,7
Güter	Nutzfahrzeug (leicht)	19,0	25,0	27,0	28,5
	Nutzfahrzeug (mittel)	4,8	4,8	4,8	4,8
	Nutzfahrzeug (schwer)	30,8	30,8	30,8	30,8
	Abfallsammelfahrzeug	1,8	2,0	2,0	2,0
	Kipper (Baustellenfahrzeug)	9,9	9,9	9,9	9,9
	Kommunalfahrzeug	0,8	0,8	0,8	0,8
	Sattelzugmaschinen	416,3	436,2	443,8	456,2
	Zug	129,2	148,6	185,6	232,3
	Schiff (Binnen)	50,9	63,9	81,0	98,0
	Schiff (international)	2.900,0	2.900,0	2.900,0	2.900,0
	Flugzeug (national)	0,1	0,1	0,1	0,1
	Flugzeug (international)	12,4	12,4	12,4	12,4

Tabelle E.3: Trendfaktoren zur ökonomischen Entwicklung [%/a] nach Gütergruppe und Verkehrsart nach [109].

Gütergruppe	National	Export	Import	Transit
Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	0,94	-4,25	1,29	2,2
Kohle, rohes Erdöl und Erdgas	-7,43	-7,43	-1,08	-1,08
Erze, Steine und Erden, Bergbau	0,97	-4,59	0,41	-2,26
Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch, Holzwaren	0,61	1,08	1,52	2,56
Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	0,75	-13,82	-1,3	4,64
Chemische und Mineralerzeugnisse	0,7	1,56	0,51	1,29
Metalle und Metallerzeugnisse	0,72	0,88	-2,52	-3,48
Maschinen und Ausrüstungen, langlebige Konsumgüter	1,37	1,4	1,35	1,84
Sekundärrohstoffe, Abfälle	1,11	-5,15	-5,03	2,73
Sonstige Produkte	0,96	0,66	3,69	2,73

F Techno-ökonomische Fahrzeuganalysen

Mittelklasse-Pkw

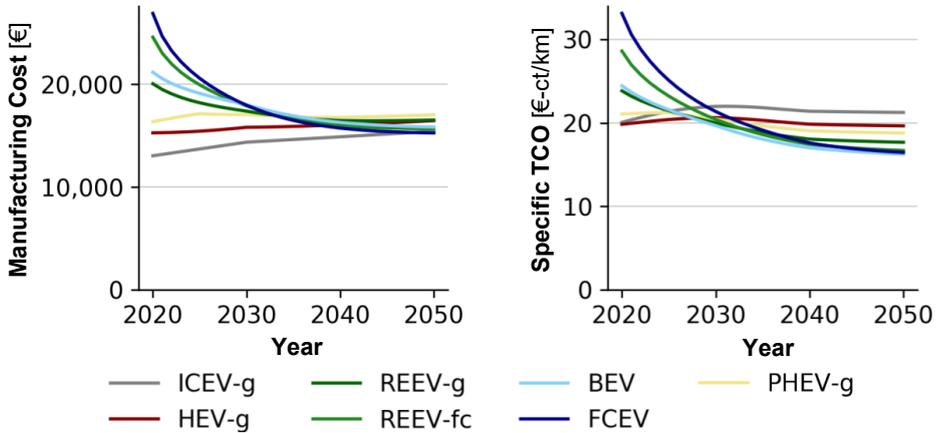


Abbildung F.1: Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -g: Benzin, -fc: Brennstoffzelle.

Stadtbus

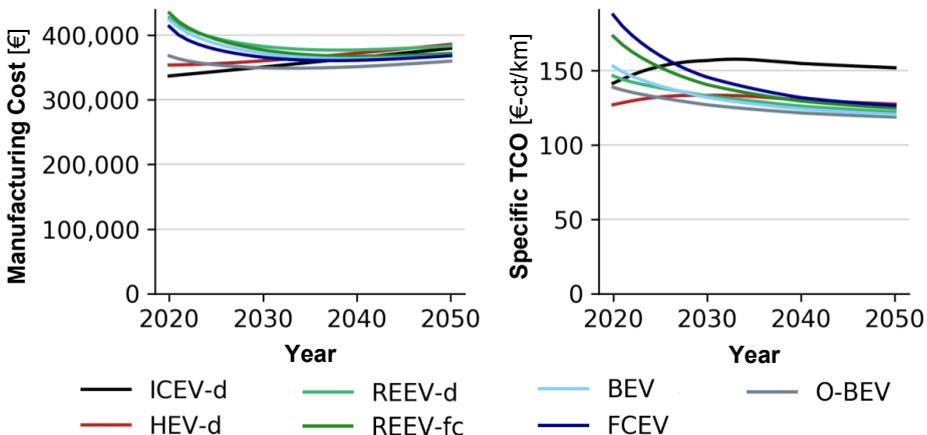


Abbildung F.2: Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Stadtbus für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O: Oberleitungs-, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr:

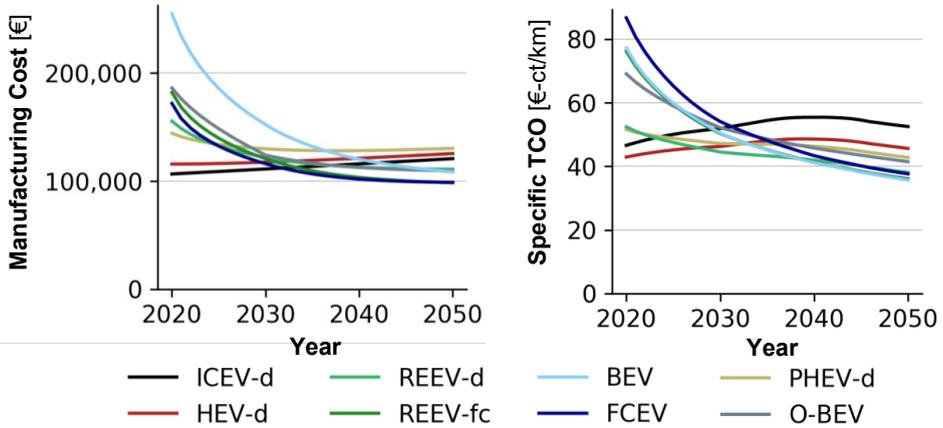


Abbildung F.3: Herstellungs- und spezifische Gesamtbetriebskosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten einer Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -g: Benzin, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle.

Einfluss der Energiekosten

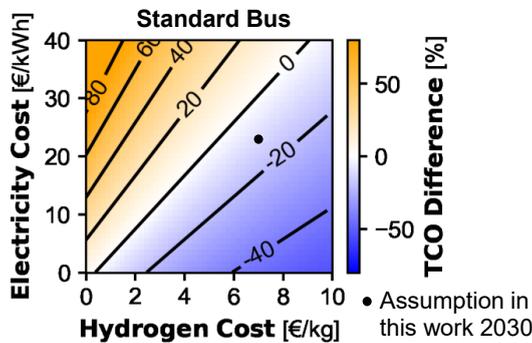


Abbildung F.4: Differenz der Gesamtbetriebskosten (TCO) (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) von batterieelektrischen (negativ, blau) und brennstoffzellenelektrischen (positiv, orange) 12 m-Stadtbussen im Jahr 2030 in Abhängigkeit der spezifischen Kraftstoffkosten an der Ladesäule bzw. der Tankstelle.

G Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors

Herstellung der Energieträger

Zunächst wird die zukünftige Stromerzeugung analysiert, welche im Rahmen der Elektrifizierung in den einzelnen Sektoren an Bedeutung gewinnt. Abbildung G.1 veranschaulicht, dass infolge von Effizienzmaßnahmen im Gebäudesektor bis 2025 eine leichte Reduktion der gesamten Stromnachfrage berechnet wird. Anschließend führt die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssektors und der weiteren Sektoren zu einer steigenden Stromnachfrage auf fast 1.400 TWh im Jahr 2045. Nur etwa 7 % des Bedarfs entstehen im Jahr 2045 im Verkehrssektor. Nicht nur die Gesamtentwicklung der Stromproduktion, sondern auch die Aufteilung nach Erzeugungstechnologie weisen eine zukünftige Veränderung auf. Der Wechsel von fossilen Energieträgern hin zu Erneuerbaren wird in den Diagrammen ersichtlich. Von 47 % im Jahr 2020 steigt der endogen berechnete Anteil der Erneuerbaren bis 2030 bereits auf fast 90 %. Unter anderem durch den Ausbau der erneuerbaren Energien wird es möglich, die treibhausgasintensive Kohleverstromung bis 2030 vollständig herunterzufahren. Gemäß dem beschlossenen Atomausstieg, wird zuvor bereits ab 2023 kein Strom aus Kernenergie mehr erzeugt. Neben dem Ausbau von Windenergie und Photovoltaik wird bis 2030 die Stromerzeugung aus Erdgas und Biomasse gesteigert, um den Anteil der Kohleverstromung zu senken. Vor dem Hintergrund des aktuellen Kriegs in der Ukraine und der hohen Abhängigkeit Deutschlands von russischem Erdgas ist es möglich, dass die Stromerzeugung aus Erdgas in den nächsten Jahren sinkt und nicht wie berechnet ansteigt. Diese Lücke müsste dann von anderen Erzeugungsoptionen ausgeglichen werden. Denkbar ist sowohl eine Verlängerung der Kohleverstromung als auch ein vorzeitiger verstärkter Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, welcher von der Bundesregierung fokussiert wird [91].

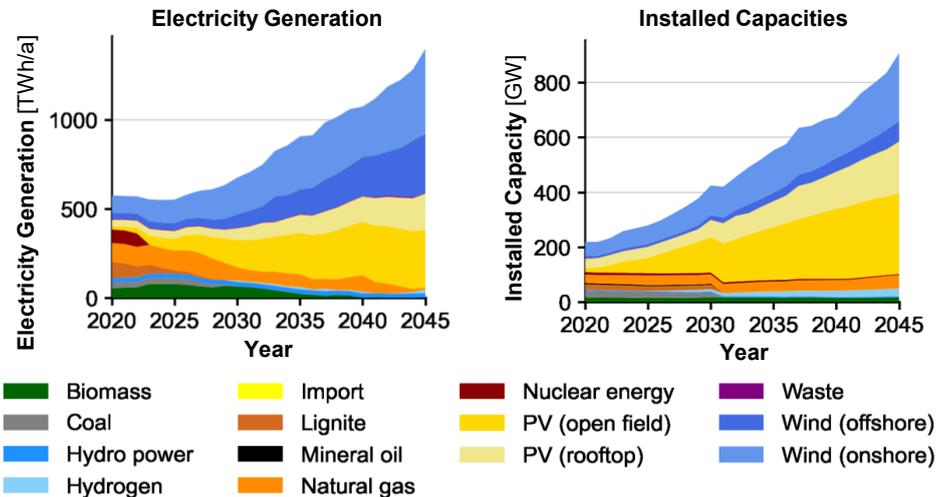


Abbildung G.1: Produktion (links) und installierte Leistung (rechts) der Stromerzeugungstechnologien nach Energieträger von 2020 bis 2045. PV: Photovoltaik.

Im Jahr 2045 erreichen die erneuerbaren Energien einen Anteil von nahezu 100 % an der Stromerzeugung. Windenergie erzielt dabei mit 58 % den größten Anteil gefolgt von Photovoltaik mit 38 %. Wasserkraft erzeugt über den Betrachtungszeitraum konstant 25 TWh/a. Der restliche Strombedarf wird im Jahr 2045 von Gaskraftwerken gedeckt, welche mittels Biogas oder Wasserstoff betrieben werden. Die Rückverstromung von Wasserstoff erzeugt während des Betrachtungszeitraum maximal 2 % des Strombedarfs.

Vergleichbar zum Strombedarf steigt auch die Wasserstoffnachfrage bis 2045 stark an. Insgesamt beziffert sich der Wasserstoffbedarf im Jahr 2045 auf mehr als 400 TWh, wovon 21 % auf den Verkehrssektor entfallen. Der Anteil des Verkehrssektors an der gesamten Wasserstoffnachfrage nimmt zunächst bis Ende der 2020er Jahre auf fast 50 % zu, bevor er anschließend wieder absinkt. Dies zeigt, dass der Verkehrssektor insbesondere innerhalb des ersten Jahrzehnts eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Wasserstoffnachfrage einnimmt. Die Wasserstoffnachfrage wird sowohl durch inländische Produktion mittels Elektrolyse als auch durch den Import von Wasserstoff gedeckt. Zur Produktion des Wasserstoffs in Deutschland werden bis 2045 Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von mehr als 72 GW errichtet. Im Jahr 2030 sind bereits fast 15 GW Elektrolyseurkapazität erforderlich. Mit 150 TWh im Jahr 2045 erfolgt der Großteil des importierten Wasserstoffs via Pipeline aus Südeuropa und Nordafrika, da dieser kostengünstiger ist als der Import via Schiff.

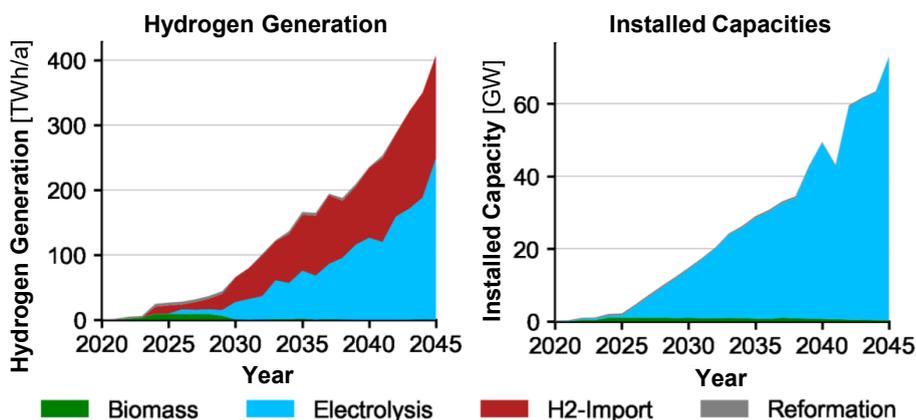


Abbildung G.2: Produktion (links) und installierte Leistung (rechts) der Wasserstoffherzeugungstechnologien von 2020 bis 2045.

Der Vergleich der endogen berechneten energieträgerspezifischen Importanteile im Jahr 2045 in Abbildung G.3 weist deutliche Unterschiede auf. Auf der einen Seite fällt die Importabhängigkeit der Stromerzeugung mit 1 % sehr gering aus. Auf der anderen Seite ist die der synthetischen Kraftstoffe mit 84 % sehr hoch. Dies deutet darauf hin, dass die Herstellung synthetischer Kraftstoffe in sonnen- oder windreichen Ländern eine günstigere Option als der Aufbau zusätzlicher inländischer erneuerbarer Stromerzeugungskapazität darstellt. Hinzu kommt, dass der internationale See- und Flugverkehr in dem betrachteten Szenario nicht berücksichtigt wird. Dieser führt zu einer deutlich höheren Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen. Da der zusätzliche Bedarf durch Import gedeckt wird, steigt der Importanteil bei den synthetischen Kraftstoffen weiter an. Die Importabhängigkeit liegt bei Wasserstoff zwischen den beiden weiteren betrachteten Energieträgern. Dies resultiert

unter anderem aus Stromerzeugungsspitzen, welche durch volatile erneuerbare Energien entstehen. Diese führen heutzutage zur Abregelung von erneuerbarer Energie und können zukünftig mittels Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion genutzt werden. Dennoch ist wie bei den synthetischen Kraftstoffen der inländische Zubau weiterer Stromerzeugungskapazitäten zur Wasserstoffproduktion nur begrenzt sinnvoll, da günstigere Wasserstoffgestehungskosten in anderen Ländern den weiteren Wasserstoffbedarf in Deutschland kostengünstiger decken können.

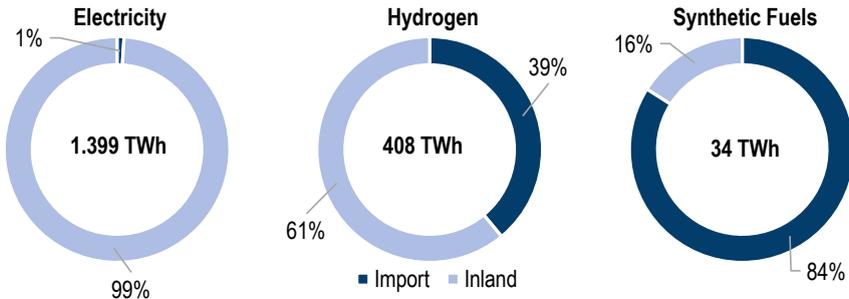


Abbildung G.3: Anteil des Imports und der inländischen Produktion an den Energieträgern elektrischer Strom, Wasserstoff und synthetischer Kraftstoffe im Jahr 2045.

Verkehrsmittel

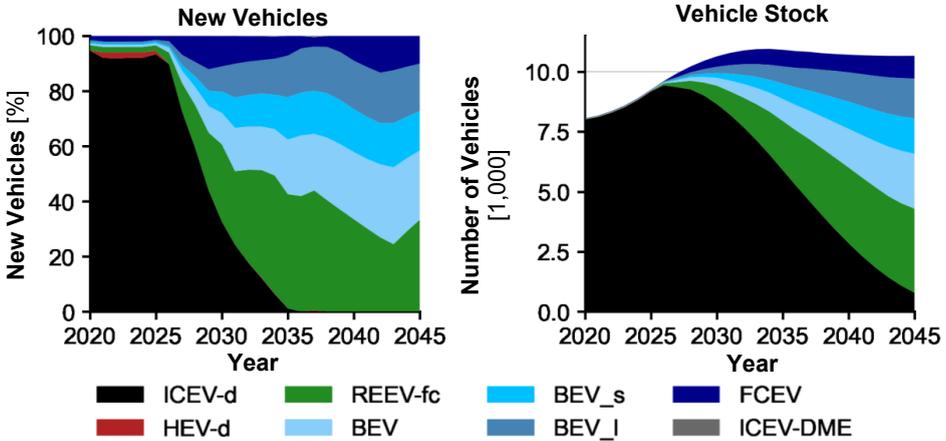


Abbildung G.4: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von kleinen Bussen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

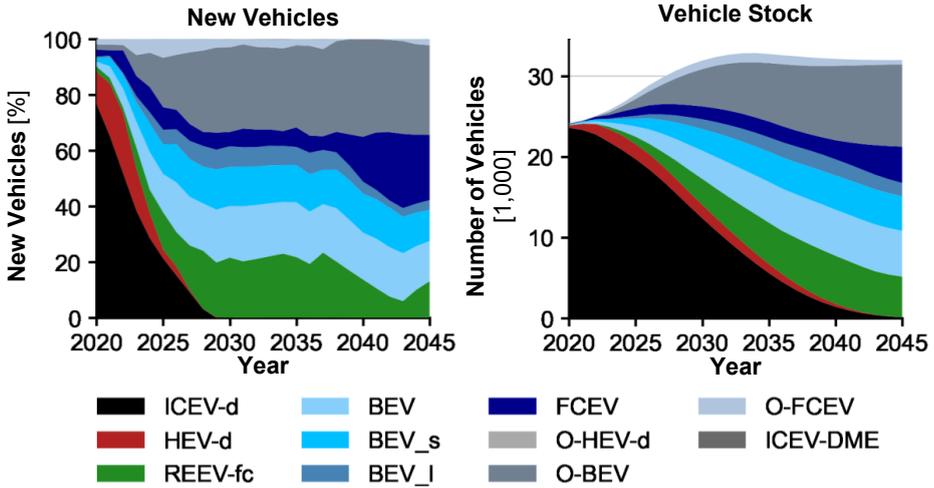


Abbildung G.5: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von mittleren Bussen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Gelegenheitslader, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

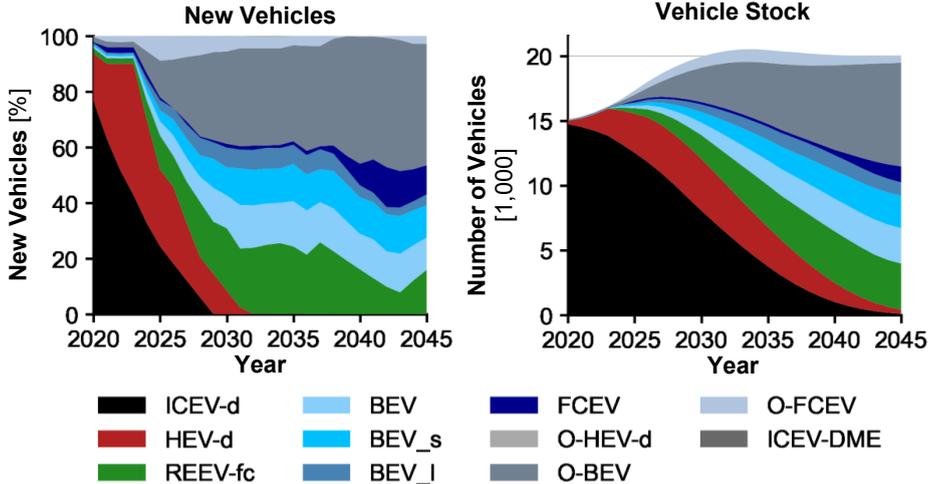


Abbildung G.6: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von großen Bussen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Gelegenheitslader, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

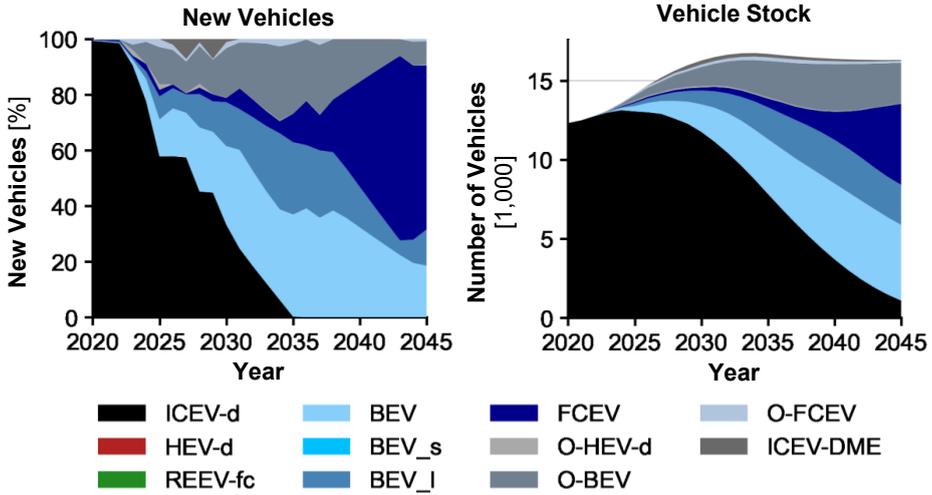


Abbildung G.7: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Reisebussen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

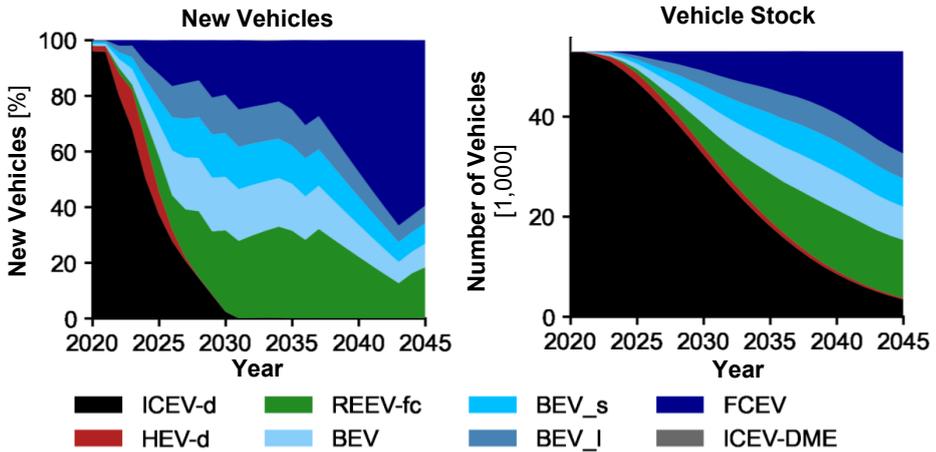


Abbildung G.8: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von mittleren Nutzfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, _s/_l: kleine/große Batteriekapazität.

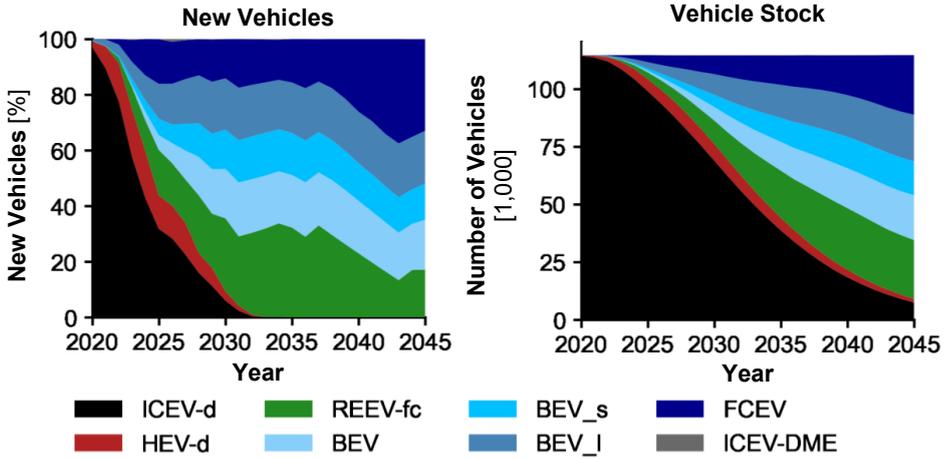


Abbildung G.9: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von schweren Nutzfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, REEV: Range-Extender-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, O-: Oberleitungs-, -d: Diesel, -fc: Brennstoffzelle, -s/_I: kleine/große Batteriekapazität.

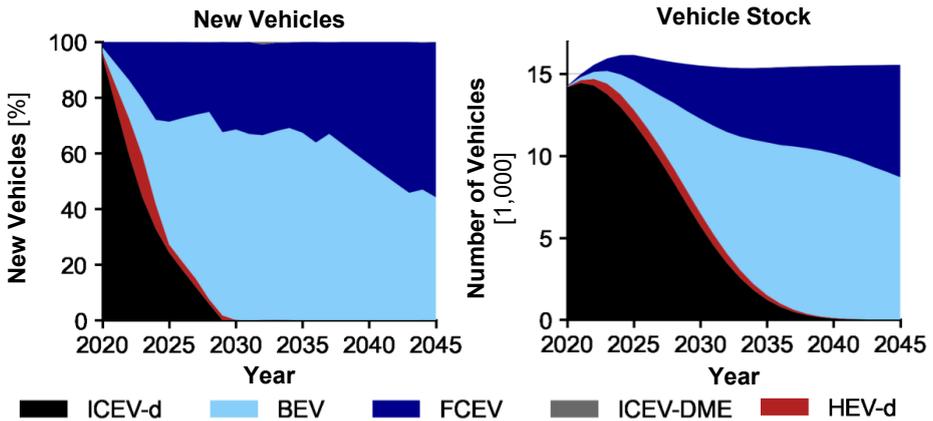


Abbildung G.10: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Abfallsammelfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel.

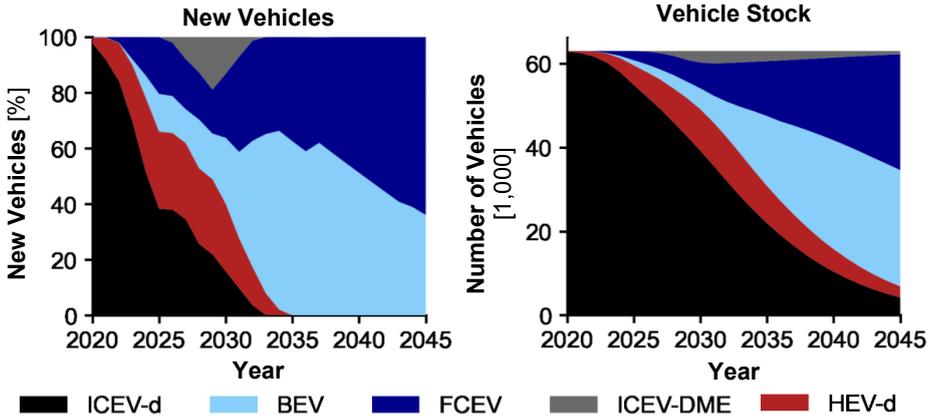


Abbildung G.11: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Kipern (Baustellenfahrzeuge) (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel.

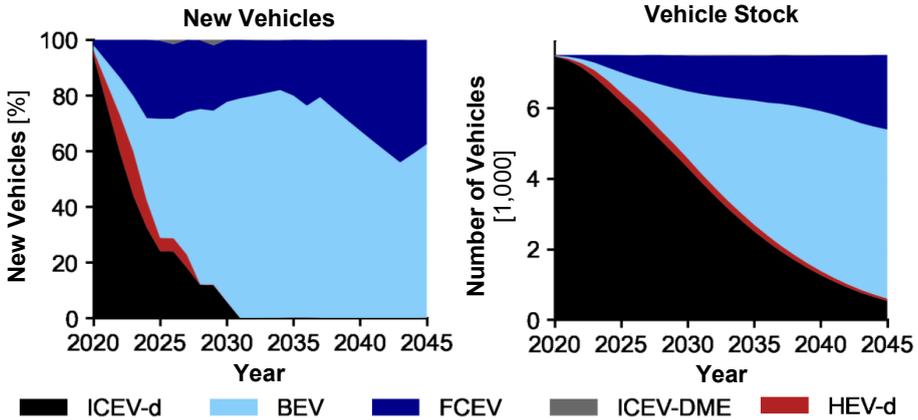


Abbildung G.12: Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebspezifische Bestandsentwicklung von Kommunalfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045. ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeug, HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, -d: Diesel.

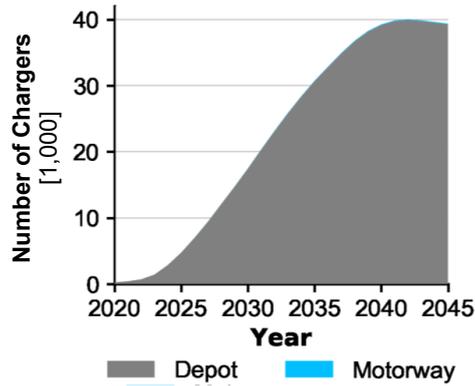


Abbildung G.13: Ausbau der Ladeinfrastruktur für Busse.

Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel im Güterverkehr

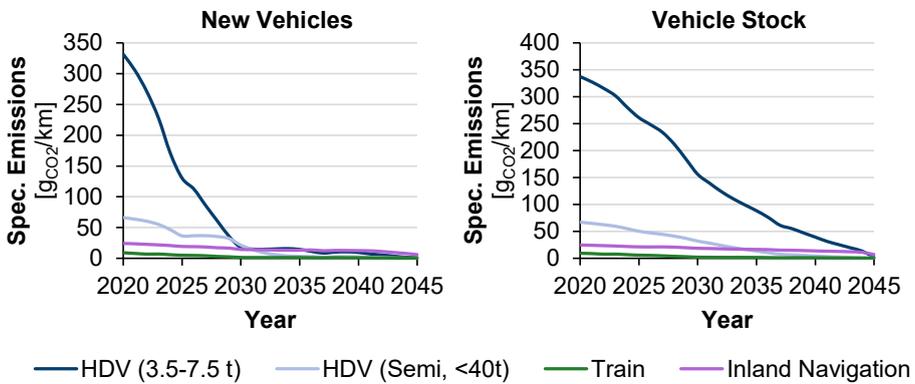


Abbildung G.14: Verkehrsleistungsspezifische Emissionen neuer Verkehrsmittel (links) und des Bestands (rechts) im Güterverkehr. Verschiedene Antriebsoptionen sind gemäß ihren endogen berechneten Anteilen gewichtet. HDV: Nutzfahrzeuge.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Historische Emissionen des deutschen Verkehrssektors von 1990 bis 2020 und sektorspezifische Ziele der Bundesregierung (links) [1], [2]. Anteile der Kraftstoffe am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2019 (rechts) [3].	1
Abbildung 1.2:	Gliederung der Arbeit (Kapitelnummer in Klammern).	5
Abbildung 2.1:	Historische Entwicklung der Personen- (links) und Güterverkehrsleistung (rechts) in Deutschland von 2000 bis 2020, angelehnt an [12]. MIV: Motorisierter Individualverkehr	7
Abbildung 2.2:	Historische Entwicklung des Bestands (links) und der Neuzulassungen (rechts) von Fahrzeugen der Klasse M1, auf Basis von [14], [15].	9
Abbildung 2.3:	Historische Entwicklung des Bestands (links) und der Neuzulassungen (rechts) von Fahrzeugen der Klasse M2 und M3, auf Basis von [20], [21].	10
Abbildung 2.4:	Historische Entwicklung des Bestands und der Neuzulassungen von Fahrzeugen der Klassen N1-N3, auf Basis von [20], [21].	11
Abbildung 2.5:	Verkehrsleistung und Fluganzahl internationaler Flüge in Abhängigkeit der Flugdistanz [37].	13
Abbildung 2.6:	Aufbau verschiedener Antriebstechnologien.	14
Abbildung 2.7:	Anteile relevanter Antriebstechnologien an den Pkw-Neuzulassungen in Deutschland von 2010 bis 2021, auf Basis von [41].	15
Abbildung 2.8:	Einteilung der elektrischen Ladeinfrastruktur für Pkw nach [61].	17
Abbildung 2.9:	Umwandlungsprozesse zur Herstellung potenzieller Sekundärenergieträger für den Verkehrssektor. Eigene Darstellung nach [81].	21
Abbildung 2.10:	Projizierte Neuzulassungen, Fahrzeugflotte und Verkehrsleistung autonomer Pkw von 2030 bis 2080 nach Litman et al. [102].	26
Abbildung 3.1:	Fahrprofil des Fahrzyklus <i>WLTC-3b</i> nach [135].	30
Abbildung 3.2:	Kostenarten einer verbraucherorientierten Total-Cost-of-Ownership Analyse von Verkehrsmitteln [149].	31
Abbildung 3.3:	Wartungskosten verschiedener Pkw-Antriebsalternativen nach [45], [158], [160]–[164].	33
Abbildung 3.4:	Kosten von Gleichstromladern in Abhängigkeit der Ladeleistung im Zeitraum von 2020 bis 2030 nach [169].	35
Abbildung 3.5:	Modellierungstechniken zur Berechnung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Anlehnung an Linton und Creutzig [181], [182].	42
Abbildung 3.6:	Zeitlicher und räumlicher Horizont der analysierten Verkehrssektormodelle. National: <2050: [193]–[197]; bis 2050: [46], [47], [198]–[216]; > 2050: [217]; Multi-country: bis 2050:	

	[198], [218]–[221]; > 2050: [222]; Global: bis 2050: [223]–[227]; > 2050: [228]–[230].	44
Abbildung 3.7:	Zeitliche (a) und räumliche (b) Auflösung der untersuchten Verkehrssektormodelle.	45
Abbildung 3.8:	Einbezogene Verkehrsmittel in den untersuchten Verkehrssektormodellen.	47
Abbildung 3.9:	Repräsentation der Antriebsarten in den Verkehrssektormodellen.	48
Abbildung 3.10:	Berücksichtigte Kraftstoffe in den Verkehrssektormodellen.	49
Abbildung 3.11:	Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für verschiedene Personenverkehrsmodi in Deutschland 2018 (basierend auf [244]).	56
Abbildung 3.12:	Spezifische Treibhausgasemissionen ausgewählter Kraftstoffe basierend auf [85].	57
Abbildung 3.13:	Veränderungen des Pkw-Energiebedarfs aufgrund automatisierten Fahrens nach [252].	59
Abbildung 3.14:	Geschwindigkeitsabhängiger Kraftstoffbedarf in <i>TRIMODE</i> [258].	62
Abbildung 3.15:	Kriterien der Antriebswahl in den untersuchten Verkehrssektormodellen.	63
Abbildung 3.16:	Neue Modi zur Berücksichtigung der Automatisierung und Shared Mobility in <i>MA3T-MC</i> [207].	66
Abbildung 3.17:	Einfluss der Mobilitätstrends untereinander sowie auf die Teile der ASIF-Methode sowie deren Modellierungsqualität in Verkehrssektormodellen.	67
Abbildung 3.18:	Überblick über potentielle Anpassungen der Verkehrssektormodelle.	69
Abbildung 4.1:	Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle sowie deren Einordnung innerhalb von <i>ETHOS</i> .	71
Abbildung 4.2:	Flussdiagramm des Modellaufbaus <i>VE Cost</i> inklusive der Kopplung an <i>VE Energy</i> . [149]	72
Abbildung 4.3:	Elektrifizierungsgrad der verschiedenen Zuggattungen auf Basis von [31], [32].	74
Abbildung 4.4:	Einfluss der verwendeten Kriterien auf den berechneten Leistungsbedarf eines Pkw des mittleren Segments (links). Angenommene Reichweiten von BEV und REEV in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments sowie des Produktionsjahres (rechts).	77
Abbildung 4.5:	Tägliche Fahrleistung der Standardbusse nach [59] und Sattelzugmaschinen nach [112] zur Ableitung der erforderlichen Reichweiten von batterieelektrischen Varianten.	78
Abbildung 4.6:	Kapazität, Auslastung und Fluganzahl in Abhängigkeit der Flugdistanz für aus Deutschland abgehende Flüge nach [37].	79
Abbildung 4.7:	Mechanischer Energiebedarf eines mittleren Pkw sowie das maximale Rekuperationspotenzial in Abhängigkeit des WLTC3a-Zyklusabschnitts (links). Qualitativer Vergleich der	

	Widerstandskräfte mit und ohne Rekuperation in Anlehnung an [125] (rechts).	81
Abbildung 4.8:	Komponentenspezifische Fahrzeugmassen von mittleren Pkw mit konventionellem und elektrifiziertem Antrieb von 2020 bis 2050.	82
Abbildung 4.9:	Aerodynamische Eigenschaften und Rollreibungswiderstand der betrachteten Pkw-Segmente von 2020 bis 2050 (links). EU-Effizienzklassen der Reifen für Busse und Nutzfahrzeuge nach Regulation (EU) 2020/740 [131] (rechts).	83
Abbildung 4.10:	Elektrischer Fahranteil von PHEV und REEV in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung in Anlehnung an [200] (links). Energiebedarf der Heizung des Fahrgastraums von Bussen nach [59] (rechts).	85
Abbildung 4.11:	Szenario-basierte Anteile der Antriebsalternativen an globalen Pkw-Neuzulassungen (links). Globale jährliche Pkw-Produktionsstückzahlen im Referenzszenario und „Autonom und geteilt“-Szenario (rechts) [149].	86
Abbildung 4.12:	Auf Basis des Lernkurvenansatzes berechnete spezifische Herstellungskosten des Batterie-, Brennstoffzellen- und Wasserstofftanksystems im Vergleich zu Literaturwerten. [127], [128], [142], [150], [151], [154], [156], [157], [159], [161], [164], [171], [213].	87
Abbildung 4.13:	Spezifische Wartungskosten verschiedener Antriebsalternativen eines mittleren Pkw nach Komponentenart in Anlehnung an Propfe [164]. Die Wartungskosten der elektrifizierten Komponenten sind straffiert dargestellt, da diese in der vorliegenden Arbeit endogen auf Basis der mittels des Lernkurvenansatzes berechneten spezifischen Komponentenkosten bestimmt werden und somit nicht von Propfe übernommen werden.	89
Abbildung 4.14:	Angenommene spezifische Kraftstoffkosten der Energieträger an der Tankstelle/Ladesäule für Pkw, Busse und Sattelzugmaschinen inklusive Produktions- und Infrastrukturkosten von 2020 bis 2050.	91
Abbildung 4.15:	Validierung der Modellergebnisse hinsichtlich Antriebskonfiguration (Systemleistung und Batteriekapazität) (links) sowie der massenabhängigen Kraftstoffverbrauchsberechnung (Kraftstoffverbrauch und Fahrzeugmasse) (rechts) im Vergleich zu aktuellen Fahrzeugmodellen.	93
Abbildung 4.16:	Vergleich der endogen berechneten Wartungskosten in Abhängigkeit der Systemleistung (links) und der Batteriekapazität (rechts) mit Literaturwerten.	94
Abbildung 4.17:	Aufbau des Modells FINE.Transport inklusive Energie- und Stofffluss.	95
Abbildung 4.18:	Historische THG-Emissionen des Verkehrs- und Energiesektors sowie linearisierte Zielwerte in Anlehnung an Ziele der Bundesregierung für die Jahre 2030 und 2045 [2].	96

Abbildung 4.19:	Prozessschema zum Auswahlprozess der in FINE.Transport verwendeten typischen Profile aus dem mit MO DE generierten Profilpool.	98
Abbildung 4.20:	Verteilung der Pkw-Flotte nach Regionstyp und Fahrzeugsegment auf Basis der MiD2017-Daten [110].	99
Abbildung 4.21:	Verteilung der Jahresfahrleistung nach Regionstyp und Fahrzeugsegment auf Basis der MiD2017-Daten [110].	100
Abbildung 4.22:	Veranschaulichung der k-medoid-Clusterung zur Auswahl der typischen Fahrprofil (links). Beispielhaftes typisches Fahrprofil mit stündlicher Auflösung (rechts).	101
Abbildung 4.23:	Funktionsschema des Modells FRE MOD zur Modellierung der Güterverkehrsnachfrage.	102
Abbildung 4.24:	Abhängigkeit der Transportdistanzen von der Verkehrsart auf Basis von [109].	104
Abbildung 4.25:	Modaler Split (verkehrsleistungsspezifisch) für Hauptgütergruppen Kokerei- und Mineralölerzeugnisse sowie Maschinen und Anlagen zur Visualisierung des Einflusses der Wertdichte.	104
Abbildung 4.26:	Lebensdauerkurven von Straßenfahrzeugen auf Basis der KBA-Daten [25].	106
Abbildung 4.27:	Obere bzw. untere Grenze der Marktentwicklung während der Markteinführung bzw. des Marktausscheidens.	107
Abbildung 4.28:	FCEV je Wasserstofftankstelle (links) bzw. BEV je Ladepunkt aufgeteilt nach Ladepunktart (rechts) in Abhängigkeit des Gesamtfahrzeugbestands [64], [73], [75], [240].	108
Abbildung 4.29:	Art des Fahrzeugstellplatzes zu Hause nach Regionstyp (RegioStaR7) [62].	109
Abbildung 4.30:	Visualisierung der implementierten Ladestrategien anhand eines beispielhaften Profils.	110
Abbildung 4.31:	Start- und Endzeiten der täglichen Routen für verschiedene Nutzfahrzeugklassen. Stündlich aggregiert nach [112].	111
Abbildung 4.32:	Installierte Leistung der Windenergie und Photovoltaik des treibhausgasneutralen Szenarios nach Stolten et al. [234] inklusive daraus abgeleiteter Grenzen des Ausbaus in FINE.Transport (links). Räumliche Auflösung der Windenergie und Photovoltaik in FINE.Transport in Anlehnung an FINE.NESTOR (rechts).	113
Abbildung 4.33:	Erzeugungsprofile der Windenergie und Photovoltaik für die Modellregionen 1 und 7, basierend auf [90].	114
Abbildung 4.34:	Absolute Energienachfrage der Sektoren Industrie, Gebäude und GHD nach Energieträger von 2020 bis 2045 (links). Kumuliertes Profil der Nachfrage nach Elektrizität, Methan und Wasserstoff im Jahr 2030 (rechts). Beides jeweils nach treibhausgasneutralem Szenario nach Stolten et al. [234].	115
Abbildung 4.35:	Vergleich der Modellergebnisse für das Jahr 2020 mit Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [3] für das Jahr	

	2019 zur kraftstoffspezifischen Endenergienachfrage des deutschen Verkehrssektors.	116
Abbildung 4.36:	Vergleich der Modellergebnisse für das Jahr 2020 mit den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [3] für das Jahr 2019 zum energieträgerspezifischen Primärenergiebedarf des gesamten deutschen Energiesystems.	117
Abbildung 5.1:	Dimensionsbasierte Entwicklung der sozio-ökonomischen Szenarien nach Reul [121]. Szenarioparameter gehören den kognitiven Normen, Gewohnheitspraktiken oder der Materialkultur an und können unterschiedliche Ausprägungen annehmen. In dieser Arbeit werden auf Basis der dimensionsbasierten Szenarioentwicklung ein Status Quo und ein Progressives Szenario abgeleitet.	122
Abbildung 5.2.	Anteile der verschiedenen Antriebsoptionen an der weltweiten Pkw-Produktion in den drei definierten Szenarien (Referenz, BEV, FCEV) von 2020 bis 2050.	124
Abbildung 6.1.	Komponentenbasierte Herstellungskosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	127
Abbildung 6.2.	Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	128
Abbildung 6.3.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines städtischen Kleinwagens für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	129
Abbildung 6.4.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Langstrecken-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	130
Abbildung 6.5.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines SUV mit temporärem Anhängerbetrieb für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	131
Abbildung 6.6.	Komponentenbasierte Herstellungskosten eines 18 m-Stadtbusses in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	133
Abbildung 6.7.	Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines 18m-Stadtbusses für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	134
Abbildung 6.8.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines 12m-Überlandbusses für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	135
Abbildung 6.9.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Reisebusses für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	136

Abbildung 6.10.	Komponentenbasierte Herstellungskosten einer 40 t-Sattelzugmaschine im Fernverkehr in Abhängigkeit der Antriebsoption für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	137
Abbildung 6.11.	Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten einer 40 t-Sattelzugmaschine im Fernverkehr für die betrachteten Antriebsalternativen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050.	138
Abbildung 6.12.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines urbanen Lieferfahrzeugs für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	139
Abbildung 6.13.	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Abfallsammelfahrzeugs für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	140
Abbildung 6.14.	Gesamtkostendifferenz von FCEV zu BEV (0 %) in den betrachteten Anwendungsfällen von 2020 bis 2050.	141
Abbildung 6.15.	Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	142
Abbildung 6.16.	Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antrieben von 2020 bis 2050. Bei allen öffentlichen Verkehrsmitteln wird eine konstante, der Historie entsprechende durchschnittliche Auslastung angenommen. Bei Pkw wird die Auslastung von 2035 bis 2050 in der Untersuchung aufgrund von verstärktem Ridesharing linear von den historischen 28 % auf 35 % erhöht.	144
Abbildung 6.17.	Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Personenfernverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	145
Abbildung 6.18.	Verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf verschiedener Güterverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	146
Abbildung 6.19.	Verkehrsleistungsspezifische Gesamtkosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer (nicht für Pkw)) verschiedener Personennahverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	148
Abbildung 6.20.	Verkehrsleistungsspezifische Gesamtkosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer (nicht für Pkw)) verschiedener Personenfernverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	149
Abbildung 6.21.	Verkehrsleistungsspezifische Gesamtkosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff und Fahrer) verschiedener Güterverkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Auslastung für das Jahr 2030.	150

Abbildung 6.22.	Anteile der Kostenarten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) an den Gesamtkosten in Abhängigkeit der Antriebsart (links) und der Fahrzeuganwendung (rechts)	151
Abbildung 6.23.	Spezifische Kosten der Batterie, Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank von 2020 bis 2050 in Abhängigkeit des betrachteten Weltmarktszenarios.	153
Abbildung 6.24.	Spezifische Kosten der Batterie, Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks von 2020 bis 2050 bei um zwei Prozentpunkte veränderter Lernrate gegenüber dem Referenzwert.	154
Abbildung 6.25.	Anteile der Batterie (BEV) und der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks (FCEV) an den Herstellungskosten (links) sowie den Gesamtkosten inklusive Herstellung, Wartung und Kraftstoff (rechts) bei den betrachteten Fahrzeuganwendungen im Jahr 2030.	155
Abbildung 6.26.	Differenz der Gesamtkosten von BEV (negativ, blau) und FCEV (positiv, orange) eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.	156
Abbildung 6.27.	Differenz der Gesamtkosten von BEV (negativ, blau) und FCEV (positiv, orange) eines 12m-Standardbusses im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.	157
Abbildung 6.28.	Differenz der Gesamtkosten von BEV (negativ, blau) und FCEV (positiv, orange) einer 40 t-Sattelzugmaschine im Jahr 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung und der Reichweite.	157
Abbildung 6.29.	Erforderliche BEV-Batteriekapazität der betrachteten Fahrzeuganwendungen in Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs und der elektrischen Reichweite. Einteilung der betrachteten Fahrzeuganwendungen in vier Gruppierungen anhand der beiden Dimensionen.	158
Abbildung 6.30.	Spezifische Kosten der elektrischen Ladeinfrastruktur von Sattelzugmaschinen im Jahr 2030 in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrzeuge je Schnell- und Langsamlader (750 bzw. 150 kW). Der Pfeil beschreibt qualitativ die Richtung der Entwicklung.	160
Abbildung 6.31.	Differenz der Gesamtkosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) von batterieelektrischen (negativ, blau) und brennstoffzellenelektrischen (positiv, orange) Pkw und Sattelzugmaschinen im Jahr 2030 in Abhängigkeit der spezifischen Kraftstoffkosten an der Ladesäule bzw. der Tankstelle.	161
Abbildung 6.32.	Vergleich der Herstellungskosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischen Pkw von 2020 bis 2050 im Verhältnis zu denen eines konventionellen Fahrzeugs (ICEV) im Jahr 2020 in dieser Arbeit sowie der Literatur [158], [171], [174], [241].	162
Abbildung 6.33.	Vergleich der Herstellungskosten von (oberleitungs-)batterie- und brennstoffzellenelektrischen Sattelzugmaschinen von 2020 bis 2050 im Verhältnis zu denen eines konventionellen Fahrzeugs im Jahr 2020 in dieser Arbeit sowie der Literatur [67], [170], [171], [175], [176], [241].	164

Abbildung 6.34:	Zeitpunkt der Gesamtkostenparität von BEV und FCEV mit ICEV in den betrachteten Fahrzeuganwendungen.	165
Abbildung 7.1:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung von Pkw (rechts) von 2020 bis 2045.	171
Abbildung 7.2:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung (rechts) der vier betrachteten Pkw-Segmente von 2020 bis 2045.	175
Abbildung 7.3:	Fahrzeuganzahl- (links) und fahrleistungsspezifische (rechts) Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand von 2020 bis 2045.	176
Abbildung 7.4:	Anteile der vollelektrischen Antriebsarten bei den Pkw-Nutzergruppen inklusive linearer Interpolation in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung. Datenpunkte entsprechen den Anteilen innerhalb der modellseitig betrachteten Nutzergruppen. Geraden stellen lineare Interpolation dieser Datenpunkte dar.	177
Abbildung 7.5:	Boxplot der Antriebsanteilverteilung vollelektrischer Optionen am Pkw-Bestand in den Regionstypen der RegioStaR7-Klassifizierung im Jahr 2045.	178
Abbildung 7.6:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung von Bussen (rechts) von 2020 bis 2045.	180
Abbildung 7.7:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung von leichten Nutzfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045.	182
Abbildung 7.8:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung von Sattelzugmaschinen (rechts) von 2020 bis 2045.	183
Abbildung 7.9:	Antriebsspezifische Fahrleistung der betrachteten Zuggattungen in den Jahren 2020, 2030 und 2045.	185
Abbildung 7.10:	Anteile der Antriebsarten an den neuen Binnengüterschiffen (links) und antriebsspezifische Bestandsentwicklung von Binnengüterschiffen (rechts) von 2020 bis 2045.	187
Abbildung 7.11:	Antriebsanteile an neuen Flugzeugen und dem Flugzeugbestand der betrachteten Flugarten in den Jahren 2020, 2030 und 2045.	188
Abbildung 7.12:	Entwicklung des Kraftstoffbedarfs im Verkehrssektor aufgeteilt nach Energieträger im Zeitraum von 2020 bis 20245.	189
Abbildung 7.13:	Otto- (links) und Dieselmotornachfrage (rechts) unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045.	191
Abbildung 7.14:	Strom- (links) und Wasserstoffnachfrage (rechts) unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045.	192
Abbildung 7.15:	Ausbau der Ladeinfrastruktur für Pkw (links) und Nutzfahrzeuge (rechts) unterteilt nach Art des Ladepunktes im Zeitraum von 2020 bis 2045.	194
Abbildung 7.16:	Kumuliertes Stromnachfrageprofil elektrifizierter Pkw im Jahr 2022 (oben) und 2045 (unten).	195

Abbildung 7.17:	Anteil der Ladepunktarten elektrifizierter Pkw an der Anzahl der Ladepunkte (rechts) und der geladenen Energie (rechts) im Jahr 2045.	196
Abbildung 7.18:	Ausbau der Wasserstofftankstellen unterteilt nach Verkehrsmitteln im Zeitraum von 2020 bis 2045.	197
Abbildung 7.19:	Primärenergiebedarf unterteilt nach Primärenergieträger sowie der Anteil des Imports und der erneuerbaren Energien von 2020 bis 2045.	199
Abbildung 7.20:	Fahrleistungsspezifische Emissionen neu zugelassener Pkw unterteilt nach Antriebsart (links) und Segment (rechts) von 2020 bis 2045. Verschiedene Pkw-Segmente (links) bzw. Antriebsoptionen (rechts) sind gemäß ihren endogen berechneten Anteilen gewichtet.	201
Abbildung 7.21:	Verkehrsleistungsspezifische Emissionen neuer Verkehrsmittel (links) und des Bestands (rechts) im Personenverkehr. Verschiedene Antriebsoptionen sind gemäß ihren endogen berechneten Anteilen gewichtet.	202
Abbildung 7.22:	Annualisierte Gesamtkosten unterteilt nach Komponenten des betrachteten Energiesystems von 2020 bis 2045.	203
Abbildung 7.23:	Antriebsspezifischer Pkw-Bestand im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	205
Abbildung 7.24:	Antriebsspezifische Differenz des Pkw-Bestands im Szenario <i>StatusQuo-E+</i> (links) und <i>StatusQuo-H₂+</i> (rechts) gegenüber dem Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> von 2020 bis 2045.	206
Abbildung 7.25:	Antriebsspezifischer Bestand von Sattelzugmaschinen im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	207
Abbildung 7.26:	Antriebsspezifische Differenz des Bestands von Sattelzugmaschinen im Szenario <i>StatusQuo-E+</i> (links) und <i>StatusQuo-H₂+</i> (rechts) gegenüber dem Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> von 2020 bis 2045.	208
Abbildung 7.27:	Antriebsspezifischer Bestand von Nahverkehrszügen (RB) im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	209
Abbildung 7.28:	Antriebsspezifischer Bestand von Binnengüterschiffen im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	210
Abbildung 7.29:	Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffart im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	212
Abbildung 7.30:	Strom- (links) und Wasserstoffbedarf (rechts) des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 in den betrachteten Szenarien.	213
Abbildung 7.31:	Otto- (links) und Dieselmotorkraftstoffbedarf (rechts) des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 in den betrachteten Szenarien.	214

Abbildung 7.32:	Ausbaubedarf der Pkw-Ladeinfrastruktur nach Ladepunktart (links) und Wasserstofftankstelleninfrastruktur nach Verkehrsmittel (rechts) im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien.	215
Abbildung 7.33:	Installierte Leistung der Strom- (links) und Wasserstoffherzeugung (rechts) nach Technologie im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien.	216
Abbildung 7.34:	Primärenergiebedarf unterteilt nach Primärenergieträgern im Jahr 2045 in den betrachteten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	218
Abbildung 7.35:	Summe der annualisierten Gesamtsystemkosten nach Komponente über den Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2045 in den analysierten Szenarien (links) und die Differenz zum Basisszenario <i>StatusQuo-Ref</i> (rechts).	219
Abbildung 7.36:	Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors von 2020 bis 2045 (links) und Endenergiebedarf im Jahr 2020 nach Energieträger (rechts) exklusive und inklusive des internationalen Verkehrs.	221
Abbildung 7.37:	Endenergiebedarf des Verkehrssektors inklusive des internationalen Verkehrs nach Energieträger von 2020 bis 2045 sowie die Differenz zum Basisszenario exklusive des internationalen Verkehrs.	222
Abbildung 7.38:	Differenz des Bestands von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) von 2020 bis 2045 in der Sensitivitätsanalyse inklusive des internationalen Verkehrs im Vergleich zum Basisszenario exklusive des internationalen Verkehrs.	223
Abbildung 7.39:	Antriebsspezifischer Bestand von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie den beiden Kostensensitivitätsanalysen.	225
Abbildung 7.40:	Endenergiebedarf des Verkehrssektors (links) sowie die Differenz zum Basisszenario (rechts) nach Energieträger im Jahr 2045 in den beiden Kostensensitivitätsanalysen.	226
Abbildung 7.41:	Kumuliertes Stromnachfrageprofil von elektrifizierten Pkw inklusive der V2G-Option im Jahr 2045.	227
Abbildung 7.42:	Antriebsspezifischer Bestand von Pkw (links), Bussen (Mitte) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie der Sensitivitätsanalyse inklusive der V2G-Option.	228
Abbildung 7.43:	Kumuliertes Stromnachfrageprofil von elektrifizierten Pkw exklusive der Ladeoption an der Arbeitsstätte im Jahr 2045.	229
Abbildung 7.44:	Anteil der Ladepunktarten an der geladenen Energie elektrifizierter Pkw im Jahr 2045 im Basisszenario (links) und in der Sensitivitätsanalyse exklusive der Ladeoption an der Arbeitsstätte (rechts).	229
Abbildung 7.45:	Antriebsspezifischer Bestand von Pkw (links) und Sattelzugmaschinen (rechts) im Jahr 2045 im Basisszenario sowie der beiden Sensitivitätsanalyse verschiedener Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur (Exklusive Ladeoption	

	an der Arbeitsstätte und fokussierter Ausbau der Schnellladeinfrastruktur).	230
Abbildung 7.46:	Anteile der Antriebsarten an den neu zugelassenen Pkw (oben) und Sattelzugmaschinen (unten) im Basisszenario (links) und in der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich einer beschränkten Verfügbarkeit von Energieträgern (rechts) von 2020 bis 2045.	232
Abbildung 7.47:	Vergleich der Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand im Jahr 2045 in den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Szenarien mit verschiedenen Szenarien aus der Literatur [46], [47], [166], [234]–[240].	235
Abbildung 7.48:	Vergleich des energieträgerspezifischen Endenergiebedarfs des Verkehrssektors im Jahr 2045 in den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Szenarien mit verschiedenen Szenarien aus der Literatur [46], [47], [166], [234]–[240].	237
Abbildung A.1:	Historische Entwicklung des Personen- und Güterverkehrsaufkommens 2000-2020, angelehnt an [12].	249
Abbildung D.1:	Tägliche Fahrleistung der verschiedenen Nutzfahrzeugtypen und Busse nach [59], [112].	260
Abbildung D.2:	Aufbau des Longitudinalmodells [126].	263
Abbildung D.3:	Fahrprofil des WHVC [132].	263
Abbildung D.4:	Fahrprofil des Braunschweig City Driving Cycle [133].	264
Abbildung D.5:	Fahrprofil des Neighborhood Refuse Truck Cycle [134].	264
Abbildung D.6:	RegioStaR 7 Klassifizierung der Gemeinden Deutschlands [120].	273
Abbildung F.1:	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	279
Abbildung F.2:	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten eines Stadtbusses für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	279
Abbildung F.3:	Herstellungs- und spezifische Gesamtkosten inklusive Herstellungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten einer Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr für die betrachteten Antriebsalternativen von 2020 bis 2050.	280
Abbildung F.4:	Differenz der Gesamtkosten (Herstellung, Wartung, Kraftstoff) von batterieelektrischen (negativ, blau) und brennstoffzellenelektrischen (positiv, orange) 12 m-Stadtbussen im Jahr 2030 in Abhängigkeit der spezifischen Kraftstoffkosten an der Ladesäule bzw. der Tankstelle.	280
Abbildung G.1:	Produktion (links) und installierte Leistung (rechts) der Stromerzeugungstechnologien nach Energieträger von 2020 bis 2045.	281
Abbildung G.2:	Produktion (links) und installierte Leistung (rechts) der Wasserstoffherzeugungstechnologien von 2020 bis 2045.	282

Abbildung G.3:	Anteil des Imports und der inländischen Produktion an den Energieträgern elektrischer Strom, Wasserstoff und synthetischer Kraftstoffe im Jahr 2045.	283
Abbildung G.4:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von kleinen Bussen (rechts) von 2020 bis 2045.	283
Abbildung G.5:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von mittleren Bussen (rechts) von 2020 bis 2045.	284
Abbildung G.6:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von großen Bussen (rechts) von 2020 bis 2045.	284
Abbildung G.7:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von Reisebussen (rechts) von 2020 bis 2045.	285
Abbildung G.8:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von mittleren Nutzfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045.	285
Abbildung G.9:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von schweren Nutzfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045.	286
Abbildung G.10:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von Abfallsammelfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045.	286
Abbildung G.11:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von Kippern (Baustellenfahrzeuge) (rechts) von 2020 bis 2045.	287
Abbildung G.12:	Anteile der Antriebsarten an den Neuzulassungen (links) und antriebsspezifische Bestands-entwicklung von Kommunalfahrzeugen (rechts) von 2020 bis 2045.	287
Abbildung G.13:	Ausbau der Ladeinfrastruktur für Busse.	288
Abbildung G.14:	Verkehrsleistungsspezifische Emissionen neuer Verkehrsmittel (links) und des Bestands (rechts) im Güterverkehr. Verschiedene Antriebsoptionen sind gemäß ihren endogen berechneten Anteilen gewichtet.	288

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Klassifizierung von Straßenkraftfahrzeugen gemäß Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 [13].	8
Tabelle 2.2:	Energienachfrage des Verkehrssektors nach Verkehrsart und Kraftstoffart im Jahr 2019 [3].	16
Tabelle 3.1:	Betrachtete Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe innerhalb des Modellvergleichs	47
Tabelle 3.2:	Methodische Schwachpunkte der Modelle in der Literatur auf Basis der durchgeführten Analyse inklusive der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lösungsansätze.	70
Tabelle 4.1	Modellseitige Segmente der Straßenfahrzeuge inklusive deren Randbedingungen bzw. zugehörige KBA-Fahrzeugsegmente.	73
Tabelle 4.2:	Flugdistanzen der modellseitigen Segmente des Luftverkehrs [36].	75
Tabelle 4.3:	Konfigurationsmatrix der betrachteten Antriebsarten von Straßenfahrzeugen.	76
Tabelle 4.4:	Maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung in Abhängigkeit des Pkw-Segments.	76
Tabelle 4.5:	Wirkungsgrade der verschiedenen Antriebskomponenten von 2020 bis 2050 [174], [136] - [137].	84
Tabelle 4.6:	Betrachtete Komponenten der Pkw-Wartungskostenberechnung nach Propfe [164].	88
Tabelle 4.7:	Eigenschaften des Verkehrssektormodells <i>FINE.Transport</i> .	97
Tabelle 4.8:	Energiespeicher in <i>FINE.Transport</i>	112
Tabelle 5.1:	Randbedingungen der untersuchten Personenkraftwagen.	119
Tabelle 5.2:	Randbedingungen der untersuchten Bustypen.	120
Tabelle 5.3:	Randbedingungen der untersuchten Nutzfahrzeugtypen.	121
Tabelle 5.4:	Ausprägung der techno-ökonomischen Szenarioparameter in den drei definierten Szenarien <i>Reference</i> , <i>Electricity+</i> und <i>Hydrogen+</i> .	125
Tabelle B.1:	Vergleich verschiedener im Rahmen dieser Arbeit genutzten Datenerhebungen bzw. -quellen.	254
Tabelle C.1:	Informationen zu den im Literaturreview betrachteten Modellen.	255
Tabelle D.1:	Steckbriefe der im Rahmen der Arbeit entwickelten Modelle. Steckbrief <i>FINE.Transport</i> in Tabelle 4.7.	258
Tabelle D.2:	Kapazität, Auslastung und Lebensdauer der Verkehrsmittel in Anlehnung an [18] [19] [37]	258
Tabelle D.3:	Segmentabhängige Reichweite von batterieelektrischen Pkw. Zwischen den Stützjahren wird die Reichweite mittels linearer Interpolation bestimmt.	259

Tabelle D.4:	Leistungs-/Energiedichten der Antriebskomponenten in Anlehnung an [127] [128] [129] [130].	260
Tabelle D.5:	Lebensdauer der Antriebskomponenten von Pkw.	261
Tabelle D.6:	Kosten der Antriebskomponenten.	261
Tabelle D.7:	Aerodynamische Parameter von Pkw.	264
Tabelle D.8:	Aerodynamische Parameter von Bussen.	265
Tabelle D.9:	Aerodynamische Parameter von Lkw.	265
Tabelle D.10:	Berechneter Energiebedarf von Pkw.	265
Tabelle D.11:	Berechneter Energiebedarf von Bussen.	267
Tabelle D.12:	Berechneter Energiebedarf von Nutzfahrzeugen.	269
Tabelle D.13:	Berechneter Energiebedarf von allen weiteren betrachteten Verkehrsmitteln in kWh/pkm oder kWh/tkm.	271
Tabelle D.14:	Angenommene Verteilung der Jahresfahrleistung [km/a] von Bussen nach Größe.	272
Tabelle D.15:	Güterklassen nach der NST-07 [114].	274
Tabelle D.16:	Eigenschaften der Ladeinfrastruktur für Busse und Sattelzugmaschinen.	275
Tabelle D.17:	Fahrzeuge je Wasserstofftankstelle bei Bussen und Sattelzugmaschinen.	275
Tabelle E.1:	Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmittel im Szenario <i>Status Quo</i> .	276
Tabelle E.2:	Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmittel im Szenario <i>Progressive</i> .	277
Tabelle E.3:	Trendfaktoren zur ökonomischen Entwicklung [%/a] nach Gütergruppe und Verkehrsart nach [109].	278

Literaturverzeichnis

- [1] „Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes“, *Bundesgesetzblatt Jahrg. 2021 Teil Nr 59 Ausgegeben Zu Bonn Am 30 August 2021*, 2021.
- [2] UBA, „Nationale Trendtabellen in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG)“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2022.
- [3] AGEB, „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland“, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen eV, Berlin, 2021.
- [4] „Wie sicher ist die Energieversorgung ohne russisches Erdgas?“, Forschungszentrum Jülich (IEK-3), Jülich, 2022.
- [5] „Maßnahmenpaket des Bundes zum Umgang mit den hohen Energiekosten“, *Ergeb. Koalitionsausschusses*, März 2022.
- [6] T. Bücker, „Energieversorgung: Wie Deutschland unabhängiger werden will“, *tageschau.de*, 2. März 2022. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/energieversorgung-unabhaengigkeit-energiepolitik-101.html> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [7] F. Bergk u. a., „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2016.
- [8] M. Robinius u. a., „Die Verkehrswende erreichen: Vermeiden, verlagern, verbessern“, *Lösungsbeiträge Zur Energiesystemtransformation*, 2019.
- [9] „Definition ‚Verkehr‘“, *Duden*. Bibliographisches Institut GmbH, Berlin, 2022.
- [10] H. Ammoser und M. Hoppe, *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften*. Dresden: TU Dresden, 2006.
- [11] K.-J. Richter, *Verkehrsökometrie*, Bd. 4. München: Oldenbourg, 1995.
- [12] KBA, „Verkehr in Zahlen 2021/2022“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2021.
- [13] *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie) (Text von Bedeutung für den EWR)*, Bd. 263. 2007. Zugegriffen: 3. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/46/oj/deu>
- [14] KBA, „Bestand nach Segmenten und Modellreihen (FZ 12)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022. Zugegriffen: 19. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz12_b_uebersicht.html?nn=3514348
- [15] KBA, „Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2021, FZ 14“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022.
- [16] S. Gerhard, „Darum sollten wir über SUV diskutieren statt über Diesel“, *quarks.de*, 2. November 2018. <https://www.quarks.de/technik/mobilitaet/darum-sollten-wir-ueber-suv-diskutieren-statt-ueber-diesel/> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [17] „Verkehren unter Panzern“, *Süddeutsche Zeitung GmbH*, München, 14. Oktober 2019. Zugegriffen: 14. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/suv-debatte-verkehren-unter-panzern-1.4640527>
- [18] VDV, „Statistik 2019“, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln, 2020.
- [19] M. Allekotte u. a., „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.

- [20]KBA, „Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (FZ 25)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022.
- [21]KBA, „Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (FZ 26)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022.
- [22]Land NRW, „Ausbau der ÖPNV-Offensive: Land gibt zusätzlich 928 Millionen Euro für mehr Sicherheit und mehr Verbindungen im Schienennahverkehr“, 23. November 2021. <https://www.land.nrw/pressemitteilung/ausbau-der-oepnv-offensive-land-gibt-zusaetzlich-928-millionen-euro-fuer-mehr> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [23]P. Wundersee, „Verkehrswende: Radikale Wege im Nahverkehr gefordert“, *tageschau.de*, 5. November 2021. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/verkehrswende-nahverkehr-oepnv-101.html> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [24]S. Keller, „Deutsche Post - Beförderte Pakete bis 2021“, *Statista*, 9. März 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476935/umfrage/anzahl-der-befoerderten-pakete-durch-die-deutsche-post/> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [25]KBA, „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter (FZ 15)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022.
- [26]M. Decker, „Strategieentwicklung zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor mit dem Fokus Kraftstoffe“, RWTH Aachen, Aachen, 2022.
- [27]*Richtlinie 96/53/EG des Rates vom 25. Juli 1996 zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr*. 2019. Zugegriffen: 13. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/1996/53/2019-08-14/deu>
- [28]M. Bäumer u. a., *Fahrleistungserhebung 2014 - Inländerfahrleistung (V290)*. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2017.
- [29]acea, „Average age of the EU vehicle fleet, by country“, Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (acea), Brüssel, Apr. 2022. Zugegriffen: 19. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acea.auto/figure/average-age-of-eu-vehicle-fleet-by-country/>
- [30]*Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist*. 2021.
- [31]Bundesverband SchienenNahverkehr e.V., „Wettbewerbsfahrplan 2021“, Berlin, 2021.
- [32]Deutsche Bahn AG, „Deutsche Bahn Daten & Fakten 2020“, Berlin, 2021.
- [33]P. Schröder, „Der weltweit erste Wasserstoff-Zug fährt im regulären Linienbetrieb“, *ingenieur.de*, 13. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/der-weltweit-erste-wasserstoff-zug-faehrt-im-regulaeren-linienbetrieb/>
- [34]BDB, „Daten & Fakten 2020/2021“, Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V., Duisburg, 2021.
- [35]DNV, „RH2INE Kickstart Study“, Det Norske Veritas BV, Barendrecht, 2021.
- [36]*Verordnung (EG) Nr. 261/2004 des europäischen Parlaments und des Rates*. OPOCE, 2004. Zugegriffen: 14. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX%3A32004R0261%3Ade%3AHTML>

- [37] Statistisches Bundesamt, „Verkehr - Luftverkehr auf allen Flugplätzen“, Wiesbaden, 2021.
- [38] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking., „Hydrogen-powered aviation: a fact based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050.“, 2020, doi: 10.2843/471510.
- [39] Statistisches Bundesamt, „Eisenbahnverkehr - Betriebsdaten des Schienenverkehrs 2016“, Wiesbaden, 2018.
- [40] F. Hacker u. a., „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“, Ökoinsitut, Hochschule Heilbronn, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Intraplan Consult GmbH, Berlin, 2020.
- [41] KBA, „Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2022.
- [42] acea, „New Car Registrations by Fuel Type, EU“, Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (acea), Brüssel, Feb. 2022.
- [43] M. Kords, „Elektroautos - Neuzulassungen in den USA“, *Statista*, 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/750905/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-usa/> (zugegriffen 15. Juni 2022).
- [44] M. Kords, „Elektroautos - Absatz nach Regionen weltweit bis 2021“, *Statista*, 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/986075/umfrage/absatz-von-elektroautos-nach-regionen-weltweit/> (zugegriffen 15. Juni 2022).
- [45] P. Plötz, T. Gnann, A. Kühn, und M. Wietschel, „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“, Karlsruhe, 2013.
- [46] F. et. A. Hacker, „eMobil 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz“, *Öko-Inst. EV Inst. Für Angew. Ökol.*, S. 1–187, 2014.
- [47] W. Zimmer, R. Blank, T. Bergmann, M. Mottschall, und R. von Waldenfels, „Endbericht RENEWABILITY III - Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors“, Ökoinstitut, DLR, IFEU, Infrac, Berlin, 2016.
- [48] A. Zeng u. a., „Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages“, *Nat. Commun.*, Bd. 13, Nr. 1, Art. Nr. 1, März 2022, doi: 10.1038/s41467-022-29022-z.
- [49] MWV, „Entwicklung des Tankstellenbestandes ab 1950 in Deutschland jeweils zu Jahresbeginn“, Mineralölwirtschaftsverband, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mwv.de/statistiken/tankstellenbestand/>
- [50] R. Tyborski, „Tankstellen-Studie: Wer vom Benzinverkauf am meisten profitiert“. <https://www.wiwo.de/unternehmen/energie/tankstellen-studie-wer-vom-benzinverkauf-am-meisten-profitiert/20960726.html> (zugegriffen 16. Juni 2022).
- [51] H2Mobility, „Netzausbau live“, 2021, [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.live/netzausbau>
- [52] „Hyundai Nexo - Technische Daten“. 2018.
- [53] CaetanoBus, „H2.City Gold - the hydrogen fuel cell bus for your city“, Vila Nova de Gaia (Portugal), 2021.
- [54] van Hool, „Datenblatt A330 FC Brennstoffzellen-Hybridbus“. 2022.
- [55] S. Leichsenring, „Mercedes GenH2 Truck soll mit Flüssig-Wasserstoff fahren“, *InsideEVs Deutschland*, 20. Mai 2021. <https://insideevs.de/news/508465/mercedes-genh2-brennstoffzellen-lkw-tests/> (zugegriffen 15. Juni 2022).

-
- [56] R. Scholz, N. Gläsner, D. Paluch, und T. Schmidt, „Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene“, Ernst & Young GmbH (EY), 2016.
- [57] S. Cerniauskas, „Introduction Strategies for Hydrogen Infrastructure“, 2021.
- [58] Zukunftsmobilität, „Studie zur Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge im Ländlichen Raum Baden-Württembergs“, Trossingen, Stuttgart, 2018.
- [59] T. Knotte, B. Haufe, und L. Saroch, „E-Bus-Standard“, Fraunhofer IVI, Dresden, 2017.
- [60] Siemens AG, „ENUBA 2 - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“, München, 2016.
- [61] NPE, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015“, Nationale Plattform Elektromobilität, Berlin, 2015.
- [62] C. Bamberg, J. Lackner, S. Siegemund, und A. Auf der Maur, „Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Prognos, Berlin, 2020.
- [63] Bundesregierung, „Masterplan Ladeinfrastruktur“, 2019.
- [64] NPM, „Bedarfsgerechte und wirtschaftliche öffentliche Ladeinfrastruktur - Plädoyer für ein dynamisches NPM-Modell“, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin, 2020.
- [65] Bundesregierung, „Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050“, 2019.
- [66] Bundesregierung, „Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG)“, 2021.
- [67] M. Wietschel u. a., „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, Karlsruhe, 2017.
- [68] T. Gnann, „Technologiebericht 7.2 Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-Lkw (energiewirtschaftliche Aspekte)“, Wuppertal Institut, ISI, IZES, Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2018.
- [69] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 2*. Springer-Verlag, 2009.
- [70] Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2020“, Bonn, 2021.
- [71] AISBL und ENTSO-E, „Ten-Year-Network-Development-Plan 2018 Executive Report“, Brüssel, 2018.
- [72] A.-Cl. Agricola u. a., „Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2012.
- [73] T. Grube, A. Linke, D. Xu, M. Robinius, und D. Stolten, „Kosten von Ladeinfrastrukturen für Batteriefahrzeuge in Deutschland“, gehalten auf der 10. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT Wien 2017, Wien, 2017.
- [74] G. Cerbe und B. Lendt, *Grundlagen der Gastechnik*. Carl Hanser Verlag, 2016.
- [75] M. Robinius u. a., „Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles“, Forschungszentrum Jülich (IEK-3), Jülich, 2018.
- [76] T. Bründlinger u. a., „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050“, 2018, S. 510.
- [77] RWE, „Hydrogen fast track: OGE and RWE present national infrastructure concept “H2ercules”“, Essen, 2022. Zugegriffen: 15. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rwe.com/en/press/rwe-ag/2022-03-24-oge-and-rwe-present-national-infrastructure-concept--h2ercules>
- [78] OGE, „GET H2 Nukleus“, OGE, 2022. <https://oge.net/de/wir/projekte/unsere-wasserstoffprojekte/get-h2-nukleus> (zugegriffen 15. Juni 2022).
-

- [79] *Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 14) geändert worden ist.* 2022. Zugriffen: 15. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/atg/index.html>
- [80] *Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz).* 2020. Zugriffen: 15. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl120s1818.pdf
- [81] N. Beneke, „Techno-ökonomische Analyse des Beitrages unterschiedlicher Antriebsstrategien zur Erreichung der Klimaschutzziele“. 2018.
- [82] „DIN EN 590:2022-05, Kraftstoffe - Dieselkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN_590:2022“, Beuth Verlag GmbH, 2022. doi: 10.31030/3337114.
- [83] „DIN EN 228:2017-08, Kraftstoffe - Unverbleite Ottokraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN_228:2012+A1:2017“, Beuth Verlag GmbH, 2017. doi: 10.31030/2669458.
- [84] S. Pischinger, „Alternative und elektrifizierte Fahrzeugantriebe“, Aachen, 2016.
- [85] R. Edwards, H. Hass, J.-F. Larivé, L. Lonza, H. Maas, und D. Rickeard, „WELL-TO-WHEELS Report Version 4.a“, JRC, EUCAR, CONCAWE, Luxembourg, 2014. doi: 10.2790/95533.
- [86] K. Naumann u. a., *Monitoring Biokraftstoffsektor*, 4. überarbeitete und Erweiterte Auflage. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2019.
- [87] S. Majer, K. Stecher, P. Adler, D. Thrän, und F. Müller-Langer, „Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen“, Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Leipzig, 2013.
- [88] S. Risch u. a., „Impact of Data Quality on Renewable Energy Potential Estimations“, Apr. 2022, doi: 10.48550/arXiv.2204.02334.
- [89] P. Stenzel, J. Linßen, S. Stemmer, M. Robinus, D. Stolten, und V. Gottke, „Energiespeicher“, *BWK Energ.-Fachmag.*, Bd. 70, Nr. 5, S. 35–46, 2018.
- [90] S. Ryberg, „Generation Lulls from the Future Potential of Wind and Solar Energy in Europe“, RWTH Aachen, 2019.
- [91] BMWK, „Überblickspapier Osterpaket“, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin, Apr. 2022.
- [92] M. Kords, „E-Bikes - Absatz in Deutschland bis 2021“, *Statista*, 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152721/umfrage/absatz-von-e-bikes-in-deutschland/> (zugriffen 15. Juni 2022).
- [93] Volocopter, „We bring urban air mobility to your life“, *Volocopter*. <https://www.volocopter.com/> (zugriffen 15. Juni 2022).
- [94] Lillium Air Mobility, „Building radically better ways of moving“, 2022. <https://lillium.com/> (zugriffen 15. Juni 2022).
- [95] „Mover von e.Go erhält Straßenzulassung“, *Aachener Zeitung*, Aachen, 22. Januar 2021. Zugriffen: 15. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.aachener-zeitung.de/wirtschaft/mover-von-ego-erhaelt-strassenzulassung_aid-55839827
- [96] C. Schwägler, „Last Mile Delivery – welche Technologie wird sich durchsetzen?“, 2019. <https://www.capgemini.com/de-de/2019/04/last-mile-delivery/> (zugriffen 1. Januar 2021).

- [97] M. Fendt, „Netzintegration von Elektroautos“, gehalten auf der electrive.net LIVE, Online, 2021.
- [98] C. Machado, N. de Salles Hue, F. Berssaneti, und J. Quintanilha, „An Overview of Shared Mobility“, *Sustainability*, Bd. 10, Nr. 12, 2018, doi: 10.3390/su10124342.
- [99] J. B. Greenblatt und S. Shaheen, „Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts“, *Curr. Sustain. Energy Rep.*, Bd. 2, Nr. 3, S. 74–81, 2015, doi: 10.1007/s40518-015-0038-5.
- [100] B. Atasoy, T. Ikeda, und M. E. Ben-Akiva, „Optimizing a Flexible Mobility on Demand System“, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Bd. 2563, Nr. 1, S. 76–85, 2019, doi: 10.3141/2536-10.
- [101] SAE International, „Levels of driving automation“, 2014.
- [102] T. Litman, „Autonomous Vehicle Implementation Predictions“, Victoria Transport Policy Institute, Victoria, 2020.
- [103] Transport Systems Catapult, „Market forecast for connected and autonomous vehicles“, 2017.
- [104] LMC Automotive, „The outlook for Autonomous Vehicle sales and their impact to 2050“, Oxford, Detroit, Bangkok, Shanghai, 2018.
- [105] N. S. Pearre und H. Ribberink, „Review of research on V2X technologies, strategies, and operations“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 105, S. 61–70, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.047.
- [106] S. Kraus, T. Grube, und D. Stolten, „Mobility Trends in Transport Sector Modeling“, *Future Transp.*, Bd. 2, Nr. 1, S. 184–215, Feb. 2022, doi: 10.3390/future-transp2010010.
- [107] W.-H. Arndt und B. Deiber, *Wissensmodell für den Wirtschaftsverkehr*. 2008. doi: 10.14279/depositonce-1960.
- [108] L. Erbshäuser, „Modellgestützte Analyse und Bewertung relevanter Einflussfaktoren auf die zukünftige Güterverkehrsnachfrage“, RWTH Aachen, Aachen, 2021.
- [109] M. Schubert u. a., „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger - Los 3“, BVU Beratergruppe, Intraplan Consult, Ingenieurgruppe IVV, Planco Consulting, Freiburg, München, Aachen, Essen, 2014.
- [110] BMVI, „Mobilität in Deutschland 2017“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2018.
- [111] L. Ecke, B. Chlond, M. Magdolen, J. Vallée, und P. Vortisch, „Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2020/2021: Alltagsmobilität und Fahrleistung“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021. doi: 10.5445/IR/1000140958.
- [112] M. Wermuth, „Mobilitätsstudie ‚Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010‘ (KiD 2010)“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Braunschweig, 2012.
- [113] M. Berlemann, J. Freese, M.-A. Luik, und J.-E. Wesselhöft, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger - Erstellung einer regionalisierten Strukturdatenprognose Los 1“, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, ifo Institut für Wirtschaftsforschung, Hamburg, Dresden, 2012.
- [114] Statistisches Bundesamt, „Verkehr - NST-2007“, Wiesbaden, 2008.
- [115] O. Ivanova, „2 - Modelling Inter-Regional Freight Demand with Input–Output, Gravity and SCGE Methodologies“, in *Modelling Freight Transport*, L. Tavasszy und G. de

- Jong, Hrsg. Oxford: Elsevier, 2014, S. 13–42. doi: 10.1016/B978-0-12-410400-6.00002-1.
- [116] G. De Jong, H. Gunn, und W. Walker, „National and International Freight Transport Models: An Overview and Ideas for Future Development“, *Transp. Rev.*, Bd. 24, Nr. 1, S. 103–124, Jan. 2004, doi: 10.1080/0144164032000080494.
- [117] „Verkehrerverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger - Los 4“, BVU Beratergruppe, Intraplan Consult, Ingenieurgruppe IVV, Planco Consulting, Freiburg, München, Aachen, Essen, Apr. 2014.
- [118] C. R. Bhat und F. S. Koppelman, „Activity-Based Modeling of Travel Demand“, in *Handbook of Transportation Science*, R. W. Hall, Hrsg. Boston, MA: Springer US, 2003, S. 39–65. doi: 10.1007/0-306-48058-1_3.
- [119] K. W. Axhausen und T. Gärling, „Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems“, *Transp. Rev.*, Bd. 12, Nr. 4, S. 323–341, Okt. 1992, doi: 10.1080/01441649208716826.
- [120] BMVI, „RegioStaR - Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2018.
- [121] J. Reul, „Modellbasierte Analyse zukünftigen Mobilitätsverhaltens (unveröffentlicht)“, RWTH Aachen, Aachen, 2022.
- [122] J. Stephenson, B. Barton, G. Carrington, D. Gnoth, R. Lawson, und P. Thorsnes, „Energy cultures: A framework for understanding energy behaviours“, *Energy Policy*, Bd. 38, Nr. 10, S. 6120–6129, Okt. 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.069.
- [123] T. Grube, „Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw“, Technische Universität Berlin, Jülich, 2014.
- [124] V. Franco, „Heavy-duty vehicle fuel-efficiency simulation: A comparison of US and EU tools“, S. 37, 2015.
- [125] A. Khan Ankur, „Development of the energy demand of drive architectures for different means of transport“, Tecnico Lisboa, 2021.
- [126] A. Khan Ankur, S. Kraus, T. Grube, R. Castro, und D. Stolten, „A Versatile Model for Estimating the Fuel Consumption of a Wide Range of Transport Modes“, S. 24, 2022.
- [127] A. Moawad, N. Kim, N. Shidore, und A. Rousseau, „Assessment of Vehicle Sizing, Energy Consumption and Cost Through Large Scale Simulation of Advanced Vehicle Technologies“, Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), Jan. 2016. doi: 10.2172/1245199.
- [128] U.S. DRIVE, „Electrical and Electronics Technical Team Roadmap“, Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability, 2017.
- [129] B. Cox, „Mobility and the energy transition: A life cycle assessment of swiss passenger transport technologies including developments until 2050“, ETH Zürich, Zürich, 2018.
- [130] S. Rogers und S. Boyd, „Overview of the DOE Advanced Power Electronics and Electric Motor R&D Program“, US Department of Energy, 2014.
- [131] *Verordnung (EU) 2020/740 des europäischen Parlaments und des Rates*. 2020.
- [132] „Emission Test Cycles: World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)“. <https://dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php> (zugriffen 17. Juni 2022).
- [133] „Emission Test Cycles: Braunschweig City Driving Cycle“. <https://dieselnet.com/standards/cycles/braunschweig.php> (zugriffen 17. Juni 2022).

- [134] „Emission Test Cycles: Neighborhood Refuse Truck Cycle“. https://dieselnet.com/standards/cycles/neigh_refuse_truck.php (zugegriffen 17. Juni 2022).
- [135] *Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission*. 2017.
- [136] K. Li und K. J. Tseng, „Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid“, in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, S. 5235–5240. doi: 10.1109/IECON.2015.7392923.
- [137] „Electric Car Myth Buster — Efficiency“. <https://cleantech-nica.com/2018/03/10/electric-car-myth-buster-efficiency/> (zugegriffen 17. September 2020).
- [138] M. Schimpe u. a., „Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis“, *Appl. Energy*, Bd. 210, S. 211–229, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.129.
- [139] A. Eftekhari, „Energy efficiency: A critically important but neglected factor in battery research“, *Sustain. Energy Fuels*, Bd. 1, Nr. 10, S. 2053–2060, Nov. 2017, doi: 10.1039/c7se00350a.
- [140] P. Spanoudakis, N. Tsourveloudis, L. Doitsidis, und E. Karapidakis, „Experimental Research of Transmissions on Electric Vehicles' Energy Consumption“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 3, S. 388, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12030388.
- [141] „Drivetrain losses (efficiency) – x-engineer.org“. <https://x-engineer.org/automotive-engineering/drivetrain/transmissions/drivetrain-losses-efficiency/> (zugegriffen 17. September 2020).
- [142] National Research Council, „Transitions to Alternative Vehicles and Fuels“, Bd. The National Academies Press, 2013, doi: <https://doi.org/10.17226/18264>.
- [143] P. Plötz, C. Moll, G. Bieker, P. Mock, und Y. Li, „Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions“, 2020.
- [144] U. Fritsche und K. Schmidt, „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)“, Öko-Institut eV, Darmstadt, 2007.
- [145] W. Klebsch, N. Guckes, und P. Heininger, „Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel ›Netz Düren‹“, VDE, 2020.
- [146] Gartner Consulting, „TCO analysis - A White Paper on Gartner Group's Next Generation Total Cost of Ownership Methodology“, Stamford, 1997.
- [147] L. M. Ellram, „Total cost of ownership“, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, Bd. 25, Nr. 8, S. 4–23, 1995, doi: 10.1108/09600039510099928.
- [148] K. Lebeau, P. Lebeau, C. Macharis, und J. Van Mierlo, „How expensive are electric vehicles? A total cost of ownership analysis.“, *World Electr. Veh. J.*, Bd. 6, 2013.
- [149] T. Grube, S. Kraus, J. Reul, und D. Stolten, „Passenger car cost development through 2050“, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, Bd. 101, S. 103110, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.103110.
- [150] G. Wu, A. Inderbitzin, und C. Bening, „Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments“, *Energy Policy*, Bd. 80, S. 196–214, 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.02.004.

- [151] Chen und Melaina, „Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties“, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, S. 234–244, 2019.
- [152] M. Reeves, G. Stalk, und F. Scognamiglio, „The Experience Curve“, The Boston Consulting Group, San Francisco, Toronto, New York, 2013.
- [153] A. Louwen, M. Junginger, und A. Krishnan, „Technological Learning in Energy Modelling: Experience Curves“, Utrecht University, Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht, 2018.
- [154] Tsiropoulos et al., „Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications“, 2018.
- [155] O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, und I. Staffell, „The future cost of electrical energy storage based on experience rates“, *Nat. Energy*, Bd. 2, Nr. 8, 2017, doi: 10.1038/nenergy.2017.110.
- [156] B. James, „Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles“, US Department of Energy, Washington, 2018.
- [157] S. T. Thompson u. a., „Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook“, *J. Power Sources*, Bd. 399, S. 304–313, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.100.
- [158] E. Ruffini und M. Wei, „Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach“, *Energy*, 2018.
- [159] A. Alaswad, A. G. Olabi, A. Palumbo, und M. Dassisti, „PEM Fuel Cell Cost Analysis during the Period (1998–2014)“, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.04008-X.
- [160] Wietschel et al., „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2019.
- [161] Bubeck, Tomaschek, und Pfahl, „Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany“, *Transp. Policy*, 2016.
- [162] Bickert, „Development of CO2 emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany“, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, 2015.
- [163] M. Noori und O. Tatari, „Development of an agent-based model for regional market penetration projections of electric vehicles in the United States“, *Energy*, Bd. 96, S. 215–230, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.018.
- [164] B. Propfe, „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [165] Ralf Becker u. a., „Katalog 2018“, *Lastauto Omn.*, Bd. 43, 2018.
- [166] P. Gerbert u. a., „Klimapfade für Deutschland“, The Boston Consulting Group, prognos, München, Berlin, Hamburg, Basel, 2018.
- [167] IEA, „World Energy Outlook 2016“, International Energy Agency, Paris, 2016.
- [168] P.-M. Heuser, T. Grube, H. Heinrichs, M. Robinius, und D. Stolten, „Worldwide Hydrogen Provision Scheme Based on Renewable Energy“, S. 27, 2020.
- [169] NPM, „Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin, 2020.
- [170] S. Kühnel, F. Hacker, und W. Görz, „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“, Ökoinstitut, Berlin, 2018.

- [171] F. Hülsmann, M. Mottschall, F. Hacker, und P. Kasten, „Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen“, Ökoinstitut, Freiburg, 2014.
- [172] R. Follmer, D. Gruschwitz, B. jesske, und S. Quandt, „Mobilität in Deutschland 2008“, infas, DLR, Bonn, Berlin, 2010.
- [173] Rousseau, T. Stephens, J. Brokate, E. D. Özdemir, und M. Klötzke, „Comparison of Energy Consumption and Costs of Different Plug-in Electric Vehicles in European and American Context“, gehalten auf der International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2015.
- [174] E. S. Islam, A. Moawad, N. Kim, und A. Rousseau, „Energy Consumption and Cost Reduction of Future Light-Duty Vehicles through Advanced Vehicle Technologies : A Modeling Simulation Study Through 2050“, Illinois, 2020.
- [175] Vijayagopal., Nieto Prada, und A. Rousseau, „Fuel Economy and Cost Estimates for Medium-and Heavy-Duty Trucks“, Argonne National Laboratory, Lemont, IL (United States), ANL/ESD-19/8, 2019.
- [176] F. Unterlohner, „Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland. Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten.“, Transport & Environment, Brüssel, 2021.
- [177] C. McKerracher, A. Izadi-Najafabadi, A. O'Donovan, N. Albanese, N. Soulopolous, und D. Doherty, „Electric Vehicle Outlook 2020“, BloombergNEF, 2020.
- [178] Agora Energiewende, *PtG/PtL Rechner*. 2018. Zugegriffen: 1. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/ptg-ptl-rechner/>
- [179] M. S. Ziegler und J. E. Trancik, „Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 14, Nr. 4, S. 1635–1651, 2021, doi: 10.1039/D0EE02681F.
- [180] Lee Schipper und C. Marie-Lilliu, „Transportation and CO2 Emissions: Flexing the Link - A Path for the World Bank“, *Environ. Dep. Pap.*, 1999.
- [181] C. Linton, S. Grant-Muller, und W. F. Gale, „Approaches and Techniques for Modelling CO2 Emissions from Road Transport“, *Transp. Rev.*, Bd. 35, Nr. 4, S. 533–553, 2015, doi: 10.1080/01441647.2015.1030004.
- [182] F. Creutzig, „Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation“, *Transp. Rev.*, Bd. 36, Nr. 3, S. 341–360, Mai 2016, doi: 10.1080/01441647.2015.1079277.
- [183] PTV Austria GmbH, „How does the City of Copenhagen become the world's most bike-friendly city?“, Wien, 2019.
- [184] R. Liu, „The DRACULA Dynamic Network Microsimulation Model“, gehalten auf der International Symposium on Transport Simulation, Yokohama, 2002.
- [185] Joint Global Research Institute, „Overview of the Global Change Assessment Model (GCAM)“, gehalten auf der Pathways to Sustainable Energy Stakeholder Consultation Workshop, Bishkek, Kyrgystan, 2018.
- [186] E. Stehfest u. a., „Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications“, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Den Haag, 2014.
- [187] K. W. Axhausen, A. Horni, und K. Nagel, *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London, 2016. doi: 10.5334/baw.

- [188] *FINE - Framework for Integrated Energy System Assessment*. Jülich: FZJ-IEK3, 2022. Zugegriffen: 16. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/FINE>
- [189] L. Welder, D. S. Ryberg, L. Kotzur, T. Grube, M. Robinius, und D. Stolten, „Spatio-temporal optimization of a future energy system for power-to-hydrogen applications in Germany“, *Energy*, Bd. 158, S. 1130–1149, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.059.
- [190] Projektträger Jülich, „Myopischer Ansatz“, *EnArgus*, 2022. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d7671-2/*/*Myopischer%20Ansatz.html?op=Wiki.getwiki (zugegriffen 16. Juni 2022).
- [191] Projektträger Jülich, „Perfekte Voraussicht“, *EnArgus*, 2022. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d8509-2/*/*Perfekte%20Voraussicht.html?op=Wiki.getwiki (zugegriffen 19. Juni 2022).
- [192] United Nations, *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. Kyoto, 1998.
- [193] P. Mock, „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)“, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [194] M. Redelbach, „Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte“, Stuttgart, Cologne, 2016.
- [195] Jörg Adolf u. a., „Shell PKW-Szenarien bis 2040“, Shell, Prognos, Hamburg, 2014.
- [196] A. Barisa und M. Rosa, „A system dynamics model for CO₂ emission mitigation policy design in road transport sector Aiga Barisa*, Marika Rosa“, *Energy Procedia*, 2018.
- [197] eia, „Transportation Sector Demand Module of the National Energy Modeling System: Model Documentation“, U.S. Energy Information Administration, Washington DC, 2019.
- [198] D. Fiorello, F. Fermi, und D. Bielanska, „The ASTRA model for strategic assessment of transport policies“, *Syst. Dyn. Rev.*, Bd. 26, Nr. 3, S. 283–290, 2010, doi: 10.1002/sdr.452.
- [199] S. Pichlmaier und S. Fattler, „TraM - Sektormodell des Verkehrs“, FfE eV, München, 2017.
- [200] T. Trost, „Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr“, Leipzig, Stuttgart, 2017.
- [201] B. Blat Belmonte, A. Esser, S. Weyand, G. Franke, L. Schebek, und S. Rinderknecht, „Identification of the Optimal Passenger Car Vehicle Fleet Transition for Mitigating the Cumulative Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions until 2050“, *Vehicles*, Bd. 2, Nr. 1, S. 75–99, 2020, doi: 10.3390/vehicles2010005.
- [202] P. Pfaffenbichler, S. Renner, und R. Krutak, „Modelling the development of vehicle fleets with alternative propulsion technologies“, gehalten auf der eceee 2011 Summer Study on energy efficiency: Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society, 2011.
- [203] C. Brand, M. Tran, und J. Anable, „The UK transport carbon model: An integrated life cycle approach to explore low carbon futures“, *Energy Policy*, Bd. 41, S. 107–124, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2010.08.019.

- [204] E. Shafiei, B. Davidsdottir, J. Leaver, H. Stefansson, und E. I. Asgeirsson, „Comparative analysis of hydrogen, biofuels and electricity transitional pathways to sustainable transport in a renewable-based energy system“, *Energy*, Bd. 83, S. 614–627, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.02.071.
- [205] S. Shepherd, P. Bonsall, und G. Harrison, „Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study“, *Transp. Policy*, Bd. 20, S. 62–74, 2012, doi: 10.1016/j.tranpol.2011.12.006.
- [206] H. Wang, X. Ou, und X. Zhang, „Mode, technology, energy consumption, and resulting CO2 emissions in China’s transport sector up to 2050“, *Energy Policy*, Bd. 109, S. 719–733, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.07.010.
- [207] Fei Xie und Z. Lin, „Market Acceptance of Advanced Automotive Technologies – Mobility Choice (MA3T-MC): Consumer Acceptance of CAV, Shared Mobility and Electric Vehicle“, gehalten auf der Automated Vehicle Symposium 2019, Orlando, 2019.
- [208] Dawn Manley, Rebecca Levinson, Garrett Barter, und T. West, „ParaChoice - Parametric Vehicle Choice Modeling“, gehalten auf der Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, 2015.
- [209] A. Brooker, J. Gonder, S. Lopp, und J. Ward, „ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model“, gehalten auf der SAE Technical Paper Series, 2015. doi: 10.4271/2015-01-0974.
- [210] T. Peng, X. Ou, Z. Yuan, X. Yan, und X. Zhang, „Development and application of China provincial road transport energy demand and GHG emissions analysis model“, *Appl. Energy*, Bd. 222, S. 313–328, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.139.
- [211] H. Hao, Z. Liu, F. Zhao, W. Li, und W. Hang, „Scenario analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions from China’s passenger vehicles“, *Energy*, Bd. 91, S. 151–159, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.054.
- [212] L. Liu, K. Wang, S. Wang, R. Zhang, und X. Tang, „Assessing energy consumption, CO2 and pollutant emissions and health benefits from China’s transport sector through 2050“, *Energy Policy*, Bd. 116, S. 382–396, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.02.019.
- [213] J. C. G. Palencia, Y. Otsuka, M. Araki, und S. Shiga, „Impact of new vehicle market composition on the light-duty vehicle fleet CO 2 emissions and cost“, *Energy Procedia*, Bd. 105, S. 3862–3867, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.790.
- [214] A. Gambhir, L. K. C. Tse, D. Tong, und R. Martinez-Botas, „Reducing China’s road transport sector CO2 emissions to 2050: Technologies, costs and decomposition analysis“, *Appl. Energy*, Bd. 157, S. 905–917, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.018.
- [215] X. Ou, X. Zhang, und S. Chang, „Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China’s future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions“, *Energy Policy*, Bd. 38, Nr. 8, S. 3943–3956, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.018.
- [216] K. Yabe, Y. Shinoda, T. Seki, H. Tanaka, und A. Akisawa, „Market penetration speed and effects on CO2 reduction of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in Japan“, *Energy Policy*, Bd. 45, S. 529–540, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.068.
- [217] C. Brand, C. Cluzel, und J. Anable, „Modeling the uptake of plug-in vehicles in a heterogeneous car market using a consumer segmentation approach“, *Transp. Res. Part Policy Pract.*, Bd. 97, S. 121–136, 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.01.017.

- [218] G. Harrison, C. Thiel, und L. Jones, „Powertrain Technology Transition Market Agent Model (PTTMAM): An introduction“, Joint Research Centre, Luxembourg, 2016. doi: 10.2790/719385.
- [219] P. Jochem und D. Möst, „Model description of TE3“, KIT, TU Dresden, Karlsruhe, Dresden, 2019.
- [220] E. Szimba u. a., „HIGH-TOOL – a strategic assessment tool for evaluating EU transport policies“, *J. Shipp. Trade*, Bd. 3, Nr. 1, 2018, doi: 10.1186/s41072-018-0037-y.
- [221] D. Fiorello, K. Nökel, und A. Martino, „The TRIMODE integrated model for Europe“, *Transp. Res. Procedia*, Bd. 31, S. 88–98, 2018, doi: 10.1016/j.trpro.2018.09.048.
- [222] Karkatsoulis, „PRIMES-TREMOVE“, 2017.
- [223] J. Purwanto, G. de Ceuster, und K. Vanherle, „Mobility, Vehicle fleet, Energy use and Emissions forecast Tool (MOVEET)“, *Transp. Res. Procedia*, Bd. 25, S. 3421–3434, 2017, doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.239.
- [224] ICCT, „ICCT Roadmap Model Version 1-0“, International Council on Clean Transportation, Washington DC, 2012.
- [225] U. S. E. I. Administration, „Component Design Report: International Transportation Energy Demand Determinants Model“, Washington, 2017.
- [226] S. Khalili, E. Rantanen, D. Bogdanov, und C. Breyer, „Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 20, 2019, doi: 10.3390/en12203870.
- [227] F. Cuenot, „ForFITS at UNECE“, gehalten auf der iTEM4, Laxenburg, 2017.
- [228] B. Girod, D. P. van Vuuren, und S. Deetman, „Global travel within the 2°C climate target“, *Energy Policy*, Bd. 45, S. 152–166, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.008.
- [229] S. Mittal, H. Dai, S. Fujimori, T. Hanaoka, und R. Zhang, „Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model“, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, Bd. 55, S. 373–388, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2016.10.006.
- [230] L. Fulton, P. Cazzola, und F. Cuenot, „IEA Mobility Model (MoMo) and its use in the ETP 2008“, *Energy Policy*, Bd. 37, Nr. 10, S. 3758–3768, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.07.065.
- [231] S. Pichlmaier, S. Fattler, und C. Bayer, „Modelling the Transport Sector in the Context of a Dynamic Energy System“, gehalten auf der 41st IAEE International Conference, Groningen, 2018.
- [232] *tsam - Time Series Aggregation Module*. FZJ-IEK3, 2022. Zugegriffen: 16. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/tsam>
- [233] M. Weiss, P. Dekker, A. Moro, H. Scholz, und M. K. Patel, „On the electrification of road transportation - A review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers“, *Transp Res Transp Env.*, Bd. 41, S. 348–366, Dez. 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.09.007.
- [234] D. Stolten u. a., „Neue Ziele auf alten Wegen?“, Forschungszentrum Jülich (IEK-3), Jülich, 2021.
- [235] S. Lorenzlik, M. Gierkink, L. Schmidt, und O. Hennes, „Kosteneffiziente Umsetzung der Sektorenkopplung“, ewi, Köln, 2018.
- [236] K. Purr, J. Günther, H. Lehmann, und P. Nuss, „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019.

- [237] B. Pfluger, B. Tersteegen, und B. Franke, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, Karlsruhe, Aachen, Heidelberg, 2017.
- [238] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende“, Berlin, 2021.
- [239] J. Brandes, M. Haun, D. Wrede, P. Jürgens, C. Kost, und H.-M. Henning, „Wege zu einem klimaneutralem Energiesystem“, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2021.
- [240] P. Kasten, M. Mottschall, W. Köppel, und C. Degünther, „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“, 2016.
- [241] M. Mottschall, P. Kasten, S. Kühnel, und L. Minnich, „Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050“, 2019.
- [242] IEA, „Energy intensity of passenger transport modes, 2018“, International Energy Agency, Paris, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-intensity-of-passenger-transport-modes-2018>
- [243] IEA, „Rail“, International Energy Agency, Paris, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/rail>
- [244] UBA, „Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland - Bezugsjahr 2018“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.
- [245] B. Bilgin u. a., „Making the Case for Electrified Transportation“, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, Bd. 1, Nr. 1, S. 4–17, 2015, doi: 10.1109/tte.2015.2437338.
- [246] D. Gaker und J. Walker, „Revealing the Value of “Green” and the Small Group with a Big Heart in Transportation Mode Choice“, *Sustainability*, Bd. 5, Nr. 7, S. 2913–2927, 2013, doi: 10.3390/su5072913.
- [247] R. Krueger, T. H. Rashidi, und J. M. Rose, „Preferences for shared autonomous vehicles“, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Bd. 69, S. 343–355, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.06.015.
- [248] M. Namazu, D. MacKenzie, H. Zerriffi, und H. Dowlatabadi, „Is carsharing for everyone? Understanding the diffusion of carsharing services“, *Transp. Policy*, Bd. 63, S. 189–199, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2017.12.012.
- [249] A. W. Schäfer und S. Yeh, „A holistic analysis of passenger travel energy and greenhouse gas intensities“, *Nat. Sustain.*, Bd. 3, Nr. 6, S. 459–462, 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0514-9.
- [250] L. M. Martinez, G. H. A. Correia, und J. M. Viegas, „An agent-based simulation model to assess the impacts of introducing a shared-taxi system: an application to Lisbon (Portugal)“, *J. Adv. Transp.*, Bd. 49, Nr. 3, S. 475–495, 2015, doi: 10.1002/atr.1283.
- [251] P. Jochem, S. Babrowski, und W. Fichtner, „Assessing CO₂ emissions of electric vehicles in Germany in 2030“, *Transp. Res. Part Policy Pract.*, Bd. 78, S. 68–83, 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.05.007.
- [252] Z. Wadud, D. MacKenzie, und P. Leiby, „Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles“, *Transp. Res. Part Policy Pract.*, Bd. 86, S. 1–18, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

- [253] M. P. Lammert, A. Duran, J. Diez, K. Burton, und A. Nicholson, „Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances, and Mass“, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Bd. 7, Nr. 2, S. 626–639, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2438.
- [254] F. Enzian und I. Brzoska, „Why platooning is the future of delivery traffic“, 2019. <https://www.mantruckandbus.com/en/innovation/why-platooning-is-the-future-of-delivery-traffic.html>
- [255] J. Hollevoet, A. D. Witte, und C. Macharis, „Improving insight in modal choice determinants: an approach towards more sustainable transport“, *Urban Transp.*, Bd. 116, 2011, doi: 10.2495/UT110121.
- [256] A. Schäfer, „Regularities in Travel Demand: An International Perspective“, *J. Transp. Stat.*, 2000.
- [257] S. Siegemund, M. Trommler, O. Kolb, und V. Zinnecker, „The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU“, dena, Berlin, 2017.
- [258] P. Siskos, P. Capros, G. Zazias, D. Fiorello, und K. Noekel, „Energy and fleet modelling within the TRIMODE integrated transport model framework for Europe“, *Transp. Res. Procedia*, 2018.
- [259] S. M. Knupfer, R. Hensley, P. Hertzke, und P. Schaufuss, „Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability“, McKinsey&Company, 2017.
- [260] *scikit-learn-contrib/scikit-learn-extra*. scikit-learn-contrib, 2022. Zugegriffen: 16. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/scikit-learn-contrib/scikit-learn-extra/blob/674c3fe6db765214da8942a8a4aaab85b3bf4f38/sklearn_extra/cluster/_k_medoids.py
- [261] E. Rogers, *Diffusion of Innovations*, Bd. 5. New York: Free Press, 2003.

Band / Volume 640

**Advancing the representation of agricultural systems
in Land Surface Models: systematic model evaluations
and technical model developments**

T. S. Boas (2024), xxi, 145 pp

ISBN: 978-3-95806-777-6

Band / Volume 641

**Imaging spatial and temporal soil water content variations of the soil-plant
continuum using ground penetrating radar**

L. Lärm (2024), xii, 303 pp

ISBN: 978-3-95806-778-3

Band / Volume 642

**Development of Iridium-based Nanostructures for Oxygen Evolution
Reaction in PEM Water Electrolysis**

S. Park (2024), 135 pp

ISBN: 978-3-95806-779-0

Band / Volume 643

**Multi-dimensional GPR full-waveform inversion for small-scale
hydrogeophysical soil characterization**

D. Hoven (2024), IX, 163 pp

ISBN: 978-3-95806-781-3

Band / Volume 644

**Analyse des Gastransports in komplexen Membransystemen durch
Modellierung und multiskalige Simulation**

K. Wilkner (2024), VIII, 122 pp

ISBN: 978-3-95806-784-4

Band / Volume 645

**Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the
Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network: 2024 Update**

T. Grube; M. Rex (2024), iii, 26 pp

ISBN: 978-3-95806-786-8

Band / Volume 646

**Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien
für Deutschland**

T. F. Schöb (2024), XII, 228 pp

ISBN: 978-3-95806-789-9

Band / Volume 647

Future Distribution Grids Using Geo-Referenced Synthetic Network Topologies

A. Bandam (2024), ix, 237 pp
ISBN: 978-3-95806-790-5

Band / Volume 648

Multi-scenario, high-resolution Lagrangian transport modeling for the analysis of the Asian tropopause aerosol layer

J. H. Clemens (2024), 143 pp
ISBN: 978-3-95806-792-9

Band / Volume 649

Prospektive Lebenszyklusanalysen von Power-to-Gas-Optionen

J. C. Koj (2024), XVIII, 197 pp
ISBN: 978-3-95806-794-3

Band / Volume 650

Assimilation of groundwater level and cosmic-ray neutron sensor soil moisture measurements into integrated terrestrial system models for better predictions

F. Li (2024), xvii, 172 pp
ISBN: 978-3-95806-796-7

Band / Volume 651

Integration of a rib-channel design to improve air-side contacting in solid oxide cell (SOC) stacks

Y. S. Ayhan (2024), 82 pp
ISBN: 978-3-95806-797-4

Band / Volume 652

Modelling Secondary Circulation in Convective Boundary Layer Using Large Eddy Simulation

L. Zhang (2024), 84 pp
ISBN: 978-3-95806-799-8

Band / Volume 653

Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

S. Kraus (2025), XI, 317 pp
ISBN: 978-3-95806-802-5

Weitere *Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich* unter
<http://www.zwb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 653
ISBN 978-3-95806-802-5