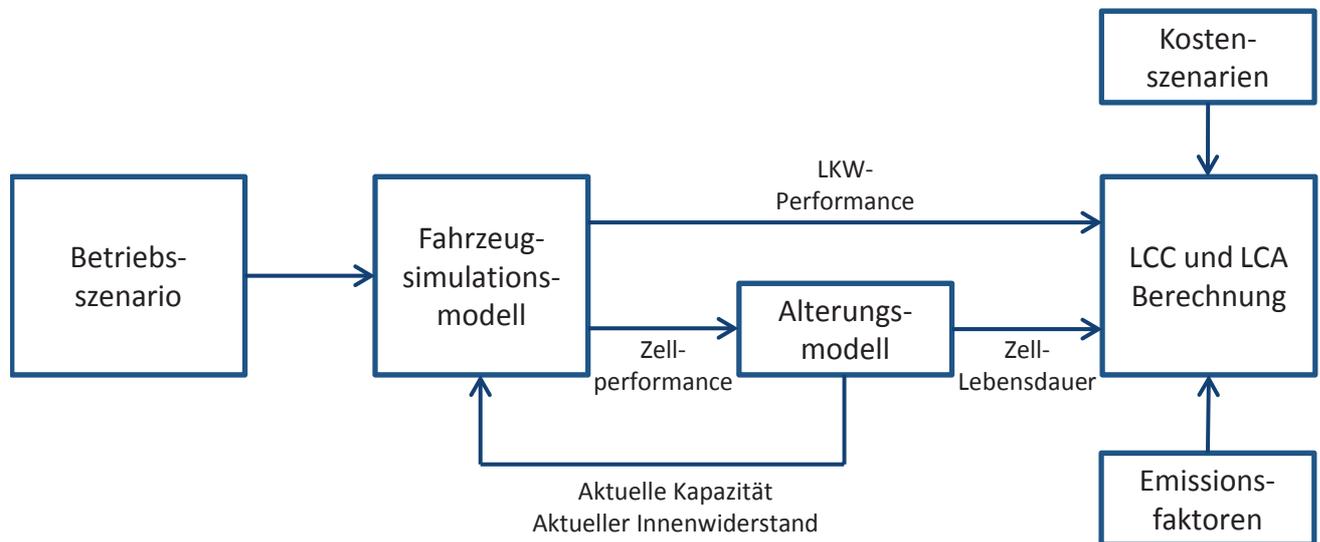


Ivan Mareev

Analyse und Bewertung von batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen Lastkraftwagen für den Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland



Analyse und Bewertung von batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen Lastkraftwagen für den Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Ivan Mareev, M. Sc.
aus Saratow, Russland

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Benedikt Schmülling

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Universitätsbibliothek online verfügbar.

AACHENER BEITRÄGE DES ISEA

Vol. 125

Editor:

Univ.-Prof. Dr. ir. h. c. Rik W. De Doncker
Director of the Institute for Power Electronics and
Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen University

Copyright ISEA and Ivan Mareev 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without prior permission of the publisher.

ISSN 1437-675X

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)

Jägerstr. 17/19 • 52066 Aachen • Germany

Tel: +49 (0)241 80-96920

Fax: +49 (0)241 80-92203

post@isea.rwth-aachen.de

Ivan Mareev

**Analyse und Bewertung von
batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten
und brennstoffzellengetriebenen
Lastkraftwagen für den Einsatz im
Güterfernverkehr in Deutschland**

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) entstanden. Nach meiner Masterarbeit an diesem Institut wurde ich sehr freundlich in die Arbeitsgruppe des Forschungsgebiets „Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik“ von Prof. Dirk Uwe Sauer aufgenommen und habe während meiner Tätigkeit an vielen interessanten Forschungsprojekten aus dem Bereich des elektrischen ÖPNV und der Nutzfahrzeuge gearbeitet.

Prof. Dirk Uwe Sauer möchte ich gerne für die Unterstützung bei der Wahl meines Dissertationsthemas und bei Durchführung meines Vorhabens danken, das mich in die herausfordernde und spannende Anwendung der elektrischen Antriebe im Güterfernverkehr geführt hat.

Prof. Schmülling danke ich für die Übernahme des Koreferats und eine interessante Diskussion zu meiner Arbeit.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Institutskollegen für eine sehr nette Arbeitsatmosphäre und den fachlichen Austausch bedanken, mit denen die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen erst möglich wurden. Insbesondere danke ich den Kollegen des Teams ÖPNV, in dem wir gemeinsam die Herausforderungen der Elektrobusse gemeistert haben. Hierbei gilt mein besonderer Dank Philipp Sinhuber, der mir den Weg ins ISEA geebnet hat, sowie Holger Pigerl und Fabian Meishner, die meine Dissertationsschrift Korrektur gelesen haben.

Der Großteil der vorliegenden Arbeit ist im Rahmen des Projekts „Analyse und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für den LKW-Fernverkehr in Deutschland“ entstanden. Für die Förderung des Projekts und Entgegenkommen bei allen meinen Nachfragen möchte ich mich bei der Karl-Vossloh-Stiftung bedanken.

Ferner möchte ich mich bei meinen studentischen Abschlussarbeitern und Hilfskräften bedanken, die dieser Arbeit viel Substanz hinzugefügt haben.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für ihre ständige Unterstützung und Ermöglichung dieses interessanten Weges und meiner Frau Valeria, die mich mit ihrem Optimismus immer ermuntert.

Ivan Mareev

Aachen, Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	4
2.1 Lastkraftwagen im Güterfernverkehr	4
2.1.1 Gütertransport und Emissionen.....	4
2.1.2 Fahrzeugklassen und Auslastung	5
2.1.3 LKW-Verkehr auf Autobahnen.....	7
2.1.4 Lenk- und Ruhezeiten	8
2.2 Stand der Technik bei schweren LKW	8
2.2.1 Konventionell angetriebene LKW	8
2.2.2 Alternativ angetriebene LKW	9
2.3 Batterie und Brennstoffzelle	13
2.3.1 Lithium-Ionenbatterie.....	13
2.3.2 Brennstoffzelle	14
2.4 Ökobilanzierung	15
2.4.1 Durchführung	15
2.4.2 Wirkungskategorien	16
3 Fahrzeug- und Energieverbrauchsmodell	18
3.1 Konventionell angetriebener LKW	18
3.2 Batteriegetriebener LKW	20
3.2.1 Modellierung eines batteriegetriebenen LKW	20
3.2.2 Parametrierung des Simulationsmodells eines batteriegetriebenen LKW	22
3.3 Oberleitungsversorgter LKW	25
3.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW.....	27
3.5 Brennstoffzellengetriebener LKW	28
3.6 Validierung	30
4 Dimensionierung der Antriebskomponenten und Infrastruktur	34
4.1 Durchschnittlicher Energieverbrauch	34
4.2 Wirkungsgrad der Fahrzeuge.....	38
4.3 Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten	40

4.3.1	Diesel-LKW	40
4.3.2	Batteriegetriebener LKW	40
4.3.3	Oberleitungsversorgter LKW	42
4.3.4	Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW	44
4.3.5	Brennstoffzellengetriebener LKW	44
4.4	Integration der Antriebskomponenten	46
4.4.1	Gewicht der Antriebskomponenten.....	46
4.4.2	Volumen der Antriebskomponenten	49
4.5	Dimensionierung der Infrastruktur	52
4.5.1	Ladeinfrastruktur.....	52
4.5.2	Oberleitungsinfrastruktur	55
5	Modellierung der Lebenszykluskosten	60
5.1	Definition des Betriebsszenarios	60
5.2	Berechnung der Lebenszykluskosten	62
5.3	Parametrierung der Lebenszykluskostenrechnung	64
5.3.1	Konventionell angetriebener LKW	65
5.3.2	Batteriegetriebener LKW	66
5.3.3	Oberleitungsversorgter LKW	69
5.3.4	Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW	70
5.3.5	Brennstoffzellengetriebener LKW	71
5.4	Ergebnisse des Betriebsszenarios	73
5.4.1	Konventionell angetriebener LKW	73
5.4.2	Batteriegetriebener LKW	74
5.4.3	Oberleitungsversorgter LKW	76
5.4.4	Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW	79
5.4.5	Brennstoffzellengetriebener LKW	81
5.5	Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung	84
5.5.1	Fahrzeugkosten.....	85
5.5.2	Infrastrukturkosten	87
5.5.3	Energie- bzw. Treibstoffkosten	90
5.5.4	Weitere variable Kosten	91
5.5.5	Fixe Kosten	92
5.5.6	Gesamte Lebenszykluskosten	93
5.5.7	Einfluss wichtiger Parameter auf Lebenszykluskosten	95
6	Modellierung der Umweltauswirkungen	98
6.1	Festlegung des Untersuchungsrahmens	98
6.2	Bilanzierung.....	100

6.2.1	Konventionell angetriebener LKW	100
6.2.2	Batteriegetriebener LKW	101
6.2.3	Oberleitungsversorgter LKW mit Batterie	104
6.2.4	Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW	105
6.2.5	Brennstoffzellengetriebener LKW	106
6.2.6	Infrastruktur	109
6.3	Auswertung der Umweltauswirkungen	112
6.3.1	Fahrzeugherstellung	112
6.3.2	Infrastruktur	115
6.3.3	Betrieb	116
6.3.4	Gesamten Umweltauswirkungen	119
6.3.5	Einfluss wichtiger Parameter auf Umweltauswirkungen	121
7	Transformationskonzepte und zukünftige Entwicklungen	124
8	Vergleich mit anderen Studien	127
9	Zusammenfassung und Ausblick	129
A	Anhang	134
	Symbolverzeichnis	140
	Abkürzungsverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	144
	Tabellenverzeichnis	147
	Literaturverzeichnis	149
	Eigene Veröffentlichungen	159
	Betreute studentische Arbeiten	160

1 Einleitung

Die Bundesregierung hat Deutschland das Ziel gesetzt, die Emissionen der Treibhausgase bis Jahr 2050 um 80 bis 95 % im Vergleich zum Jahr 1990 zu reduzieren [1]. Außerdem ist Deutschland dem Klimaübereinkommen von Paris im Jahr 2015 beigetreten, dessen Ziel u.a. die Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau ist, um den Klimawandel zu begrenzen [2]. Vor diesem Hintergrund wird die Dekarbonisierung des Verkehrssektors wichtig, der im Jahr 2015 für ca. 18 % der Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich war [3].

Laut der Untersuchung des Umweltbundesamtes muss der Verkehrssektor zum Erreichen der Klimaziele vollständig dekarbonisiert werden [4], was die Betrachtung alternativer Antriebsmöglichkeiten auch für die energieintensive Anwendung der Lastkraftwagen (kurz LKW) im Güterfernverkehr erfordert. Als alternativ angetriebene LKW werden in der Literatur hybridisierte Diesel-LKW, extern über Oberleitung oder induktiv versorgte LKW, brennstoffzellengetriebene LKW und batteriegetriebene LKW diskutiert. Ferner wird die Dekarbonisierung konventioneller Antriebe durch Biokraftstoffe oder stromgenerierte Kraftstoffe (Power to Liquid, „Synthetische Kraftstoffe“) untersucht. Neben den technischen Lösungen werden auch organisatorische Lösungen diskutiert wie z.B. effizientere Organisation der Logistikabläufe zur besseren Auslastung der LKW und Vermeidung der Leerfahrten sowie die Verlagerung des Gütertransports von der Straße auf die Schiene.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf elektrisch angetriebene Varianten der Fernverkehr-LKW, nämlich den batteriegetriebenen LKW, den oberleitungsversorgten LKW sowie den brennstoffzellengetriebenen LKW als den zur Zeit in Deutschland meist diskutierten und auch in Forschungsprojekten untersuchten Technologien. Als Gemeinsamkeit haben diese LKW-Technologien den Antrieb mit elektrischer Energie über einen Elektromotor. Der batteriegetriebene LKW speichert die zum Antrieb benötigte Energie an Bord in einer Batterie. Der oberleitungsversorgte LKW wird dagegen extern, über eine Oberleitung mit Energie versorgt und kann je nach Konfiguration des Antriebsstrangs auch eine Batterie und einen Dieselmotor enthalten. In dem brennstoffzellengetriebenen LKW wird die Energie als Wasserstoff in einem Drucktank gespeichert und mit Hilfe einer Brennstoffzelle in elektrische Energie für den Antrieb umgewandelt.

Aktuell werden diese LKW-Technologien in diversen Studien, Forschungs- und Industrieprojekten erforscht und demonstriert. Zur Untersuchung des oberleitungsversorgten LKW wurde in einem Forschungsprojekt eine Teststrecke auf nicht-öffentlichem Gelände aufgebaut und mehrere schwere Diesel-LKW sowie eine Sattelzugmaschine zu Hybrid-LKW mit Dieselmotor, Batterie und Stromabnehmer umgerüstet [5], [6]. Im nächsten Schritt sollen

zwei Streckenabschnitte auf öffentlichen Autobahnen mit Oberleitung ausgestattet werden und der Betrieb auf öffentlicher Straße getestet werden [7]. Bei brennstoffzellengetriebenen LKW und batteriegetriebenen LKW wurden einige Modelle schwerer LKW zum Einsatz im Verteilerverkehr entwickelt und werden zur Zeit getestet (zum Beispiel [8], [9], [10]). Für den Fernverkehr befinden sich entsprechende Modelle brennstoffzellengetriebener und batteriegetriebener LKW noch in Entwicklung [11], [12].

Zum Betrieb benötigen die in dieser Arbeit untersuchten LKW eine Infrastruktur, um die zum Antrieb benötigte Energie in Form elektrischer Energie bzw. Wasserstoff zu beziehen. Diese Infrastruktur muss zum großflächigen Betrieb der alternativ angetriebenen LKW aufgebaut werden. Der batteriegetriebene LKW benötigt Ladestationen, für den oberleitungsversorgten LKW müssen geeignete Strecken mit Oberleitung elektrifiziert werden und für den brennstoffzellengetriebenen LKW müssen Wasserstofftankstellen aufgebaut werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Analyse und Bewertung der batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten sowie brennstoffzellengetriebenen LKW bezüglich ihres Energieverbrauchs, Lebenszykluskosten sowie Umweltauswirkungen beim Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland. Dabei werden die Fahrzeugkomponenten durch eine ausführliche Energieverbrauchssimulation auf Systemebene des Fahrzeugs in einem realistischen Betriebsszenario entsprechend den Anforderungen des Güterfernverkehrs ausgelegt. Auch die dazugehörige Infrastruktur aus Ladestationen, Oberleitungen bzw. Wasserstofftankstellen wird bei dieser Untersuchung berücksichtigt. Auf diese Weise wird eine umfassende Bewertung dieser Antriebstechnologien für den Einsatz im Güterfernverkehr möglich.

Die vorliegende Arbeit beginnt im Kapitel 2 mit einer Analyse aktueller Rahmenbedingungen und Anforderungen der LKW im Güterfernverkehr auf bundesdeutschen Autobahnen. Ferner wird auf den aktuellen Stand der Technik bei schweren LKW mit konventionellen und in dieser Arbeit untersuchten alternativen Antrieben eingegangen. Dabei werden auch Grundlagen zu Batterie und Brennstoffzelle als Kernkomponenten des Antriebs dieser LKW gegeben. Es wird auch das Vorgehen bei Ökobilanzierung zur Lebenszyklusanalyse erläutert.

Zur Modellierung der Fahrzeuge und ihres Energieverbrauchs werden im Kapitel 3 die erstellten Fahrzeugsimulationsmodelle alternativ angetriebener LKW und ihre Parametrierung erläutert. Als Referenz zu den alternativen Antrieben wird auch ein konventionell angetriebener Diesel-LKW modelliert. Schließlich wird der aus Fahrzeugsimulationen resultierende Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge mit Hilfe von Literaturquellen validiert.

Mit den erstellten Fahrzeugmodellen werden im Kapitel 4 die durchschnittlichen Energieverbräuche der untersuchten LKW auf den wichtigsten bundesdeutschen Autobahnen ermittelt und der Wirkungsgrad der Antriebe verglichen. Ausgehend von durchschnittlichen Verbräuchen werden die Antriebsstrangkomponenten wie Batterie, Brennstoffzelle, Elektromotor etc. in Bezug auf ihre Kapazität bzw. Leistung dimensioniert. Anschließend wird geprüft, ob die Integration dieser Antriebsstrangkomponenten in das Fahrzeug gewichts- und volumenmäßig möglich ist und welche Auswirkungen auf die Beladung entstehen. Auch

die Lade- und Oberleitungsinfrastruktur werden entsprechend der Energie- und Betriebsanforderungen dimensioniert.

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten im Kapitel 5 wird ein Betriebsszenario für Fernverkehr-LKW definiert, das sich nach gesetzlichen Vorgaben zu Lenk- und Ruhezeiten für Fahrer richtet. Die Performancedaten des jeweiligen LKW werden mit Hilfe der zuvor erstellten Simulationsmodelle für die ausgelegten LKW simuliert und dienen als Eingangsdaten für die Lebenszykluskostenberechnung. Ferner werden durch Literaturrecherche und Kontakt zu Ladestationsherstellern Kostenparameter für die untersuchten LKW-Technologien und Infrastruktur ermittelt. Schließlich werden die Lebenszykluskosten für verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Auslegungen der Fahrzeuge und Infrastruktur ermittelt und verglichen.

Im Kapitel 6 wird die Ökobilanzierung für die Herstellung der Fahrzeuge und Infrastruktur sowie den Betrieb durchgeführt. Die Umweltauswirkungen der bei Berechnung der Lebenszykluskosten definierten Szenarien werden in den Umweltkategorien Treibhauspotential, Primärenergiebedarf, Versauerungspotential und Überdüngungspotential untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss eines Stromproduktionsmixes mit hohem Anteil erneuerbarer Energien sowie der Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse unter Verwendung dieses Strommixes analysiert.

Anschließend werden wichtige Aspekte bei Erstellung der Transformationskonzepte zum Umstieg auf die alternativ angetriebenen LKW erläutert. Im Kapitel 8 werden die wesentlichen Ergebnisse aus dieser Arbeit mit anderen Studien verglichen. Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse zu batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen LKW in den untersuchten Szenarien bezüglich ihres Energieverbrauchs, der erzielten Lebenszykluskosten und der Umweltauswirkungen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird zuerst die Rolle des LKW im Güterfernverkehr und die häufigsten Fahrzeugklassen der Fernverkehr-LKW beschrieben. Anhand einiger Statistiken werden der LKW-Verkehr auf Autobahnen und die Auslastung der Fahrzeuge dargestellt. Anschließend wird der Stand der Technik bei konventionellen und alternativen Antrieben für schwere LKW erläutert und es wird ausführlicher auf die Batterie und Brennstoffzelle als Kernkomponenten der in dieser Arbeit betrachteten Antriebe eingegangen. Schließlich werden die Grundlagen für die Durchführung und Auswertung einer Ökobilanz dargestellt.

2.1 Lastkraftwagen im Güterfernverkehr

2.1.1 Gütertransport und Emissionen

Die Beförderung der Güter kann grundsätzlich auf verschiedene Weisen erfolgen, die sich durch Wahl der Verkehrsmittel und Verkehrsträger unterscheiden. Als Verkehrsmittel werden z.B. Kraftfahrzeuge, Eisenbahn und Schiffe und als Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasser usw. bezeichnet. Die verschiedenen Verkehrsmittel haben Vor- und Nachteile aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften. So hat das Verkehrsmittel Lastkraftwagen den Vorteil der besten Flächenabdeckung wegen des größten Infrastrukturnetzes und eignet sich insbesondere für eilbedürftige Güter [13]. Bei Verkehrsmittel Eisenbahn und Schiff liegen die Vorteile gegenüber LKW in einem geringeren spezifischen Energieverbrauch [14] und ihrer Affinität zu Massengütern [13].

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften erbringen die jeweiligen Verkehrsmittel unterschiedliche Verkehrsleistungen, die als Produkt aus der beförderten Gütermenge und der zurückgelegten Entfernung definiert sind. Der Straßengüterverkehr hat über Jahre hinweg den größten Anteil an der gesamten Güterverkehrsleistung in Deutschland [15]. So betrug seine Verkehrsleistung im Jahr 2014 rund 460 Mrd. tkm und war damit das Vielfache der Verkehrsleistungen der Eisenbahnen und der Binnenschifffahrt (Abbildung 2-1). Auch in der Langfristprognose soll die Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs weiter auf rund 610 Mrd. tkm im Jahr 2030 steigen [16]. Betrachtet man die Aufteilung der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, stellt man fest, dass ein Großteil der Verkehrsleistung (ca. 67 % im Jahr 2014) durch Fernverkehr mit Entfernungen über 150 km erbracht wird [15]. Ebenfalls lagen die Beförderungsmengen (definiert als das Gewicht der beförderten Güter) des Straßengüterverkehrs im Jahr 2014 um mindestens Faktor 7 höher als

die der Eisenbahn und Binnenschifffahrt, was den Straßengüterverkehr zum wichtigsten Transportmittel des Güterlandverkehrs macht [15].

Durch die hohe Verkehrsleistung erzeugt der Straßengüterverkehr auch hohe CO₂-Emissionen, die im Jahr 2010 einen Anteil von 93 % an gesamten CO₂-Emissionen des Güterlandverkehrs in Deutschland ausmachten [17]. Im Gegensatz zum Personentransport mit Personenkraftwagen, wo die CO₂-Emissionen in den Jahren 1999 bis 2010 leicht gesunken sind, sind sie in demselben Zeitraum bei dem Straßengüterverkehr um ca. 15 % gestiegen [17]. Bei dem Straßengüterverkehr werden wiederum rund 50 % der CO₂-Emissionen durch Sattelzugmaschinen verursacht [18], die vorwiegend im Fernverkehr eingesetzt werden.

Die Bundesregierung hat jedoch das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen sektorübergreifend bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren [1]. Für den Verkehrssektor bedeutet dies laut dem Umweltbundesamt, dass dieser aufgrund nicht vermeidbarer Treibhausgasemissionen anderer Sektoren vollständig dekarbonisiert werden muss [4]. Dabei ist der Beitrag des Güterfernverkehrs wichtig, wie die oben genannten Zahlen zu seinen CO₂-Emissionen zeigen.

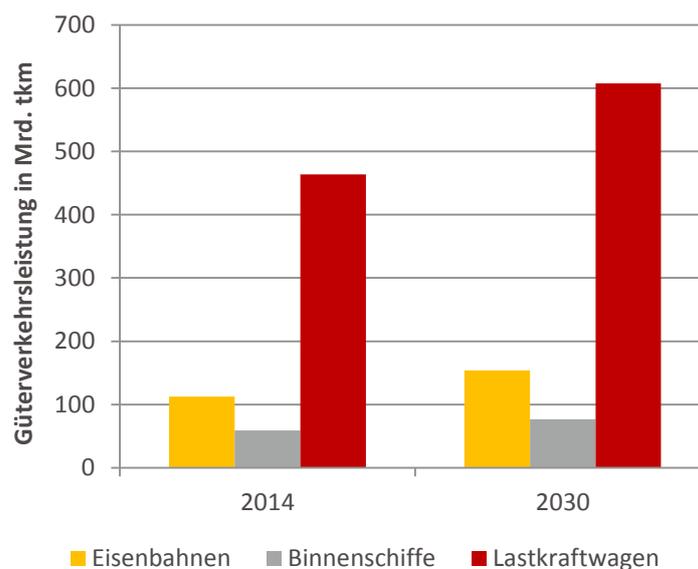


Abbildung 2-1: Verkehrsleistung des Güterlandverkehrs im Jahr 2014 sowie Prognose für Jahr 2030 (Daten aus [15] und [16])

2.1.2 Fahrzeugklassen und Auslastung

Die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr wird durch Lastkraftwagen unterschiedlicher Fahrzeugklassen erbracht. Man unterscheidet bei Lastkraftwagen drei Fahrzeugklassen nach der zulässigen Gesamtmasse des Fahrzeugs: Klasse N1 für bis 3,5 t, Klasse N2 für mehr als 3,5 t bis 12 t und Klasse N3 für mehr als 12 t [19]. Nach der Verkehrserfassung in [20] ist die am meisten auf der Autobahn eingesetzte Klasse der schweren Lastkraftwagen die Fahrzeugklasse N3, die typischerweise im Güterfernverkehr eingesetzt wird [21]. Über die Hälfte der LKW auf Autobahnen sind Sattelzugmaschinen mit Sattelauflegern [20]. Den

zweitgrößten Anteil des LKW-Verkehrs auf der Autobahn bilden Gliederzüge, bestehend aus Lastkraftwagen mit einem Anhänger [20]. Der Anteil der LKW von der Klasse N2 liegt dagegen je nach erfasster Autobahn bei max. 15 % [20]. Diese werden vorrangig im Regionalverkehr eingesetzt [21] und fahren seltener auf Autobahnen. Aus diesem Grund werden die Betrachtungen in dieser Arbeit für den Sattelzug als die wichtigste LKW-Art im Güterfernverkehr durchgeführt. Die Abbildung 2-2 zeigt zur Veranschaulichung ein Sinnbild eines Sattelzugs und eines Gliederzugs. Die hier dargestellte Zahl der Achsen sowie ihre Positionen entsprechen den am meisten auf der Autobahn vorkommenden LKW-Ausführungen nach [20], können jedoch variieren.



Abbildung 2-2: Sinnbild eines Sattelzugs (links) und eines Gliederzugs (rechts)

Das maximale zulässige Gesamtgewicht der Sattelzüge und Gliederzüge darf laut der Straßenverkehrsordnung 40 Tonnen nicht überschreiten [22]. Beim Gütertransport spielt jedoch nicht ausschließlich das Gewicht der Ladung, sondern auch ihr Volumen eine Rolle. Deswegen werden Gewicht- oder Volumenkapazität eines Fahrzeugs oft nicht komplett ausgenutzt. Abbildung 2-3 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Je höher die Auslastung des Ladevolumens, desto höher ist auch der durchschnittliche Auslastungsgrad des Gewichts. Demnach beträgt die durchschnittliche Gewichtsauslastung bei einem volumenvollen Lkw knapp 70 % [23]. In diesem Fall ist anzunehmen, dass die Menge der Ladung durch das Volumen begrenzt wurde. Beträgt die Volumenauslastung dagegen weniger als 30 %, so beträgt die durchschnittliche Gewichtsauslastung etwa 20 %. Hierbei wird die Ladung weder durch das Volumen noch durch das Gewicht begrenzt. Das Fahrzeug ist nicht vollständig beladen.

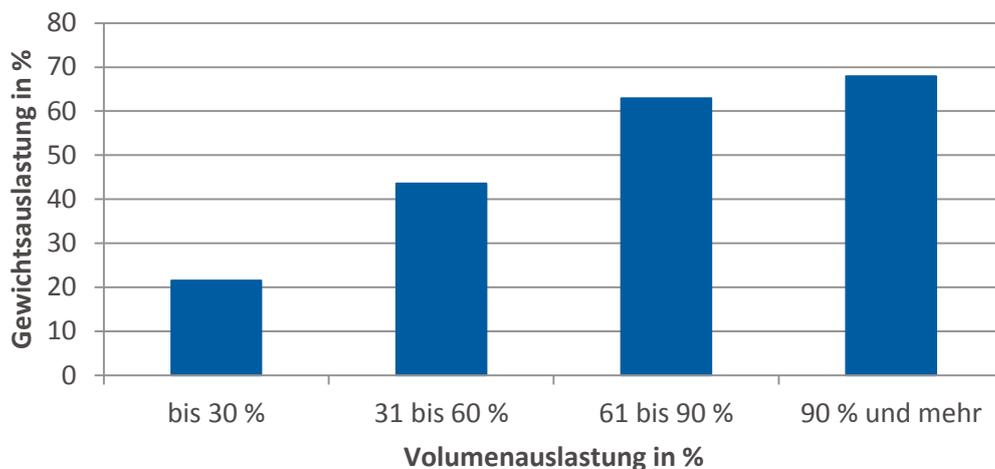


Abbildung 2-3: Durchschnittliche Gewichtsauslastung aller Fahrzeuge im Inlandsverkehr in Abhängigkeit der Volumenauslastung (Daten aus [23]).

2.1.3 LKW-Verkehr auf Autobahnen

Eine Größe zur Charakterisierung des Verkehrsstroms ist die Verkehrsstärke, die die Zahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit angibt. Auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen wird sie durch Auswertung der automatischen Zählstellen regelmäßig erfasst. Dabei werden die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken für Leicht- und Schwerverkehr berechnet. Der Schwerverkehr umfasst hierbei LKW mit einem Gesamtgewicht über 3,5 t sowie Sattelzüge und Busse. Laut der Jahresauswertung 2013 [24] liegt die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs auf Bundesautobahnen an Werktagen bei 8620 Fahrzeugen je Fahrtrichtung. Dies entspricht einem Anteil am Gesamtverkehr auf Bundesautobahnen von ca. 17,6 %. Die stündliche Verkehrsstärke des Gesamtverkehrs variiert dabei stark im Tagesverlauf mit Spitzenwerten in den Morgenstunden und am späten Nachmittag sowie einem Tief in den Nachtstunden [24].

Betrachtet man die Auslastung der Rastanlagen an den Autobahnen, so stellt man fest, dass die meisten LKW dort in den Nachtstunden abgestellt werden. Bei der Erhebung der Auslastung von Rastanlagen auf Bundesautobahnen in [25] wurden in einer Stichprobe die nachts abgestellten LKW auf bewirtschafteten und unbewirtschafteten Rastanlagen, Autohöfen, Grenzzollanlagen sowie sonstigen Abstellorten gezählt. Danach werden auf einer bewirtschafteten Rastanlage durchschnittlich ca. 69 LKW in den Nachtstunden abgestellt. Tagsüber befinden sich dagegen nur wenige LKW an den Rastanlagen, wie der Bericht [26] zeigt. Entsprechend der darin gezeigten Statistiken kann angenommen werden, dass maximal etwa 17 % der nachts abgestellten LKW bzw. 5,6 LKW tagsüber auf einer durchschnittlichen Rastanlage parken. Des Weiteren zeigte die Erhebung [25], dass die Rastanlagen nachts insgesamt überbelegt sind, wobei die Belegung der Anlagen je nach Typ stark variiert. Um die Überbelegung der Rastanlagen zu vermeiden und die Planbarkeit der Nachtpause im Güterfernverkehr zu verbessern, werden zum einen zusätzliche Stellplätze durch Ausbau der Rastanlagen geschaffen und zum anderen werden in einigen Pilotprojekten Systeme zur Parkplatzbelegung an Rastanlagen getestet [27], [28]. Diese Systeme zeigen anlagenübergreifend die aktuellen Parkplatzbelegungen an Rastanlagen entlang einer Autobahn.

Die Routen eines Fernverkehr-LKW verbinden üblicherweise Verteilerzentren oder große Industrieanlagen und verlaufen dabei größtenteils auf Autobahnen. Die Verteilerzentren, von denen Verteiler-LKW die Güter regional ausliefern, befinden sich meist in autobahnnahen Gewerbegebieten. Wie einer Datenbank mit Einträgen zu Gewerbegebieten [29] entnommen werden kann, liegen rund 80 % der Gewerbeflächen weniger als 20 Kilometer von der Autobahn entfernt. 18 % der Gewerbeflächen liegen zwischen 20 und 50 Kilometer von der Autobahn entfernt und nur ein relativ geringer Anteil von 2 % liegt über 50 Kilometer von der Autobahn entfernt.

2.1.4 Lenk- und Ruhezeiten

Die Standzeiten eines LKW während des Betriebs richten sich nach den Lenk- und Ruhezeiten des Fahrzeugführers, welche in [30] einheitlich für die Europäische Union geregelt sind. Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über einige dieser Regelungen. Spätestens nach einer Lenkdauer von 4,5 Stunden muss der Fahrer seine Fahrt unterbrechen und eine Pause einlegen, für welche eine Dauer von mindestens 45 Minuten vorgesehen ist. Die Pausendauer von 45 Minuten kann innerhalb der 4,5 Stunden Lenkzeit aufgeteilt werden. Zuerst wird eine Pause von 15 Minuten und anschließend eine von 30 Minuten eingelegt, wobei diese Reihenfolge eingehalten werden muss. Nach welcher Zeit die verkürzten Pausen eingelegt werden müssen, ist nicht vorgeschrieben, jedoch darf die Summe der Teillenkezeiten 4,5 Stunden nicht überschreiten. Im Anschluss der Pause stehen dem Fahrer wieder 4,5 Stunden Lenkzeit zur Verfügung. Die maximale Tageslenkzeit beträgt neun Stunden. An zwei Tagen pro Woche darf diese auf zehn Stunden ausgeweitet werden. Pro Woche ergibt sich eine Wochenlenkzeit von 56 Stunden. Diese setzt sich aus zwei Lenkzeiten à zehn Stunden und vier Lenkzeiten à neun Stunden zusammen. An Sonn- und Feiertagen gilt für alle Fahrzeuge über 7,5 Tonnen das Sonntagsfahrverbot [30].

Lenk- und Ruhezeit	Dauer
Lenkzeitunterbrechung	Mind. 45 Minuten nach 4,5 Stunden. Aufteilbar in 15 Minuten und 30 Minuten.
Tägliche Lenkzeit	Max. 9 Stunden. Zweimal pro Woche auf 10 Stunden erweiterbar.
Tägliche Ruhezeit	Mind. 11 Stunden. Unter bestimmten Bedingungen aufteilbar bzw. reduzierbar.
Wöchentliche Lenkzeit	Max. 56 Stunden pro Woche. Max. 90 Stunden in zwei aufeinanderfolgenden Wochen.

Tabelle 2-1: Überblick über die wichtigsten gesetzlichen Bestimmungen zu Lenk- und Ruhezeiten für LKW-Fahrer nach [30]

2.2 Stand der Technik bei schweren LKW

2.2.1 Konventionell angetriebene LKW

Die heutzutage im Güterfernverkehr eingesetzten konventionellen LKW werden von einem Dieselmotor angetrieben, der je nach Gesamtgewicht des Fahrzeugs unterschiedlich leistungsstark ist. Die StVZO regelt u.a. die Mindestmotorleistung der Fahrzeuge. § 35 besagt, dass Sattelkraftfahrzeuge und Gliederzüge eine Motorleistung von mindestens 5 kW/t aufweisen müssen [22]. Ein Sattelzug mit 40 t muss demnach über eine Motorleistung von mindestens 200 kW verfügen. Ca. 65 % der in Deutschland zugelassenen Sattelzugmaschinen

besitzen jedoch eine Motorleistung zwischen 301 und 350 kW [31]. Sattelzugmaschinen mit einer Motorleistung unter 250 kW sind dagegen selten.

Die zum Fahren notwendige Energie wird bei einem konventionellen LKW chemisch gebunden im Dieseldraftstoff gespeichert. Durch Verbrennung im Dieselmotor wird die chemische Energie des Dieseldraftstoffs in mechanische Nutzenergie und Abwärme umgewandelt. Die mechanische Energie wird über Motorwelle und Getriebe an die Räder weitergegeben und zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt.

2.2.2 Alternativ angetriebene LKW

Zum Erreichen der Klimaziele und Reduktion der Emissionen werden alternative Antriebe auch für Fernverkehr-LKW untersucht. Viele Studien, die sich mit alternativen Antrieben für LKW beschäftigen, untersuchen Diesel-Hybrid-LKW [32], Erdgas-LKW [32], [33], brennstoffzellengetriebene LKW [33], [34], über Oberleitung, Stromschiene oder induktiv versorgte LKW [18], [33]–[35] sowie LKW mit konventionellem Dieselmotor, aber alternativen Kraftstoffen aus Biomasse [36], [37] und stromgenerierten Kraftstoffen [38]–[40]. Diesel-Hybrid-LKW und Erdgas-LKW können zwar eine leichte Verbesserung der Ökobilanz gegenüber dem konventionellen LKW erwirken [32], sind jedoch nach wie vor an erschöpfliche Ressourcen gebunden und die Fahrzeuge verursachen lokale Emissionen aus Kraftstoffverbrennung. Die Kraftstoffe aus Biomasse können die Treibhausgasemissionen reduzieren, stehen jedoch im Konflikt mit anderen Flächennutzungen und erzeugen indirekte Emissionen aus dem Pflanzenanbau und Flächennutzung. Dadurch kann sich die Reduktion der Treibhausgase durch Nutzung der Biokraftstoffe stark verringern [41]. Die stromgenerierten Kraftstoffe haben eine hohe Energiedichte und können in einem konventionellen LKW mit Verbrennungsmotor eingesetzt werden, haben als Nachteil jedoch einen hohen Strombedarf zur Herstellung und deshalb einen voraussichtlich höheren Preis als konventionelle Kraftstoffe [39]. In der Studie [40] wird der Wirkungsgrad eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und stromgeneriertem Kraftstoff als 4- bis 6-fach kleiner als der Wirkungsgrad eines mit elektrischem Strom betriebenen batterieelektrischen Fahrzeugs angegeben und die Produktionskosten des stromgenerierten Kraftstoffs belaufen sich aktuell auf bis zu 4,5 € pro Liter Dieselequivalent.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf elektrisch angetriebene LKW gelegt und es werden batteriegetriebene, oberleitungsversorgte und brennstoffzellengetriebene LKW analysiert, die zur Zeit in Deutschland die meist diskutierten Technologien für die Anwendung im Güterfernverkehr darstellen und auch in diversen Forschungsprojekten untersucht werden. In den folgenden Kapiteln werden diese LKW-Technologien im Einzelnen dargestellt.

2.2.2.1 Batteriegetriebener LKW

Ein batteriegetriebener LKW enthält einen elektrischen Antriebsstrang mit einer Batterie als Energiequelle. Eine der größten Herausforderungen bei dieser LKW-Technologie insbesondere im Güterfernverkehr ist die Reichweitenbeschränkung aufgrund der begrenzten

Kapazität der Batterie, die bei heute vorhandenen Batterietechnologien eine geringere Energiedichte als der Dieselmotorkraftstoff besitzt.

In einschlägigen Studien wird der batteriegetriebene LKW deshalb oft als ungeeignet für Fernverkehr eingestuft. So wird diese LKW-Technologie z.B. in [33] aufgrund großer Energieanforderungen und langer täglicher Strecken als ungeeignet betrachtet, weil eine sehr schwere Batterie erforderlich und die Nutzlast eingeschränkt wäre. Batteriegetriebene LKW werden stattdessen für Verteiler-LKW mit kürzeren täglichen Strecken vorgeschlagen [34]. Auch laut [38] sind batteriegetriebene LKW keine geeignete Option für Fernverkehr aufgrund geringer Energiedichten der Batterien.

Jedoch hat sich die Energiedichte der Lithiumbatterien in den Jahren 1990 bis 2010 ungefähr verdoppelt [42] und ihre Preise sind auf 20 % verglichen mit ihren Preisen vor einer Dekade gesunken [43], [44]. Deshalb entwickeln einige Fahrzeughersteller wie Tesla und MAN batteriegetriebene Sattelzüge. Während der Sattelzug von MAN [10] für Verteilerverkehr gedacht ist, entwickelt Tesla einen schweren Sattelzug für Fernverkehr [12]. Einige Studien wie [45], [46] betrachten u.a. auch den batteriegetriebenen LKW und nehmen Batteriekapazitäten von 270 kWh bzw. 400 kWh an. Der batteriegetriebene LKW wird darin mit konventionellen und anderen alternativ angetriebenen LKW bezüglich seiner Energieeinsparungen [46], Lebenszykluskosten und Emissionen [45] verglichen.

Da die Batterie ein wichtiger Bestandteil des Antriebsstrangs ist und u.a. den Energieverbrauch, die maximale Nutzlast und Lebenszykluskosten beeinflusst, ist eine detailliertere Betrachtung ihrer Kapazitätsdimensionierung notwendig. Um die Einschränkung der geringen Reichweite zu überwinden, wird in dieser Arbeit eine Dimensionierung der Batterie sowie zugehöriger Ladeinfrastruktur für realitätsnahes Betriebsszenario im Güterfernverkehr vorgenommen.

2.2.2.2 Oberleitungsversorgter (Hybrid)-LKW

Zu den Möglichkeiten der direkten Energieversorgung eines LKW während der Fahrt zählen Energieübertragung mittels Oberleitung, Stromschiene und Induktion. Bei Energieübertragung mittels Stromschiene wird eine stromleitende Schiene in die Fahrbahn eingelassen. Ein Fahrzeug, das über dieser Schiene fährt, kann mit einem entsprechenden Pantographen die Stromschiene kontaktieren und wird so mit elektrischer Energie versorgt. Bei induktiver Energieübertragung werden stromleitende Spulen unter die Fahrbahnoberfläche verbaut. Wenn ein Fahrzeug mit einer im Fahrzeugboden installierten Spule über der Spule in der Fahrbahn fährt, kann elektrische Energie mittels Induktion übertragen werden. Als Vorteil dieser Technologien kann ihre Anwendbarkeit für alle Fahrzeugklassen angesehen werden. Wohingegen die Installation der Stromabnehmer auf Personenkraftwagen und Lieferfahrzeugen unrealistisch erscheint. Durch diesen Synergieeffekt werden in [35] geringere Kosten für die Elektrifizierung der Straßen mit Stromschiene bezogen auf die gesamte Fahrzeugflotte Schwedens ausgerechnet. Als Nachteile können jedoch die umfangreichen durchzuführenden Bauarbeiten zum Einbau der

Komponenten in die Fahrbahn genannt werden. Auch die Wartung der in der Fahrbahn integrierten Komponenten sollte an die Wartungszyklen der Fahrbahn gekoppelt werden, um zusätzliche Bauarbeiten zu vermeiden [47]. Zum anderen bestehen bei den Stromschienen Herausforderungen durch eine andere Bodenhaftung der Reifen auf der Stromschiene als auf Asphalt [47] und durch Witterungseinflüsse [6]. Bei induktiver Energieübertragung sind die Verluste durch größeren Luftspalt und ungenaue Positionierung über fahrbahnseitigen Spulen bei fahrenden Fahrzeugen zu beachten [47]. Außerdem konnte bei induktiven Konzepten anders als bei konduktiven Systemen bisher keine fahrzeugseitige Rückspeisung der Bremsenergie ins System realisiert werden [6].

Für den oberleitungsversorgten LKW kann die Infrastruktur für die Oberleitung neben der Fahrbahn aufgebaut werden. Ähnlich wie bei einem Oberleitungsbussystem sind die Fahrdrähte über der Fahrbahn an Masten befestigt. Die Energieübertragung erfolgt konduktiv mit einem Stromabnehmer. Die Vorteile dieser Technologie sind die Möglichkeit der additiven Integration in bestehende Straßeninfrastruktur ohne Veränderungen an der Fahrbahn sowie Verwendung erprobter Technologien aus dem Bahnbereich für die Oberleitungsinfrastruktur [47]. Die technische Machbarkeit dieser Technologie wurde in Forschungsprojekten ENUBA 1 und 2 [5], [6] gezeigt und zur Zeit werden in Deutschland zwei Teststrecken für oberleitungsversorgte LKW auf öffentlichen Autobahnen aufgebaut [7]. Ferner schätzte der Sachverständigenrat für Umweltfragen die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs mit dieser Technologie als eine vielversprechende Option ein [48] und ebenfalls der Umweltbundesamt betrachtet diese Technologie zur Reduzierung der CO₂-Emissionen [39]. Aus diesen Gründen fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf oberleitungsversorgte LKW als Technologie zur direkten Energieversorgung der Fahrzeuge während der Fahrt.

Auf der Fahrzeugseite verfügen die oberleitungsversorgten LKW über ein Pantographensystem (im Folgenden zur Vereinfachung als Pantograph bezeichnet) bestehend aus zwei Stromabnehmern, die am spannungsführenden bzw. neutralen Fahrleitungsdraht schleifen. Der Antriebsstrang eines oberleitungsversorgten LKW kann eine Batterie enthalten, die zum Fahren auf oberleitungsfreien Strecken und zur Rekuperation verwendet werden kann. In dieser Arbeit wird auf die Dimensionierung dieser Batterie (Kapitel 4.3.2) und der erforderlichen Oberleitungsleistung (Kapitel 4.5.2) eingegangen. Ferner wird hier angenommen, dass der oberleitungsversorgte LKW die elektrische Energie nur über Oberleitung beziehen kann und keine Ladestationen nutzt.

Ferner kann ein oberleitungsversorgter LKW auch mit einem Dieselmotor hybridisiert werden. Als Hybridfahrzeug wird nach der Definition der UN-Wirtschaftskommission aus dem Jahr 2003 ein Fahrzeug mit mindestens zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichersystemen bezeichnet [49]. Der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW enthält neben dem Elektromotor und der Batterie auch einen Dieselmotor und einen Dieseltank, sodass auch längere oberleitungsfreie Strecken überbrückt werden können. Je nach Konfiguration des Antriebsstrangs kann ein Hybridfahrzeug als serieller, paralleler oder leistungsverzweigter Hybrid klassifiziert werden [50], [51]. Beim seriellen Hybrid ist der Dieselmotor über einen Generator an die elektrische Maschine zum Antrieb der Räder

verbunden. Die Batterie dient als Zwischenspeicher für Energie und kann mit Energie aus dem Dieselmotor geladen werden. Bei parallelem Hybrid ist der Verbrennungsmotor mechanisch mit der Radachse verbunden und der elektrische Strang ist über die elektrische Maschine parallel mit der Antriebswelle des Dieselmotors verbunden. Bei leistungsverzweigtem Hybrid wird die Leistung in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad unterteilt.

Die in Forschungsprojekten ENUBA 1 und 2 aufgebauten schweren LKW sind als serielle Hybride konzipiert, weil man in diesen Projekten zu dem Schluss gekommen ist, dass diese Hybridart aufgrund einer einfacheren Modifizierung des Antriebsstrangs (wie z.B. Ersetzen des Dieselmotors durch Brennstoffzelle) geeigneter ist [5], [6]. Ferner ist beim parallelen Hybrid kein Downsizing der elektrischen Maschine möglich, weil die elektrische Maschine beim Fahren an Oberleitung als einziger Fahrmotor betrieben wird. In der vorliegenden Arbeit wird aus diesen Gründen der serielle Oberleitungshybrid-LKW betrachtet.

2.2.2.3 Brennstoffzellengetriebener LKW

Der brennstoffzellengetriebene LKW besitzt einen Wasserstofftank zur Speicherung des Wasserstoffs unter Druck sowie eine Brennstoffzelle zur Energiewandlung von chemischer Energie des Wasserstoffs in die elektrische Energie. Ferner enthält der Antriebsstrang eines brennstoffzellengetriebenen LKW eine elektrische Maschine, Leistungselektronik sowie oft eine Batterie zum Ausgleich der Leistungsspitzen der Traktion und zum Zwischenspeichern der Energie aus Brennstoffzelle und Rekuperation.

Den brennstoffzellengetriebenen Fahrzeugen werden Vorteile wie große Reichweite und kurze Betankungszeit zugeschrieben, die mit Parametern konventioneller Kraftfahrzeuge vergleichbar sind [52]. Daher lassen sich diese Fahrzeuge ohne grundlegende Umstellung der Nutzungsgewohnheiten einsetzen und in die bestehenden Betriebsabläufe integrieren. Zu den Nachteilen dieser Technologie zählen die derzeit hohen Kosten der Brennstoffzellenfahrzeuge sowie die Wirkungsgradverluste bei Herstellung des Wasserstoffs unter Nutzung des Stroms und Rückverstromung im Fahrzeug.

Die Speicherung des Wasserstoffs in Fahrzeugen erfolgt üblicherweise in zylindrischen Drucktanks mit Speicherdrücken von 350 bis 700 bar [52], um die gespeicherte Energiemenge zu erhöhen. Die Drucktankbehälter werden wegen hoher Drücke mit Faserbewicklung verstärkt. Zu beachten ist der Energieaufwand zur Kompression des Wasserstoffs auf 700 bar, der ca. 12 % seines Energiegehalts entspricht [53].

Der Wasserstoff kann in einem aus Sicht der Benutzer ähnlichen Betankungsvorgang wie der konventionelle Kraftstoff an Wasserstofftankstellen getankt werden. Zur Zeit wird durch die Initiative Clean Energy Partnership des deutschen Bundesverkehrsministeriums und mehrerer Industrieprojektpartner [54] ein Netz aus Wasserstofftankstellen in Deutschland aufgebaut. Der Transport des Wasserstoffs zu den Tankstellen kann mittels Tankwagen oder Pipelines erfolgen bzw. kann der Wasserstoff direkt an der Tankstelle mittels Elektrolyse hergestellt

werden. Auf Einzelheiten der Wasserstoffherstellung, Transports und Betankung wird in Kapiteln 6.2.5.2 und 6.2.6.3 eingegangen.

2.3 Batterie und Brennstoffzelle

In diesem Kapitel werden Grundlagen zu Batterie und Brennstoffzelle als wichtigen Komponenten des alternativen Antriebsstrangs erläutert. Sie zählen auch zu den größten Kostenbestandteilen eines alternativ angetriebenen Fahrzeugs und werden in der vorliegenden Arbeit deshalb ausführlicher modelliert (Kapitel 3.2 und 3.5).

2.3.1 Lithium-Ionenbatterie

Nahezu alle heute am Markt verfügbaren Elektrofahrzeuge werden mit Lithium-Ionenbatterien ausgestattet. Die Gründe für diese Entwicklung sind vergleichsweise hohe Energiedichte dieser Batterien, gute Lebensdauer sowie Synergieeffekte zum Consumerelektronikmarkt, wo die Lithium-Ionenbatterien in den meisten Laptops, Smartphones etc. verwendet werden.

Als eine Batterie im Fahrzeug wird üblicherweise ein Batteriepack (auch Batteriesystem genannt) bezeichnet, das im Wesentlichen aus mehreren miteinander verschalteten Batteriemodulen, Batteriemanagementsystem, Kühlung, Schützbox sowie einem Gehäuse zur Unterbringung dieser Komponenten besteht. Die Batteriemodule enthalten wiederum einzelne Batteriezellen sowie untergeordnete Module des Batteriemanagementsystems und Sensoren zur Messung von z.B. Spannung und Temperatur der Zellen. Die Zellen und Module werden parallel und/oder seriell miteinander verschaltet, um die gewünschten Spannung und Strom am Anschluss des Batteriepacks zu erhalten. Zu den Aufgaben des Batteriemanagementsystems gehört die Überwachung der Betriebsgrenzen der Zellen (min. und max. Spannung, Temperatur) sowie die Ermittlung des Ladezustands und Kommunikation mit dem Energiemanagementsystem des Fahrzeugs.

Die Lithium-Ionenbatterien sind sogenannte Sekundärbatterien, die im Gegensatz zu Primärbatterien wieder aufgeladen werden können. Bei den meisten Zellchemien besitzt eine Lithium-Ionenzelle eine Anode aus Kohlenstoff und eine Kathode aus Metalloxiden, zwischen denen eine Spannung aufgrund der Potentialdifferenz entsteht. Die Elektroden befinden sich in einem Elektrolyten, der zum Transport der Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode beim Entladen bzw. von der Kathode zur Anode beim Laden dient. Die Speicherung des Lithiums in den Elektroden erfolgt als Einlagerung in die Kristallgitter des Elektrodenmaterials, auch als Interkalation bezeichnet. Ein Separator, der für die Lithium-Ionen durchlässig ist, verhindert den Kontakt der Anode und Kathode und somit den Kurzschluss der Zelle. Dieser Hin- und Hertransport der Lithium-Ionen wird im Englischen auch „rocking chair“ (deutsch: Schaukelstuhl) genannt [53], [55]. Während für die Anode als Material meist Graphit eingesetzt wird, werden für Kathode unterschiedliche Metalloxide

eingesetzt. Die somit gebildete Zellchemie entscheidet maßgebend über die Eigenschaften der Zelle. Beispielsweise haben die Zellen mit Nickel-Mangan-Kobaltoxyd (NMC) als Kathodenmaterial eine hohe Energiedichte und eine gegenüber Zellen mit Nickel-Kobalt-Aluminiumoxyd (NCA) höhere Sicherheit. Die Zellen mit Lithium-Eisenphosphat (LFP) als Kathodenmaterial haben als Vorteile eine hohe Sicherheit, gute Lebensdauer sowie eine über weiten Ladezustandsbereich konstante Spannung, allerdings als Nachteil eine geringere Energiedichte [55].

Bei der Alterung der Lithium-Ionenbatteriezellen wird zwischen kalendarischer und zyklischer Lebensdauer unterschieden. Kalendarische Alterung tritt durch Lagerung der Zelle bei bestimmten Umgebungstemperaturen auf. Die zyklische Alterung ist auf den Betrieb der Zelle und Lade- und Entladezyklen zurückzuführen. Diese beiden Alterungstypen laufen beim Betrieb in einem Fahrzeug gleichzeitig ab. Der am häufigsten beobachtete Alterungsprozess ist die Bildung einer Deckschicht an der Kontaktfläche zwischen Anode und Elektrolyt. Diese wächst im Laufe der Zeit an und trägt zum Verbrauch der Lithium-Ionen sowie Innenwiderstandserhöhung der Zelle bei. Bei Zyklisierung der Zelle kommt es durch Volumenänderung des Aktivmaterials zu mechanischem Stress in der Deckschicht, sodass diese bricht und sich Neubildet, was ebenfalls zum Verbrauch der Lithium-Ionen beiträgt. Weitere Alterungsprozesse sind Aktivmaterialverlust durch Kontaktverlust der Aktivmassepartikel sowie Lithiumabscheidung auf der Anode (auch Lithium-Plating genannt), die durch hohe Ladeströme bei niedrigen Temperaturen ausgelöst wird. Die genannten Alterungsprozesse bewirken eine Kapazitätsabnahme und einen Anstieg des Innenwiderstands der Zelle [56].

2.3.2 Brennstoffzelle

In den Fahrzeuganwendungen werden Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (kurz PEM-Brennstoffzellen) eingesetzt, die als Hauptvorteile Kaltstartfähigkeit und Leistungsdichte bieten [52]. Die PEM-Brennstoffzelle besteht aus einer mit Katalysator beschichteten Anode, einer Elektrolytmembran und einer mit Katalysator beschichteten Kathode. Als Katalysator kommt meistens Platin zum Einsatz, das in wenigen Nanometern großen Partikeln aufgebracht ist. An der Anode werden Wasserstoffmoleküle zu positiv geladenen Wasserstoffprotonen und Elektronen gespalten. So entsteht an der Seite der Anode ein Elektronenüberschuss und die Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis zur Kathode. Die Wasserstoffprotonen gelangen über die für Protonen durchlässige Elektrolyt-Membran zur Kathode. Der Kathode wird komprimierter Sauerstoff zugeführt. So reagieren dort Sauerstoff, Wasserstoffprotonen und Elektronen zu Wassermolekülen [57].

Die Leerlaufspannung einer einzelnen PEM-Brennstoffzelle beträgt etwa 1 V und so werden die Zellen zum Erreichen einer höheren Spannung zu einem Brennstoffzellenstack zusammengeschaltet [57]. Zum Betrieb des Brennstoffzellenstacks werden Wasserstoffversorgungssystem, Luftversorgungs- und Befeuchtungssystem sowie Steuerungssystem benötigt, die zusammen als Brennstoffzellensystem bezeichnet werden. Das Luftversorgungssystem verdichtet die Luft mit dem darin enthaltenen Sauerstoff auf den

Arbeitsdruck der Brennstoffzelle und führt die verdichtete und mit dem Befeuchtungssystem befeuchtete Luft der Kathode zu. Das Steuerungssystem regelt den Betrieb des Brennstoffzellensystems und kommuniziert mit dem Energiemanagementsystem des Fahrzeugs [52].

Zu den wichtigsten Alterungsmechanismen einer Brennstoffzelle gehört zum einen die Abnahme der elektrochemisch aktiven Oberfläche des Katalysators, was sich in verminderter Ausgangsspannung bzw. Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle ausdrückt [58]. Zum anderen wird die Abnahme der Aktivoberfläche durch Korrosion der Kathode verursacht, die durch dynamische Lastwechsel beschleunigt wird [59]. Ein weiterer Alterungsprozess ist die chemische Zersetzung der Polymer-Elektrolytmembran durch Wasserstoffperoxid als Nebenprodukt der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff [60]. Zur Vermeidung häufiger Lastwechsel und hoher Spannungen im Leerlauf, die die Korrosion der Kathode begünstigen, wird die Brennstoffzelle oft in Kombination mit Batterie in einem hybridisierten Fahrzeugantrieb eingesetzt.

2.4 Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse genannt, engl. life cycle assessment, kurz LCA) dient zur Abbildung und Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines Produkts oder eines Prozesses auf die Umwelt. Ergebnisse von Ökobilanzen werden zum Beispiel zur Optimierung der Umweltverträglichkeit eines Produktes, zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Prozesse eines Unternehmens oder zum Beurteilen verschiedener Produkte bezüglich ihrer Umweltauswirkungen verwendet.

2.4.1 Durchführung

Bei einer Ökobilanz werden üblicherweise alle Lebensstadien des untersuchten Produkts oder Verfahrens auf ihre Umwelteinflüsse untersucht [61], [62]. [61] beschreibt folgende Punkte als relevante Lebensstadien, die einen kompletten Lebenszyklus eines Produktes skizzieren: Die Rohstoffgewinnung, die Herstellung, die Verarbeitung, den Transport, den Gebrauch, die Nachnutzung, den Abfall, die Abwasserreinigung und die Entsorgung.

Um die Vergleichbarkeit verschiedener Ökobilanzen zu fördern, wurde die Durchführung eines Life Cycle Assessments durch DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 in das deutsche Normenwerk übertragen [63]. Die Normen legen fest, dass eine Ökobilanz vier grundlegende Elemente umfasst: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

Bei der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen werden die Produkte oder Verfahren definiert, die bilanziert und miteinander verglichen werden sollen. Will man mehrere Produkte untersuchen, müssen diese auch den gleichen Nutzen haben. Am Beispiel einer Verpackung heißt das, dass dem Konsumenten bzw. Kunden dieselbe Menge des gleichen,

verpackten Produktes zur Verfügung gestellt werden soll. Dabei ist auch zu beachten, ob es sich hierbei um Einweg oder Mehrweg-Verpackungen handelt, die womöglich mehrere Male verwendet werden und somit in Summe eine größere Menge des gleichen Produktes verpacken könnten. Um die Quantifizierung der Funktion und des Nutzens der zu vergleichenden Produkte zu vereinheitlichen, wird eine sogenannte funktionelle Einheit festgelegt [64].

Es gibt vier verschiedene Ebenen der Sachbilanz. Bei der Input-/Output-Bilanz wird der ökologisch relevante Input eines Unternehmens dem Output während der betrachteten Periode gegenübergestellt. Als Input zählen hierbei beispielsweise Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, sowie Fremdleistungen, Energie und Luft. Outputs werden durch Produkte oder Leistungen und (stofflichen) Emissionen wie Abfall und Abgase beschrieben. Bei der sogenannten Prozessbilanz werden produktionsspezifische Abläufe und Produktionsprozesse strukturiert. Die Produktbilanz dient der Bewertung von Umwelteinwirkungen, die während des gesamten Lebenszyklus von dem Produkt ausgehen. Schließlich konzentriert sich die Substanzbilanz auf die ökologische Optimierung der Substanzbilanz (wie Boden- und Wasserflächen) des Unternehmens [61].

Der dritte Schritt der Wirkungsabschätzung ordnet die Ergebnisse der Sachbilanz des untersuchten Produktlebenszyklus den Wirkungskategorien zu, die im Kapitel 2.4.2 erläutert werden [64].

Im letzten Schritt, der Auswertung, werden die Ergebnisse aus den beiden vorherigen Schritten (Sachbilanz und Wirkungsabschätzung) für eine Gesamtevaluation zusammengeführt. Es werden Schlussfolgerungen getroffen und Empfehlungen abgeleitet [64].

2.4.2 Wirkungskategorien

Um die Umwelteinwirkungen eines Produkts auf seinem Lebensweg beurteilen zu können, werden den Ergebnissen der Sachbilanz die sogenannten Wirkungskategorien zugeordnet. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Wirkungskategorien, die sich in ihrer Modellierung und Gewichtung unterscheiden und in der Grundlagenliteratur aufgeführt werden [65]. Die in dieser Arbeit untersuchten Wirkungskategorien sind das Treibhauspotential, das Versauerungspotenzial, das Überdüngungspotenzial, die mit der CML 2001 Methode vom Niederländischen Centre of Environmental Science (CML) der Leiden Universität [66] berechnet werden, sowie der kumulierte Energieaufwand, die gängige Wirkungskategorien zur Auswertung der Ökobilanzen darstellen und im Folgenden näher beschrieben werden.

Das Treibhauspotential (engl. global warming potential, kurz GWP) gibt den potentiellen Beitrag eines Stoffes zum Treibhauseffekt an. Die funktionale Einheit ist Kilogramm CO₂-Äquivalente bzw. kg CO₂-eq. Der Beitrag des Stoffes wird also relativ zum Treibhauspotential des Kohlenstoffdioxids angegeben. Bei der Berechnung wird der Einfluss eines Stoffes auf den Treibhauseffekt gemittelt über einen Zeitraum von 100 Jahren bezogen.

So haben z.B. 1 kg Schwefelhexafluorid einen GWP-Wert von 23.900 kg CO₂-eq und 1 kg Methan von 21 kg CO₂-eq [67].

Das Versauerungspotential (engl. acidification potential, kurz AP) hat kg SO₂-Äquivalenten (Schwefeldioxid-Äquivalente) als funktionale Einheit und beschreibt das Potential einiger Stoffe zur Erhöhung der Konzentration von Wasserstoff-Ionen in Luft, Wasser und Boden. Schwefel- und Stickstoffverbindungen können in Form von saurem Regen die Böden, Gewässer, Lebewesen und Gebäude schädigen. Als weitere Folgen können Waldsterben und Fischsterben vorkommen [68]. Neben Schwefeldioxid sind Ammoniak, Schwefelsäure, Chlorwasserstoff und Stickstoffdioxid einige wichtige Stoffe in dieser Wirkungskategorie [67].

Das Überdüngungspotential (engl. eutrophication potential, kurz EP) wird in PO₄-Äquivalenten (Phosphat-Äquivalente) angegeben. In [68] wird Überdüngung als Übergang von Gewässern und Böden von einem nährstoffarmen in einen nährstoffreichen Zustand definiert. Eine Folge des vermehrten Nährstoffgebots ist beispielsweise eine erhöhte Algenbildung in Gewässern, welche wiederum das Fischsterben begünstigt. Neben Phosphat tragen u.a. Phosphor, Nitrat, Stickstoff und Ammoniak zu dieser Wirkungskategorie bei [67].

Unter dem kumulierten Energieaufwand (engl. primary energy demand, kurz PED) versteht man die aufsummierte Menge erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergieträger. Zu nicht erneuerbaren Primärenergieträgern zählen fossile Energieträger (wie Steinkohle, Braunkohle, Erdgase), nukleare Energieträger sowie Primärwald. Zu den erneuerbaren Energieträgern zählen Windkraft, Sonnenenergie, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie [69]. PED wird in MJ-Äquivalenten angegeben und bezieht sich auf festgelegten Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen.

3 Fahrzeug- und Energieverbrauchsmodell

Um den Energiebedarf eines elektrischen LKW mit einem alternativen Antriebsstrang zu bestimmen und seine Komponenten auszulegen, wurden Simulationsmodelle des konventionellen, batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen LKW erstellt und parametrisiert. In diesem Kapitel wird auf die Implementierung dieser Modelle für die drei genannten LKW-Arten eingegangen sowie die Parametrierung einzelner Modellbestandteile aufgezeigt. Schließlich folgt die Validierung des Modells bezüglich des Verbrauchs.

3.1 Konventionell angetriebener LKW

Um die alternativen LKW-Technologien zu bewerten, wird in dieser Arbeit ein konventionell angetriebener LKW als Referenz ausgewählt. In diesem Kapitel wird auf die Modellierung und Parametrierung des Dieselmotors eines konventionell angetriebenen Diesel-LKW eingegangen. Die Parameter der Fahrwiderstände und der Nebenverbraucher sind für alle LKW gleich gewählt und können dem Kapitel 3.2.2 entnommen werden.

In Deutschland regelt die Straßenverkehrszulassungsordnung unter anderem auch die Mindestmotorleistung der Lastkraftwagen [22]. So müssen Sattelkraftfahrzeuge und Gliederzüge eine Motorleistung von mindestens 5 kW pro Tonne aufweisen. Ein Sattelzug mit einem Gesamtgewicht von 40 t muss demnach über eine Motorleistung von mindestens 200 kW verfügen. Die meisten konventionellen Sattelzüge werden von einem Dieselverbrennungsmotor mit einer Leistung im Bereich von 300 bis 350 kW angetrieben [31].

Zur Implementierung des Fahrzeugmodells eines Diesel-LKW wurde das Fahrzeugmodell eines batteriegetriebenen LKW (Kapitel 3.2) als Grundlage genommen und die elektrischen Komponenten im Antriebsstrangmodell (elektrische Antriebsmaschine, Traktionsumrichter und Batterie) durch ein Modell des Dieselmotors ausgetauscht. Der Dieselmotor wurde hierbei anstelle der elektrischen Antriebsmaschine in das Modell gesetzt (vgl. Abbildung 3-3), sodass dieser die Leistung zum Überwinden der Fahrwiderstände $P_{FW, \text{ soll}}$ verrechnet mit dem Wirkungsgrad des Getriebes η_{Getr} als Anfrageleistung $P_{\text{Diesel, soll}}$ bekommt:

$$P_{\text{Diesel, soll}} = 1/\eta_{\text{Getr}} \cdot P_{\text{FW, soll}} \quad (3.1)$$

Der Dieselmotor wird als ein Verbrauchskennfeld in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl modelliert. Weil kein Verbrauchskennfeld eines aktuellen Dieselmotors passender

Leistung zur Verfügung stand, wurde ein generisches implementiert. Dazu wurde der charakteristische Verlauf der Muschelkurven aus dem Kennfeld eines Dieselmotors für mittelschwere LKW genommen [70] und das Drehmoment wurde anschließend linear skaliert, um die Volllastkurve eines größeren Dieselmotors für schwere LKW [71] abzubilden (Tabelle 3-1). Auch die Drehzahl wurde linear skaliert, weil der verbrauchsoptimale Arbeitspunkt des abzubildenden Motors bei 1300 Umdrehungen pro Minute liegt [72]. Da die geringsten spezifischen Verbrauchswerte¹ der beiden Motoren 188 g/kWh betragen, wurden die absoluten Verbrauchswerte der Muschelkurven beibehalten. Das so entstandene generische Verbrauchskennfeld ist in Abbildung 3-1 gezeigt. Ferner wurde ein Getriebe implementiert, um den Arbeitspunkt des Motors im Bereich mit geringen Verbrauchswerten zu halten.

	Dieselmotor für mittelschwere LKW	Dieselmotor für schwere LKW
Hubvolumen	6,4 l	10,7 l
Leistung	205 kW bei 2300 U/min	315 kW bei 1800 U/min
Drehmoment	1100 Nm bei 1300 U/min	2100 Nm bei 1100 U/min
Min. Verbrauch	188 g/kWh bei 1500 U/min	188 g/kWh bei 1300 U/min

Tabelle 3-1: Technische Daten des ursprünglichen Dieselmotors für mittelschwere LKW und des Dieselmotors für schwere LKW

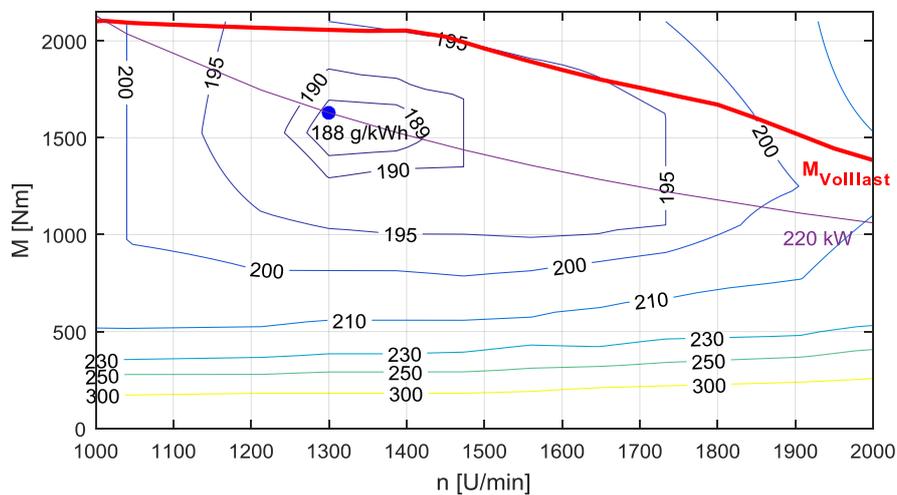


Abbildung 3-1: Verbrauchskennfeld eines generischen Dieselmotors mit Volllastkurve und Konstantleistungskurve durch den Arbeitspunkt mit minimalem Verbrauch

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass die lineare Skalierung der Verbrauchskennfelder in der Umgebung nahe am tatsächlichen Parameter auch in gängigen

¹ Der spezifische Verbrauchswert eines Verbrennungsmotors ist als das Verhältnis zwischen Kraftstoffbedarf und der abgegebenen mechanischen Leistung definiert.

Fahrzeugsimulationsprogrammen wie z.B. ADVISOR angewandt wird [51], um unterschiedliche Motoren abzubilden. Die hier in einer größeren Umgebung durchgeführte Skalierung soll lediglich einen groben Orientierungswert für den spezifischen Verbrauch des Dieselmotors und damit für den Dieselverbrauch auf simulierter Strecke liefern.

3.2 Batteriegetriebener LKW

3.2.1 Modellierung eines batteriegetriebenen LKW

Zum Modellieren eines batteriegetriebenen LKW wurde ein Systemmodell des Fahrzeugs erstellt, dessen Grundstruktur in Abbildung 3-2 gezeigt ist. Es besteht aus einem Streckenmodell, Fahrermodell, Modell der Fahrwiderstände, Antriebsstrangmodell und einem Batteriemodell, die im Folgenden einzeln erläutert werden. Die Beschreibungen in diesem Kapitel basieren dabei größtenteils auf [73]. Ferner wurde eine Benutzeroberfläche zur einfacheren Modellparametrierung und Analyse der Ergebnisse implementiert. Das Modell wurde in Matlab und Simulink entwickelt.

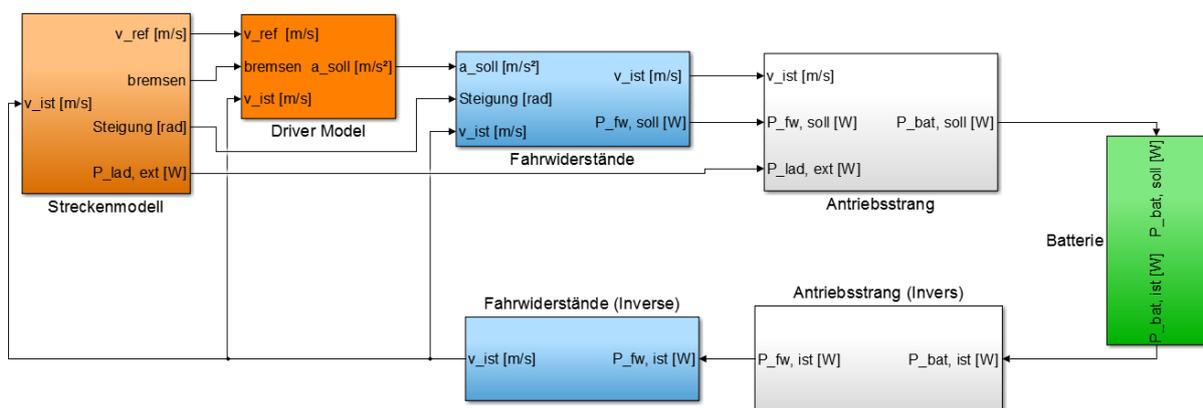


Abbildung 3-2: Struktur des Systemmodells eines batteriegetriebenen LKW

Zuerst importiert das Streckenmodell ein Streckenprofil, welches aus GPS-Koordinaten, Höhendaten sowie zusätzlichen Informationen über maximal erlaubte Geschwindigkeit, Position der Rastplätze, Dauer der Ruhepausen und Ladestationen enthält. Abhängig von der aktuellen Fahrzeugposition werden aus dem Streckenmodell Signale wie Referenzgeschwindigkeit, Steigung, verfügbare Ladeleistung sowie Bremsignal beim Erreichen eines Rastplatzes oder bei Überschreitung der maximal erlaubten Geschwindigkeit ausgegeben.

Das Fahrermodell liefert die zum Erreichen der Referenzgeschwindigkeit erforderliche Soll-Beschleunigung des Fahrzeugs. Ausgehend von der Soll-Beschleunigung, der Steigung und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet das Modell der Fahrwiderstände die Soll-Leistung $P_{FW, \text{soll}}$ zum Überwinden der Fahrwiderstände, die sich als Summe des

Luftwiderstands, Rollwiderstands, Steigungswiderstands und Beschleunigungswiderstands nach der folgenden Formel ergibt:

$$P_{\text{FW,soll}} = v_{\text{ist}} \cdot (F_{\text{Luft}} + F_{\text{Roll}} + F_{\text{Steig}} + F_{\text{B}}), \quad (3.2)$$

wobei v_{ist} die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Die Luftwiderstandskraft F_{Luft} wird als Produkt aus dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , der projizierten Stierfläche A des Fahrzeugs, der Luftdichte ρ_{Luft} und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit v_{ist} berechnet:

$$F_{\text{Luft}} = 1/2 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v_{\text{ist}}^2. \quad (3.3)$$

Die Rollwiderstandskraft F_{Roll} wird entsprechend der folgenden Formel bestimmt:

$$F_{\text{Roll}} = g \cdot m_{\text{ges}} \cdot c_{\text{Roll}} \cdot \cos \alpha, \quad (3.4)$$

wobei g die Erdbeschleunigung, m_{ges} die Fahrzeuggesamtmasse inkl. Beladung, c_{roll} der Rollwiderstandsbeiwert und α der Steigungswinkel sind. Die Steigungswiderstandskraft F_{Steig} berechnet sich nach der Formel:

$$F_{\text{Steig}} = g \cdot m_{\text{ges}} \cdot \sin \alpha. \quad (3.5)$$

Die Beschleunigungswiderstandskraft F_{B} wird unter Benutzung der durch das Fahrermodell vorgegebenen Beschleunigung a_{soll} berechnet und berücksichtigt die translatorischen und rotatorischen Anteile:

$$F_{\text{B}} = a_{\text{soll}} \cdot \left(m_{\text{ges}} + \frac{m_{\text{Rad}} \cdot r_{\text{Rad}}^2 + J_{\text{M}} \cdot i_{\text{Getr}}^2}{r_{\text{Rad}}^2} \right). \quad (3.6)$$

Dabei werden für den rotatorischen Anteil der Beschleunigungswiderstandskraft die Masse der Räder m_{Rad} und ihr dynamischer Radius r_{Rad} sowie das Trägheitsmoment der elektrischen Maschine J_{M} und die Getriebeübersetzung i_{Getr} berücksichtigt. Weitere Details zu den genutzten Formeln für Fahrwiderstände können z.B. in [74]–[76] gefunden werden.

Das Antriebsstrangmodell bildet die in Abbildung 3-3 dargestellte Topologie eines batteriegetriebenen LKW ab. Die Batterie ist direkt an einen Traktionsumrichter angeschlossen, der mit einer elektrischen Antriebsmaschine verbunden ist. Die Antriebsmaschine ist über ein Getriebe mechanisch mit der angetriebenen Radachse verbunden.

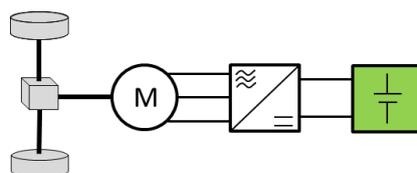


Abbildung 3-3: Die modellierte Topologie eines batteriegetriebenen LKW

Das Antriebsstrangmodell berechnet die Batterieanfrageleistung $P_{\text{Bat, soll}}$ aus der Soll-Leistung $P_{\text{FW, soll}}$ zum Überwinden der Fahrwiderstände unter Verwendung der Wirkungsgrade des Getriebes η_{Getr} und der Antriebsmaschine inklusive des Traktionsumrichters η_{MU} sowie der Nebenverbraucherleistung P_{NV} nach der Formel:

$$P_{\text{Bat, soll}} = 1/\eta_{\text{Getr}} \cdot 1/\eta_{\text{MU}} \cdot P_{\text{FW, soll}} + P_{\text{NV}} \quad (3.7)$$

Das Batteriemodell bestimmt die aktuell mögliche Ausgangsleistung $P_{\text{Bat, ist}}$ der Batterie in Abhängigkeit von Zellparametern, Ladezustand, Temperatur und aktuellem Alterungszustand. Die Batterieanfrageleistung $P_{\text{Bat, soll}}$ wird auf eine einzelne Zelle skaliert, die mit einem thermisch-elektrischen Modell der Zelle simuliert wird. So wird eine detaillierte Simulation der Batterie durchgeführt und Spannungs-, Strom-, Ladezustands- und Temperaturprofile der Batterie für die simulierte Strecke erstellt, die im Anschluss an die Simulation durch ein Alterungsmodell ausgewertet werden. Eine ausführlichere Beschreibung des Batteriemodells ist im Kapitel 3.2.2 zu finden.

Nachdem im Batteriemodell die aktuelle Ausgangsleistung $P_{\text{Bat, ist}}$ bestimmt wurde, wird diese unter Verwendung der Formel (3.7) in die verfügbare Leistung $P_{\text{FW, ist}}$ zum Überwinden der Fahrwiderstände im inversen Antriebsstrangmodell (Abbildung 3-2) umgerechnet, wobei die Soll- durch Ist-Größen ersetzt werden. Schließlich wird die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit v_{ist} mit Hilfe der Formeln (3.2) - (3.6) und der zum Überwinden der Fahrwiderstände verfügbaren Leistung $P_{\text{FW, ist}}$ berechnet und an das Streckenmodell weitergegeben.

3.2.2 Parametrierung des Simulationsmodells eines batteriegetriebenen LKW

Das Fahrzeugmodell des batteriegetriebenen LKW wurde für einen schweren Sattelzug mit einem Gesamtgewicht von bis zu 40 t parametrierung. Da der Roll- und Luftwiderstand den Energieverbrauch eines Fahrzeugs stark beeinflussen [76], werden zwei LKW-Konfigurationen mit unterschiedlichen Fahrwiderstandsbeiwerten entsprechend der Tabelle 3-2 betrachtet. Die genutzten Fahrwerte für Roll- und Luftwiderstand entsprechen den unteren bzw. mittleren Werten aus den Wertebereichen, die in [74], [77] angegeben sind.

LKW-Konfiguration	Luftwiderstandsbeiwert c_w	Rollwiderstandsbeiwert c_{roll}
Niedrige Fahrwiderstände	0.48	0.004
Mittlere Fahrwiderstände	0.63	0.007

Tabelle 3-2: Parameter für Fahrwiderstandsbeiwerte der parametrierung LKW

Das Fahrermodell enthält die Beschleunigungs- und Bremskonstanten für das Fahrzeug. Der Beschleunigungswert ist abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit wie in Abbildung 3-4 dargestellt. Diese Werte entsprechen dem Beschleunigungsvermögen eines konventionellen voll beladenen 40 t schweren Sattelzugs entnommen aus [76] und multipliziert mit einem Faktor 0,7, weil angenommen wird, dass der Sattelzug unter normalen Fahrumständen nicht

mit maximaler Beschleunigung fährt. Die Abbremsung wurde als konstant mit $0,9 \text{ m/s}^2$ angenommen. Das Fahrermodell beschleunigt oder bremst das Fahrzeug, um die vorgegebene Referenz-geschwindigkeit einzuhalten.

Die Nebenverbraucher eines konventionell angetriebenen LKW müssen in einem vollelektrischen batteriegetriebenen LKW ebenfalls elektrisch angetrieben werden. Dies bedeutet insbesondere einen Leistungsbedarf durch Lenkhilfepumpe, Bremskraftverstärker, Klimaanlage etc. [50], der auch von der Batterie gedeckt werden muss und kontinuierlich während der Fahrt anfallen kann wie z.B. bei der Klimaanlage. In dieser Arbeit wird vereinfachend eine konstante Leistung für Nebenverbraucher von 5 kW angenommen, die sich aus der Leistungsaufnahme der Beispielgeräte der Lenkhilfepumpe und Klimaanlage [50] einerseits und der installierten Leistung des Stromgenerators in konventionellen LKW (zum Beispiel [78], [79]) zusammensetzt. Zwar wird in Elektrobussen oft eine dieselbetriebene Heizung eingesetzt, weil der Heizenergiebedarf in Stadtbussen mit großem Fahrgastraum und vielen Haltestellen relativ hoch ist. Bei einem batteriegetriebenen LKW muss nur die Fahrerkabine beheizt werden, sodass der Heizenergiebedarf im Vergleich zur Traktionsenergie gering ist (vgl. Kapitel 4.2).

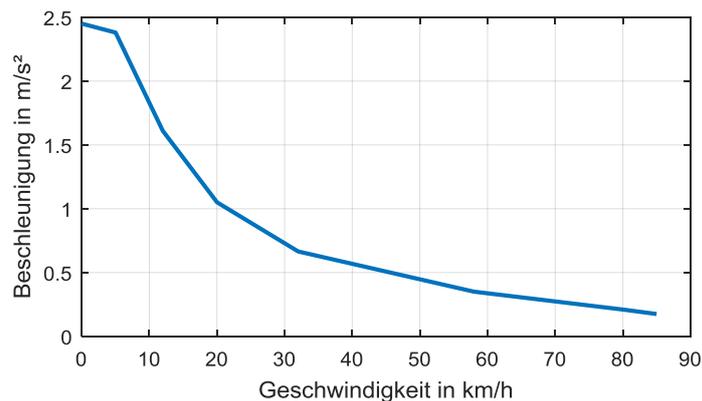


Abbildung 3-4: Maximale Beschleunigung des voll beladenen Sattelzugs in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit

Die elektrische Antriebsmaschine und der dazugehörige Traktionsumrichter sind als ein Wirkungsgradkennfeld mit Abhängigkeit von Rotordrehzahl und Drehmoment implementiert. Die gewählte dreiphasige permanenterrregte Synchronmaschine (Tabelle 3-3) ist aufgrund ihrer kompakten Bauart für den Einsatz in Elektrofahrzeugen geeignet und bietet eine Dauerleistung von 188 kW [80]. Um den Leistungsanforderungen eines schweren LKW gerecht zu werden, sind zwei dieser Maschinen im Antriebsstrangmodell implementiert, sodass eine Gesamtdauerleistung von 376 kW zur Verfügung steht. Um das insbesondere beim Anfahren erforderliche hohe Drehmoment zu erhalten, ist im Antriebsstrangmodell ein Getriebe zwischen Antriebsmaschine und Antriebswelle implementiert. Dabei sind die Übersetzungen einzelner Stufen so gewählt, dass die Antriebsmaschine bei optimaler Drehzahl arbeitet und das erforderliche Drehmoment aufbringt. Der Wirkungsgrad des Getriebes ist zu 94% gewählt, was den durchschnittlichen Werten für Getriebewirkungsgrade in [75] entspricht.

Parameter	Wert
Max. Drehzahl	5000 U/min
Nenndrehmoment	520 Nm
Nennleistung	188 kW
Max. Wirkungsgrad	96,2 %
Abmessungen	244 mm x 380 mm
Gewicht	82 kg

Tabelle 3-3: Auszug aus dem Datenblatt der gewählten Antriebsmaschine [80]

Das genutzte ganzheitliche Simulationsmodell einer Batteriezelle besteht aus einem thermisch-elektrischen Modell sowie einem Alterungsmodell und ist im Detail in [81] beschrieben. Das elektrische Zellmodell ist impedanzbasiert und beschreibt ein Ersatzschaltbild für die Zelle bestehend aus einem Serienwiderstand, zwei ZARC-Elementen und einer Ruhespannungsquelle. Über das Stromsignal ist das elektrische Modell mit dem thermischen Modell verknüpft, das aus ohmschen Verlusten und Wärmeübergangswiderstand für verschiedene Kühlungsoptionen die Zelltemperatur bestimmt. Das Alterungsmodell berechnet die kalendarische und zyklische Alterung in Abhängigkeit von Strom, Spannung, Temperatur und Ladezustand mit Hilfe der aus beschleunigten Zellenalterungstests gewonnenen Alterungsfunktionen. Die kalendarische und zyklische Alterung werden schließlich addiert, um die gesamte Zellalterung zu bestimmen.

Das Zellmodell ist für die in Tabelle 3-4 angegebenen Zellen parametrisiert. Die Zellen haben zwar die gleiche chemische Zusammensetzung, unterscheiden sich aber in ihrem Zelltyp, Nennkapazität, maximalen Strömen und erzielbaren Zyklenzahlen. So ist die Zelle HEa eine auf hohe Energiedichte ausgelegte Zelle, die im Elektroautomobilbereich verwendet wird [82]. Die in dieser Arbeit gewählte Bezeichnung HEa steht dabei für high energy und automotive. Die Zelle HEc (für high energy und consumer) ist dagegen eine kleinere Rundzelle [81], die vorwiegend im Consumerelektronik-Bereich verwendet wird. Bei der Zelle HPa (für high power und automotive) handelt es sich um eine für hohe Leistungen ausgelegte Zelle mit einer geringeren Energiedichte, die typischerweise in hybriden Antriebssträngen eingesetzt werden [83].

Die angegebenen Vollzyklenzahlen wurden mit dem oben beschriebenen Zellmodell bei Umgebungstemperatur von 15 °C und Stromrate von 1 C ermittelt. Als Kriterium für das Ende der Lebensdauer wurden 80 % Restkapazität oder eine Verdopplung des Innenwiderstands definiert. Die erzielten Zyklenzahlen sollen an dieser Stelle die unterschiedliche zyklische Lebensdauer der Zellen zeigen und die Annahmen für Batteriepackkosten mit diesen Zellen begründen. Die sehr niedrige Vollzyklenzahl der Zelle HEc verdoppelt sich bei Teilzyklisierung dieser Zelle mit 50 % Entladetiefe, sodass die äquivalente Vollzyklenzahl auf 1.000 Zyklen steigt. Die Teilzyklisierung ist insbesondere für Hybridfahrzeuge charakteristisch. Die sehr hohe Zyklenzahl bei der Hochleistungszelle ist auf die relativ geringe Strombelastung von 1 C zurückzuführen. In der Praxis würde diese Zelle

bei diesen Betriebsbedingungen eher kalendarisch als zyklisch altern. Ausgehend von den aktuellen Batteriekosten [43] und eigenen Annahmen basierend auf der Zyklenzahl sind die Batteriepackkosten definiert und in Tabelle 3-4 angegeben.

Bezeichnung	Zelle HEa	Zelle HEc	Zelle HPa
Zelltyp	Hochenergiezelle	Hochenergiezelle	Hochleistungszelle
Gehäuseform	Pouch Bag	18650 Rundzelle	Pouch Bag
Zellchemie	Li(NiMnCo)O ₂	Li(NiMnCo)O ₂	Li(NiMnCo)O ₂
Kapazität	10 Ah	2,15 Ah	6 Ah
Nennspannung	3,6 V	3,6 V	3,6 V
Max. Laderate	2 C	1 C	5 C
Max. Entladerate	2 C	3 C	20 C
Vollzyklenzahl (15 °C, 1 C)	6.500 Vollzyklen	500 Vollzyklen	20.000 Vollzyklen
Kostenannahme Batteriepack	300 €/kWh	200 €/kWh	400 €/kWh

Tabelle 3-4: Parameter der im Batteriemodell genutzten Zellen und die angenommenen Kosten eines Batteriepacks mit jeweiligen Zellen

3.3 Oberleitungsversorgter LKW

Bei dem oberleitungsversorgten LKW dient die Oberleitung als die Hauptquelle für die Antriebsenergie. Ferner können im Antriebsstrang je nach Konfiguration eine Traktionsbatterie und ggf. ein Dieselmotor eingebaut werden, die zum Überbrücken der oberleitungsfreien Abschnitte genutzt werden. Die Batterie kann außerdem auch zum Ausgleich der hohen Antriebsleistungsanfragen oder zum kurzzeitigen Abbügeln des Fahrzeugs von der Oberleitung (z.B. bei Überholmanöver) genutzt werden.

Die Topologie des modellierten oberleitungsversorgten LKW ist in Abbildung 3-5 gezeigt. Im Gegensatz zu dem zuvor modellierten batteriegetriebenen LKW (Abbildung 3-3) befinden sich im Antriebsstrang des LKW zusätzlich ein Stromabnehmer für die Energieentnahme aus der Oberleitung und ein Umrichter für die Batterie. Der Batterieumrichter dient der Anbindung der Batterie mit einer variablen, ladezustandsabhängigen Spannung an den Zwischenkreis mit weitgehend konstanter Spannung. Der Stromabnehmer ist dagegen ohne Umrichter an den Zwischenkreis angebunden (in Anlehnung an die Topologie im

Forschungsprojekt ENUBA [6]), weil die Fahrdrachtspannung in Oberleitungsenergieversorgungssystemen auf einen konstanten Wert geregelt wird.

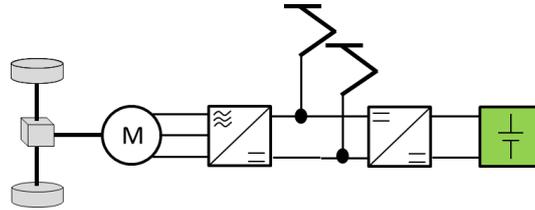


Abbildung 3-5: Antriebstopologie eines Oberleitungs-LKW mit Batterie und Stromabnehmer

Zum Modellieren des oberleitungsversorgten LKW wurde das Simulationsmodell (Abbildung 3-2) um eine externe Leistungsquelle erweitert, die die Oberleitung repräsentiert und auch während der Fahrt Energie liefern kann. Die Batterieanfrageleistung $P_{\text{Bat, soll}}$ berechnet sich nun aus der Leistungsbilanz des Spannungszwischenkreises:

$$\eta_{\text{Pan}} \cdot P_{\text{OL, max}} + \eta_{\text{BU}} \cdot P_{\text{Bat, soll}} = 1/\eta_{\text{Getr}} \cdot 1/\eta_{\text{MU}} \cdot P_{\text{FW, soll}} + P_{\text{NV}} \cdot \quad (3.8)$$

Diese enthält auf der linken Seite die Leistungsquellen (Batterieleistung $P_{\text{Bat, soll}}$ und die maximal verfügbare Oberleitungsleistung $P_{\text{OL, max}}$) und auf der rechten Seite die Leistungssenken (Antriebsanfrageleistung $P_{\text{FW, soll}}$ und Nebenverbraucherleistung P_{NV}) und berücksichtigt die Wirkungsgrade von Getriebe η_{Getr} , Antriebsmaschine inkl. Traktionsumrichter η_{MU} , Pantograph η_{Pan} Batterieumrichter η_{BU} .

Je nach Betriebssituation können die Leistungsquellen aber auch als Leistungssenken fungieren und umgekehrt. So kann z.B. beim Bremsen die Antriebsmaschine Bremsenergie in den Zwischenkreis einspeisen und die Batterie diese aufnehmen. Deshalb muss jeweils der reziproke Wirkungsgrad der Komponente in der Formel (3.8) benutzt werden, wenn die Leistung der Komponente ihr Vorzeichen wechselt.

Aufbauend auf der Leistungsbilanz (3.8) wurde für diese Antriebsvariante ein Energiemanagementsystem implementiert, das die verfügbare Oberleitungsleistung zum Antrieb des LKW nutzt und die ggf. überschüssige Oberleitungsleistung zum Laden der Batterie verwendet. Ist die geforderte Antriebsleistung größer als die verfügbare Oberleitungsleistung (z.B. bei Steigungen oder beim Beschleunigen), so kann die Batterie die fehlende Leistung ausgleichen. Während des Bremsvorgangs wird die Energie in die Batterie zurückgespeist. Ist diese komplett geladen, wird die Energie in die Oberleitung zurückgespeist. Da auf Autobahnen eine hohe Zahl von LKW verkehrt, kann die Bremsenergie über Oberleitungen von einem bremsenden LKW auf andere LKW übertragen werden. Daher wird in dem Modell angenommen, dass die Oberleitung die Bremsenergie immer aufnehmen kann.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den alternativen LKW-Technologien zu erhalten, wird das Modell des oberleitungsversorgten LKW entsprechend dem Modell des batteriegetriebenen LKW (Kapitel 3.2.2) parametrisiert. Für den zusätzlichen Batterieumrichter

wird ein konstanter Wirkungsgrad von 95 % angenommen. Der Wirkungsgrad des Stromabnehmers wird basierend auf Messergebnissen in [6] zu 99 % angenommen.

3.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW

In diesem Kapitel wird auf die Modellierung der Hybrid-LKW eingegangen, die als serieller Hybrid konfiguriert sind. Die modellierte Topologie eines seriellen Hybrid-LKW ist in Abbildung 3-6 gezeigt und enthält zusätzlich zu den Komponenten eines oberleitungsversorgten LKW einen Dieselmotor (D) und einen Generator (G) mit dazugehörigem Gleichrichter. Der Dieselmotor ist dabei über einen Generator und Umrichter an den Zwischenkreis angeschlossen.

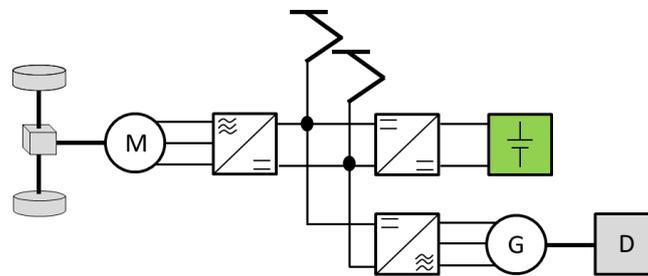


Abbildung 3-6: Die modellierte Topologie eines Serienhybrid-LKW

Das Simulationsmodell des Antriebsstrangs eines oberleitungsversorgten LKW (Kapitel 3.3) wurde entsprechend um ein Modell des Dieselmotors und Generators erweitert, so dass sich die folgende Leistungsbilanz am elektrischen Zwischenkreis ergibt:

$$\eta_P \cdot P_{OL, \max} + \eta_G \cdot P_{D, \text{soll}} + \eta_{BU} \cdot P_{Bat, \text{soll}} = 1/\eta_{Getr} \cdot 1/\eta_{MU} \cdot P_{FW, \text{soll}} + P_{NV}, \quad (3.9)$$

wobei $P_{D, \text{soll}}$ die Soll-Leistung des Dieselmotors und η_G der Wirkungsgrad des Generators inklusive des Gleichrichters ist.

Das Energiemanagement des Serienhybrid-LKW wurde so implementiert, dass längere oberleitungsfreie Strecken mit dem Dieselmotor überbrückt werden können. Der Dieselmotor wird eingeschaltet, wenn keine Oberleitung vorhanden ist und SOC der Batterie unter 10 % ist. Diese Betriebsstrategie sowie die gewählten SOC-Grenzen sind in Abbildung 3-7 gezeigt. So wird der Batterieladezustand zwischen 10 und 20 % gehalten, damit die Batterie vorwiegend aus Oberleitung und nicht aus dem Dieselmotor geladen wird. Auf diese Weise wird die geladene Batterie auf oberleitungsfreien Abschnitten gut ausgenutzt bis die untere SOC-Grenze erreicht ist und erst dann zusammen mit dem Dieselmotor betrieben. Durch die Entkopplung von der mechanischen Achse kann ein Arbeitspunkt des Dieselmotors mit einem hohen Wirkungsgrad und der durchschnittlichen Leistungsanforderung der Strecke gewählt werden. So wird die Energie aus dem Dieselmotor der Antriebsachse zugeführt und die überschüssige Energie zum Laden der Batterie verwendet. Außerdem kann die Batterie den Dieselmotor unterstützen, wenn die angefragte elektrische Antriebsleistung der elektrischen

Maschine höher als die durch den Arbeitspunkt eingestellte Dieselmotorleistung ist. Erreicht der SOC die obere Grenze von 20 % entsprechend der Abbildung 3-7, wird der Dieselmotor wieder ausgeschaltet. Beim Fahren unter Oberleitung wird der Dieselmotor nicht genutzt.

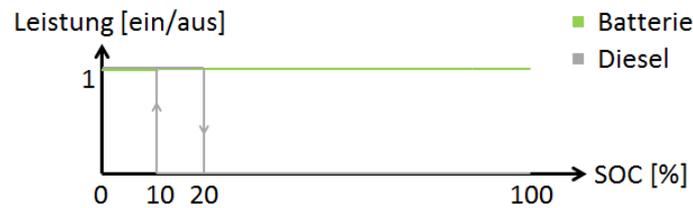


Abbildung 3-7: Betriebsstrategie der Batterie und des Dieselmotors beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW

Ferner wird der Dieselmotor so implementiert, dass seine Auslegung auf Grundlast möglich ist. Bei der Auslegung auf Grundlast übernimmt der Dieselmotor die durchschnittlich benötigte Leistung, wobei er in einem verbrauchsgünstigen Lastpunkt arbeitet. Die Batterie gleicht die Lastspitzen aus [50]. Das Verbrauchskennfeld des generischen Dieselmotors aus Abbildung 3-1 wird auf sein Drehmoment im verbrauchsoptimalen Arbeitspunkt normiert und dann mit dem erforderlichen Drehmoment $M_{\text{opt,neu}}$ skaliert. Dieser ergibt sich aus der durchschnittlich benötigten Leistung P_{ϕ} und der Drehzahl des Motors n_{opt} im verbrauchsoptimalen Arbeitspunkt nach der Formel:

$$M_{\text{opt,neu}} = P_{\phi} / (2 \cdot \pi \cdot n_{\text{opt}}). \quad (3.10)$$

Wenn der Dieselmotor eingeschaltet ist, wird er in diesem verbrauchsoptimalen Arbeitspunkt betrieben. Die genaue Parametrierung des Motors richtet sich also nach der durchschnittlichen Leistungsanforderung der Fahrstrecke und wird daher im Kapitel 4.3.5 angegeben. Der Wirkungsgrad des Generators einschließlich des dazugehörigen Stromgleichrichters wird zu 95 % angenommen.

3.5 Brennstoffzellengetriebener LKW

Der brennstoffzellengetriebene LKW verfügt über eine Brennstoffzelle als Energielieferanten und besitzt außerdem eine Batterie, die Belastungsschwankungen der Brennstoffzelle durch den Antrieb ausgleicht und Bremsenergie aufnehmen und abgeben kann. Die modellierte Topologie eines brennstoffzellengetriebenen LKW ist in Abbildung 3-8 gezeigt.

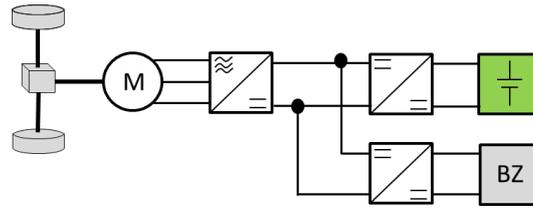


Abbildung 3-8: Antriebstopologie eines brennstoffzellengetriebenen LKW mit Brennstoffzelle (BZ) und Batterie

Bei dieser Topologie kann die Batterie auch die überschüssige Leistung aus dem Zwischenkreis aufnehmen bzw. zusätzliche Leistung bei hoher Last liefern. Somit kann die Brennstoffzelle entlastet werden und bei einer weniger variablen Leistung betrieben werden, wodurch sie einerseits kleiner dimensioniert werden kann und andererseits ihre Lebensdauer verlängert wird. Am Zwischenkreis ergibt sich somit die folgende Leistungsbilanz:

$$\eta_{BZU} \cdot P_{BZ,soll} + \eta_{BU} \cdot P_{Bat,soll} = 1/\eta_{Getr} \cdot 1/\eta_{MU} \cdot P_{FW,soll} + P_{NV}, \quad (3.11)$$

wobei $P_{BZ,soll}$ die angefragte Brennstoffzellenleistung und η_{BZU} der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenumrichters ist.

Um die Vergleichbarkeit des brennstoffzellengetriebenen LKW mit anderen untersuchten LKW-Technologien zu erhalten, wird der brennstoffzellengetriebene LKW entsprechend dem batteriegetriebenen LKW im Kapitel 3.2.2 parametrisiert. Für die neu hinzugekommenen Komponenten der Brennstoffzelle wird ein Modell basierend auf charakteristischen Kennlinien erstellt. Der modellierte Brennstoffzellenstack besteht aus Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen mit einer Gesamtausgangsleistung von 150 kW und wird in Traktionsanwendungen (z.B. Brennstoffzellenhybridbus) verwendet. Er wird über seine charakteristische Strom-Spannungskennlinie modelliert [84], sodass das Brennstoffzellenmodell auf einen vom Energiemanagementsystem vorgegebenen Strom eine Spannungsantwort ausgibt. Der Wasserstoffverbrauch berechnet sich als aktueller Ausgangsstrom der Brennstoffzelle multipliziert mit einem festen Verbrauchsfaktor nach Herstellerangaben. Ferner werden die Nebenverbraucher der Brennstoffzelle, insbesondere der Druckluftkompressor, über ihre stromabhängigen Leistungskennlinien modelliert. Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenumrichters wird konstant zu 95 % angenommen.

Die Betriebsstrategie der Brennstoffzelle und der Batterie eines brennstoffzellengetriebenen LKW wurde so implementiert, dass die Brennstoffzelle die durchschnittliche Leistung des Antriebs und der Nebenverbraucher liefert und die Batterie die Leistungsspitzen ausgleicht. Bei geringer Leistungsabfrage des Antriebsmotors (z.B. bei Fahrt auf flacher Strecke) oder beim Bremsen kann die Batterie die überschüssige Leistung aus dem Zwischenkreis aufnehmen. Die Brennstoffzelle wird eingeschaltet, wenn der SOC der Batterie unter 80 % fällt und ausgeschaltet, wenn der SOC über 95 % steigt (Abbildung 3-9). Durch die gewählten Grenzen wird erreicht, dass die auf durchschnittliche Leistungsanforderung ausgelegte Brennstoffzelle bereits bei hohen SOC eingeschaltet wird und verhindert, dass die Batterie komplett entladen wird und dem Fahrzeug somit eine begrenzte Antriebsleistung zur Verfügung steht.

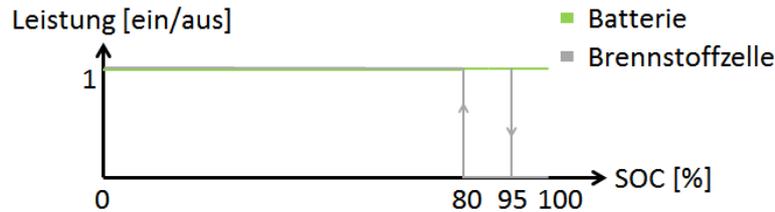


Abbildung 3-9: Betriebsstrategie der Brennstoffzelle und Batterie eines brennstoffzellengetriebenen LKW

3.6 Validierung

In diesem Kapitel werden die vorher beschriebenen Simulationsmodelle der LKW bezüglich des resultierenden Verbrauchs validiert, indem die Ergebnisse mit verschiedenen Literaturquellen verglichen werden. Ferner werden die Geschwindigkeit und die Lastprofile einzelner Komponenten auf ihre Plausibilität geprüft.

Der in der Literatur angegebene Dieserverbrauch konventioneller LKW variiert stark aufgrund unterschiedlicher Parameter der LKW (z.B. Luftwiderstand, Rollwiderstand, Gesamtgewicht) und gefahrener Strecken (z.B. Höhenunterschiede, Anteil der Autobahnen- und Stadtstrecken). Eine Schwierigkeit bei Validierung mit diesen Verbrauchswerten ist, dass die LKW-Parameter oder die Strecken oftmals nicht vollständig angegeben bzw. definiert sind, was eine Anpassung der Simulationsparameter schwierig macht. In Tabelle 3-5 sind einerseits Dieserverbräuche von schweren LKW mit unterschiedlichem Gesamtgewicht und auf unterschiedlichen Strecken aus verschiedenen Literaturquellen zusammengetragen. Andererseits sind die simulierten Dieserverbräuche angegeben, die mithilfe des Simulationsmodells eines konventionellen LKW (Kapitel 3.1) bei möglichst gleichen Bedingungen und unterschiedlichen LKW-Konfigurationen (entsprechend Tabelle 3-2) bestimmt wurden. Im mittleren Abschnitt der Tabelle 3-5 sind die Dieserverbräuche auf durchschnittlichen Autobahnstrecken (mittel) angegeben. Als Vergleich dazu wurden die Dieserverbräuche auf einer Autobahnstrecke mit mittleren Fahrleistungsanforderungen und einem Fahrzeuggesamtgewicht von 39,2 t durchgeführt. Da es sich bei Literaturangaben um Werte aus Verbrauchsermittlungsfahrten zum Vergleich mit anderen Fahrzeugen handelt, wurden niedrige Fahrwiderstände für Fahrzeugparameter angenommen. Der simulierte Dieserverbrauch von 37 l pro 100 km liegt in diesem Fall im angegebenen Bereich der Literaturwerte.

Im unteren Abschnitt der Tabelle 3-5 ist ein Literaturwert für eine schwere Autobahnstrecke angegeben. Leider definiert die Quelle nicht, was eine schwere Strecke in diesem Fall ist, es wird in dieser Arbeit aber von einer Strecke mit einem hohen Verbrauch ausgegangen. Der Verbrauchswert der Vergleichssimulation ist kleiner als der Literaturwert, was z.B. an anderen Fahrzeugparametern liegen kann, die in der Quelle nicht genauer angegeben sind, oder an der gefahrenen Strecke. Der erzielte Simulationswert wird als eine Abschätzung nach unten jedoch als hinreichend genau betrachtet. Im oberen Abschnitt der Tabelle 3-5 sind die

Verbrauchsangaben auf komplett flacher Strecke und auf einer Strecke mit leichten Steigungen angegeben, die im Bereich von 25 bis 27 l pro 100 km liegen. Der Verbrauch in Vergleichssimulationen auf flacher Strecke liegt im Bereich von 22 bis 30 l pro 100 km und variiert in Abhängigkeit von Fahrwiderständen des Fahrzeugs. Da in der Literaturquelle keine genaueren Angaben zu den Fahrzeugparametern gemacht wurden, wird das Ergebnis als hinreichend genau angesehen. Bei leichter Strecke trifft das Simulationsergebnis die Literaturwerte gut bei niedrigen Fahrwiderständen.

Literaturdaten				Simulation			
Verbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	Quelle	Verbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	LKW-Konfiguration
27 l / 100 km	Komplett flach	27,5 t	[85]	22 l / 100 km 30 l / 100 km	Komplett flach	27,5 t	Niedrige Fahrwiderstände Mittlere Fahrwiderstände
25,1 l / 100 km	Leicht	40 t	[86]	25 l / 100 km	Leicht	40 t	Niedrige Fahrwiderstände
26,2 l / 100 km	Leicht	39,2 t	[87]				
34,5 l / 100 km	Mittel	39,2 t	[87]	37 l / 100 km	Mittel	39,2 t	Niedrige Fahrwiderstände
37,7 l / 100 km	Mittel	40 t	[86]				
47 l / 100 km	Schwer	39,2 t	[87]	43 l / 100 km	Schwer	39,2 t	Niedrige Fahrwiderstände

Tabelle 3-5: Literaturwerte des Dieserverbrauchs bei unterschiedlichen Strecken und Gesamtgewichten des Fahrzeugs sowie Simulationsergebnisse des Dieserverbrauchs

Der Energieverbrauch eines oberleitungsversorgten LKW wird in dem entwickelten Simulationsmodell ab dem Stromabnehmer angegeben. Nach der Abbildung 3-5 läuft der Energiefluss von dem Zwischenkreis über den Traktionsumrichter, elektrische Maschine und Getriebe zu den Rädern. Auch bei dem batteriegetriebenen LKW läuft der Energiefluss ab dem Zwischenkreis (in diesem Fall zwischen Batterie und Traktionsumrichter) über den gleichen Pfad (Abbildung 3-3). Daher wird im Folgenden der Energieverbrauch ab dem Zwischenkreis für den oberleitungsversorgten und den batteriegetriebenen LKW validiert.

Als Vergleichswerte werden die Energieverbrauchswerte der oberleitungsgetriebenen Serienhybrid-LKW genommen, die im Forschungsprojekt ENUBA 2 aufgebaut wurden [6]. Der zuerst aufgebaute LKW in Form eines Gliederzuges erzielte einen spezifischen Energieverbrauch von 1,3 kWh/km (Tabelle 3-6) bei Fahrten auf den Autobahnen A1, A2, A3 und A7. Dabei wurde sein Energieverbrauch ausgehend vom Zwischenkreis gemessen, sodass der Wirkungsgrad von Dieselmotor und Generator nicht in den angegebenen Energieverbrauchswert einfließen. Weil sich die genannten Autobahnen hauptsächlich im flacheren Nordteil Deutschlands befinden, wird eine leichte Strecke mit geringen Steigungen

angenommen. Für die Vergleichssimulation werden mittlere Fahrwiderstände angenommen, da bei einem Gliederzug im Allgemeinen der Luftwiderstand höher als bei einem Sattelzug ist. Der Energieverbrauchswert der Simulation trifft in diesem Fall relativ genau den Literaturwert und liegt bei 1,32 kWh/km.

Der andere im Forschungsprojekt ENUBA 2 aufgebaute LKW ist ein Sattelzug, für den bei Messfahrten ein Energieverbrauch von 1,3 kWh/km ab dem Zwischenkreis ermittelt wurde [6]. Da in der Quelle keine Angaben zur Strecke gemacht wurden, wird für die Vergleichssimulation eine mittlere Autobahnstrecke angenommen und für den Sattelzug die LKW-Konfiguration mit niedrigen Fahrwiderständen gewählt. In diesem Fall entspricht der simulierte Energieverbrauch ebenfalls dem gemessenen Wert aus der Literatur.

Literaturdaten				Simulation			
Verbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	Quelle	Verbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	LKW-Konfiguration
1,3 kWh/km	Leicht	28,5 t	[6]	1,32 kWh/km	Leicht	28,5 t	Mittlere Fahrwiderstände
1,3 kWh/km	-	40 t	[6]	1,29 kWh/km	Mittel	40 t	Niedrige Fahrwiderstände

Tabelle 3-6: Energieverbrauch der oberleitungsversorgten LKW aus Literatur und Simulation

Zur Validierung des Simulationsmodells eines oberleitungsgetriebenen Serienhybrid-LKW werden sein Dieserverbrauch im verbrennungsmotorischen Fahrmodus und sein Energieverbrauch im elektrischen Fahrmodus getrennt betrachtet. Die Fahrt im elektrischen Modus findet nach der im Kapitel 3.4 definierten Betriebsstrategie unter Oberleitung statt und solange der Batterie-SOC von 15 % nicht unterschritten wurde. Die restliche Fahrt findet im verbrennungsmotorischen Modus statt. Bei der simulierten Strecke wird ein elektrifizierter Anteil von 60 % angenommen und zunächst eine mittlere Autobahnstrecke betrachtet (Tabelle 3-7). Der simulierte Dieserverbrauch von 25,9 l pro 100 km liegt im Bereich des Dieserverbrauchs auf leichter Strecke (vgl. Tabelle 3-5) und der simulierte Energieverbrauch von 1,49 kWh/km liegt über jenem für mittlere Strecken (vgl. Tabelle 3-6). Dies ist jedoch durch die Verteilung der elektrifizierten Abschnitte auf den topologisch anspruchsvolleren Teil der Strecke zu erklären. Die oberleitungsfreien Abschnitte liegen hierbei in einem weniger anspruchsvollen Teil der Strecke.

Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde ferner eine flache Strecke mit gleichen Oberleitungsabschnitten simuliert. Dabei wurde das Gesamtgewicht des Fahrzeugs auf 27,5 t reduziert, um eine bessere Vergleichbarkeit mit zuvor durchgeführten Simulationen zu erreichen. In diesem Fall liegt der Dieserverbrauch von 21,6 l pro 100 km im Bereich der Simulationsergebnisse für flache Strecken (vgl. Tabelle 3-5).

Simulation				
Energieverbrauch	Dieserverbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	LKW-Konfiguration
1,49 kWh/km	25,9 l / 100 km	Mittel	40 t	Niedrige Fahrwiderstände
0,90 kWh/km	21,6 l / 100 km	Flach	27,5 t	Niedrige Fahrwiderstände

Tabelle 3-7: Simulierter Energie- und Dieserverbrauch eines oberleitungsversorgten Serienhybrid-LKW

Zur Validierung des Simulationsmodells eines brennstoffzellengetriebenen LKW wird der simulierte Wasserstoffverbrauch mit dem Wasserstoffverbrauch aus zwei unterschiedlichen Literaturquellen verglichen (Tabelle 3-8). Der von der Esoro AG aufgebaute Brennstoffzellen-LKW in der Form eines Sattelzugs weist laut Herstellerangaben einen Wasserstoffverbrauch von 7,5 bis 8 kg pro 100 km auf [8]. Als Vergleichswert wird ein Brennstoffzellen-LKW mit niedrigen Fahrwiderständen aber mit einem höheren Luftwiderstandsbeiwert für Sattelzüge simuliert. Der resultierende Wasserstoffverbrauch liegt in diesem Fall in dem angegebenen Bereich des Literaturwertes.

Für einen Brennstoffzellen-LKW mit 40 t Gesamtgewicht wird in der von CE Delft und DLR durchgeführten Studie zu alternativen LKW-Antrieben ein Wasserstoffverbrauch von 8,8 kg pro 100 km angenommen [34]. Als Vergleichssimulation wird ein Brennstoffzellen-LKW mit unterschiedlichen LKW-Konfigurationen simuliert. Der Literaturwert liegt in diesem Fall ebenfalls in dem Bereich des simulierten Wasserstoffverbrauchs.

Literaturdaten				Simulation			
Wasserstoffverbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	Quelle	Wasserstoffverbrauch	Strecke	Gesamtgewicht	LKW-Konfiguration
7,5 – 8 kg / 100 km	-	34 t	[8]	7,9 kg / 100 km	Mittel	34 t	Niedrige Fahrwiderstände mit $c_w = 0,6$
8,8 kg / 100 km	Mittel	40 t	[34]	8,1 kg / 100 km 10,6 kg / 100 km	Mittel	40 t	Niedrige Fahrwiderstände Mittlere Fahrwiderstände

Tabelle 3-8: Wasserstoffverbrauch der brennstoffzellengetriebenen LKW aus Literatur und Simulation

4 Dimensionierung der Antriebskomponenten und Infrastruktur

Um die Antriebsstrangkomponenten der untersuchten LKW und die dazugehörige Infrastruktur zu dimensionieren, wird in diesem Kapitel zuerst der durchschnittliche Energieverbrauch dieser LKW auf Autobahnen bestimmt. Auch der Wirkungsgrad und Verluste innerhalb des Antriebsstrangs werden untersucht. Anschließend findet die Dimensionierung der LKW-Komponenten sowie der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur statt. Da für den Betrieb im Güterfernverkehr große Energiemengen benötigt werden, wird ferner die Realisierbarkeit der Integration der Antriebsstrangkomponenten in Fahrzeug bezüglich des Gewichts und Volumens geprüft.

4.1 Durchschnittlicher Energieverbrauch

Um einen durchschnittlichen Energieverbrauch der LKW mit unterschiedlichen Antriebsstrangtechnologien zu bestimmen, werden ihre Fahrten mit dem im vorhergehenden Kapitel entwickelten Simulationsmodell auf den wichtigsten bundesdeutschen Autobahnen A1 bis A9 simuliert. Die GPS-Koordinaten der Autobahnstrecken sind den Webkartendiensten [88], [89] entnommen und mit den Höhenprofilen aus [90] ergänzt. Da die Autobahnen A1 bis A9 deutschlandweit verteilt sind, ergeben sich auch sehr unterschiedliche Streckentopographien. Die Abbildung 4-1 zeigt beispielhaft die Höhenprofile der Autobahnen A2 und A8 in Fahrtrichtung West. Das Höhenprofil der Autobahn A2, die im nördlichen, eher flachen Teil Deutschlands verläuft, zeigt geringere Höhenunterschiede als das Höhenprofil der Autobahn A8, die im südlichen Teil Deutschlands verläuft. Für die Autobahnen A1, A4 und A8 werden verbindende Landstraßen benutzt, weil diese nicht durchgehend sind.

Um eine Simulation auf den gewählten Strecken durchzuführen, müssen die Fahrzeuge und ihre Antriebskomponenten parametrisiert werden. Es wird also eine Startparametrisierung gewählt, mit welcher der durchschnittliche Energieverbrauch abgeschätzt wird. Das Gesamtgewicht aller LKW wird jeweils auf den maximalen Wert von 40 t gesetzt, sodass der Energieverbrauch der Fahrzeuge unabhängig von ihrem Leergewicht für die maximale Nutzlast bestimmt wird. Die Fahrwiderstandsbeiwerte werden entsprechend der Tabelle 3-2 gewählt. Für den oberleitungsversorgten LKW sowie Serienhybrid-LKW wird die Energieeinspeisung über Oberleitung auf kompletter Strecke angenommen. Dadurch fährt der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW die komplette Strecke im elektrischen Modus und der

Dieselmotorstrang wird nicht benutzt, sodass diese beiden Fahrzeuge den gleichen Energieverbrauch liefern.

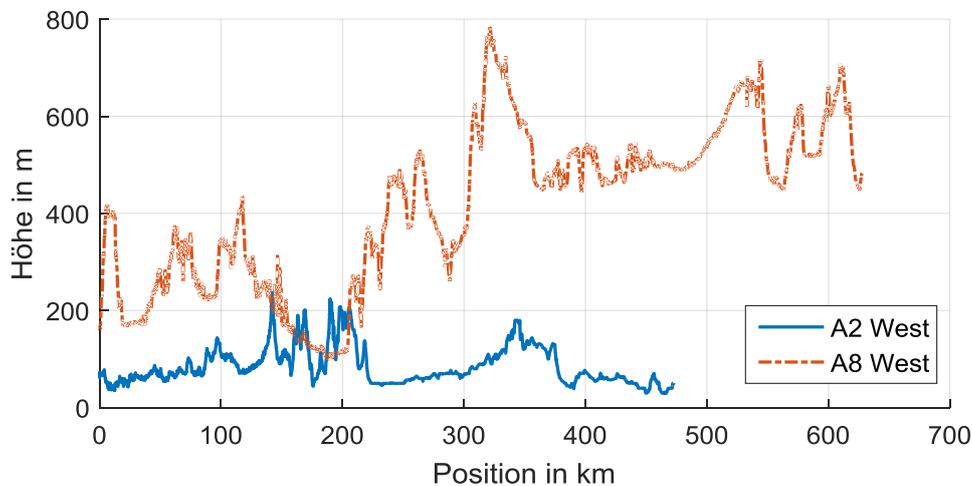


Abbildung 4-1: Höhenprofile der Autobahnstrecken A2 und A8 in Richtung West

Die auf diese Art simulierten Energieverbräuche werden ab Energiequelle am Fahrzeug (Dieseltank, Batterie, Stromabnehmer bzw. Wasserstofftank) bis zu den Rädern bestimmt. Die Abbildung 4-2 zeigt den Energiefluss E für die untersuchten Antriebe von der jeweiligen Energiequelle zu den Rädern. Es ist anzumerken, dass beim oberleitungsversorgten und beim brennstoffzellengetriebenen LKW eine Batterie als zusätzlicher Zwischenspeicher vorhanden ist. In diesem Kapitel wird diese Batterie beim oberleitungsversorgten LKW zu Beginn der Fahrt als vollständig geladen parametrisiert und die maximale Oberleitungsleistung wird zu 400 kW gewählt. Damit werden die Motorleistung sowie die Nebenverbraucher vollständig aus der Oberleitung gedeckt, sodass die Batterie keinen Einfluss auf den ermittelten Energieverbrauch hat. Auch beim regenerativen Bremsen kann die Batterie keine Energie aufnehmen, sondern die Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist. Bei dem batteriegetriebenen LKW wird die Kapazitätsbegrenzung der Batterie in diesem Kapitel aufgehoben, um den spezifischen Energieverbrauch auf beliebig langer Strecke zu ermitteln.

Beim brennstoffzellengetriebenen LKW dient die Batterie u.a. zur Leistungsaddition mit der Brennstoffzellenausgangsleistung und zum Aufnehmen der Bremsenergie. Deswegen kann die Batterie bei der Energieverbrauchsberechnung nicht vernachlässigt werden. Die Startparametrierung der Batteriekapazität wird zu 100 kWh gewählt. Die Brennstoffzelle wird konstant mit ihrer Nennleistung von 150 kW betrieben. Verschiedene Auslegungen der Brennstoffzelle und Batterie werden in Kapitel 4.3.5 betrachtet. Die Tabelle 4-1 fasst noch einmal alle gewählten Startparameter zur Bestimmung des durchschnittlichen Energieverbrauchs zusammen.

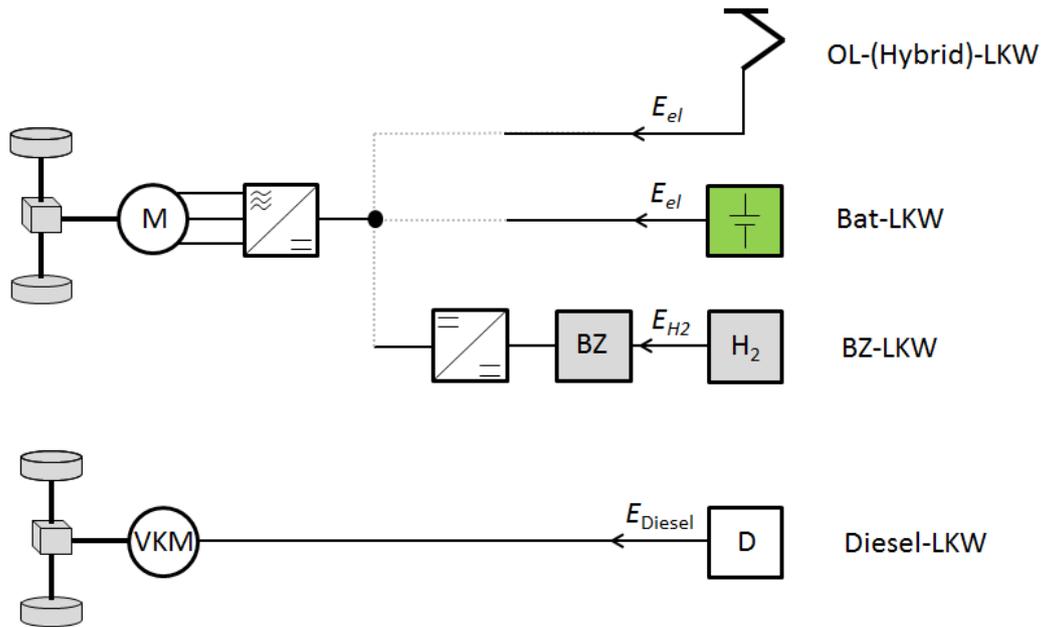


Abbildung 4-2: Energiefluss E ab Energiequelle zum Rad bei unterschiedlichen Antriebssträngen. Die gestrichelten Linien verbinden den jeweiligen Teil des Antriebs eines alternativen LKW mit dem für diese LKW identischen Teil des Antriebsstrangs aus elektrischer Maschine samt Umrichter und mechanischer Achse.

	Diesel-LKW	Bat-LKW	OL-(Hybrid)-LKW	BZ-LKW
Fahrwiderstandsbeiwerte (entsprechend Tabelle 3-2)		Niedrige bzw. mittlere Fahrwiderstände		
Gesamtgewicht	40 t	40 t	40 t	40 t
Max. Leistung der Oberleitung			400 kW	
Batteriekapazität				100 kWh
Start-SOC		100 %	100 %	50 %

Tabelle 4-1: Startparameter zur Bestimmung des durchschnittlichen Energieverbrauchs

Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 zeigen die spezifischen Energieverbräuche der betrachteten LKW-Technologien nach Autobahnnummer und Fahrtrichtung für die niedrigen bzw. mittleren Fahrwiderstände. Die Dieselverbräuche wurden mit dem volumenbezogenen unteren Heizwert des Diesels von 9,64 kWh/l [91] in den äquivalenten Energieverbrauch umgerechnet. Für Wasserstoff wurde der äquivalente Energieverbrauch mit dem unteren Heizwert von 33,3 kWh/kg [92] berechnet.

Die spezifischen Energieverbräuche variieren deutlich in Abhängigkeit von dem LKW-Antrieb, dem Höhenprofil der Strecken und den Fahrwiderständen der Fahrzeuge. So variiert der Energieverbrauch des batteriegetriebenen bzw. des oberleitungsversorgten LKW von 1,09 kWh/km auf der Autobahn A2 in Fahrtrichtung West für niedrige Fahrwiderstände bis hin zu 2,04 kWh/km auf der Autobahn A8 in Fahrtrichtung West für mittlere Fahrwiderstände. Erwartungsgemäß erzielen auch der Diesel-LKW und der brennstoffzellengetriebene LKW die niedrigsten bzw. die höchsten Energieverbräuche auf diesen Strecken, was auf die Höhenprofile dieser Strecken zurückzuführen ist. Aus den gezeigten Ergebnissen ist auch direkt ersichtlich, dass der Diesel-LKW unabhängig von der Strecke die höchsten Energieverbräuche und der batteriegetriebene bzw. der oberleitungsversorgte LKW die niedrigsten Verbräuche erzielen. Der batteriegetriebene LKW und der oberleitungsversorgte LKW erzielen dabei den gleichen Verbrauch, weil der Energiefluss ab Energiequelle die gleichen Komponenten durchläuft (Abbildung 4-2).

Im Durchschnitt über alle Strecken erzielt der batteriegetriebene bzw. der oberleitungsversorgte LKW einen spezifischen Energieverbrauch von ca. 1,33 kWh/km bei niedrigen Fahrwiderständen und 1,83 kWh/km bei mittleren Fahrwiderständen. Der um ca. 28 % geringere Energieverbrauch bei niedrigeren Fahrwiderständen zeigt ihren wichtigen Einfluss. Ein geringer Luftwiderstand kann zum Beispiel durch Seitenverkleidungen und Dachspoiler und ein geringer Rollwiderstand durch Nutzung von energiesparenden Reifen sowie regelmäßige Prüfung des Reifendrucks erreicht werden [74]. Der Diesel-LKW erreicht einen durchschnittlichen Verbrauch von ca. 3,89 kWh/km bei niedrigen Fahrwiderständen und 4,68 kWh/km bei mittleren Fahrwiderständen. Diese Verbräuche sind um mindestens Faktor 2,5 höher als beim batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW. Der brennstoffzellengetriebene LKW liegt mit 2,68 kWh/km bei niedrigen Fahrwiderständen und mit 3,5 kWh/km bei mittleren Fahrwiderständen im Mittelfeld.

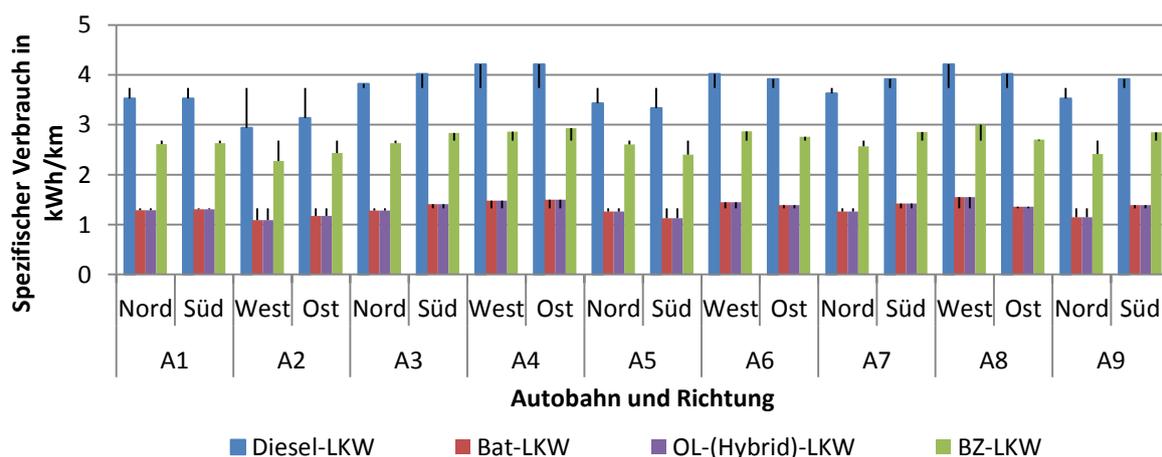


Abbildung 4-3: Spezifische Energieverbräuche unterschiedlicher LKW-Typen bei geringen Fahrwiderständen. Die schwarzen Balken geben die Abweichung vom durchschnittlichen Energieverbrauch des jeweiligen LKW-Typs auf den untersuchten Autobahnen an, die aufgrund der Streckentopographie zustande kommt.

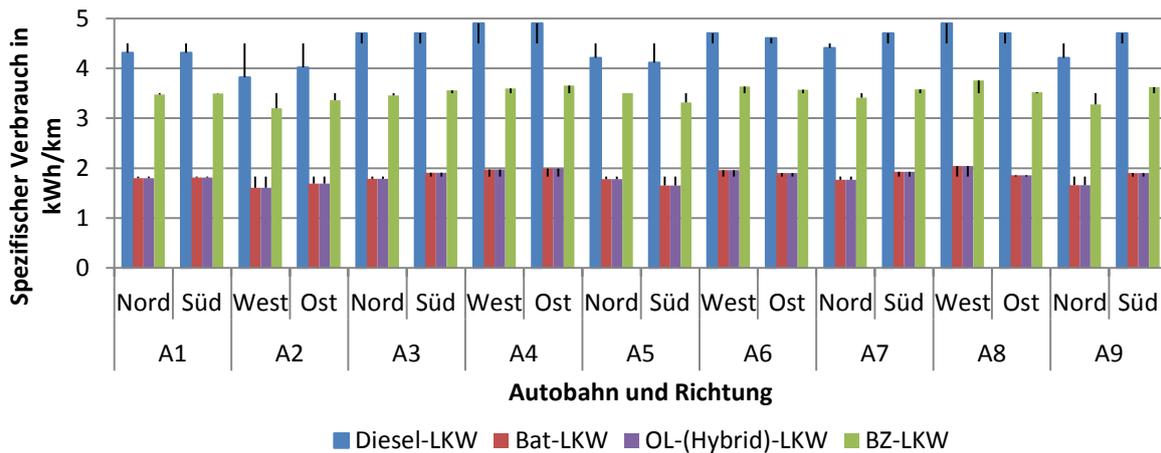


Abbildung 4-4: Spezifische Energieverbräuche unterschiedlicher LKW-Typen bei mittleren Fahrwiderständen. Die schwarzen Balken geben die Abweichung vom durchschnittlichen Energieverbrauch des jeweiligen LKW-Typs auf den untersuchten Autobahnen an, die aufgrund der Streckentopographie zustande kommt.

4.2 Wirkungsgrad der Fahrzeuge

Die im vorhergehenden Kapitel gezeigten Energieverbräuche der Fahrzeuge basieren auf dem jeweiligen Wirkungsgrad des Antriebes. In diesem Kapitel werden daher die Verluste der Antriebsstrangkomponenten sowie die Gesamtwirkungsgrade des Antriebs von der Energiequelle im Fahrzeug bis zu den Rädern thematisiert. Die Abbildung 4-5 zeigt die Verluste einzelner Antriebsstrangkomponenten und die Nutzenergien, die an die Räder und an die Nebenverbraucher des Fahrzeugs abgegeben werden. Die Werte wurden für die Strecke auf der Autobahn A7 in Fahrtrichtung Nord ermittelt, die einen ungefähr durchschnittlichen Energieverbrauch aufweist. Anschließend wurden die Werte auf den äquivalenten Energieverbrauch des Diesel-LKW normiert.

Bei dem Diesel-LKW entstehen die meisten Energieverluste im Dieselmotor, der einen durchschnittlichen Wirkungsgrad für die Bereitstellung mechanischer Energie von etwa 44 % aufweist. Der Anteil der an Nebenverbraucher abgegebenen Energie ist mit ca. 1 % gering und entsprechend den Simulationsannahmen (Kapitel 3.2.2) bei allen Fahrzeugen gleich. Etwa 40 % der im Dieselmotor gespeicherten Energie kommen schließlich bei den Rädern an.

Der batteriegetriebene LKW und der oberleitungsversorgte LKW benötigen nur rund 40 % der Energie eines Diesel-LKW. Die meisten Verluste entstehen hier an der elektrischen Maschine und ihrem Inverter (durchschnittlicher Wirkungsgrad 93 %) sowie am Getriebe (Wirkungsgrad 94 %). Der Energiebedarf an den Rädern ist ca. 10 % geringer als beim Diesel-LKW, weil bei diesen Fahrzeugen durch das regenerative Bremsen ein Teil der Energie wiedergewonnen wird. Die Verlustbestandteile des batteriegetriebenen LKW und

oberleitungsversorgten LKW in Abbildung 4-5 unterscheiden sich im Vorhandensein der Entladeverluste der Batterie (Entladewirkungsgrad 98 %) bzw. der Verluste des Stromabnehmers (Wirkungsgrad 99 %). Es ist anzumerken, dass hier keine Ladeverluste der Batterie berücksichtigt sind, weil sie während des Ladens in Wärmeenergie an der Batterie umgewandelt werden und folglich für die Dimensionierung der Batteriekapazität keine Rolle spielen. Sie werden aber bei dem Energieverbrauch ab Ladestation bei der Lebenszykluskostenrechnung und der Analyse der Umweltauswirkungen in späteren Kapiteln berücksichtigt.

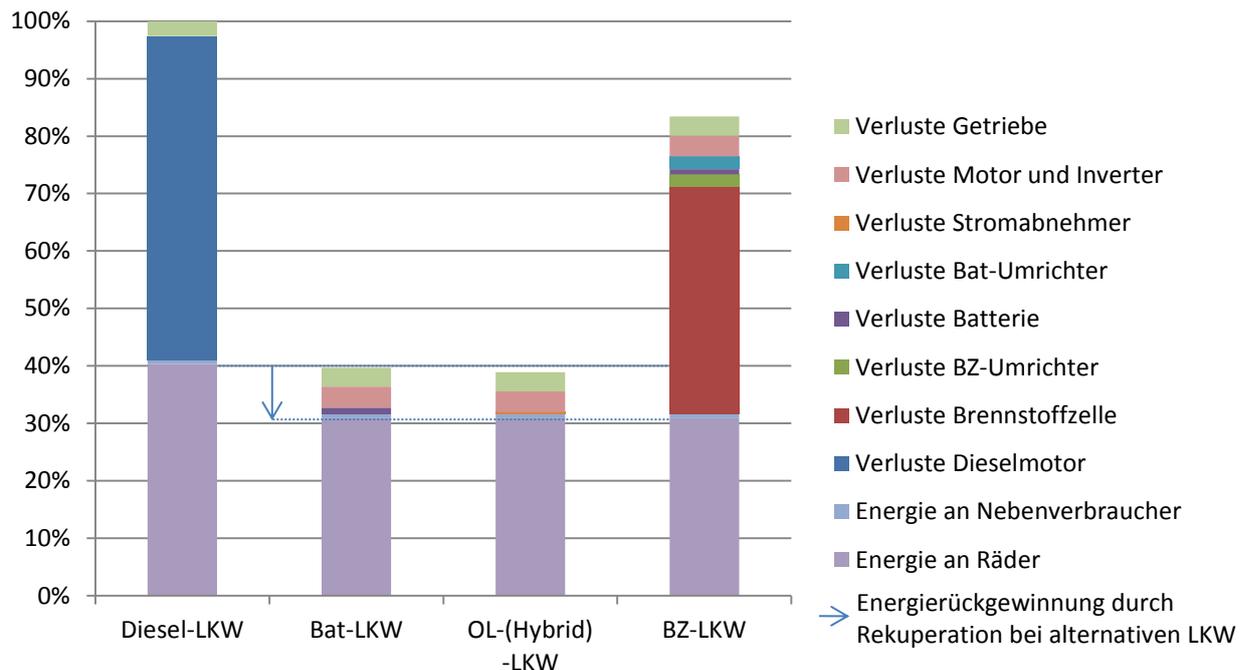


Abbildung 4-5: Verluste einzelner Antriebsstrangkomponenten sowie abgegebene Energie an Nebenverbraucher und Räder.

Der brennstoffzellengetriebene LKW benötigt ca. 83 % der Energie eines Diesel-LKW, wobei die größten Verluste an dem Brennstoffzellensystem entstehen. Bezogen auf den unteren Heizwert des Wasserstoffs von 33,3 kWh/kg beträgt der simulierte Systemwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems, der die zum Betrieb der Brennstoffzelle notwendigen Nebenverbraucher miteinbezieht, ca. 52 %. Durch Einsatz des regenerativen Bremsens ist der Energiebedarf an den Rädern des brennstoffzellengetriebenen LKW ebenfalls geringer als beim Diesel-LKW.

Schließlich zeigt die Abbildung 4-6 die Wirkungsgrade der untersuchten LKW von der jeweiligen Energiequelle im Fahrzeug bis zum Rad. Zur Vermeidung des Topographieinflusses wurden die dargestellten Wirkungsgrade durch Simulation einer flachen Autobahnstrecke ermittelt. Der batteriegetriebene und der oberleitungsversorgte LKW erreichen ungefähr den gleichen Wirkungsgrad von ca. 87 %. Der Wirkungsgrad des brennstoffzellengetriebenen LKW von ca. 45 % liegt leicht über dem Wirkungsgrad des Diesel-LKW von rund 40 %.

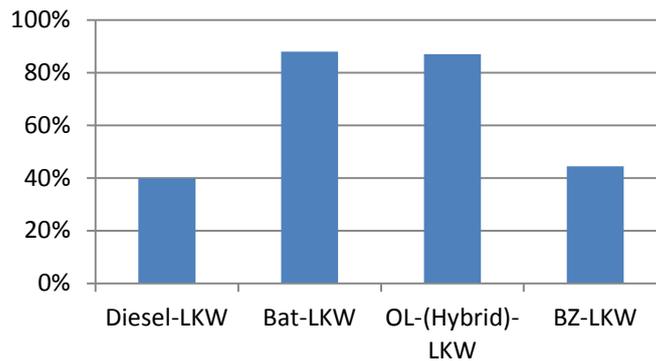


Abbildung 4-6: Die in Simulation erzielten Wirkungsgrade der untersuchten LKW von Energiequelle im Fahrzeug bis zu den Rädern auf einer flachen Autobahnstrecke

4.3 Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten

4.3.1 Diesel-LKW

Die Motorleistung des modellierten konventionellen Diesel-LKW richtet sich nach den Anforderungen eines schweren LKW mit einem Gesamtgewicht bis zu 40 t. Die Leistung des Dieselmotors von 315 kW entspricht einem typischen Wert in dieser Fahrzeugklasse (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Volumen des Dieseltanks ist aufgrund der großen Energiedichte des Dieselmotors relativ klein und stellt kein Problem für die Integration ins Fahrzeug dar. Typische Dieseltankgrößen bei schweren LKW umfassen 500 l und mehr, sodass eine hohe Reichweite möglich ist und die Fahrzeuge nicht täglich betankt werden müssen. In dieser Arbeit wird ein Volumen von 665 l gewählt, um eine Tankkapazität für zwei Betriebstage mit je 9 Fahrstunden, einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h und einem durchschnittlichen Dieserverbrauch von 46 l pro 100 km zur Verfügung zu stellen.

4.3.2 Batteriegetriebener LKW

Auch die im Kapitel 3.2.2 gewählte elektrische Maschine zum Antrieb der elektrifizierten LKW ist mit ihrer Nennleistung von 376 kW in dem gängigen Leistungsbereich für schwere LKW. Bei batteriegetriebenen Fahrzeugen stellt die Batteriekapazität eine Beschränkung der Reichweite dar. Bei energieintensiven Anwendungen wie dem batteriegetriebenen Fernverkehr-LKW muss die Batterie daher ausreichend dimensioniert sein, um den Betriebsanforderungen gerecht zu werden. Entsprechend den gesetzlichen Vorgaben (Kapitel 2.1.4) beträgt die maximale Fahrdauer ohne Unterbrechung durch Fahrerpause 4,5 Stunden. Also muss die Batterie die erforderliche Energie während dieser maximalen Fahrperiode bereitstellen und kann anschließend während der Ruhepause für Fahrer nachgeladen werden.

Unter Annahme einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h kann der LKW in dieser Fahrperiode eine Strecke von 360 km zurücklegen. Mit dem im Kapitel 4.1 ermittelten durchschnittlichen spezifischen Energieverbrauch für niedrige und mittlere Fahrwiderstände von 1,33 kWh/km bzw. 1,83 kWh/km ergibt sich eine notwendige Energiemenge von 478,8 kWh bzw. 658,8 kWh.

Im Allgemeinen ist das Lebensende einer Batterie erreicht, wenn ihre Kapazität sich um 20 % reduziert oder wenn ihr Innenwiderstand sich verdoppelt. Um die Kapazitätsabnahme durch Alterung zu berücksichtigen werden 25 % der gesamten Batteriekapazität zusätzlich auf die berechneten Energiemengen für eine 4,5-stündige Fahrperiode beaufschlagt. Dies resultiert in einer durchschnittlich erforderlichen Batteriekapazität von ca. 600 kWh für den batteriegetriebenen LKW mit niedrigen Fahrwiderständen und in ca. 825 kWh für hohe Fahrwiderstände. Die Reserve von 20 % der Batteriekapazität kann auch den veränderlichen Bedingungen beim Betrieb zugutekommen, wie Reifenabnutzung, Wetterbedingungen, Verkehrsverhältnisse etc. Die Tabelle 4-2 fasst die wesentlichen Auslegungsdaten der Antriebsstrangkomponenten für den batterieelektrischen LKW zusammen, wobei im Folgenden nur die Auslegung für mittlere Fahrwiderstände betrachtet wird.

	Niedrige Fahrwiderstände	Mittlere Fahrwiderstände
Elektrische Maschine	376 kW	376 kW
Batterie	600 kWh	825 kWh
Zellen	HEa oder HEc	HEa oder HEc

Tabelle 4-2: Auslegungsdaten der Antriebsstrangkomponenten eines batteriegetriebenen LKW

Ferner muss die Batterieleistung ausreichend sein, um die Traktionsmaschine und Nebenverbraucher zu versorgen. Je nach benutzten Zellen aus Tabelle 3-4 variiert auch die maximale Batterieausgangsleistung P_{Bat} , die unter Benutzung der Entladestromrate R_{ela} der jeweiligen Zelle und der Batteriekapazität C_{Bat} nach der folgenden Formel berechnet werden kann:

$$P_{\text{Bat}} = C_{\text{Bat}} \cdot R_{\text{ela}} \quad (4.1)$$

So kann die Batterie mit einer Kapazität von 600 kWh unter Benutzung der Zelle HEa mit geringerer Entladestromrate aus Tabelle 3-4 eine Leistung von 1.200 kW abgeben. Bei höheren Batteriekapazitäten und Entladeraten ergeben sich entsprechend höhere Leistungen. Somit stellt die Leistung der Batterie anders als ihre Reichweite kein beschränkendes Kriterium dar. Aufgrund der hohen Kapazität der Batterie und somit eines hohen Batteriegewichts werden beim batteriegetriebenen LKW nur Hochenergiezellen betrachtet, die über eine höhere Energiedichte als Hochleistungszellen verfügen.

4.3.3 Oberleitungsversorgter LKW

Die wichtigsten auszulegenden Komponenten im Antriebsstrang eines oberleitungsversorgten LKW sind die elektrische Maschine, Batterie sowie ihr Umrichter. Die hier modellierte elektrische Maschine besitzt die gleiche Leistung wie bei dem batteriegetriebenen LKW, die sich nach den Leistungsanforderungen eines schweren LKW richtet.

Die Batterie eines oberleitungsversorgten LKW muss die oberleitungsfreien Strecken überbrücken können. Das heißt, ihre Kapazität richtet sich nach Dimensionierung der Länge der Oberleitungsabschnitte. Die Batterieleistung muss einerseits die Anforderung der Traktionsmaschine und der Nebenverbraucher decken. Andererseits muss die Batterie eine ausreichende Ladeleistung aufbringen, um auf Streckenabschnitten mit Oberleitung aufgeladen zu werden. Somit hängt sowohl die notwendige Kapazität der Batterie als auch ihre Leistung von der Länge der Oberleitungsabschnitte sowie der verfügbaren Oberleitungsleistung ab.

In dieser Arbeit werden deshalb zwei Varianten von Batterie- und Oberleitungsdimensionierung definiert, die in Tabelle 4-3 angegeben sind. Bei der kompletten Ausbaustufe der Oberleitung wird die Oberleitung über das komplette Netz der bundesdeutschen Autobahnen mit einer Länge von ca. 13.000 km gebaut. Die Batteriekapazität bestimmt sich in diesem Fall über die Länge der oberleitungsfreien Abschnitte abseits der Autobahn zwischen Autobahnabfahrt und dem Start- bzw. Zielpunkt der LKW-Route, der bei einem Fernverkehr-LKW meistens innerhalb eines Industrie- oder Gewerbegebiets liegt. Laut den Daten der Gewerbeinternetdatenbank [29] liegen ca. 80 % der dort eingetragenen Industrie- und Gewerbegebiete innerhalb 20 km von einer Autobahnabfahrt entfernt. Mit der Annahme, dass der oberleitungsversorgte LKW keine Ladestationen benutzt, sondern die Traktionsenergie und Ladeenergie für die Batterie nur aus Oberleitung bezogen wird, muss die Batteriekapazität für eine Streckenlänge von 40 km (Strecke ab Autobahnabfahrt und zurück) ausreichen. Unter Hinzunahme des zuvor berechneten durchschnittlichen Energieverbrauchs eines oberleitungsversorgten LKW mit mittleren Fahrwiderständen, den Wirkungsgrad des Batterieumrichters sowie unter Berücksichtigung der Kapazitätsreserve von 20 % aufgrund der Batteriealterung ergibt sich eine notwendige Batteriekapazität von ca. 96 kWh.

Die Batterieleistung ist über die Stromrate der verwendeten Zellen mit der Batteriekapazität nach der Formel (4.1) verknüpft. Bei Benutzung der Hochenergiezellen HEa bzw. HEc ergeben sich Batterieentladeleistungen von 192 kW bzw. 288 kW, die nicht ausreichend zur Deckung der Traktions- und Nebenverbraucherleistung von 381 kW sind. Die notwendige Batteriekapazität, um die erforderliche Batterieentladeleistung aufzubringen, würde bei Batterie mit Zellen HEa 190,5 kWh und mit Zellen HEc 127 kWh betragen. Würde man eine Batterie mit 96 kWh Kapazität und Hochleistungszelle HPa aufbauen, würde sie mit ihrer Ausgangsleistung von 1920 kW die Traktionsanforderung decken können. Die möglichen Kombinationen sind in Tabelle 4-3 gezeigt.

Die Ladeleistung der Batterie stellt kein beschränkendes Kriterium dar, weil der Hauptlauf des Fernverkehr-LKW auf der Autobahn geschieht und die Batterie auch mit kleinerer Leistung nachgeladen werden kann.

Ausbaustufe der Oberleitung	Kompletter Ausbau	Partieller Ausbau
Aufbau der Oberleitung	durchgehend	partiell
	190,5 kWh, HEa	190,5 kWh, HEa
Batteriekapazität, Zelltyp	127 kWh, HEc	300 kWh, HEc
	96 kWh, HPa	120 kWh, HPa

Tabelle 4-3: Untersuchte Varianten der Oberleitungsinfrastruktur und der Batteriekapazität

Bei partieller Ausbaustufe werden die Oberleitungen partiell aufgebaut, wobei sich die mit Oberleitung elektrifizierten Autobahnabschnitte mit oberleitungsfreien Autobahnabschnitten abwechseln. Diese partiellen Oberleitungen werden ebenfalls auf dem kompletten bundesdeutschen Autobahnnetz aufgebaut. In Anlehnung an das Forschungsprojekt ENUBA 2 [6] wird ein Verhältnis 1:3 von elektrifizierten zu nicht elektrifizierten Abschnitten angenommen, weil der oberleitungsversorgte LKW darin durch Fahrt auf 1 km Oberleitungsstrecke die Batterie für 2 km oberleitungsfreier Strecke nachladen kann. Dies erfordert eine leistungsfähigere Oberleitungsinfrastruktur, um die Batterie auf kürzeren elektrifizierten Abschnitten aufzuladen. Die Batteriekapazität wurde dabei auf den Wert von 120 kWh des im Forschungsprojekt entwickelten LKW-Prototyps gesetzt [6]. Diese Kapazität deckt auch den oben berechneten Energiebedarf von 96 kWh auf oberleitungsfreier Strecke abseits der Autobahn.

Die erforderliche Batterieladeleistung ergibt sich im Falle der partiellen Ausbaustufe aus der Anforderung der Batterienachladung auf dem elektrifizierten Abschnitt für die Fahrt auf dem nachfolgenden, doppelt so langen oberleitungsfreien Abschnitt. Die Oberleitung muss zusätzlich dazu die Leistungsnachfrage der Traktion bereitstellen. Aus der Energieverbrauchssimulation im vorhergehenden Kapitel leitet sich ein durchschnittlicher Leistungsbedarf des oberleitungsversorgten LKW von ungefähr 150 kW bei mittleren Fahrwiderständen ab. Somit muss die Batterie eine Ladeleistung von 300 kW aufbringen. Bei der gewählten Kapazität von 120 kWh ist das nur mit der Hochleistungszelle HPa möglich. Die Batteriekapazitäten für andere Zelltypen werden zur Erfüllung der Ladeleistungsvorgabe entsprechend angepasst und sind in Tabelle 4-3 angegeben.

Schließlich ist der Batterieumrichter in seiner Leistung zu dimensionieren. Diese entspricht dem Betrag der maximalen Batterieleistung, die im Fall des oberleitungsbetriebenen Fahrzeugs beim Entladen der Batterie zur Speisung der Traktion und Nebenverbraucher entsteht und somit 381 kW entspricht.

4.3.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW

Auch bei dem oberleitungsversorgten Hybrid-LKW richtet sich die Batteriekapazität nach der Länge der oberleitungsfreien Streckenabschnitte. Zusätzlich verfügt der Hybrid-LKW über einen Dieselmotor, der auf längeren oberleitungsfreien Abschnitten zum Einsatz kommt. Für die Dimensionierung der Batterie und Oberleitungsinfrastruktur wird eine mittlere Ausbaustufe der Oberleitung definiert (Tabelle 4-4), bei der die Oberleitungen ca. 32 % der bundesdeutschen Autobahnen abdecken und über den für den LKW-Fernverkehr wichtigsten Autobahnabschnitten aufgebaut sind. Diese Ausbaustufe wurde in [93] und [6] vorgeschlagen und soll bundesweit ca. 60 % der jährlichen Fahrleistung aller mautpflichtigen LKW decken [6]. Entsprechend wird in dieser Arbeit angenommen, dass 60 % der Fahrstrecke mit Oberleitung ausgestattet sind und die restlichen 40 % der Fahrstrecke mit Batterie und Dieselmotor zurückgelegt werden. Für die Batteriekapazität werden die gleichen Werte wie bei der kompletten Ausbaustufe angenommen.

Der Dieselmotor wird auf den durchschnittlichen Leistungsbedarf des oberleitungsversorgten LKW dimensioniert, der sich aus der Energieverbrauchsbestimmung im Kapitel 4.1 zu ca. 150 kW ableitet. Diese Dimensionierung wird als Dimensionierung auf Grundlast bezeichnet [50], wobei das Gewicht und Kosten des Dieselmotors eingespart werden.

Ausbaustufe der Oberleitung	Mittlere Ausbaustufe
Aufbau der Oberleitung	durchgehend auf 32 % des Autobahnnetzes
Batteriekapazität, Zelltyp	190,5 kWh, HEa 127 kWh, HEc 96 kWh, HPa
Dieselmotor	150 kW

Tabelle 4-4: Kombination der Oberleitungsinfrastruktur, Batteriekapazität und Dieselmotorleistung für den oberleitungsversorgten Hybrid-LKW

4.3.5 Brennstoffzellengetriebener LKW

Bei dem brennstoffzellengetriebenen LKW wird die Antriebsenergie im Wasserstofftank gespeichert, der nach dem Energiebedarf dimensioniert werden muss. Während die elektrische Maschine die gleiche Leistung wie bei dem batteriegetriebenen LKW besitzt, müssen die Brennstoffzelle und Batterie dimensioniert werden.

Charakteristisch für die Brennstoffzellenfahrzeuge ist eine höhere Reichweite im Vergleich zu batteriegetriebenen Fahrzeugen. Auch die Betankung mit dem Wasserstoff kann in relativ kurzer Zeit (ca. 15 Minuten [8], [34]) erfolgen, sodass ihre Dauer im Betriebsablauf

vernachlässigt werden kann, falls die Häufigkeit der Tankvorgänge gering ist. Die Kapazität des Wasserstofftanks des brennstoffzellengetriebenen LKW wird in dieser Arbeit deshalb so dimensioniert, dass sie zwei Betriebstage mit jeweils 9 Fahrstunden abdeckt. Damit wird der brennstoffzellengetriebene LKW ähnlich wie der Diesel-LKW einmal in mehreren Tagen getankt. Unter Annahme einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h und des durchschnittlichen Wasserstoffverbrauchs von 10,5 kg pro 100 km bei mittleren Fahrwiderständen (vgl. Kapitel 4.1) ergibt sich eine notwendige Kapazität des Wasserstofftanks von ca. 150 kg.

	BZ-LKW 1	BZ-LKW 2	BZ-LKW 3
Wasserstofftank	150 kg	150 kg	150 kg
Brennstoffzelle	150 kW	100 kW	300 kW
Batterie	96 kWh	120 kWh	320 kWh
Zelltyp	HEa, HEc oder HPa	HEa, HEc oder HPa	HEa, HEc oder HPa

Tabelle 4-5: Dimensionierung der Komponenten eines brennstoffzellengetriebenen LKW

Um die Kosten und das Gewicht des Brennstoffzellensystems zu sparen, kann dieses wegen der Leistungsaddition mit Batterie kleiner dimensioniert werden. Auch die Leistung und Kapazität der Batterie können unterschiedlich dimensioniert werden, weil die Batterie hier lediglich als Zwischenspeicher für Brennstoffzellenenergie und Bremsenergie dient und nicht extern nachgeladen wird. Deshalb werden in dieser Arbeit unterschiedliche Kombinationen aus Batterie und Brennstoffzellensystem untersucht (Tabelle 4-5).

Beim BZ-LKW 1 wird das Brennstoffzellensystem ähnlich wie der Dieselmotor beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW auf Grundlast ausgelegt. Der durchschnittliche Traktionsleistungsbedarf eines brennstoffzellengetriebenen LKW ergibt sich zu 150 kW. Die Batteriekapazität wird wie beim oberleitungsversorgten LKW zu 96 kWh angenommen. Die Auslegung BZ-LKW 2 entspricht der Auslegung der Brennstoffzelle und Batterie eines realen 34 t LKW von ESORO [8]. Auch die Auslegung BZ-LKW 3 entspricht der realen Auslegung der Brennstoffzelle und Batterie eines geplanten LKW Nikola One [11]. Die Kapazität des Wasserstofftanks wird bei allen brennstoffzellengetriebenen LKW wie oben beschrieben auf 150 kg gesetzt.

Es werden alle Zelltypen für die Batterie untersucht, weil die Batterieleistung durch Brennstoffzellenleistung ergänzt wird und sich so keine scharfen Anforderungen an die Batterieleistung ergeben.

Die aufgezeigten Auslegungen werden im Folgenden simulativ auf den resultierenden Energieverbrauch und Lebenszykluskosten in einem konkreten Betriebsszenario untersucht.

4.4 Integration der Antriebskomponenten

Die Antriebsstränge der alternativen LKW besitzen Energiespeicherkomponenten mit einer geringeren Energiedichte als der Dieseltank eines konventionellen LKW. Außerdem kommen je nach Konfiguration zusätzliche Komponenten wie Elektromotor, Stromabnehmer, Brennstoffzelle etc. hinzu. Das Ziel dieses Kapitels ist es deshalb das Leergewicht einzelner LKW entsprechend den Auslegungen im vorhergehenden Kapitel zu berechnen und die Auswirkungen auf die Nutzlast des jeweiligen Fahrzeugs zu untersuchen. Ausgehend von dem Leergewicht der Fahrzeuge kann die gleiche zu transportierende Nutzlast unabhängig von der jeweiligen LKW-Technologie definiert werden, um die Fahrzeuge in einem bestimmten Betriebsszenario (Kapitel 5.1) zu vergleichen.

4.4.1 Gewicht der Antriebskomponenten

Zuerst wird das Gewicht einzelner Antriebsstränge aufgeschlüsselt auf ihre Komponenten betrachtet und anschließend die Gewichtszusammensetzung des gesamten Fahrzeugs gezeigt. Die Abbildung 4-7 zeigt das Gewicht der Antriebsstränge der in dieser Arbeit untersuchten LKW-Arten entsprechend Kapitel 4.3, wobei exemplarisch die jeweils erste Auslegungsvariante der jeweiligen LKW-Technologie dargestellt ist. Das Gewicht der Komponenten des Antriebsstrangs einer konventionellen Zugmaschine (mit der Auslegung entsprechend Kapitel 4.3.1) berechnet sich insgesamt zu etwa 2100 kg, was basierend auf Datenblättern [78], [79], [94] abgeschätzt wurde. Das größte Gewicht besitzen dabei der Verbrennungsmotor und der Dieseltank. Bei dem Dieseltank wird entsprechend der Definition des Leergewichts eines Fahrzeugs in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung [22] eine Füllung von 90 % berücksichtigt. Zu weiteren Komponenten zählen das System der Abgasnachbehandlung, das vor allem aus Katalysator und AdBlue-Tank besteht, sowie das Schaltgetriebe. Das Gewicht des Getriebes [95] wird bei allen Antriebsvarianten zur Vereinfachung gleich angenommen. Eine Gewichtsreduktion des Getriebes bei elektrifizierten Antrieben erscheint jedoch möglich, weil ein Elektromotor aus dem Stillstand heraus ein hohes Drehmoment erzeugt. So werden in einigen elektrischen Verteiler-LKW Getriebe mit nur einem Gang, also mit fester Übersetzung eingesetzt.

Der Antriebsstrang eines oberleitungsversorgten LKW kommt ungefähr auf das gleiche Gewicht wie der Antriebsstrang eines Diesel-LKW. Das größte Gewicht entfällt auf die Batterie, die bei der gezeigten Auslegung mit 190,5 kWh ungefähr 1500 kg wiegt. Dabei wird für die Batterie mit Zellen HEa eine gravimetrische Energiedichte von 125 Wh/kg angenommen, die auf Literaturangaben in [45], [96], [97] zu Energiedichten von Batteriepacks basiert. Bei anderen Auslegungen des oberleitungsversorgten LKW (Tabelle 4-3) verändert sich die Kapazität der Batterie und damit ihr Gewicht wie in Abbildung A-1 im Anhang gezeigt ist. Dabei wird für die Zellen HEc eine Energiedichte der mit diesem Zelltyp aufgebauten Batterie von 160 Wh/kg angenommen, weil es sich um Rundzellen aus Consumerbereich mit typischerweise höheren Energiedichten handelt. Für die Batterie mit Zellen HPa wird dagegen eine geringere Energiedichte von 90 Wh/kg angenommen, da es

sich hierbei um eine auf höhere Lade und Entladeleistungen ausgelegte Zelle handelt (vgl. auch Kapitel 3.2.2).

Ferner werden das Gewicht der elektrischen Maschine [80] und des Schaltgetriebes [95] berücksichtigt, die einen nachrangigen Gewichtsanteil ausmachen. Das Gewicht der elektrischen Maschine ist bei allen untersuchten alternativen Antrieben identisch, weil die gleiche Leistung des Antriebsmotors angenommen ist.

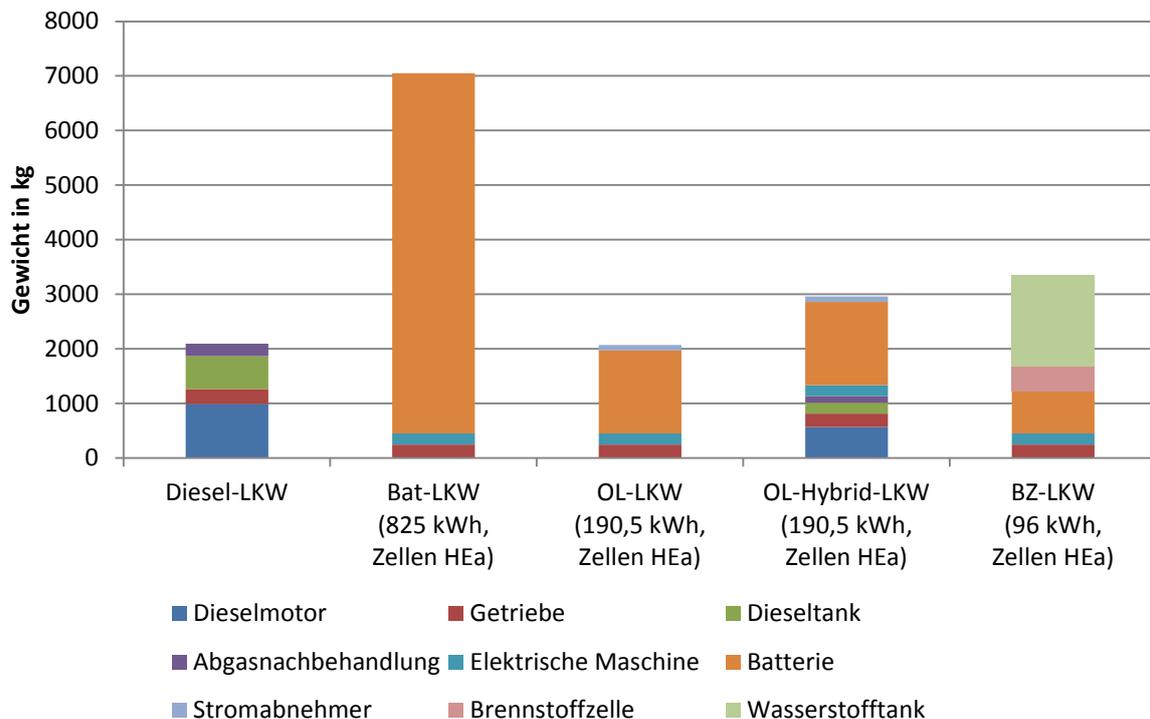


Abbildung 4-7: Gewicht der Antriebsstränge unterschiedlicher LKW aufgeschlüsselt auf die wichtigsten Komponenten

Bei dem oberleitungsversorgten Hybrid-LKW kommt das Gewicht des Dieselmotorstrangs zu dem Gewicht des Antriebsstrangs eines oberleitungsversorgten LKW hinzu. Da der Dieselmotor bei diesem Antrieb zur Reichweitenerweiterung dient und eine geringere Leistung besitzt, wurden sein Gewicht sowie das Gewicht der dazugehörigen Komponenten (elektrischer Generator und Abgasnachbehandlungssystem) leistungsspezifisch skaliert. In Abbildung 4-7 ist das Gewicht des Dieselmotors (inklusive des Generators) sowie des Abgasnachbehandlungssystems gezeigt. Auch bei diesem Antrieb macht das Gewicht der Batterie den größten Gewichtsanteil aus. Bei anderen Auslegungen dieses Antriebs entsprechend der Tabelle 4-4 variiert das Gewicht der Batterie wie in Abbildung A-2 im Anhang gezeigt ist.

Der Antriebsstrang des batteriegetriebenen LKW hat das größte Gewicht aller untersuchten Antriebsstränge, was auf die hohe Kapazität der Batterie zurückzuführen ist. Die anderen Komponenten dieses Antriebsstrangs, wie elektrische Maschine und Getriebe, spielen bei der Gewichtsverteilung nur eine untergeordnete Rolle (Abbildung 4-7). Bei Einsatz der Zellen HEc mit höherer Energiedichte kann das Batteriegewicht um rund 20 % reduziert werden

(Abbildung A-3 im Anhang). Dies deutet auf den hohen Stellenwert der Energiedichte der Batterie bei diesem Antriebsstrang hin.

Bei dem brennstoffzellengetriebenen Antriebsstrang ist der Wasserstofftank der Hauptenergiespeicher und hat den größten Anteil an der Gewichtsverteilung im Antriebsstrang. Das spezifische Gewicht des Wasserstofftanks bei einem Speicherdruck von 350 bar wird basierend auf [98], [99] zu $21 \text{ kg}_{\text{Tank}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ angenommen. Für höhere Speichermengen des Wasserstoffs wird allerdings vorzugsweise ein höherer Speicherdruck von 700 bar verwendet, der zurzeit auch schon bei Serienfahrzeugen im PKW-Bereich verwendet wird [100], [101]. Auch für die energieintensive Anwendung in Fernverkehr-LKW wäre dies ein sinnvoller Ansatz. Nach der idealen Gasgleichung halbiert sich das Volumen des Gases bei einer Verdopplung des Druckes, wenn die Temperatur des Gases konstant bleibt. Deshalb wird in dieser Arbeit näherungsweise von einem spezifischen Gewicht der Wasserstofftanks von $11 \text{ kg}_{\text{Tank}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ bei einem Speicherdruck von 700 bar ausgegangen. In der Praxis weicht dieser Wert nach unten ab, weil der Wasserstoff sich als reales Gas verhält und ein höherer Speicherdruck evtl. massivere Wasserstofftanks voraussetzen kann.

Den zweitgrößten Gewichtsanteil bei diesem Antriebsstrang hat die Batterie, die je nach Kapazitätsauslegung (Tabelle 4-5) auch ein höheres Gewicht als Wasserstofftanks haben kann (vgl. Abbildung A-4). Für das Brennstoffzellensystem wurde ein spezifisches Gewicht von $2,7 \text{ kg/kW}$ entsprechend dem Datenblatt der modellierten Brennstoffzelle für Traktionsanwendungen [84] angenommen. Ferner wird beim Brennstoffzellensystem zusätzlich ein Kompressor für die Druckluftzufuhr mit einem Gewicht von 50 kg berücksichtigt. Der Gewichtsanteil des Brennstoffzellensystems ist jedoch relativ klein verglichen mit Wasserstofftank und Batterie.

Die bestimmten Gewichte der Antriebsstränge werden nun ins Verhältnis zum Gesamtgewicht des Fahrzeugs gesetzt, um deren Einfluss auf die Nutzlast zu beurteilen. Dabei wird die Karosserie eines konventionellen LKW, die den Fahrzeugrahmen, Räder, Dämpfer, Wellen etc. enthält, als gleichbleibend für die alternativen Antriebe angesehen. Das Gewicht der Karosserie kann aus dem Leergewicht des Sattelzugs von typischerweise 14.000 kg [87], [102] durch Subtrahieren des Gewichts des Dieselantriebs zu ungefähr 12.000 kg berechnet werden. Somit ergibt sich die maximale Nutzlast bei einem konventionellen Diesel-LKW zu 26.000 kg (Abbildung 4-8).

Bei dem oberleitungsversorgten LKW sowie Hybrid-LKW ergibt sich ungefähr die gleiche Nutzlast wie bei dem Diesel-LKW, die bei ca. 26.000 kg bzw. 25.000 kg liegt. Der schwarze Fehlerbalken in Abbildung 4-8 zeigt die Abweichungen des Antriebsstranggewichts bei anderen in dieser Arbeit untersuchten Auslegungen des jeweiligen Antriebsstrangs, die bei oberleitungsversorgten Varianten relativ klein bezüglich des Gesamtgewichts ausfallen.

Beim brennstoffzellengetriebenen LKW beträgt die Nutzlast bei der in Abbildung 4-8 gezeigten Auslegung etwa 24.500 kg und ist somit nur geringfügig kleiner als die Nutzlast bei Diesel-LKW. Bei anderen Auslegungen kann sich die Nutzlast jedoch um etwa 3.000 kg verringern, was vor allem auf die deutlich größere Batteriekapazität dieser Auslegungen zurückzuführen ist.

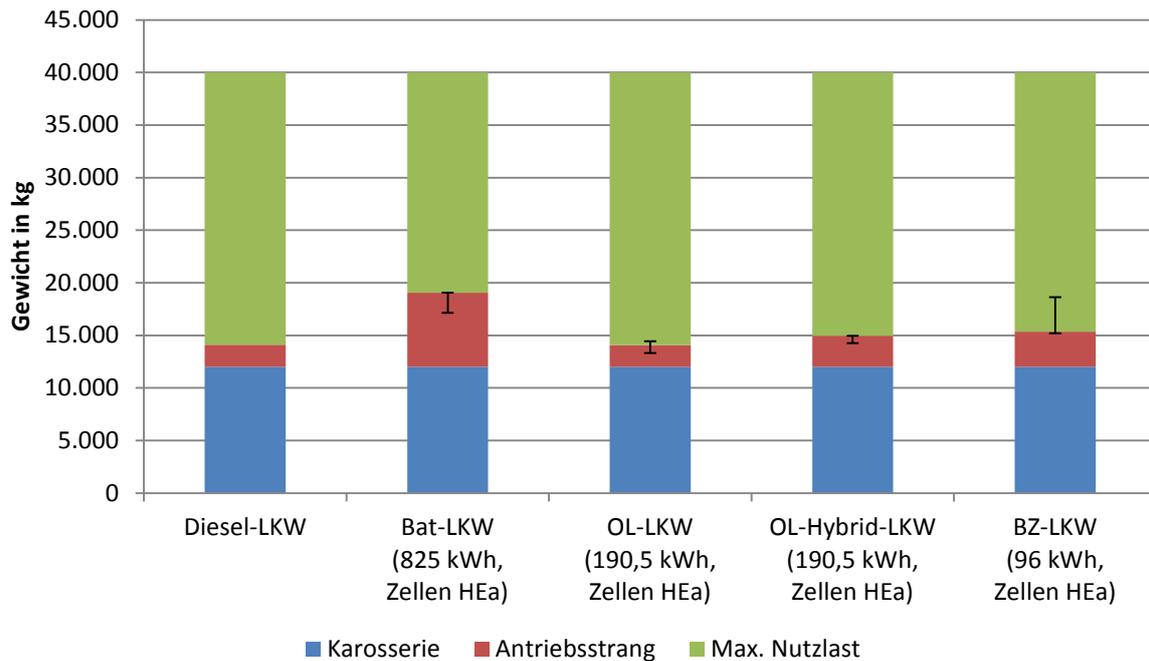


Abbildung 4-8: Gewichtsverteilung bei den untersuchten LKW. Der Fehlerbalken gibt die mögliche Abweichung des Antriebsstranggewichts in Abhängigkeit von den betrachteten Auslegungen an.

Die höchsten Nutzlastverluste ergeben sich bei dem batteriegetriebenen LKW. Bei der Auslegung in Abbildung 4-8 ergibt sich eine ca. 19 % kleinere Nutzlast im Vergleich zum Diesel-LKW. Insbesondere bei diesem Antrieb kommt der Energiedichte der Batterie ein hoher Stellenwert zu. So kann durch die Verwendung der Batterie mit HEc und höherer Energiedichte der Nutzlastverlust gegenüber Diesel-LKW auf ca. 12 % reduziert werden. Statistisch gesehen werden durchschnittlich jedoch nur 70 % der maximalen Nutzlast eines konventionellen LKW genutzt (Kapitel 2.1.2). Bei oben angenommener Nutzlast des konventionellen Sattelzugs entspricht dies einem Gewicht von 18.200 kg. Diese Nutzlast ist sowohl mit dem batteriegetriebenen LKW als auch mit den anderen LKW-Technologien transportierbar.

Neben der hier durchgeführten überschlägigen Gewichtsbehandlung der Komponenten müssen bei Integration der Antriebsstrangkomponenten die jeweiligen Radachslasten und Schwerpunktverteilung beachtet werden. Ferner kann durch eine räumliche Aufteilung der Batterie in einzelne Batteriepacks ihre gesamtheitliche Energiedichte sinken.

4.4.2 Volumen der Antriebskomponenten

Durch Weglassen des Verbrennungsmotors [94] und des Dieseltanks eines konventionellen Diesel-LKW ergibt sich ein freies Volumen von ca. 2000 l, das für den Einbau der Komponenten der alternativen Antriebsstränge zur Verfügung steht. Auch das Volumen im Rahmen des Sattelauflegers unterhalb der Ladefläche in der Größenordnung von etwa 4000 l kann zum Einbau der Antriebskomponenten verwendet werden, was zum Beispiel bei der

Unterbringung der Batterie eines batteriegetriebenen Sattelzugs in [6] geschehen ist. Somit stehen insgesamt ca. 6000 l für Integration der Antriebskomponenten zur Verfügung. Dabei wurde das Volumen des Getriebes als gleich bei allen LKW-Technologien angenommen und deshalb nicht miteingerechnet. Diese konservative Annahme wurde analog zu der Annahme des gleichen Getriebegegichts im vorhergehenden Kapitel gemacht. Die mögliche Volumen- und Gewichtsreduktion des Getriebes bei der realen Ausführung eines elektrifizierten LKW kann sich jedoch zu Gunsten des verfügbaren Nutzgewichts und Raums auswirken.

Die Abbildung 4-9 zeigt das notwendige Volumen bei der Integration der unterschiedlichen Antriebskomponenten. Die Fehlerbalken geben mögliche Volumenvariationen bei anderen betrachteten Auslegungen (entsprechend Kapitel 4.3) und beziehen sich dabei auf das gesamte Antriebsstrangvolumen.

Der oberleitungsversorgte LKW stellt hierbei die geringsten Anforderungen an das Integrationsvolumen des Antriebsstrangs. Das wesentliche Volumen wird hier von der Batterie beansprucht, deren volumetrische Energiedichte beim Aufbau mit Zellen HEa zu 200 Wh/l basierend auf Literaturangaben [45], [96], [97] angenommen wird. Die Abweichung des Fehlerbalkens nach oben wird durch die angenommene Energiedichte von 250 Wh/l der Batterie mit Zellen HEc und nach unten durch die angenommene Energiedichte von 150 Wh/l der Batterie mit Zellen HPa verursacht. Das Volumen der elektrischen Maschine von ungefähr 50 l ist relativ klein und wird in Abbildung 4-9 deshalb nicht dargestellt. Der Stromabnehmer befindet sich über dem Dach der Fahrerkabine, sodass dieser nicht in die Zugmaschine hinein integriert werden muss und sein Volumen bei dieser Berechnung deshalb nicht betrachtet wird. Jedoch erfordert der Stromabnehmer des in [6] aufgebauten Sattelzugs eine Tragkonstruktion mit ca. 0,5 m Bautiefe, die sich hinter der Fahrerkabine befindet. Dadurch kann es evtl. zu Einschränkungen des Laderaums des Sattelauflegers kommen, da die Länge des Gesamtfahrzeugs gesetzlichen Einschränkungen unterliegt.

Bei dem oberleitungsgetriebenen Hybrid-LKW ergibt sich durch den Einbau des zusätzlichen Dieselmotorstrangs ein höherer Platzbedarf. Durch Downsizing des Dieselmotors und des Dieseltanks ist der Dieselmotorstrang jedoch kompakter als beim konventionellen LKW.

Bei dem batteriegetriebenen LKW ergibt sich der größte Volumenbedarf durch die Batterie, die hier eine hohe Kapazität besitzt. Deshalb muss auch der im Sattelaufleger vorhandene Raum zur Integration der Batterie genutzt werden. Durch Verwenden der Zellen HEc mit höherer Energiedichte kann der Volumenbedarf der Batterie reduziert werden, was durch den Fehlerbalken in Abbildung 4-9 angegeben ist.

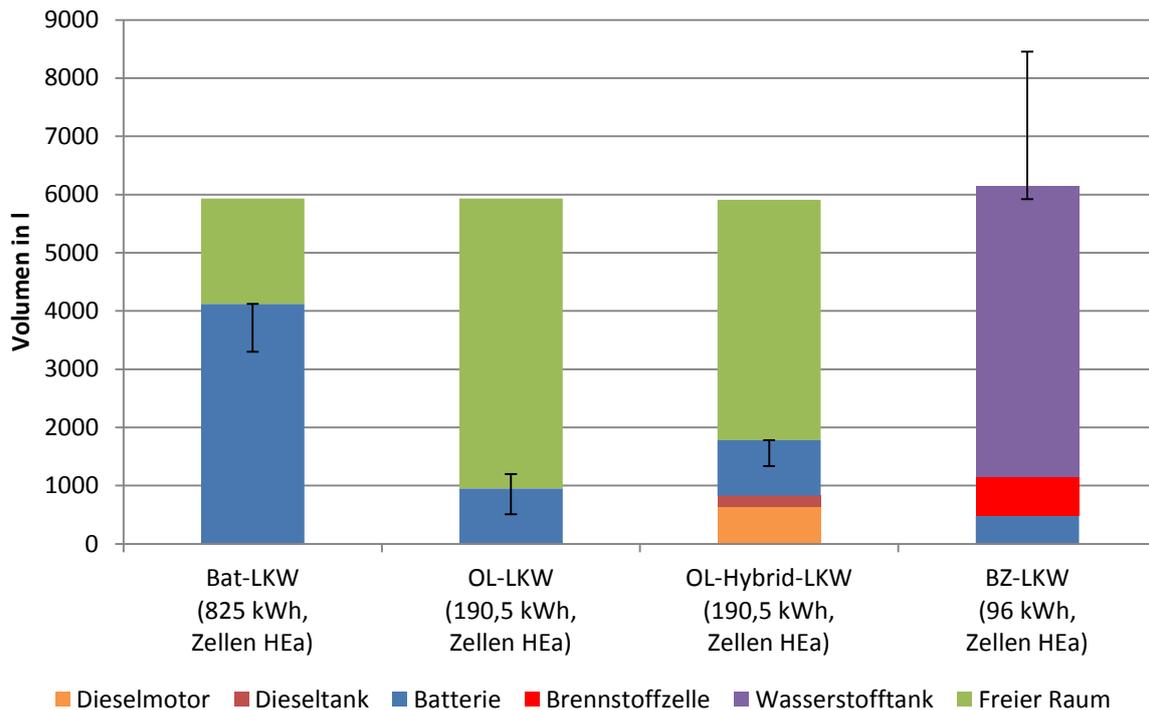


Abbildung 4-9: Das Volumen der Antriebskomponenten der untersuchten LKW. Der Fehlerbalken gibt die mögliche Volumenvariation bei anderen betrachteten Auslegungen an. Als Einbauvolumen wird hier der Raum des Verbrennungsmotors, des Tanks und im Rahmen unter dem Sattelaufleger gesehen.

Bei dem Antriebsstrang des brennstoffzellengetriebenen LKW hat der Wasserstofftank den größten Anteil am Volumenbedarf (Abbildung 4-9). Die volumetrische Dichte des Wasserstofftanks wurde zu ungefähr $33 \text{ l}_{\text{Tank}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ bei einem Speicherdruck von 700 bar angenommen, was auf Datenblattangaben eines 350 bar Drucktanks [98] und Verdopplung der Speichermenge basiert. Bei anderen Auslegungen dieses Antriebsstrangs erhöht sich der Raumbedarf vor allem durch die größer dimensionierte Batterie. Aus Abbildung 4-9 ist es ersichtlich, dass bei der gezeigten Auslegung die Integration des Wasserstofftanks für die definierte Wasserstoffmenge (für die gleiche Reichweite wie bei dem Diesel-LKW) auch bei dem Speicherdruck von 700 bar eine Herausforderung bleibt. In Kombination mit einer groß dimensionierten Batteriekapazität erhöht sich der Raumbedarf deutlich, was der Fall bei BZ-LKW 3 entsprechend Tabelle 4-5 ist. Diese Auslegung basiert jedoch auf den Angaben zu einem für den Einsatz in den USA geplanten LKW [11], wo größere Fahrzeuglängen für LKW erlaubt sind. Unter diesem Gesichtspunkt kann der zur Integration verfügbare Raum größer sein und die Integration des Antriebsstrangs ermöglichen.

Schließlich ist bei der hier durchgeführten Volumenberechnung anzumerken, dass es sich hierbei nur um eine grobe Abschätzung des Raumbedarfs handelt, weil lediglich das Volumen, jedoch nicht die geometrische Form der Komponenten und des verfügbaren Raums berücksichtigt wird.

4.5 Dimensionierung der Infrastruktur

Die batteriegetriebenen und die oberleitungsversorgten LKW sind eng mit ihrer Lade- bzw. Oberleitungsinfrastruktur verknüpft. Die batteriegetriebenen LKW können nur eine begrenzte Energiemenge in ihren Batterien speichern, sodass die Auslegung ihrer Batterien auf eine Fahrperiode von 4,5 Stunden mit anschließender Nachladung während der Fahrerruhepause erfolgt. Die oberleitungsversorgten LKW beziehen ihre Energie zum Fahren aus der Oberleitung und haben nur einen kleinen Batteriespeicher an Bord. Auch die oberleitungsversorgten Hybrid-LKW sind auf die richtige Dimensionierung der Oberleitungsinfrastruktur angewiesen, wenn sie weitgehend elektrisch fahren sollen.

Der konventionelle Diesel-LKW und der brennstoffzellengetriebene LKW sind dagegen deutlich unabhängiger von ihrer Tankstelleninfrastruktur, weil eine höhere Energiemenge im Tank gespeichert werden kann und die Tankvorgänge relativ kurz und seltener sind. So kann mit getroffenen Auslegungen im vorhergehenden Kapitel eine Energiemenge von 4900 kWh in einem 500 l Dieseltank und rund 5000 kWh im Drucktank mit 150 kg Wasserstoffinhalt gespeichert werden. Demgegenüber kann in der Batterie eines batteriegetriebenen LKW (mit Auslegung nach Kapitel 4.3.2) eine deutlich kleinere Menge von 825 kWh gespeichert werden.

Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit die Dimensionierung der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur für den batteriegetriebenen und den oberleitungsversorgten LKW genauer analysiert. Die Tankstelleninfrastruktur für Diesel-LKW und brennstoffzellengetriebenen LKW wird aus den oben genannten Gründen sowie wegen beschränkter Verfügbarkeit der Kostendaten in Literatur (insbesondere für die Komponenten der Wasserstofftankstellen) nicht gesondert betrachtet, sondern als ein Teil des Kraftstoffpreises angenommen. Für den Diesel-LKW ist die Tankstelleninfrastruktur in den Dieselnkosten inbegriffen (Kapitel 5.3.1). Für den brennstoffzellengetriebenen LKW werden Wasserstoffkosten aus den Ergebnissen einer umfassenden Studie [103] herangezogen, bei der ein Aufbau der Wasserstofftankstellen für eine großflächige Nutzung des Wasserstoffs in Personenkraftfahrzeugen angenommen wird (Kapitel 5.3.5).

In den folgenden Unterkapiteln wird die Dimensionierung der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur diskutiert.

4.5.1 Ladeinfrastruktur

Die Dimensionierung der Ladeinfrastruktur für den batteriegetriebenen LKW wird basierend auf der durchschnittlichen statistischen Nutzung der Rastanlagen entlang der bundesdeutschen Autobahnen sowie basierend auf dem durchschnittlichen Energieverbrauch bei mittleren Fahrwiderständen (vgl. Kapitel 4.1) durchgeführt. Die Beschreibungen in diesem Kapitel basieren weitgehend auf der zuvor durchgeführten Studie [73] des Autors.

Zur Dimensionierung der Ladeleistung einer Ladestation müssen die Energieanforderung und die Ladedauer bekannt sein. Unter Annahme des durchschnittlichen Energieverbrauchs von 1,83 kWh/km (Kapitel 4.1) und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80 km/h ergibt sich ein Energiebedarf von ca. 660 kWh für eine 4,5-stündige Fahrperiode. Die Ladedauern werden ausgehend von der Dimensionierung der Batterie für eine Fahrperiode von 4,5 Stunden und Nachladung während der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhepausen für die Fahrer gewählt. Die Ruhepause zwischen zwei 4,5-stündigen Fahrperioden muss mindestens 45 Minuten betragen und erfordert deshalb eine Schnellladung der Batterie. Nach maximal 9 Stunden Fahrbetrieb pro Tag folgt eine Nachruhepause. Während dieser kann die Batterie mit einer geringen Ladeleistung geladen werden, um die Batteriezellen zu schonen. Bei gleichmäßiger Verteilung der Arbeitszeiten auf die Werktage beträgt diese Nachtpause 14,25 Stunden (vgl. Abbildung 5-1).

Ferner müssen die Wirkungsgrade der Batterie und der Infrastruktur berücksichtigt werden. Die Abbildung 4-10 zeigt schematisch die Komponenten einer Ladestation und des Antriebsstrangs eines batteriegetriebenen LKW sowie die zugeordneten Leistungen und Wirkungsgrade. Der batteriegetriebene LKW wird über eine Kupplungstechnik (z.B. Steckkontakte, Pantograph) an eine Ladestation angeschlossen. Der Wirkungsgrad dieser Kupplung η_{Kupplung} wird zu 99 % angenommen. Die Ladestation enthält Leistungselektronik zum Gleichrichten der Wechselspannung und Laden der Batterie sowie einen Transformator, der die Mittelspannung in Niederspannung transformiert. Als Wirkungsgrad der Leistungselektronik η_{LE} werden 98 % und für den Wirkungsgrad des Transformators η_{Trafo} werden 97 % angenommen. Abweichend von der Abbildung kann ein Transformator auch mehrere Ladestationen speisen, was für diese Rechnung jedoch nicht erheblich ist, weil der Transformator mit einem konstanten Wirkungsgrad berücksichtigt wird.

Ferner muss auch der Ladewirkungsgrad der Batterie $\eta_{\text{Bat, lad}}$ berücksichtigt werden, weil der oben angegebene Energiebedarf lediglich den Entladewirkungsgrad der Batterie berücksichtigt. Vorläufige Simulationen mit gewählten Batteriezellen HEa und HEc haben einen Ladewirkungsgrad $\eta_{\text{Bat, lad}}$ von ca. 98 % ergeben. Der für eine Schnellladung relativ hohe Wirkungsgrad erklärt sich durch die hohe Batteriekapazität und deshalb eine geringe Strombelastung auf Zellebene (s. Kapitel 5.4.2).

Weil auf einer Rastanlage im Allgemeinen mehrere LKW während der Ruhepausen stehen, beinhaltet eine Rastanlage mehrere Ladestationen, was in der Abbildung 4-10 durch mehrere Rechtecke auf der rechten Seite angedeutet ist. Die mittlere Zahl der auf Rastanlagen parkenden LKW tagsüber und nachts (Kapitel 2.1.3) bestimmt die Anzahl der notwendigen Schnell- und Langsamladestationen (Tabelle 4-6). Weil tagsüber nur wenige LKW während der Fahrerpause an einer Rastanlage parken, ist die Zahl der Schnellladestationen n_{schnell} kleiner als die Zahl der Langsamladestationen n_{langsam} . In Summe ist die Zahl der Ladestationen ausreichend für die durchschnittliche Zahl der nachts parkenden LKW.

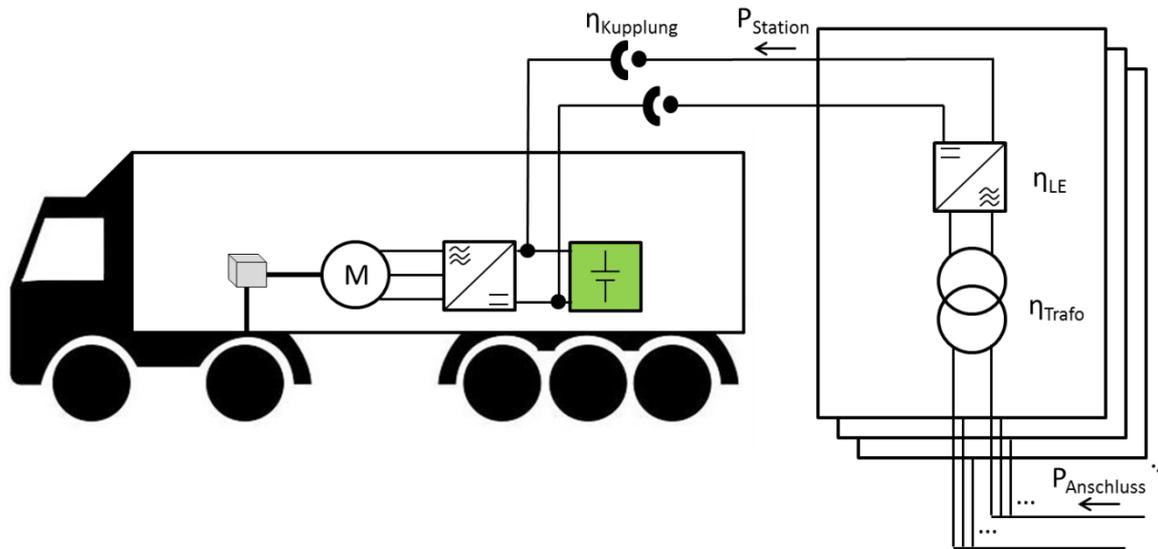


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung eines batteriegetriebenen LKW mit dem Antriebsstrang und einer Ladestation mit elektrischen Komponenten

Die Leistung $P_{\text{Station, schnell}}$ einer Schnellladestation berechnet sich aus dem Energiebedarf E des LKW und der verfügbaren Ladezeit t_{lad} unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Batterie und der Kupplung nach der folgenden Formel:

$$P_{\text{Station, schnell}} = 1/\eta_{\text{Bat, lad}} \cdot 1/\eta_{\text{Kupplung}} \cdot E/t_{\text{lad}} \quad (4.2)$$

So ergibt sich die Leistung einer Schnellladestation zu ca. 910 kW (Tabelle 4-6). Für die Langsamladestationen wird eine Leistung von 50 kW angesetzt, mit der die Batterie in ca. 13,5 Stunden nachgeladen werden kann, was in die nächtliche Fahrerruhepause passt.² Die Gesamtanschlussleistung $P_{\text{Anschluss}}$ aller Ladestationen einer durchschnittlichen Rastanlage an die Mittelspannung berechnet sich aus der Ladeleistung der Schnellladestationen $P_{\text{Station, schnell}}$ und der Langsamladestationen $P_{\text{Station, langsam}}$ nach der folgenden Formel und ist ebenfalls in Tabelle 4-6 angegeben:

$$P_{\text{Anschluss}} = 1/\eta_{\text{LE}} \cdot 1/\eta_{\text{Trafo}} \cdot (n_{\text{schnell}} \cdot P_{\text{Station, schnell}} + n_{\text{langsam}} \cdot P_{\text{Station, langsam}}) \quad (4.3)$$

Die berechnete Infrastruktur ist für eine durchschnittliche Rastanlage ausgelegt. Für große Rastanlagen mit z.B. 150 LKW-Parkplätzen kann die Zusammensetzung der Infrastruktur entsprechend skaliert werden, sodass 26 Schnellladestationen und 124 Langsamladestationen mit einer Gesamtanschlussleistung von ca. 31.400 kW an Mittelspannung notwendig sind. Um die Höhe dieser Anschlussleistung zu veranschaulichen, kann sie mit einem Beispiel der Anschlussleistung eines Bahnunterwerks verglichen werden. So wurden auf einer neu gebauten Eisenbahnstrecke zwischen Erfurt und Leipzig/Halle drei Unterwerke mit jeweils

² Grundsätzlich ist auch eine höhere Nachtladeleistung von zum Beispiel 100 kW möglich. Das würde die Ladezeit der Batterien halbieren und wäre insbesondere bei einer Entwicklung zum autonomen Fahren hin interessant. Dadurch wäre es möglich die Ladezeit ausreichend kurz zu halten und auf die Lieferzeitkorridore der Logistik abzustimmen.

30.000 kW Transformatorenleistung gebaut (je zwei Transformatoren à 15.000 kW in einem Unterwerk), die Hochgeschwindigkeits- und Güterzüge auf dieser Strecke versorgen [104]. Die Leistung eines dieser Unterwerke entspricht also ungefähr der Anschlussleistung der LKW-Ladeinfrastruktur einer großen Rastanlage.

	Schnellladestation	Langsamladestation
Ausgangsleistung einer Ladestation	910 kW	50 kW
Anzahl der Ladestationen	6	28
Gesamtanschlussleistung $P_{\text{Anschluss}}$ an Mittelspannung	7.216 kW	

Tabelle 4-6: Durchschnittliche Ausstattung einer Rastanlage mit Ladestationen

Insgesamt werden 2113 Anlagen wie in Tabelle 4-6 spezifiziert benötigt, um alle Rastanlagen entlang der deutschen Autobahnen zu bestücken und die Ladestationen für alle parkenden LKW zur Verfügung zu stellen (entsprechend Kapitel 2.1.3). Ausgehend von der Zahl der die Infrastruktur nutzenden LKW können die Kosten der Infrastruktur auf den einzelnen LKW umgelegt werden, was bei der Berechnung der Lebenszykluskosten in folgenden Kapiteln gemacht wird.

4.5.2 Oberleitungsinfrastruktur

In den Kapiteln 4.3.3 und 4.3.4 wurden drei unterschiedliche Ausbaustufen der Oberleitungsinfrastruktur für den oberleitungsversorgten (Hybrid)-LKW definiert, die das komplette Autobahnnetz durchgehend (komplette Ausbaustufe) oder partiell (partielle Ausbaustufe) oder nur 32 % des Autobahnnetzes (mittlere Ausbaustufe) durchgehend abdecken.

Die Abbildung 4-11 zeigt schematisch die Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur (Unterwerk, Fahrdrabt, Masten) und des Antriebsstrangs eines oberleitungsversorgten LKW sowie die zugeordneten Leistungen und Wirkungsgrade. Beim Unterwerk werden Gleichrichter und Transformator sowie die Anschlussleistung am Mittelspannungsnetz dimensioniert.

Bei einem oberleitungsversorgten (Hybrid)-LKW muss die Oberleitungsleistung nicht nur die Traktionsenergie und Nebenverbraucher decken, sondern auch die Batterie für die oberleitungsfreien Streckenabschnitte aufladen. Mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit v_{ϕ} von 80 km/h, einem durchschnittlichen Energieverbrauch e von 1,83 kWh/km (nach Kapitel 4.1) sowie der Streckenlänge s_{OL} unter Oberleitung zum Nachladen der Batterie und der Streckenlänge s_{Bat} eines nachfolgenden oberleitungsfreien Abschnitts (in welchem das Fahrzeug mit Energie aus Batterie fährt) berechnet sich die Leistung P_{Pan} , die am Pantographen des Fahrzeugs ankommen muss, nach folgender Formel:

$$P_{\text{Pan}} = e \cdot v_{\phi} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta_{\text{Bat,lad}} \cdot \eta_{\text{Pan}}} \cdot \frac{s_{\text{Bat}}}{s_{\text{OL}}}\right). \quad (4.4)$$

Der erste Summand in dieser Formel gibt die durchschnittliche Traktionsleistung des Fahrzeugs wieder und der zweite Summand die zusätzlich benötigte Leistung zum Laden der Batterie. Der Ladewirkungsgrad der Batterie $\eta_{\text{Bat,lad}}$ wird mithilfe vorläufiger Simulationen zu 97 % angenommen.

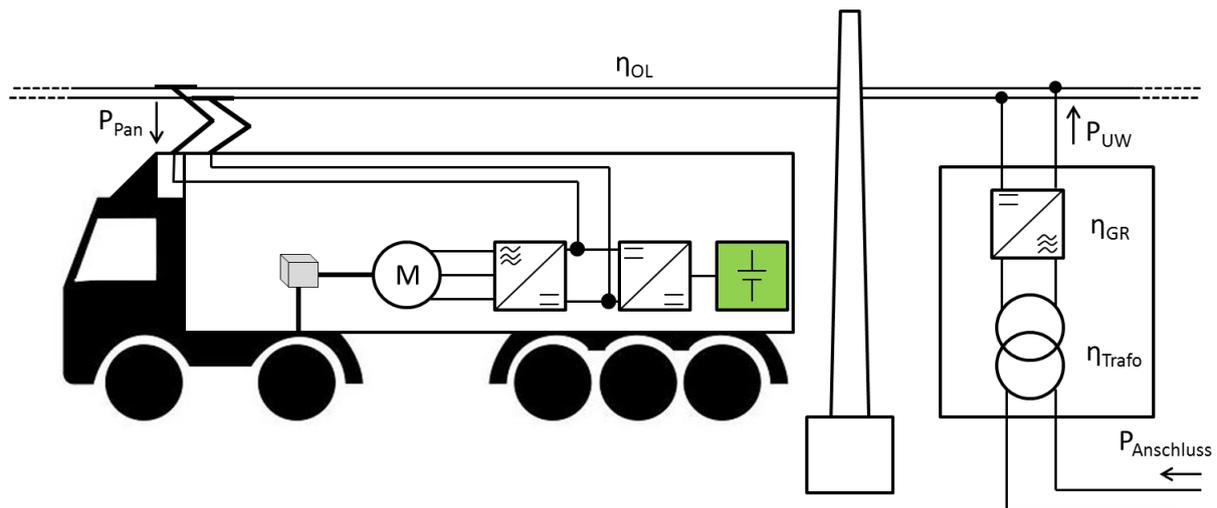


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Komponenten einer Oberleitungsinfrastruktur und des Antriebsstrangs eines oberleitungsversorgten LKW

Mit den in Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 gemachten Annahmen zur Länge der elektrifizierten und oberleitungsfreien Abschnitte sowie einer Tagesstrecke von 720 km (vgl. Kapitel 5.1) wird die Strecke s_{OL} ermittelt, während der die Batterie für die nachfolgende oberleitungsfreie Strecke geladen werden kann. Für die komplette Ausbaustufe betragen die oberleitungsfreien Abschnitte jeweils 20 km am Anfang und Ende der Tagesstrecke. Somit beträgt die Strecke s_{OL} 680 km (Tabelle 4-7). Bei der partiellen Ausbaustufe soll 1 km Oberleitung die Batterie für 2 km oberleitungsfreie Fahrt laden. Nimmt man auch hier die Tagesstrecke von 720 km an und berücksichtigt die nicht elektrifizierten Strecken von 20 km abseits der Autobahn am Anfang und Ende der Fahrt, so beträgt die Tagesfahrstrecke s_{OL} unter Oberleitung ein Drittel von 680 km, also ca. 227 km. Der Rest der Tagesstrecke von 493 km wird mit Energie aus der Batterie gefahren (Tabelle 4-7). Mit der gewählten Batteriekapazität von 120 kWh sowie unter Berücksichtigung der alterungsbedingten Kapazitätsabnahme auf 80 % und dem durchschnittlichen Energieverbrauch e von 1,83 kWh/km ergibt sich die Länge eines Oberleitungsabschnitts zu 26 km. Bei dem mittleren Ausbauszenario für den Hybrid-LKW werden 60 % der Tagesstrecke elektrisch gefahren, was 430 km entspricht. Mit den in Tabelle 4-7 angegebenen Werten und der Formel (4.4) wird die am Pantographen des LKW bereitzustellende Leistung P_{Pan} berechnet.

Ausbaustufe der Oberleitung	Komplett	Partiell	Mittel
Verfügbare Tagesfahrstrecke s_{OL} unter Oberleitung zum Nachladen der Batterie	680 km	230 km	430 km
Tagesfahrstrecke s_{Bat} ohne Oberleitung mit Energie aus Batterie	40 km	490 km	40 km
Leistung P_{Pan} am Pantographen des LKW	155 kW	480 kW	160 kW

Tabelle 4-7: Die am Pantographen des LKW benötigte Leistung zur Deckung der Traktion und Nachladung der Batterie

Mit der Leistung P_{Pan} eines einzelnen LKW werden nun die Anschlussleistungen der Unterwerke berechnet. Dazu werden die Verkehrsstärke und die Anzahl der Unterwerke benötigt. In [24] wird eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke von 8620 LKW pro Fahrtrichtung als Mittelwert für alle bundesdeutschen Autobahnen an Werktagen angegeben. Der Stundenverkehr variiert jedoch abhängig von der Tagesuhrzeit. Nimmt man an, dass die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke sich auf die Uhrzeit von 6 bis 22 Uhr verteilt, sodass in der Nacht keine LKW fahren, so ergibt sich eine stündliche Verkehrsstärke n_{LKW} von 540 LKW pro Stunde und Richtung. Dieser Wert wird für die Ausbaustufen komplett und partiell angenommen, weil sie das komplette Autobahnnetz umfassen. Für die mittlere Ausbaustufe wird eine höhere Verkehrsstärke von 720 LKW pro Stunde und Richtung in Anlehnung an [5] angenommen, weil bei dieser Ausbaustufe die Elektrifizierung der für den Güterverkehr wichtigsten Autobahnstrecken angenommen wird. Die Anzahl der Unterwerke n_{UW} wird in [5] bei einer Oberleitungsspannung von 1,5 kV DC mit 20 Unterwerken pro 100 km angegeben, wobei als ein Berechnungskriterium die Einhaltung der Spannungsgrenzen am Fahrzeug beachtet wird. Somit speist ein Unterwerk eine Strecke von 5 km mit dem Verkehr in beide Richtungen.

Mit den oben genannten Werten der Verkehrsstärke n_{LKW} , der Anzahl der Unterwerke n_{UW} und der Leistung P_{Pan} eines einzelnen LKW können nun die Anzahl der LKW auf der Einspeisestrecke eines Unterwerks $n_{LKW,UW}$ und anschließend die Ausgangsleistung P_{UW} eines Unterwerks mit Hilfe der folgenden Formeln berechnet werden:

$$n_{LKW,UW} = \frac{2 \cdot n_{LKW}}{v_{\phi} \cdot n_{UW}}, \quad (4.5)$$

$$P_{UW} = 1/\eta_{OL} \cdot n_{LKW,UW} \cdot P_{Pan}. \quad (4.6)$$

Die resultierenden Werte sind in Tabelle 4-8 angegeben, wobei für den Wirkungsgrad η_{OL} der Energieübertragung über Oberleitung 95 % angenommen wird [6]. Mit den angenommenen Wirkungsgraden der Unterwerkskomponenten (Wirkungsgrad des Gleichrichters η_{GR} von 98 % und Transformators η_{Trafo} von 97 % [6]) kann nun die Anschlussleistung $P_{Anschluss, UW}$ eines Unterwerks an Mittelspannungsnetz berechnet werden:

$$P_{Anschluss, UW} = 1/\eta_{GR} \cdot 1/\eta_{Trafo} \cdot P_{UW} \quad (4.7)$$

Mit der gesamten Oberleitungslänge in der jeweiligen Ausbaustufe wird schließlich die notwendige Gesamtzahl der Unterwerke berechnet (Tabelle 4-8).

Ausbaustufe der Oberleitung	Komplett	Partiell	Mittel
Verkehrsstärke n_{LKW} (pro Stunde und Richtung)	540 LKW	540 LKW	720 LKW
Anzahl der Unterwerke n_{UW} pro 100 km	20 Unterwerke	20 Unterwerke	20 Unterwerke
Anzahl der LKW $n_{LKW, UW}$ auf Einspeisetrecke eines Unterwerks (in beide Richtungen)	67,5 LKW	67,5 LKW	90 LKW
Ausgangsleistung P_{UW} eines Unterwerks	11.000 kW	33.980 kW	15.170 kW
Anschlussleistung $P_{Anschluss, UW}$ eines Unterwerks	11.600 kW	35.750 kW	16.000 kW
Gesamtlänge der Oberleitung	13.000 km	4.330 km	4.160 km
Gesamtzahl der Unterwerke	2600 Unterwerke	867 Unterwerke	832 Unterwerke

Tabelle 4-8: Durchschnittliche Dimensionierung der Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur

Die berechneten Anschlussleistungen der Unterwerke liegen in der Größenordnung der Bahnunterwerke, die als Vergleich im Kapitel 4.5.1 erwähnt wurden. Erwartungsgemäß ergibt sich die höchste Unterwerksanschlussleistung bei der partiellen Ausbaustufe, bei der die Batterie intensiv nachgeladen werden muss. Hier ist die Leistung der Unterwerke ungefähr um den Faktor 3 höher. In diesem Ausbauszenario ergibt sich auch die geringste Zahl der Unterwerke, weil die Gesamtlänge der elektrifizierten Strecken die niedrigste von den drei Ausbaustufen ist.

Ferner ist anzumerken, dass die hier durchgeführte Auslegung eines Unterwerks auf durchschnittliche Leistung möglich ist, weil ein oberleitungsversorgter LKW zusätzlich über

eine Batterie zur Leistungsaddition verfügt. Unabhängig davon kann es bei streckenspezifischer Auslegung der Unterwerke zu Abweichungen der notwendigen Leistungen nach oben oder unten kommen z.B. wegen Streckentopographien, Fahrzeugverkehrszahlen etc.

Es liegt nahe, einen Vergleich der Oberleitungs- mit der Ladeinfrastruktur aus Kapitel 4.5.1 hinsichtlich der gesamten Anschlussleistung der kompletten Infrastrukturen durchzuführen. Die Ladeinfrastruktur benötigt insgesamt eine Anschlussleistung von rund 15 GW, während die Oberleitungsinfrastruktur rund 30 GW bei kompletter sowie partieller Ausbaustufe benötigt. Dies liegt an der längeren Verweildauer des LKW an der Ladeinfrastruktur, die sich unter Berücksichtigung der Ruhezeiten für Fahrer zu 15 Stunden pro Tag ergibt. In Fahrt verbringt der LKW dagegen nur 9 Stunden pro Tag, wobei die Fahrzeit unter Oberleitung noch etwas geringer ist, sodass für Oberleitungsinfrastruktur eine höhere Anschlussleistung benötigt wird. Betrachtet man die insgesamt installierte Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland von ca. 200 GW im Jahr 2017 [105], so macht die Anschlussleistung der Ladeinfrastruktur 7,5 % und der Oberleitungsinfrastruktur 15 % davon aus. Dies deutet auf einen deutlichen Anstieg der Leistungsnachfrage hin. Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,83 kWh/km, Zugrundelegung der oben angenommenen Wirkungsgrade der Infrastruktur und einer täglichen Strecke von 700 km würde ein batteriegetriebener LKW 1390 kWh und ein oberleitungsversorgter LKW 1420 kWh ab dem Anschlusspunkt der Infrastruktur verbrauchen. Bei 260 Betriebstagen im Jahr und bei einer Anzahl von rund 72.000 teilnehmenden LKW (vgl. Kapitel 5.5.2) würde ein Energiebedarf von ca. 26 TWh für batteriegetriebene bzw. 26,6 TWh für oberleitungsversorgte LKW resultieren. Dies entspricht ungefähr 5 % der gesamten Stromerzeugung in Deutschland von ca. 550 TWh im Jahr 2017 [106]. Anhand dieser Zahlen erkennt man, dass bei Umstellung auf die elektrisch angetriebenen LKW auch die energiewirtschaftlichen Auswirkungen näher untersucht werden müssen.

In den folgenden Kapiteln wird die Ladeinfrastruktur hinsichtlich der Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen unter Einbeziehung der Fahrzeuge betrachtet.

5 Modellierung der Lebenszykluskosten

Um die in dieser Arbeit betrachteten Technologien für Fernverkehr-LKW zu vergleichen, werden die Lebenszykluskosten dieser LKW und der dazugehörigen Infrastruktur berechnet. Dazu wird zuerst ein Betriebsszenario für den Fernverkehr-LKW definiert. Im anschließenden Kapitel werden die Bestandteile der Lebenszykluskosten und die Berechnungsmethodik erläutert. Es wird die Kostenparametrierung für einzelne betrachtete LKW-Antriebstechnologien vorgenommen und danach werden die Ergebnisse der Fahrsimulation und Lebenszykluskostenrechnung einzelner Szenarien vorgestellt. Schließlich werden die Entwicklung wichtiger Kostenparameter und ihr Einfluss auf die Lebenszykluskosten untersucht.

5.1 Definition des Betriebsszenarios

Zum Berechnen der Lebenszykluskosten der jeweiligen LKW-Technologie wird ein Betriebsszenario für Fernverkehr-LKW definiert. Die Beschreibungen in diesem Kapitel basieren weitgehend auf [73]. Es wird eine Strecke mit durchschnittlichem Verbrauch definiert, wobei die Einordnung des Verbrauchs der einzelnen Strecken anhand der Ergebnisse des Kapitels 4.1 erfolgt.

Ausgehend von gesetzlichen Bestimmungen (Kapitel 2.1.4) wird ein tägliches Betriebsszenario bestehend aus 4,5 Stunden Fahrt gefolgt von einer 45-minütigen Pause sowie weiteren 4,5 Stunden Fahrt festgelegt. Dies entspricht der maximalen täglichen Fahrzeit, worauf die Energiespeicherkomponenten des LKW ausgelegt werden sollen. Die restliche Zeit des täglichen Betriebsszenarios von 11 Stunden und 45 Minuten wird als Ruhezeit für den Fahrer genutzt.

Bei dem batteriegetriebenen LKW wird die Ruhezeit zum Laden der Batterie genutzt. Während der kürzeren 45-minütigen Pause wird die Batterie mit einer hohen Ladeleistung geladen. In der längeren Nachtpause wird die Batterie mit einer geringeren Ladeleistung geladen, um die Batterie zu schonen. Der oberleitungsversorgte LKW bezieht die gesamte notwendige Energie aus der Oberleitung während der Fahrt. Es wird angenommen, dass keine Nachladung über eine stationäre Ladestation stattfindet. Die Tankzeiten für einen brennstoffzellengetriebenen LKW und einen konventionellen Diesel-LKW sind relativ kurz. Die Dauer der Betankung mit Wasserstoff kann zu ca. 15 Minuten angenommen werden [8], [34]. Die im Fernverkehr eingesetzten Diesel-LKW verfügen über Dieseltanks in Größenordnungen von 400 bis zu 1000 Litern, sodass sie nicht täglich getankt werden

müssen. Daher wird die Betankungszeit bei brennstoffzellengetriebenen LKW und bei Diesel-LKW vernachlässigt.

Das resultierende Tagesbetriebsszenario ist für den Fall eines batteriegetriebenen LKW in Abbildung 5-1 gezeigt. Ferner wird angenommen, dass der LKW 5 Tage pro Woche und 52 Wochen pro Jahr dieselbe Strecke fährt. Das resultierende wöchentliche Betriebsszenario ist ebenfalls in Abbildung 5-1 dargestellt.

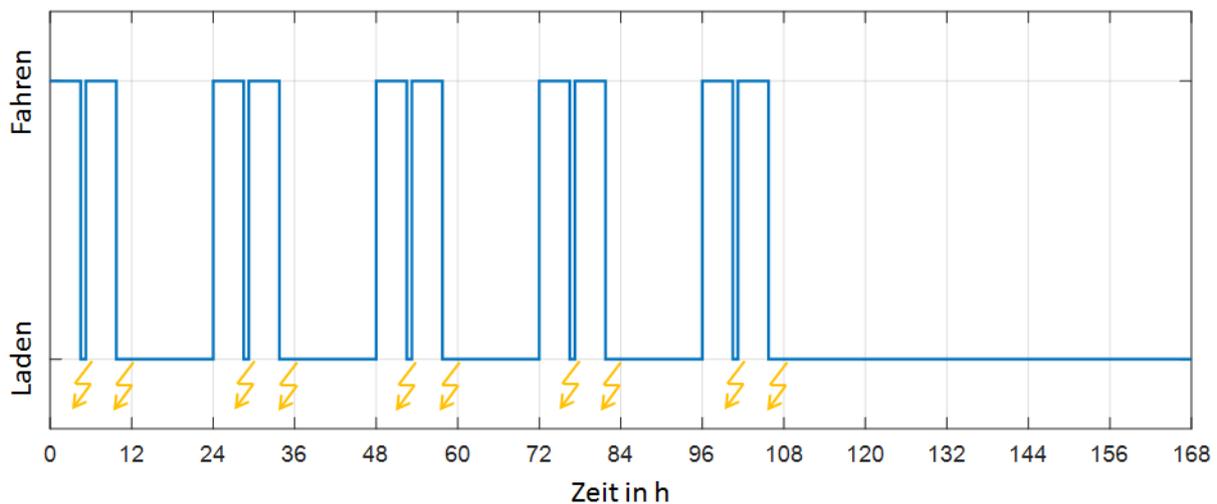


Abbildung 5-1: Wöchentliches Betriebsszenario bestehend aus 5 Tagesbetriebsszenarien. Anfang der Ladevorgänge für den batteriegetriebenen LKW ist durch Blitzzeichen markiert.

Um ein realitätsnahes Betriebsszenario und Verbrauch zu erhalten, wird die Strecke unter Benutzung der GPS-Koordinaten aus Internetkartendiensten [88], [89] und Höhenangaben aus [90] erstellt. Die Eckdaten dieser Strecke sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst und die Abbildung 5-2 zeigt ihr Höhenprofil. Es ist zu erkennen, dass die gewählte Strecke eine unregelmäßige Topographie hat, die ab etwa 250 km anspruchsvoller als zu Beginn ist. Um die unterschiedlichen Leergewichte der verschiedenen LKW-Technologien zu berücksichtigen, wird eine konstante Nutzlast von 18,2 t für alle Fahrzeuge angenommen. Dies entspricht der durchschnittlichen Auslastung von 70 % für Fernverkehr-LKW (vgl. Kapitel 2.1.2).

Betriebsszenario	Tägliche Streckenlänge	Autobahnabschnitte	Nutzlast
Durchschnittliche Strecke	723 km	A6, A9, A10, A11	18,2 t

Tabelle 5-1: Eckdaten des definierten Betriebsszenarios

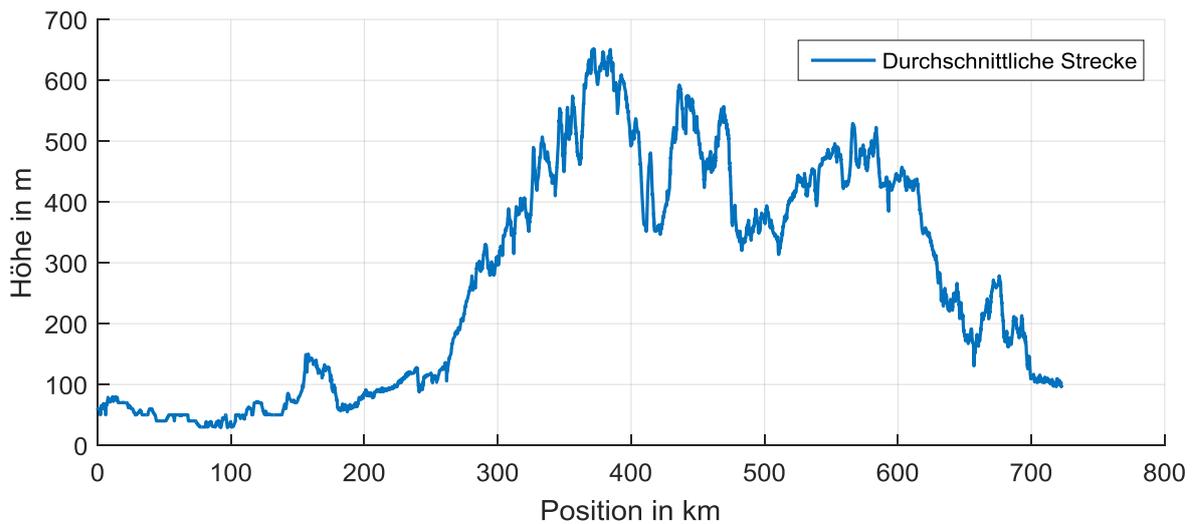


Abbildung 5-2: Höhenprofil der Strecke in dem definierten Betriebsszenario

5.2 Berechnung der Lebenszykluskosten

Unter Benutzung der zuvor definierten Betriebsszenarien werden die Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Costs, kurz LCC) für die betrachteten LKW-Technologien einschließlich der Lade- bzw. Tankinfrastruktur berechnet. Der Inhalt dieses Kapitels basiert weitgehend auf [73]. Die Abbildung 5-3 zeigt den für die Berechnung der LCC notwendigen Datenfluss. Das Betriebsszenario mit den Streckendaten sowie den LKW-Parametern wird an das in Kapitel 3 beschriebene Fahrzeugsimulationsmodell übergeben. Das Fahrzeugsimulationsmodell gibt einerseits die Performancedaten des simulierten LKW wie Geschwindigkeit, Leistung einzelner Komponenten und Energie-, Diesel-, bzw. Wasserstoffverbrauch aus. Andererseits gibt es die Daten der Batteriezellen, die Spannung, Strom, Temperatur und SOC enthalten. Nach einer Ausführung des Fahrzeugsimulationsmodells werden die Daten der Batteriezellen von dem Zellenalterungsmodell aus [81] ausgewertet, um den Alterungszustand der Zelle zu bestimmen. Die aktuellen Werte der Kapazität und des Innenwiderstands der Zelle werden in die Fahrzeugsimulation zurückgespeist und die nächste Iteration wird gestartet, wobei angenommen wird, dass Kapazität und Innenwiderstand der Zellen innerhalb eines Zeitraums von einem Jahr konstant bleiben. Dies stellt einen Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Ergebnisse und der Iterationszahl bzw. der Simulationsdauer dar. Schließlich, nachdem die Zelle ihr Lebensende erreicht hat (üblicherweise 80 % der Nennkapazität bzw. doppelter Innenwiderstand), wird die Berechnung der LCC gestartet. Diese erhält die Parametersätze für Kosten einzelner Komponenten, Treibstoff- und Energiekosten, Servicekosten sowie Kostenentwicklung.

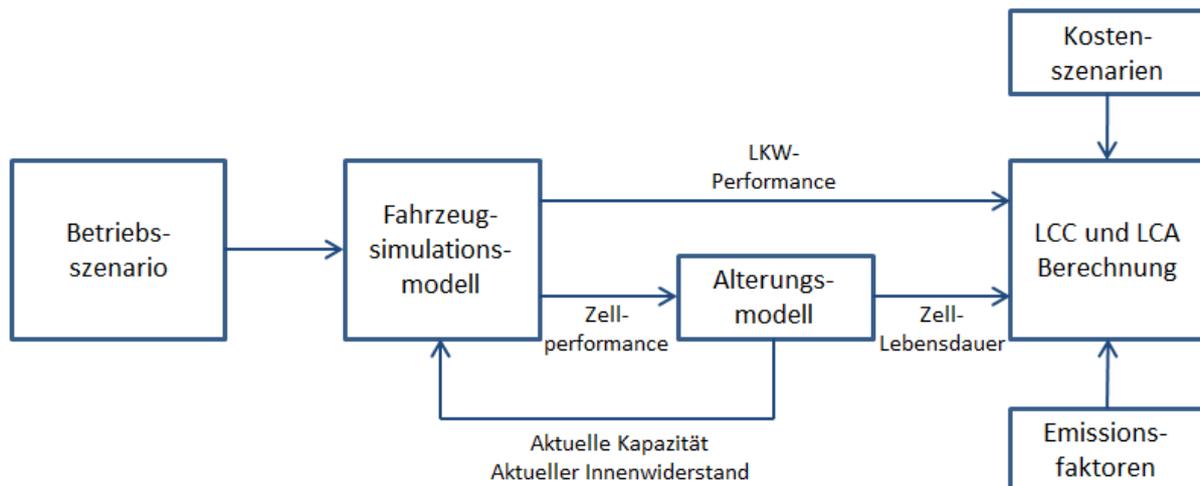


Abbildung 5-3: Die zur Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) und Lebenszyklusanalyse (LCA) notwendigen Daten

Die Abbildung 5-4 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit berücksichtigten Bestandteile der Lebenszykluskosten für alle LKW-Technologien. Die Investitionskosten des Fahrzeugs setzen sich aus der Fahrzeugkarosserie und dem Antriebsstrang zusammen, der je nach betrachteter Technologie aus Dieselmotor, elektrischer Maschine, Batterie, Brennstoffzellensystem, Leistungselektronik und dem Stromabnehmer besteht. Die Treibstoffkosten bzw. die Energiekosten werden aus dem Energie-, Diesel- bzw. Wasserstoffverbrauch berechnet, der vom Fahrzeugsimulationsmodell ausgegeben wird. Die Infrastruktur wird je nach LKW-Technologie über die Kosten der Ladestationen, der Oberleitung einschließlich Unterwerke oder der Wasserstofftankstellen berücksichtigt. Für Diesel-LKW werden die Tankstellenkosten als über Dieselposten abgegolten angenommen. Fixe Kosten berücksichtigen die von der Laufleistung unabhängigen Kraftfahrzeugsteuer und Versicherungsprämien. Die variablen Kosten setzen sich aus kilometerabhängigen Kosten für Wartung und Maut zusammen. Auf die Parametrierung der einzelnen Kosten wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Die Berechnung der LCC erfolgt für alle oben genannten Bestandteile mit der Barwert-Methode. Der Barwert referenziert den Wert der zukünftigen Zahlungen auf den heutigen Zeitpunkt unter Annahme einer bestimmten Verzinsung [107]. So wird sichergestellt, dass zukünftige Kosten auf denselben Zeitpunkt referenziert und unter Berücksichtigung von Zinseinflüssen angepasst werden. Dadurch wird es auch möglich, die Lebenszykluskosten der Szenarien mit unterschiedlichen Dauern zu vergleichen. Der Barwert BW berechnet sich unter Berücksichtigung des Restwerts RW_T nach der Formel:

$$BW = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^{t-1}} - \frac{RW_T}{(1+i)^T}, \quad (5.1)$$

wobei t das laufende Jahr, C_t die zukünftigen Kosten einer Komponente im Jahr t , T die Szenariendauer und i der jährliche Zinssatz ist. Um die unterschiedlichen Lebensdauern der Komponenten zu berücksichtigen, wird der Restwert RW_T der Komponenten von LKW und

Ladeinfrastruktur berechnet. Es wird eine lineare Restwertentwicklung nach der folgenden Formel angenommen:

$$RW_T = C_0 \cdot (L_{\text{rest}, T} / L_0) \cdot (1 + j)^T, \quad (5.2)$$

mit Komponentenkosten C_0 zu Beginn des Szenarios, verbleibender Lebensdauer $L_{\text{rest}, T}$ der Komponente, der gesamten Lebensdauer L_0 der Komponente und der Inflationsrate j . Für die LCC-Berechnung wird eine konstante jährliche Inflationsrate von 1,39 % und ein konstanter jährlicher Zinssatz von 2,2 % angenommen. Der Betrachtungszeitraum der LCC-Rechnung wird so angepasst, dass eine Laufleistung von max. 1 Mio. km bei allen LKW-Technologien erreicht wird.

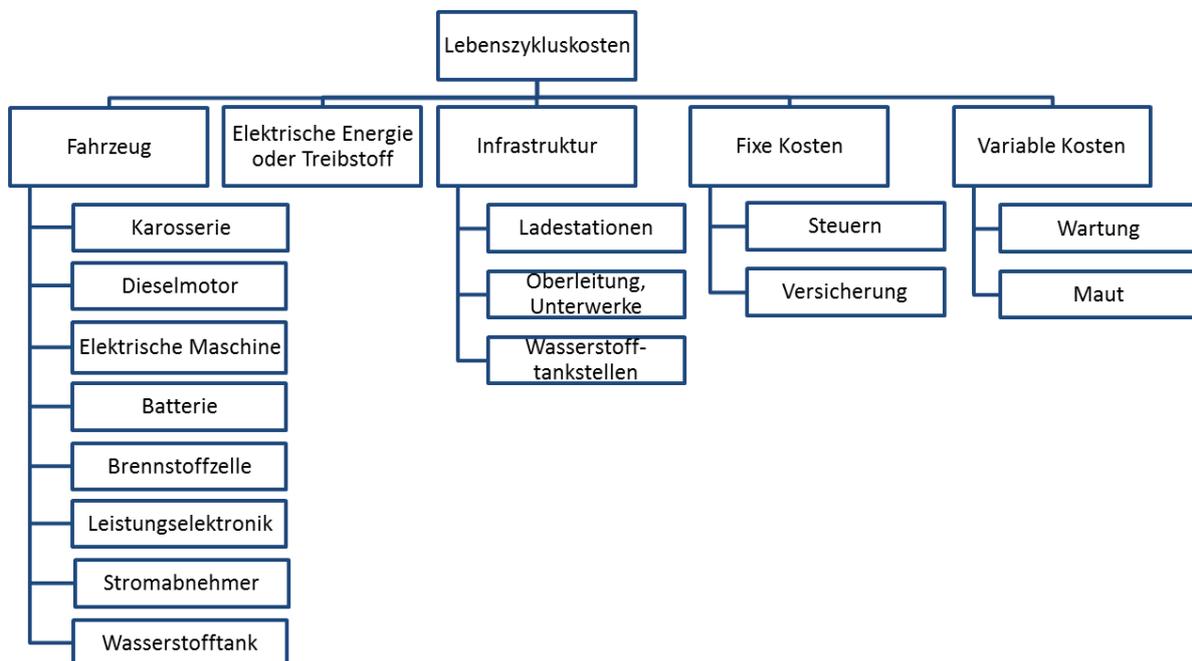


Abbildung 5-4: Zusammensetzung der Lebenszykluskosten

5.3 Parametrierung der Lebenszykluskostenrechnung

In diesem Kapitel sind die Standardparameter für die Berechnung der LCC zusammengetragen. Die folgenden Unterkapitel behandeln jede in dieser Arbeit untersuchte LKW-Technologie sowie die Infrastrukturarten. Außerdem werden einige wichtige Parameter variiert, um den Einfluss dieser Parameter zu quantifizieren. Dies wird in den betreffenden Ergebniskapiteln angegeben. Die Kostenparameter werden ohne Mehrwertsteuer angegeben.

5.3.1 Konventionell angetriebener LKW

Tabelle 5-2 gibt die angenommenen Kostenparameter für einen konventionellen Diesel-LKW in der Form eines Sattelzugs mit einem Gesamtgewicht von bis zu 40 t an. Die Investitionskosten eines Diesel-LKW sind hier als Kosten für einen kompletten LKW inklusive des Dieselantriebsstrangs angegeben. Die Investitionskosten der LKW mit alternativen Antriebsstrangtechnologien werden in den folgenden Kapiteln auf die Komponenten des Antriebsstrangs aufgeschlüsselt.

Der Dieselpreis unterliegt grundsätzlich starken Schwankungen. So lag der Jahresdurchschnitt im Jahr 2012 bei ca. 150 ct/l und im Jahr 2016 bei ca. 107 ct/l (inkl. Mehrwertsteuer) [108]. Der kumulierte Mittelwert der Jahresdurchschnittspreise zeigt jedoch seit 2000 bis 2017 eine Erhöhung von ca. 2,3 %/a. Der Mittelwert der Jahresdurchschnittspreise liegt in diesem Zeitraum bei etwa 113 ct/l. Abzüglich des Anteils der Mehrwertsteuer von 16 % an dem Dieselpreis [109] ergeben sich die Dieseldkosten von ca. 94,9 ct/l. Ferner werden die Kosten der Tankinfrastruktur nicht separat sondern als implizit in den Dieseldkosten enthalten betrachtet, weil die Tankstellen über die Einnahmen aus dem Kraftstoffverkauf finanziert werden.

Parameter	Wert	Quelle
Fahrzeug		
Diesel-LKW (komplett)	120.000 €	[34]
Treibstoff		
Diesel	0,949 €/l	[108], [109] und eigene Berechnung
Dieseldkostenentwicklung	2,3%/a	[108] und eigene Berechnung
Fixe Kosten		
Kraftfahrzeugsteuer	556 €/a	[110]
Versicherung	2.936 €/a	[111]
Variable Kosten		
Wartung	0,06 €/km	[34]
Maut	0,135 €/km	[112]

Tabelle 5-2: Kostenparameter für Diesel-LKW

Die Kraftfahrzeugsteuer ist für einen LKW unter Annahme eines Fahrzeugs mit aktueller Abgasnorm und Gesamtgewicht bis zu 40 t angegeben. Die Versicherungsbeiträge werden sowohl für konventionellen als auch für alternative LKW gleich angenommen.

Für variable Kosten werden Wartungskosten entsprechend der Kostenrechnung in [34] und die Mautkosten für einen Sattelzug mit 5 Achsen und aktueller Abgasnorm EURO 6 angenommen [112].

Als die maximale Lebensdauer des konventionell angetriebenen LKW sowie der Karosserie und des Dieselmotors bei alternativen LKW-Technologien wird die Gesamtfahrleistung des definierten Betriebsszenarios angenommen.

5.3.2 Batteriegetriebener LKW

In der Tabelle 5-3 sind die Kostenparameter für den batteriegetriebenen LKW zusammengestellt. Die Fahrzeuginvestitionskosten wurden in Kosten für Karosserie und Komponenten des Antriebsstrangs unterteilt. Die Karosserie enthält dabei alle Teile eines Sattelzugfahrzeugs außer den Antriebsstrangkomponenten, die gesondert angegeben sind.

Die Kosten der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik werden basierend auf [34] zu 27,5 €/kW und 35 €/kW angenommen. Ausgehend von der Leistung der im Kapitel 3.2.2 modellierten elektrischen Maschine werden ihre Kosten und die der Leistungselektronik berechnet.

Die Batteriekosten werden basierend auf [43] und den eigenen Annahmen im Kapitel 3.2.2 definiert. Wird eine Ersatzbatterie benötigt, werden ihre Kosten unter Berücksichtigung der Batteriekostenentwicklung berechnet. Laut Prognosen in [43] halbieren sich die Kosten näherungsweise in den Jahren 2015 bis 2025. Dies entspricht einer prozentualen Kostenänderung von ca. -6,7 %/a.

Die Batterielebensdauer wird abhängig von den Simulationsergebnissen des ausgewählten Betriebsszenarios mit Hilfe des Alterungsmodells aus [81] bestimmt (Kapitel 3.2.2).

Der Strompreis wird unter Annahme eines industriellen Großverbrauchers ab einem Jahresverbrauch von 160 MWh angegeben [113]. Ein Verbrauch in dieser Größenordnung gestaltet sich bereits ab 1 LKW in dem gewählten Szenario auch bei einem geringen Energieverbrauch des Fahrzeugs als durchaus realistisch. So werden z.B. bei einer Fahrleistung von 723 km pro Tag rund 960 kWh elektrischer Energie benötigt (vgl. Kapitel 4.1) und bei einem Einsatz von 5 Tagen pro Woche und 52 Wochen pro Jahr resultieren ca. 250 MWh Energieverbrauch. Betrachtet man die Entwicklung des Industriestrompreises in den Jahren 2004 bis 2014, so stellt man einen durchschnittlichen Kostenzuwachs von ca. 5,3 %/a fest [113].

Da für die Elektrofahrzeuge laut dem Kraftfahrzeugsteuergesetz eine Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer gilt [110], wird diese für den batteriegetriebenen LKW nicht berechnet. Die Versicherung und die Mautkosten werden dagegen wie bei einem konventionellen LKW

angesetzt. Da ein Elektrofahrzeug tendenziell weniger wartungsintensiv als ein konventionelles Fahrzeug ist (z.B. aufgrund einer geringeren Zahl rotierender Motorbauteile oder nicht notwendiger Motorölwechsel), werden geringere Wartungskosten angesetzt.

Parameter	Wert	Quelle
Fahrzeug		
Karosserie	91.800 €	[34]
Elektrische Maschine	27,5 €/kW	[34]
Leistungselektronik	35 €/kW	[34]
Batterie mit Zelltyp HEa (Hochenergiezellen)	300 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batterie mit Zelltyp HEc (Hochenergiezellen)	200 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batterie mit Zelltyp HPa (Hochleistungszellen)	400 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batteriekostenentwicklung	-6.7 %/a	[43]
Energie		
Strom	0,139 €/kWh	[113]
Stromkostenentwicklung ³	+5,3 %/a	[113]
Fixe Kosten		
Kraftfahrzeugsteuer	0 €/a	[110]
Versicherung	2.936 €/a	[111]
Variable Kosten		
Wartung	0,04 €/km	[34]
Maut	0,135 €/km	[112]

Tabelle 5-3: Kostenparameter für den batteriegetriebenen LKW

Die Kostenparameter der Ladeinfrastruktur für batteriegetriebene LKW sind in Tabelle 5-4 zusammengestellt. Da es noch keine Ladestationen für schwere LKW auf dem Markt gibt, gibt es eine gewisse Unsicherheit bei den Kostenparametern. Daher basieren die hier getroffenen Kostenannahmen auf Informationen aus der Kommunikation mit Herstellern der

³ Die hier eher konservativ angenommene Stromkostenentwicklung gilt für einen industriellen Großverbraucher. Der Stromkostenanstieg für Haushaltsendverbraucher fällt geringer aus, sodass in Literatur auch deutlich kleinere Werte für die Stromkostenentwicklung vorkommen.

Ladestationen für Elektrobusse, die ebenfalls hohe Ladeleistungen bis zu 500 kW verwenden. Die hier gezeigten Kosten beziehen sich auf eine Schnellladestation mit 910 kW Leistung und eine Langsamladestation mit 50 kW Leistung sowie die Konfiguration der Ladeinfrastruktur einer durchschnittlichen Rastanlage wie in Kapitel 4.5.1 bestimmt. Die Herrichtungskosten beziehen sich auf die Bauarbeiten bei der Errichtung von Ladestationen. Die Netzanschlusskosten beschreiben die Kosten, die von einem Netzbetreiber für die Erstellung eines Anschlusses von dem Ladeort bis an das Mittelspannungsnetz erhoben werden. Sie setzen sich aus einem fixen, leistungsspezifischem Anteil sowie einem variablen, entfernungsabhängigen Anteil zusammen. Der Letztere wird unter Annahme einer Entfernung von 1 km vom Anschluss des Ladeortes bis zum Anschlusspunkt des Mittelspannungsnetzes berechnet.

Parameter	Wert
Ladeort	
Leistungselektronik (in Schnellladestation)	160.000 €
Leistungselektronik (in Langsamladestation)	9.800 €
Ladekupplung (bei Schnellladestation)	21.000 €
Ladekupplung (bei Langsamladestation)	1.400 €
Herrichtungskosten (bei Schnellladestation)	85.000 €
Herrichtungskosten (bei Langsamladestation)	10.000 €
Transformator	310.000 €
Netzanschluss	
Netzanschlusskosten (bei Annahme: 1 km bis zum Netzknoten)	Fix: 25,9 €/kW, Variabel: 140 €/m, Total: 399.000 €
Baukostenzuschüsse	60,44 €/kW
Lebensdauern	
Lebensdauer Transformator	25 a
Lebensdauer Leistungselektronik	12 a

Tabelle 5-4: Kostenparameter für die Ladeinfrastruktur. Die Kostenangaben basieren auf vertraulichen Informationen aus Kommunikation mit Herstellern der Ladesysteme für Elektrobusse [114].

Ferner werden vom Netzbetreiber Baukostenzuschüsse zur Verstärkung der Anlagen des Energienetzes erhoben, die abhängig von der Anschlussleistung des Ladeortes sind. Schließlich werden Lebensdauerannahmen für Transformatoren und Leistungselektronik getroffen, weil die Ladestationen im Allgemeinen eine längere Lebensdauer als die LKW haben. Ihr Restwert wird zum Szenarienende berechnet und entsprechend Formel (5.1) bei der Kostenberechnung berücksichtigt. Insbesondere für einen Transformator können auch höhere Lebensdauerannahmen (bspw. 40 Jahre) gemacht werden. Mit den hier getroffenen Annahmen soll eine konservative Abschätzung der Ladeinfrastrukturkosten erreicht werden.

5.3.3 Oberleitungsversorgter LKW

Ein oberleitungsversorgter LKW besitzt größtenteils die gleichen Komponenten wie ein batteriegetriebener LKW, sodass hierfür die gleichen Kostenparameter angenommen wurden. Ein zusätzlicher Kostenparameter sind die Kosten für Stromabnehmer. Ein oberleitungsversorgter LKW, wie im Forschungsprojekt ENUBA, besitzt zwei Stromabnehmer [5], [6], die hier als ein Kostenparameter zusammengefasst angegeben sind (Tabelle 5-5). Auch die Kostenparameter für Energie, fixe und variable Kosten sind gleich denen des batteriegetriebenen LKW angenommen.

Parameter	Wert	Quelle
Fahrzeug		
Stromabnehmer	38.000 €	[34]

Tabelle 5-5: Zusätzlicher Kostenparameter eines oberleitungsversorgten LKW. Andere Kostenparameter sind gleich denen des batteriegetriebenen LKW (Tabelle 5-3).

Die Oberleitungsinfrastruktur setzt sich aus Unterwerken mit Anschlüssen an das Energienetz, Oberleitungen sowie Masten zusammen. Die Tabelle 5-6 stellt die notwendigen Kostenparameter sowie Lebensdauern zusammen. Bei den Unterwerken sind die spezifischen Gleichrichterkosten zu etwa der Hälfte der spezifischen Kosten der Leistungselektronik in den Ladestationen angenommen. Auch der Fixkostenanteil des Netzanschlusses wird leistungsspezifisch angegeben und für den variablen Kostenanteil wird eine Entfernung von 2,5 km bis zum Anschluss an das Mittelspannungsnetz entsprechend [18] gewählt. Die Herrichtungskosten werden gleich den Herrichtungskosten einer Schnellladestation angenommen. Die Kostenannahmen für Oberleitung und Masten pro Richtung basieren auf [115] mit der Annahme von 65 m Abstand zwischen zwei benachbarten Masten [6].

Parameter	Wert	Quelle
Unterwerk		
Gleichrichter	80 €/kW	[114]
Transformator	45 €/kW	[114]
Herrichtungskosten	85.000 €	[114]
Netzanschluss		
Netzanschlusskosten (bei Annahme: 2,5 km bis zum Netzknoten)	Fix: 25,9 €/kW, Variabel: 140 €/m	[114], [18]
Baukostenzuschüsse	60,44 €/kW	[114]
Oberleitung		
Oberleitung inkl. Masten (pro Fahrtrichtung)	730 €/m	[6], [115]
Lebensdauern		
Lebensdauer Transformator	25 a	[114]
Lebensdauer Leistungselektronik	12 a	[114]
Lebensdauer Fahrleitung und Masten	25 a	Eigene Annahme

Tabelle 5-6: Kostenparameter für die Oberleitungsinfrastruktur

5.3.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW

Der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW besitzt zusätzlich zu den Komponenten eines vollelektrischen oberleitungsversorgten LKW einen Strang mit Dieselmotor und Generator mit Umrichter (Abbildung 3-6). Die spezifischen Kosten des Dieselmotors werden mit der benötigten Motorleistung von 150 kW (s. Kapitel 4.3.4) skaliert. Für den Dieseltank ist die Hälfte der in [34] angegebenen Kosten für einen Dieseltank eines konventionellen LKW angesetzt, weil der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW einen erheblichen Teil der Szenarienstrecke elektrisch zurücklegt. Der Generator wird mit dem gleichen Kostenparameter wie eine elektrische Maschine berücksichtigt.

Im Gegensatz zum vollelektrischen oberleitungsversorgten LKW wird bei Hybrid-LKW die Kraftfahrzeugsteuer wie bei einem konventionellen Diesel-LKW fällig. Bei den Wartungskosten wird angenommen, dass sie einen Mittelwert zwischen Wartung eines elektrischen und eines konventionellen LKW darstellen.

Die Kostenparameter der Oberleitungsinfrastruktur bleiben unverändert.

Parameter	Wert	Quelle
Fahrzeug		
Dieselmotor	60 €/kW	[34]
Kraftstofftank	500 €	[34]
Generator	27,5 €/kW	[34]
Fixe Kosten		
Kraftfahrzeugsteuer	556 €/a	[110]
Variable Kosten		
Wartung	0,05 €/km	[34] und eigene Annahme

Tabelle 5-7: Abweichende Kostenparameter eines oberleitungsgetriebenen Hybrid-LKW. Andere Kostenparameter sind gleich denen eines vollelektrischen oberleitungsgetriebenen LKW (Tabelle 5-5).

5.3.5 Brennstoffzellengetriebener LKW

Die Tabelle 5-8 stellt die Kostenparameter eines brennstoffzellengetriebenen LKW zusammen. Im Vergleich zu einem batteriegetriebenen LKW enthält der brennstoffzellengetriebene LKW ein Brennstoffzellensystem sowie einen Wasserstofftank. Die spezifischen Kosten des Brennstoffzellensystems und Wasserstofftanks werden mittels linearer Interpolation für das Jahr 2017 aus den Kostenangaben der angegebenen Studien (s. Tabelle 5-8) berechnet und sind als Mittelwert angegeben. Zur Lebensdauer der Brennstoffzelle gibt es noch keine gesicherten Angaben aus dem Betrieb eines LKW. Die meisten Annahmen zu ihrer Lebensdauer in der Literatur basieren daher auf den Erfahrungswerten aus dem Betrieb in Brennstoffzellenbussen, die jedoch anders als die Fernverkehr-LKW meistens im Stadtverkehr unterwegs sind. Rechnet man die in der Studie [116] angegebene Lebensdauer in die Lebensdauer bei dem Betriebsszenario dieser Arbeit um, ergibt sich eine Lebensdauer von ca. 1,4 Jahren. In [117] ist jedoch eine deutlich höhere Lebensdauer von umgerechnet 4,3 Jahren angegeben, die von einem Brennstoffzellenbus in einem Demonstrationsprojekt erreicht wurde. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Mittelwert aus den beiden Lebensdauerangaben genommen. Die spezifischen Kosten des Wasserstofftanks basieren auf den in Tabelle 5-8 angegebenen Quellen. Bezüglich der Lebensdauer des Wasserstofftanks stellt der Bericht [118] Forschungsbedarf fest. Entsprechend diesem Bericht wird die Lebensdauer des Wasserstofftanks auf 10 Jahre festgelegt. Dies ist eine relativ optimistische Annahme, da in einigen Literaturquellen (z.B. [34], [116]) auch niedrigere Lebensdauern z.B. gleich der Fahrzeug- oder Brennstoffzellenlebensdauer angenommen werden.

Parameter	Wert	Quelle
Fahrzeug		
Karosserie	91.800 €	[34]
Elektrische Maschine	27,5 €/kW	[34]
Leistungselektronik	35 €/kW	[34]
Batterie mit Zelltyp HEa (Hochenergiezellen)	300 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batterie mit Zelltyp HEc (Hochenergiezellen)	200 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batterie mit Zelltyp HPa (Hochleistungszellen)	400 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Batteriekostenentwicklung	-6.7 %/a	[43]
Brennstoffzelle	550 €/kW	[34], [116], [119]
Brennstoffzellenkostenentwicklung	-10 %/a	[34], [116], [119]
Lebensdauer der Brennstoffzelle	2,8 Jahre	[116], [117]
Wasserstofftank	960 €/kg _{H2}	[18], [34], [120]
Lebensdauer des Wasserstofftanks	10 Jahre	[118]
Treibstoff		
Wasserstoff	7,1 €/kg	[103]
Wasserstoffkostenentwicklung	-2,3 %/a	[103]
Fixe Kosten		
Kraftfahrzeugsteuer	0 €/a	[110]
Versicherung	2.936 €/a	[111]
Variable Kosten		
Wartung	0,04 €/km	[34]
Maut	0,135 €/km	[112]

Tabelle 5-8: Kostenparameter eines brennstoffzellengetriebenen LKW

Die Wasserstoffkosten basieren auf einer Studie [103], in welcher eine großflächige Nutzung des Wasserstoffs in Personenkraftfahrzeugen und der Ausbau der Tankstelleninfrastruktur angenommen wird. Die Wasserstoffkosten beinhalten bereits die Infrastrukturkosten der

Wasserstofftankstellen und des Wasserstofftransports bis hin zu diesen. Weil die Infrastrukturkosten in dem Wasserstoffpreis bereits enthalten sind, wird die Infrastruktur, ähnlich wie bei dem Diesel-LKW, nicht gesondert betrachtet. Zur Zeit liegen die Wasserstoffkosten an den Tankstellen der Clean Energy Partnership (kurz CEP), einer Initiative des deutschen Bundesverkehrsministeriums und Industrieprojektpartner, die ein Netz aus 21 Wasserstofftankstellen in Deutschland betreibt, allerdings bei 9,50 €/kg [54]. Dies ist ein politisch motivierter Preis festgelegt durch CEP, um ungefähr gleiche Treibstoffkosten pro km bei den Brennstoffzellenfahrzeugen wie bei Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor zu erzielen [54].

Die weiteren Kostenparameter der fixen und variablen Kosten werden analog den Kosten eines batteriegetriebenen LKW angenommen.

5.4 Ergebnisse des Betriebsszenarios

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Fahrzeugsimulation im Betriebsszenario mit durchschnittlicher Strecke gezeigt, das im Kapitel 5.1 definiert wurde. Die Ergebnisse der untersuchten LKW-Technologien werden in den folgenden Kapiteln nacheinander vorgestellt.

5.4.1 Konventionell angetriebener LKW

Als Referenzszenario wird ein konventionell angetriebener Diesel-LKW im Betriebsszenario mit durchschnittlicher Strecke (entsprechend Kapitel 5.1) modelliert. Die Tabelle 5-9 zeigt eine Übersicht der Parameter dieses LKW. Die Auslegung des Fahrzeugs entspricht dem Kapitel 4.3.1. Das Gesamtgewicht berechnet sich aus der Summe des Leergewichts des Fahrzeugs (entsprechend Abbildung 4-8) und der Nutzlast von 18,2 t, die für alle LKW-Technologien gleich angenommen wird.

Szenario	Betriebsszenario	Batterie	Zelltyp	Infrastruktur	Gesamtgewicht
Diesel-LKW					
Szenario 1	Durchschnittliche Strecke	-	-	Tankstellen	32,3 t

Tabelle 5-9: Referenzszenario mit Diesel-LKW

Für dieses Szenario liefert die Fahrzeugsimulation einen spezifischen Dieserverbrauch von 31,6 l pro 100 km und eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 81,5 km/h. Dieser Verbrauch entspricht umgerechnet mit dem volumenbezogenen unteren Heizwert des Diesels von 9,64 kWh/l [91] einem äquivalenten Energieverbrauch von 3,84 kWh/km.

Die Gesamtlaufzeit des Szenarios beträgt 5 Jahre, nach deren Ablauf eine Fahrleistung von ca. 940.000 km erreicht wird. Diese Fahrleistung, die sich aus dem definierten Betriebsszenario ergibt, gilt auch für die alternativen LKW in nachfolgenden Kapiteln.

5.4.2 Batteriegetriebener LKW

Die im Kapitel 4.3.2 definierten batteriegetriebenen LKW sowie die zugeordneten Szenarien sind in Tabelle 5-10 zusammengefasst. Die Fahrzeuge unterscheiden sich in dem verwendeten Zelltyp, was sich auf das Gesamtgewicht auswirkt.

Szenario	Betriebsszenario	Batterie	Zelltyp	Infrastruktur	Gesamtgewicht
Bat-LKW					
Szenario 2	Durchschnittliche Strecke	825 kWh	HEa	Ladestationen	37,3 t
Szenario 3	Durchschnittliche Strecke	825 kWh	HEc	Ladestationen	35,8 t

Tabelle 5-10: Szenarien für batteriegetriebenen LKW

Das etwas leichtere Gesamtgewicht des Fahrzeugs 3 wirkt sich nur sehr geringfügig auf seinen Energieverbrauch aus, der in Abbildung 5-5 dargestellt ist. Bei diesem Energieverbrauch handelt es sich um die Energie ab Ladestation, deren Kosten anschließend in der Lebenszykluskostenberechnung bestimmt werden. Im Vergleich zum Diesel-LKW beträgt der spezifische Verbrauch der batteriegetriebenen LKW nur etwa die Hälfte, was an dem deutlich höheren Wirkungsgrad des Antriebs eines batteriegetriebenen LKW liegt (vgl. Kapitel 4.2). Die Durchschnittsgeschwindigkeiten aller Fahrzeuge liegen ungefähr gleich. Die leicht höheren Werte bei batteriegetriebenen Fahrzeugen sind auf eine etwas höhere Motorleistung von 376 kW im Vergleich zu 315 kW bei dem Diesel-LKW zurückzuführen.

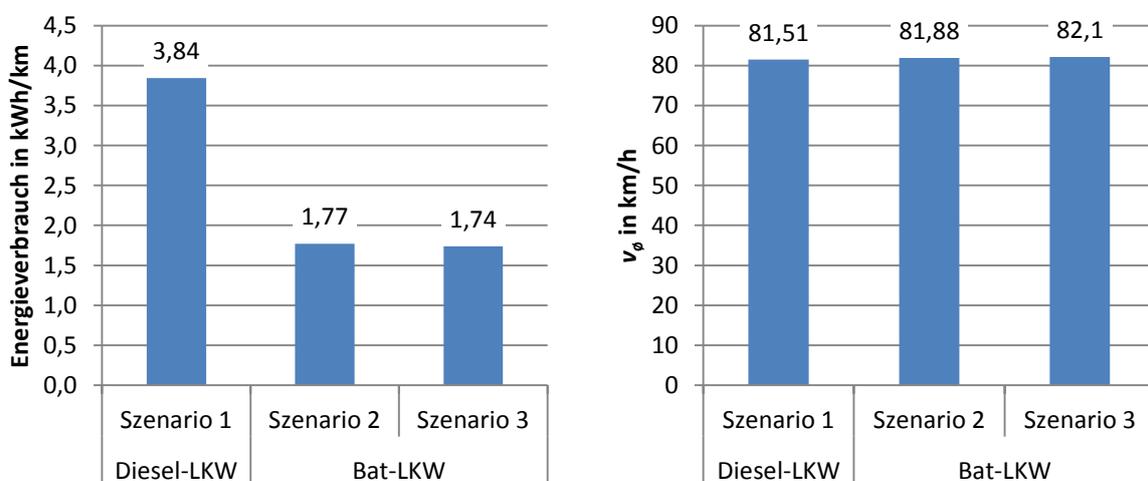


Abbildung 5-5: Spezifischer Energieverbrauch und Durchschnittsgeschwindigkeit der batteriegetriebenen LKW und Diesel-LKW

Der Batterieladezustand schwankt bei beiden Szenarien mit batteriegetriebenen LKW im Bereich von ca. 30 % bis 100 % und seine Verläufe sind in diesen Szenarien fast identisch (Abbildung 5-6). Durch den etwas höheren Energieverbrauch bei Szenario 2 liegt der SOC-Verlauf hier etwas tiefer. Die Abbildung 5-6 zeigt den Ladezustandsverlauf bei einer nicht gealterter Batterie zu Beginn des Szenarios. Durch die fortschreitende Alterung der Batterie sinkt ihre Kapazität, sodass ein breiterer SOC-Bereich ausgenutzt wird.

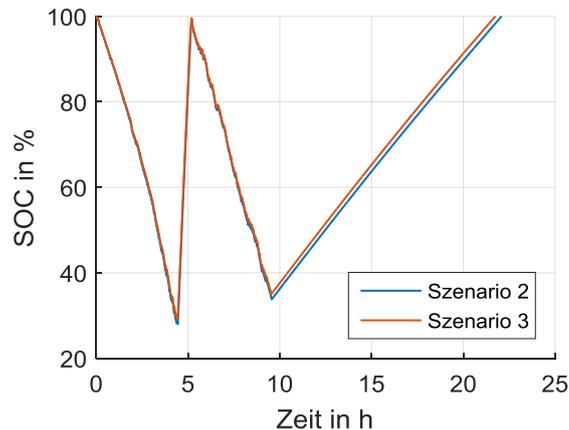


Abbildung 5-6: Batterieladezustand in Szenarien mit batteriegetriebenen LKW

Die aus dem verwendeten mathematischen Alterungsmodell resultierenden Lebensdauern der Batterien unterscheiden sich deutlich. So ergibt sich für die Batterie mit Zellen HEa im Szenario 2 eine sehr hohe Lebensdauer von über 20 Jahren, was auf die gute zyklische Lebensdauer dieser Zellen zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 3-4). Um realistischere Werte für die Lebensdauer dieser Zelle zu erhalten, wurde ihre Lebensdauer auf einen für zyklische Lebensdauern typischen Wert von 12 Jahren beschränkt. Für die Batterie mit Zellen HEc ergibt sich hingegen eine relativ geringe Lebensdauer von ca. 2,1 Jahren. Bei Szenariendauer von 5 Jahren im definierten Betriebsszenario muss diese Batterie also zwei Mal ausgetauscht werden, wobei die Restwerte der Batterien am Szenariende bei der Kostenrechnung berücksichtigt werden.

Trotz einer hohen Ladeleistung von 910 kW während der 45-minütigen Pause bleiben die Zellströme auf einem relativ niedrigen Niveau, was durch die hohe Batteriekapazität zu erklären ist. Die Abbildung 5-7 zeigt links die Zellströme während des Schnellladens. Für beide Zelltypen liegen die Ströme bei ca. 1 C zu Beginn des Ladevorgangs. Für die Zelle HEc ist dies bereits der maximale Ladestrom, sodass der Strom zu Beginn des Ladevorgangs bei dieser Zelle auf 1 C begrenzt wird. Trotzdem schaffen beide Batterien während des Ladevorgangs fast die gesamte verbrauchte Energiemenge wiederaufzuladen, wie der SOC-Verlauf zeigt.⁴ Im Gegensatz zum Schnellladen sind die Stromspitzen während des Fahrens deutlich niedriger.

⁴ Die Batterie wird in der kurzen Fahrerpause nicht ganz zu 100 % aufgeladen, weil die zeitintensive Konstantspannungsphase zum Vollladen der Batterie bei hohen Ladezuständen aufgrund begrenzter Ladezeit fehlt.

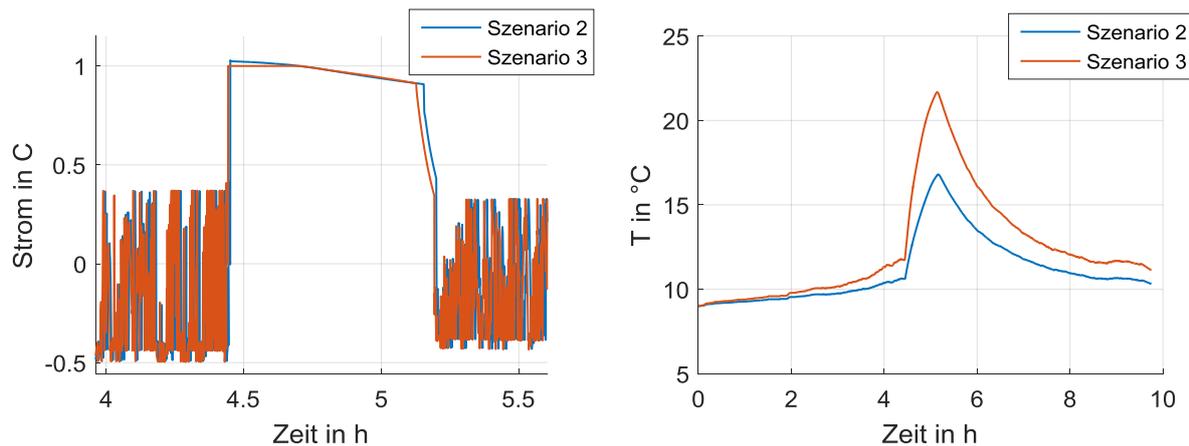


Abbildung 5-7: Zellströme während des Schnellladens der Batterie sowie die Temperaturverläufe der Zellen während des kompletten Betriebstages

Auf der rechten Seite zeigt die Abbildung 5-7 die Temperaturverläufe der Zellen in beiden Szenarien für einen kompletten Betriebstag. Es ist ein deutliches Temperaturmaximum während des Schnellladens zu erkennen. Bei einer Starttemperatur von 9 °C am Szenarienbeginn, was ungefähr der durchschnittlichen Temperatur für Deutschland in den Jahren 2001-2010 entspricht [121], erwärmt sich die Batterie nur gering während der Fahrt. Beim Schnellladen erreicht die Temperatur bei Zelle HEa hingegen 23 °C und bei Zelle HEc rund 28 °C , wobei zum Erreichen einer hohen Energiedichte der Batterie ein passives Kühlsystem angenommen wird. Im Allgemeinen sind dies keine kritischen Temperaturen für die Zellen. Auch kühlen sich die Zellen nach dem Schnellladen wieder ab, weil die Strombelastung während der Fahrt relativ gering ist. Insgesamt zeigen die Zellen also eine geringe Belastung auf, was an der hohen Batteriekapazität liegt.

5.4.3 Oberleitungsversorgter LKW

Tabelle 5-11 stellt die untersuchten Szenarien für den oberleitungsversorgten LKW zusammen. Die untersuchten Kombinationen aus Fahrzeugauslegungen und der Infrastruktur entsprechen der Tabelle 4-3. Bei kompletter Ausbaustufe (Szenarien 4, 6 und 8) der Oberleitung und bei partieller Ausbaustufe (Szenarien 5, 7 und 9) richtet sich die minimale Batteriekapazität nach der Länge der oberleitungsfreien Strecken sowie nach der Leistungsanforderung zur Deckung der Traktion und Nebenverbraucher (vgl. Kapitel 4.3.3). Wegen der letzteren Bedingung ergeben sich unterschiedlich hohe Batteriekapazitäten, wobei nur bei Zelltyp HPa die Batterie ausreichend leistungsfähig ist, die Leistungsanforderung bei minimaler Batteriekapazität zu erfüllen. Auf das Gesamtgewicht des Fahrzeugs hat das Batteriegewicht im Falle des oberleitungsversorgten LKW jedoch nur einen relativ geringen Einfluss, weil die Batteriekapazitäten kleiner als beim batteriegetriebenen LKW sind. Im Schnitt sind die untersuchten oberleitungsversorgten LKW etwa 12 % leichter als die batteriegetriebenen LKW.

Szenario	Betriebsszenario	Batterie	Zelltyp	Infrastruktur	Gesamtgewicht
OL-LKW					
Szenario 4	Durchschnittliche Strecke	190,5 kWh	HEa	Oberleitung Komplette Ausbaustufe	32,3 t
Szenario 5	Durchschnittliche Strecke	190,5 kWh	HEa	Oberleitung Partielle Ausbaustufe	32,3 t
Szenario 6	Durchschnittliche Strecke	127 kWh	HEc	Oberleitung Komplette Ausbaustufe	31,5 t
Szenario 7	Durchschnittliche Strecke	300 kWh	HEc	Oberleitung Partielle Ausbaustufe	32,6 t
Szenario 8	Durchschnittliche Strecke	96 kWh	HPa	Oberleitung Komplette Ausbaustufe	31,8 t
Szenario 9	Durchschnittliche Strecke	120 kWh	HPa	Oberleitung Partielle Ausbaustufe	32,1 t

Tabelle 5-11: Untersuchte Szenarien für oberleitungsversorgten LKW

In Abbildung 5-8 ist der spezifische Energieverbrauch der untersuchten oberleitungsgetriebenen LKW ab Stromabnehmer dem Energieverbrauch eines Diesel-LKW und batteriegetriebenen LKW (Szenario mit dem geringeren Verbrauch) gegenübergestellt. Das Szenario 6 erfüllt nicht die Anforderungen des Betriebsszenarios, worauf weiter unten eingegangen wird, und ist deshalb beim Energieverbrauch nicht gezeigt. Zwar bewegen sich die Energieverbräuche der oberleitungsversorgten LKW alle in einem schmalen Band, jedoch verbrauchen die LKW in Szenarien mit partiellen Oberleitungen (Szenarien 5, 7 und 9) mehr als in Szenarien mit durchgehenden Oberleitungen bei kompletter Ausbaustufe. Dies liegt daran, dass bei durchgehenden Oberleitungen die Energie direkt zum Rad geleitet werden kann ohne über den Batterieumrichter in der Batterie zwischengespeichert zu werden. Trotz des kleineren Gesamtgewichts der oberleitungsversorgten LKW im Vergleich zu batteriegetriebenen LKW haben sie in Szenarien mit partiellen Oberleitungen einen höheren Energieverbrauch aufgrund dieses Energiepfades über Batterieumrichter und Batterie. Bei dem batteriegetriebenen LKW ist der Batterieumrichter hingegen ein Teil der Ladestation und deswegen ist sein Wirkungsgrad in dem Energieverbrauch ab Ladestationsausgang nicht enthalten. Ferner ergeben sich durch geringere Zellströme aufgrund höherer Batteriekapazitäten bei batteriegetriebenem LKW auch etwas bessere Wirkungsgrade der Batterie.

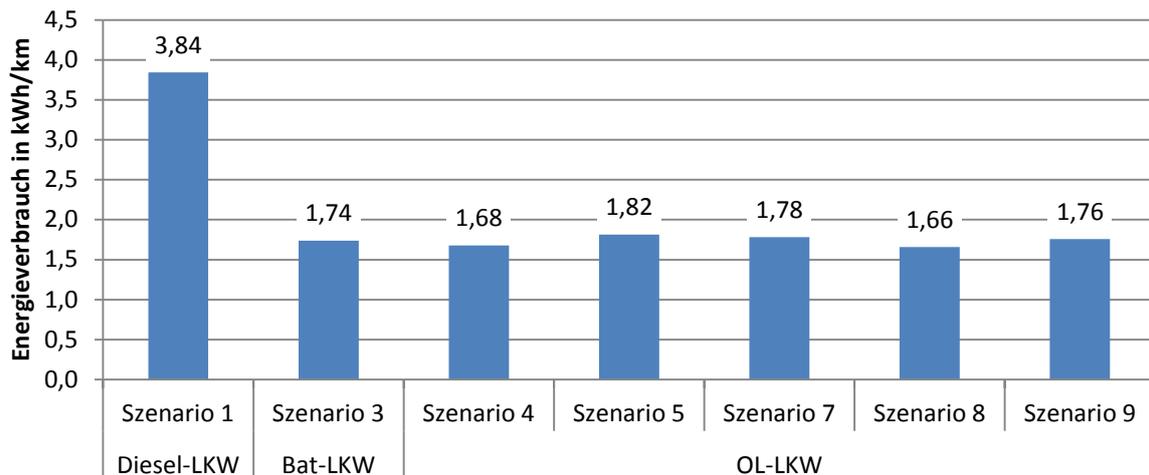


Abbildung 5-8: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten Szenarien für oberleitungsversorgte LKW sowie Diesel-LKW und batteriegetriebenen LKW. Szenario 6 erfüllt nicht die Betriebsanforderungen und wird deshalb nicht gezeigt.

Die Abbildung 5-9 zeigt exemplarisch die Verläufe des Batterieladezustands und der Zelltemperatur in Szenarien 8 und 9. Im Szenario 8 mit durchgehender Oberleitung wird die Batterie auf oberleitungsfreien Abschnitten zu Beginn und Ende des Szenarios entladen und während der Fahrt an Oberleitung mit überschüssiger Energie geladen. Dadurch wird die Batterie vorwiegend in kleinen Mikrozyklen zyklisiert. Bei partieller Oberleitung im Szenario 9 wird die Batterie dagegen in größeren Makrozyklen zyklisiert, um die häufigen oberleitungsfreien Abschnitte zu überwinden. Dies erfordert auch höhere Zellströme, um die Energie während kurzer Oberleitungsabschnitte nachzuladen. Die intensivere Nutzung im Szenario 9 spiegelt sich auch im Temperaturverlauf der Zellen wieder (Abbildung 5-9 rechts) sowie in ihrer Lebensdauer, wie die Tabelle 5-12 zeigt. So reduziert sich die Lebensdauer in Szenarien mit partieller Oberleitung gegenüber dem jeweiligen Szenario mit durchgehender Oberleitung.

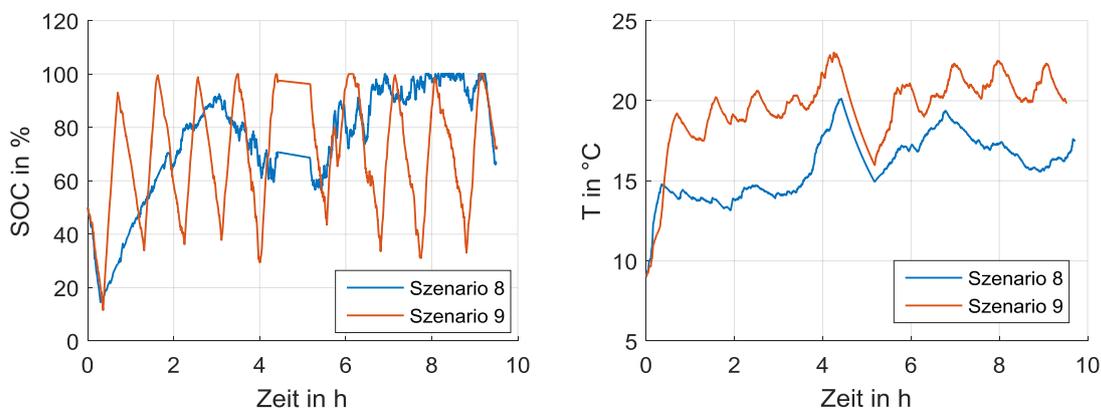


Abbildung 5-9: SOC und Zelltemperatur in Szenarien 8 (durchgehende Oberleitung) und 9 (partielle Oberleitung).

	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 7	Szenario 8	Szenario 9
Batterie und Zelltyp	190,5 kWh, HEa	190,5 kWh, HEa	300 kWh, HEc	96 kWh, HPa	120 kWh, HPa
Ausbaustufe der Oberleitungsinfrastruktur	Komplett	Partiell	Partiell	Komplett	Partiell
Modellierte Batterielebensdauer in Jahren	12	11	3,9	12	9,9

Tabelle 5-12: Batterielebensdauer in Szenarien mit oberleitungsversorgtem LKW

Wie oben erwähnt wird das Szenario 6 nicht weiter betrachtet, weil die Anforderungen des Betriebsszenarios nicht erfüllt sind. Aufgrund der Streckentopologie stehen der Batterie Leistungsspitzen zum Laden zur Verfügung, wenn die Fahrwiderstände geringer als die maximale Oberleitungsleistung sind. Im Szenario 6 kann die Batterie aufgrund des geringen maximalen Ladestroms des Zelltyps HEc nicht ausreichend geladen werden und so kann der LKW die oberleitungsfreie Strecke nicht bis zum Zielpunkt fahren. Deshalb wäre in diesem Szenario eine Dimensionierung der Batterie auf höhere Ladeströme notwendig. Dies offenbart höhere Anforderungen des oberleitungsversorgten LKW an die verwendeten Zellen bezüglich ihrer Stromstärken, was für hybride Fahrzeuge mit mehreren Energiequellen oftmals der Fall ist.

Auch wenn bei dem oberleitungsversorgten LKW das Szenario 8 die besten Ergebnisse bezüglich des Energieverbrauchs und der Batterielebensdauer liefert, müssen auch die Kosten des Gesamtsystems zur Bewertung herangezogen werden, was in den folgenden Kapiteln geschieht.

5.4.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW

Bei dem oberleitungsversorgten Hybrid wird im Kapitel 4.5.2 eine mittlere Ausbaustufe der Oberleitung angenommen, bei der 60 % der Strecke des Betriebsszenarios elektrifiziert sind. Die restlichen 40 % der Strecke werden mit Energie aus Batterie oder Diesel gedeckt. Die gewählten Batteriekapazitäten entsprechen den Batteriekapazitäten des jeweiligen rein elektrischen oberleitungsversorgten LKW bei kompletter Ausbaustufe der Oberleitung. Zum Beispiel entspricht die Batteriekapazität des LKW im Szenario 10 der Batteriekapazität im Szenario 4. Durch die Hybridisierung haben die untersuchten LKW ein Mehrgewicht von ca. 0,9 t im Vergleich zum jeweiligen rein elektrischen oberleitungsversorgten LKW.

In Abbildung 5-10 sind die spezifischen Energieverbräuche der oberleitungsversorgten Hybrid-LKW ab Stromabnehmer bzw. Dieseltank dargestellt. Dabei sind der elektrische Energieverbrauch und die mit dem unteren Heizwert des Diesels berechnete Energie aus dem Dieserverbrauch zusammengerechnet. Durch die Verwendung des Dieselmotors auf oberleitungsfreien Strecken steigt der spezifische Energieverbrauch bei dem Hybrid-LKW

gegenüber dem rein elektrischen oberleitungsversorgten LKW. Das Szenario 11 wird ausgelassen, weil es die Betriebsanforderung nicht erfüllt, was weiter unten erläutert wird.

Szenario	Betriebsszenario	Batterie	Zelltyp	Infrastruktur	Gesamtgewicht
OL-Hybrid-LKW					
Szenario 10	Durchschnittliche Strecke	190,5 kWh	HEa	Oberleitung Mittlere Ausbaustufe	33,2 t
Szenario 11	Durchschnittliche Strecke	127 kWh	HEc	Oberleitung Mittlere Ausbaustufe	32,4 t
Szenario 12	Durchschnittliche Strecke	96 kWh	HPa	Oberleitung Mittlere Ausbaustufe	32,7 t

Tabelle 5-13: Untersuchte Szenarien für oberleitungsversorgten Hybrid-LKW

Zum Vergleich sind auch die Szenarien anderer LKW-Technologien mit jeweils niedrigsten Energieverbräuchen gezeigt. Da der Hybrid-LKW die Betriebsstrecke zum einen Teil elektrisch und zum anderen Teil verbrennungsmotorisch fährt, liegt sein Energieverbrauch zwischen dem von Diesel-LKW und reinelektrischen LKW.

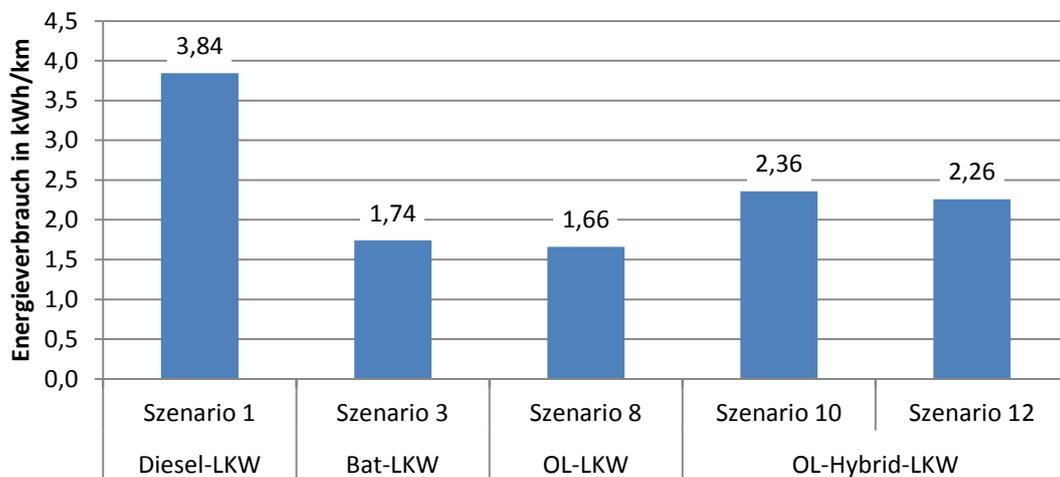


Abbildung 5-10: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten Szenarien für oberleitungsversorgte Hybrid-LKW sowie die Szenarien mit jeweils niedrigsten Verbräuchen anderer LKW-Technologien. Szenario 11 erfüllt nicht die Betriebsanforderungen und wird deshalb nicht gezeigt.

Die Abbildung 5-11 links zeigt den Verlauf des Batterieladezustands in den untersuchten Szenarien. Am Anfang des Szenarios fährt das Fahrzeug elektrisch mit Energie aus Batterie, sodass der SOC auf 10 % sinkt, bis der Dieselmotor anspringt und die Batterie nachlädt. Bei 20 % SOC wird der Dieselmotor entsprechend dem implementierten Energiemanagement wieder ausgeschaltet (Kapitel 3.4). Wird die Oberleitung erreicht (bei ca. 2 h), beginnt der elektrische Fahrmodus unter Oberleitung und die Batterie wird mit überschüssiger Energie

nachgeladen. Bei Szenario 12 kann die Batterie mehr aufgeladen werden wegen hoher Ladestromrate der verwendeten Hochleistungszelle. Bei Szenario 11 fällt der SOC dagegen oft auf 0 % wegen des geringen Ladestroms der Zelle HEc. Dieses Verhalten des SOC ist das Gleiche wie beim oberleitungsversorgten LKW. Dadurch kann die Batterie oft keine Leistung zur Addition mit Oberleitungsleistung liefern, sodass die Fahrzeuggeschwindigkeit fällt und die Fahrt (inkl. Pause) ca. 10 h dauert. Dies ist länger als die maximal erlaubte tägliche Lenkzeit von 9 h plus einer 45-minütigen Ruhepause. Aus diesem Grund wird das Szenario 11 bei dieser Auslegung der Batterie verworfen. Dies offenbart wiederum höhere Ladestromanforderungen an Zellen bei hybridisierten Fahrzeugen. Als eine weitere Option könnte der Dieselmotor eingeschaltet werden, um zusätzliche Leistung in die Traktion bzw. in die Batterie einzuspeisen. Dies ist aber durch das in dieser Arbeit realisierte Energiemanagementsystem (Kapitel 3.4) nicht vorgesehen und würde der Grundidee der vollelektrischen Fahrt an Oberleitung widersprechen.

Die Temperaturverläufe zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei dem rein elektrischen oberleitungsversorgten LKW (Abbildung 5-11 rechts). Im Szenario 11 erreichen die Zellen eine höhere Temperatur aufgrund der thermischen Eigenschaften der Zelle HEc. Jedoch bleiben die Temperaturen in einem für die Zellen zulässigen Bereich und kühlen nach einer Nachtpause wieder auf die Starttemperatur ab.

Die erreichten Lebensdauern der Batterien in Szenarien 10 und 12 betragen 12 Jahre, da die Zellen in diesen Szenarien wiederum nur relativ wenige Makrozyklen machen.

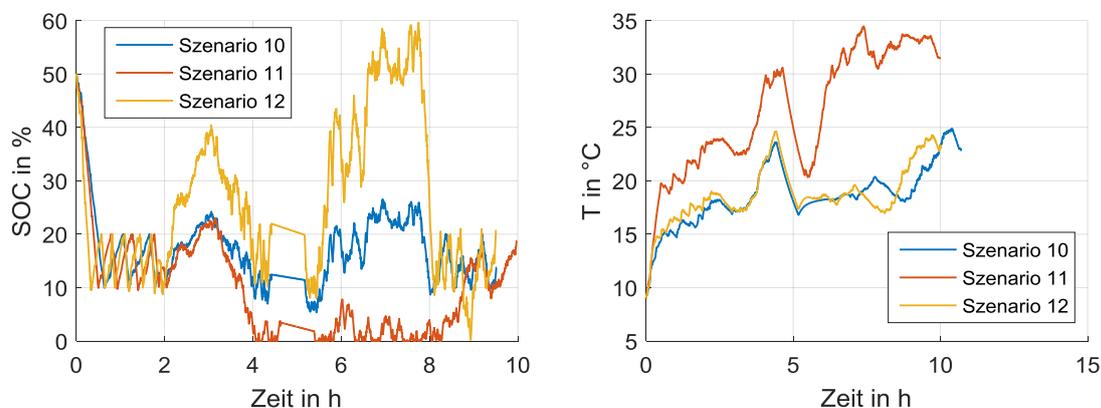


Abbildung 5-11: SOC- und Temperaturverläufe bei untersuchten Szenarien des oberleitungsversorgten Hybrid-LKW

5.4.5 Brennstoffzellengetriebener LKW

Die untersuchten Szenarien für brennstoffzellengetriebenen LKW sind in Tabelle 5-14 zusammengefasst. Die Auslegungen der Fahrzeuge entsprechen dem Kapitel 4.3.5, wobei Leistung der Brennstoffzelle und Kapazität der Batterie variiert werden, um den Einfluss ihrer Dimensionierung zu untersuchen. Die Kapazität des Wasserstofftanks bleibt hingegen mit 150 kg gespeichertem Wasserstoff konstant, sodass das Gesamtgewicht des Fahrzeugs abhängig vom Batterie- und Brennstoffzellengewicht variiert.

Szenario	Betriebsszenario	BZ	Batterie	Zelltyp	Infrastruktur	Gesamtgewicht
BZ-LKW						
Sz. 13	Durchschnittliche Strecke	150 kW	96 kWh	HEa	H ₂ -Tankstellen	33,5 t
Sz. 14	Durchschnittliche Strecke	150 kW	96 kWh	HEc	H ₂ -Tankstellen	33,3 t
Sz. 15	Durchschnittliche Strecke	150 kW	96 kWh	HPa	H ₂ -Tankstellen	33,8 t
Sz. 16	Durchschnittliche Strecke	100 kW	120 kWh	HEa	H ₂ -Tankstellen	33,7 t
Sz. 17	Durchschnittliche Strecke	100 kW	120 kWh	HEc	H ₂ -Tankstellen	33,5 t
Sz. 18	Durchschnittliche Strecke	100 kW	120 kWh	HPa	H ₂ -Tankstellen	34,1 t
Sz. 19	Durchschnittliche Strecke	300 kW	320 kWh	HEa	H ₂ -Tankstellen	35,5 t
Sz. 20	Durchschnittliche Strecke	300 kW	320 kWh	HEc	H ₂ -Tankstellen	34,8 t
Sz. 21	Durchschnittliche Strecke	300 kW	320 kWh	HPa	H ₂ -Tankstellen	36,3 t

Tabelle 5-14: Die untersuchten Szenarien für brennstoffzellengetriebenen LKW

Erwartungsgemäß liegt der Energieverbrauch der brennstoffzellengetriebenen LKW zwischen den Werten des Diesel-LKW und der batteriegetriebenen bzw. oberleitungsversorgten LKW (Abbildung 5-12), was auf den Wirkungsgrad seines Antriebs zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 4.2). Es ist auffällig, dass der Energieverbrauch in Szenarien 13 und 14 bei kleineren Fahrzeuggesamtgewichten größer als der Energieverbrauch in Szenario 15 mit einem schwereren Fahrzeug ist. Dies ist durch eine geringere Leistungsaufnahme während Rekuperation erklärbar, weil die Hochenergiezellen einen geringeren Ladestrom ermöglichen als die Hochleistungszellen im Szenario 15. Durch höhere Energierückgewinnung beim Bremsen sinkt insgesamt der Energieverbrauch im Szenario 15. In Szenarien 16 bis 18 ist die Brennstoffzelle mit 100 kW Leistung zu klein für das Gesamtfahrzeuggewicht dimensioniert, da der Batterieladezustand oft auf 0 % fällt (s. Abbildung 5-13 links) und die Batterie keine Leistung abgeben kann. Dadurch sinkt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, sodass die Dauer des täglichen Betriebsszenarios über 10 Stunden beträgt. Deshalb erfüllen die Szenarien 16 bis 18 nicht die Betriebsanforderungen und werden in Abbildung 5-12 nicht dargestellt.

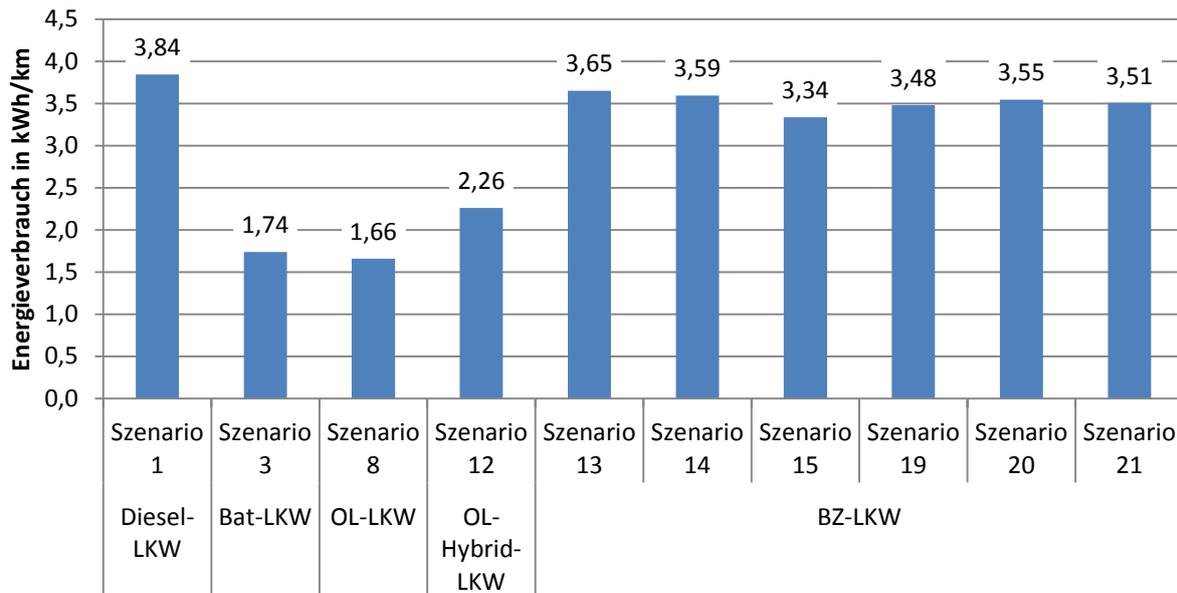


Abbildung 5-12: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten brennstoffzellengetriebenen LKW sowie die Szenarien mit jeweils niedrigsten Verbräuchen anderer LKW-Technologien. Szenarien 16 bis 18 erfüllen nicht die Betriebsanforderungen und werden deshalb nicht gezeigt.

Bei größer ausgelegter Brennstoffzelle und Batterien in Szenarien 19 bis 21 zeigen sich die Vorteile im Verbrauch nur begrenzt, weil das Gesamtgewicht des Fahrzeugs steigt. So sinkt zwar der Energieverbrauch in Szenarien 19 und 20 durch eine höhere Leistungsaufnahme der größeren Batterie jeweils gegenüber Szenarien 13 und 14. Durch das höhere Fahrzeuggewicht ist der Verbrauch im Szenario 21 aber größer als im Szenario 15, wo die Hochleistungsbatterie die Aufnahme der Bremsenergie nicht einschränkt.

Ferner ist die Brennstoffzellenleistung in den Szenarien 19 bis 21 mit 300 kW für die gewählte Strecke und Fahrzeuggesamtgewicht zu hoch dimensioniert, da der Batterieladezustand über die ganze Fahrt im oberen Bereich liegt. Die Abbildung 5-13 zeigt dies am Beispiel des Szenarios 19. Die Brennstoffzelle deckt die Antriebsleistung und lädt gleichzeitig die Batterie voll, sodass sie während der Fahrt oft abgeschaltet werden muss. In Szenarien 16 bis 18 ist die Leistung der Brennstoffzelle mit 100 kW dagegen zu klein dimensioniert, sodass der Batterieladezustandsverlauf über einen Großteil der Fahrt im unteren Bereich liegt und die Batterie den Antrieb nicht unterstützen kann. Bei Szenarien 13 bis 16 bewegt sich der SOC dagegen im mittleren Bereich. Durch kleinere Batteriedimensionierung und entsprechend höhere Zellströme liegt hier die Zelltemperatur höher als in den vergleichbaren Szenarien des brennstoffzellengetriebenen LKW (Abbildung 5-13 rechts). Die Tabelle 5-15 zeigt die resultierenden modellierten Lebensdauern der Batterien in den untersuchten Szenarien.

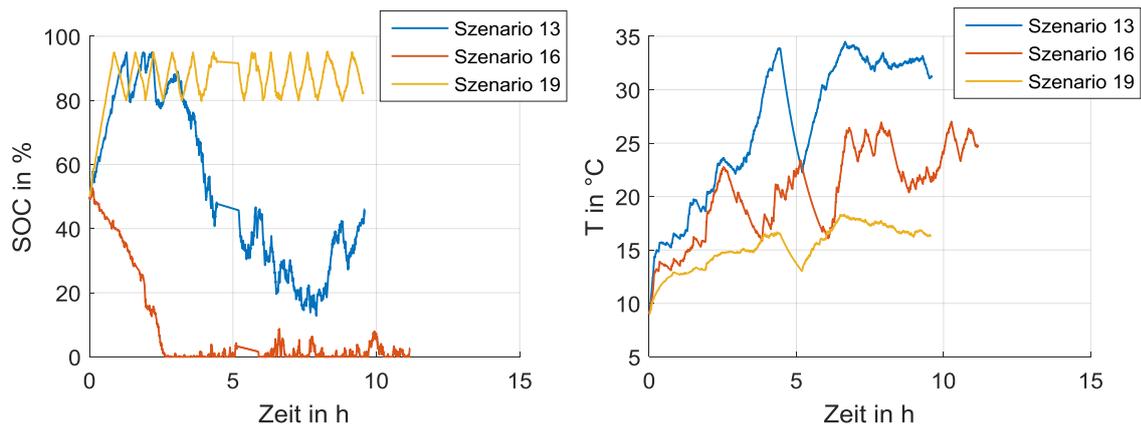


Abbildung 5-13: Ladezustands- und Temperaturverläufe der Zellen HEa in Szenarien 13, 16 und 19.

	Szenario 13	Szenario 14	Szenario 15	Szenario 19	Szenario 20	Szenario 21
Leistung der Brennstoffzelle	150 kW	150 kW	150 kW	300 kW	300 kW	300 kW
Batterie und Zelltyp	96 kWh, HEa	96 kWh, HEc	96 kWh, HPa	320 kWh, HEa	320 kWh, HEc	320 kWh, HPa
Modellierte Batterielebensdauer in Jahren	10,8	5,2	7,2	12	3,7	12

Tabelle 5-15: Geschätzte Lebensdauer der Batterien in untersuchten Szenarien des brennstoffzellengetriebenen LKW

Schließlich ist anzumerken, dass auch durch ein verbessertes Energiemanagementsystem für die Steuerung der Brennstoffzelle und Batterie im brennstoffzellengetriebenen LKW der Energieverbrauch leicht verbessert werden kann. Zum Beispiel kann das Energiemanagementsystem als ein System aus mehreren Reglern und Steuerungen, eine Zustandsmaschine, ein Set aus heuristischen Regeln oder mit Hilfe der Fuzzylogik implementiert werden. Ein Überblick über verschiedene Energiemanagementstrategien kann z.B. in [50], [122] gefunden werden.

5.5 Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung

In den vorigen Kapiteln wurden die Ergebnisse der Fahrzeugsimulation für einzelne Szenarien erläutert, die u.a. Fahrperformance des LKW, Energieverbrauch und Batterielebensdauer liefern. Diese Parameter variieren sehr differenziert je nach gewähltem Szenario und Fahrzeugauslegung. Deshalb wird in diesem Kapitel eine Bewertung dieser

Szenarien bezüglich ihrer Lebenszykluskosten unter Einbeziehung der im Kapitel 5.3 festgelegten Kostenparameter vorgenommen.

5.5.1 Fahrzeugkosten

Zu Beginn jedes Szenarios werden ein komplettes Fahrzeug sowie die Infrastruktur angeschafft. Ausgehend von den ermittelten bzw. angenommenen Komponentenlebensdauern werden während der Szenarienlaufzeit neue Komponenten beschafft und deren Restwert zum Ende des Szenarios ermittelt (s. Kapitel 5.2). Die Kosten dieser Anschaffungen werden im Folgenden als Barwerte der Fahrzeuge für alle untersuchten Szenarien aufgezeigt.

Die Abbildung 5-14 zeigt die Fahrzeugkosten aufgeschlüsselt auf ihre Komponenten, wobei auch Ersatzbeschaffungen und Restwerte entsprechend der Komponentenlebensdauer in dem jeweiligen Szenario berücksichtigt sind. Der konventionelle Diesel-LKW verursacht als etablierte Technologie die geringsten Fahrzeugkosten und besitzt nach dem Szenariende keinen Restwert, denn die Szenarienfahrleistung von ca. 940.000 km richtet sich nach der Lebensfahrleistung eines konventionellen LKW.

Bei den batteriegetriebenen LKW ist die Batterie aufgrund ihrer hohen Kapazität die teuerste Komponente. Durch eine lange Lebensdauer der Batterie von 12 Jahren im Szenario 2 besitzt sie auch am Ende des Szenarios noch einen Restwert von ca. 40 % der Anschaffungskosten. Das reduziert die Fahrzeugkosten in diesem Szenario gegenüber Szenario 3, in dem die Batterie mit einer kürzeren Lebensdauer von ca. 2,1 Jahren zwei Mal ausgetauscht werden muss.

Die Fahrzeugkosten des oberleitungsversorgten LKW sind im Gegensatz zu den Kosten des batteriegetriebenen LKW deutlich kleiner, was auf die kleinere Batteriekapazität zurückzuführen ist. Bei dieser LKW-Technologie ist die Karosserie die teuerste Komponente, die jedoch als konventioneller Bestandteil bei allen alternativen LKW gleich angenommen wird. Als eine zusätzliche kostspielige Komponente kommt der Stromabnehmer hinzu, der je nach Szenario den zweitgrößten Anteil der Fahrzeugkosten ausmacht. Die Szenarien 5 und 9 mit partiellen Oberleitungen verursachen bei den Fahrzeugkosten keine großen Unterschiede zu Szenarien 4 und 8 mit durchgehenden Oberleitungen, da sowohl die Batteriekapazitäten als auch ihre Lebensdauern vergleichbar sind. Lediglich im Szenario 7 mit partiellen Oberleitungen entstehen höhere Kosten durch größere die Batteriekapazität und ihre geringere Lebensdauer (vgl. Tabelle 5-12). Bei oberleitungsgetriebenem Hybrid-LKW kommen zusätzliche Kosten durch den Dieselantriebsstrang hinzu, die im Vergleich zu Fahrzeuggesamtkosten allerdings gering sind.

Bei brennstoffzellengetriebenen LKW verursacht die Brennstoffzelle den größten Kostenanteil, der je nach Szenario zwischen 35 und 50 % betragen kann. Die zweitteuerste Komponente ist der Wasserstofftank, der entsprechend der Fahrzeugauslegung eine relativ große Kapazität von 150 kg besitzt, um den Anforderungen der Fernverkehr-LKW gerecht zu werden. Die gesamten Fahrzeugkosten mit mäßiger Auslegung in Szenarien 13 bis 15 sind aufgrund vor allem aufgrund dieser beiden Komponenten fast um Faktor 3 teurer als

konventioneller Diesel-LKW. In Szenarien 19 bis 21 kommen die Kosten für eine größer ausgelegte Batterie hinzu.

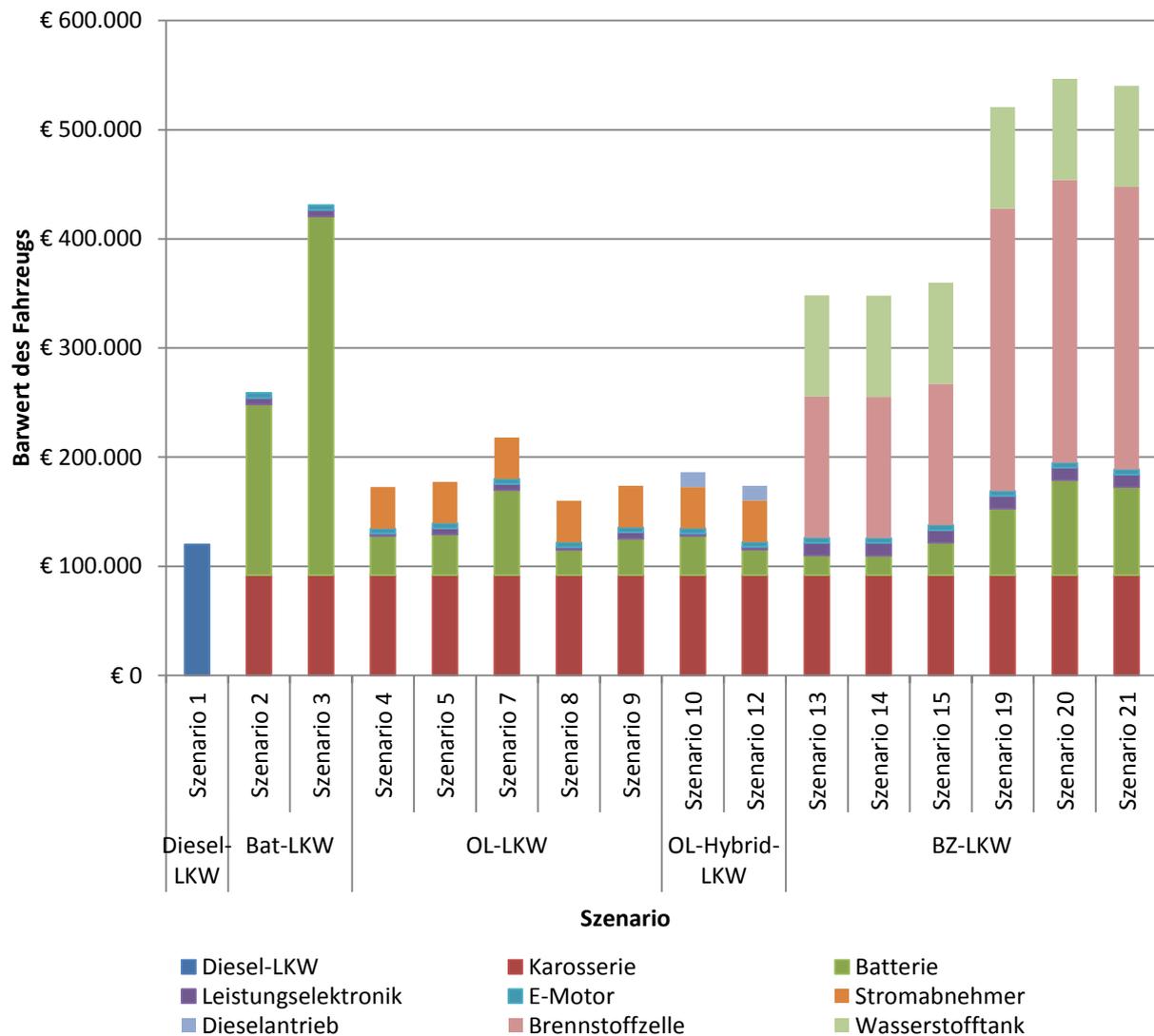


Abbildung 5-14: Fahrzeugkosten in den untersuchten Szenarien inklusive der Ersatzanschaffungen von Fahrzeugkomponenten ohne laufende Betriebskosten

Insgesamt zeigt es sich, dass bei den untersuchten Szenarien die Fahrzeugkosten aller alternativ angetriebenen LKW höher sind als die eines konventionellen LKW. Unter alternativ angetriebenen LKW verursachen die oberleitungsversorgten LKW die geringsten Fahrzeugkosten, die jedoch im Schnitt um den Faktor 1,5 höher sind als die Fahrzeugkosten eines Diesel-LKW. Durch Hybridisierung des oberleitungsversorgten LKW steigen seine Kosten nur gering an. Der batteriegetriebene LKW ist mindestens um den Faktor 2 teurer als der Diesel-LKW aufgrund der hohen Batteriekapazität und der brennstoffzellengetriebene LKW mindestens um den Faktor 2,9, wobei hier die Brennstoffzelle und Wasserstofftank die größten Kostentreiber sind.

5.5.2 Infrastrukturkosten

Während die Infrastrukturkosten für Diesel- und Wasserstofftankstellen bereits in Kraftstoffkosten enthalten sind, werden die Kosten der Ladeinfrastruktur für batteriegetriebene LKW und der Oberleitungsinfrastruktur für oberleitungsversorgte LKW sowie Hybrid-LKW separat berechnet. Die Dimensionierungen der Infrastruktur entsprechen dem Kapitel 4.5 und die Kostenparameter einzelner Komponenten dem Kapitel 5.3.

Auf der Seite der Ladeinfrastruktur entstehen Kosten für Ladestationen auf Rastanlagen. Die Investitionskosten einer Ladestation sind in Abbildung 5-15 links dargestellt. Durch die hohe Ladeleistung ergeben sich bei einer Schnellladestation, die während der kurzen 45-minütigen Ruhepause genutzt wird, deutlich höhere Kosten durch die Leistungselektronik als bei einer Langsamladestation für die Nachladung. Auch die Ladekupplung muss bei Schnellladestationen leistungsfähiger dimensioniert werden. Die Herrichtungskosten geben die Kosten für Bauarbeiten bei Errichtung einer Ladestation und Anschlussleitungen wieder. So belaufen sich die Investitionskosten für eine Schnellladestation mit 910 kW auf ca. 260.000 € und einer Langsamladestation von 50 kW auf rund 20.000 €.

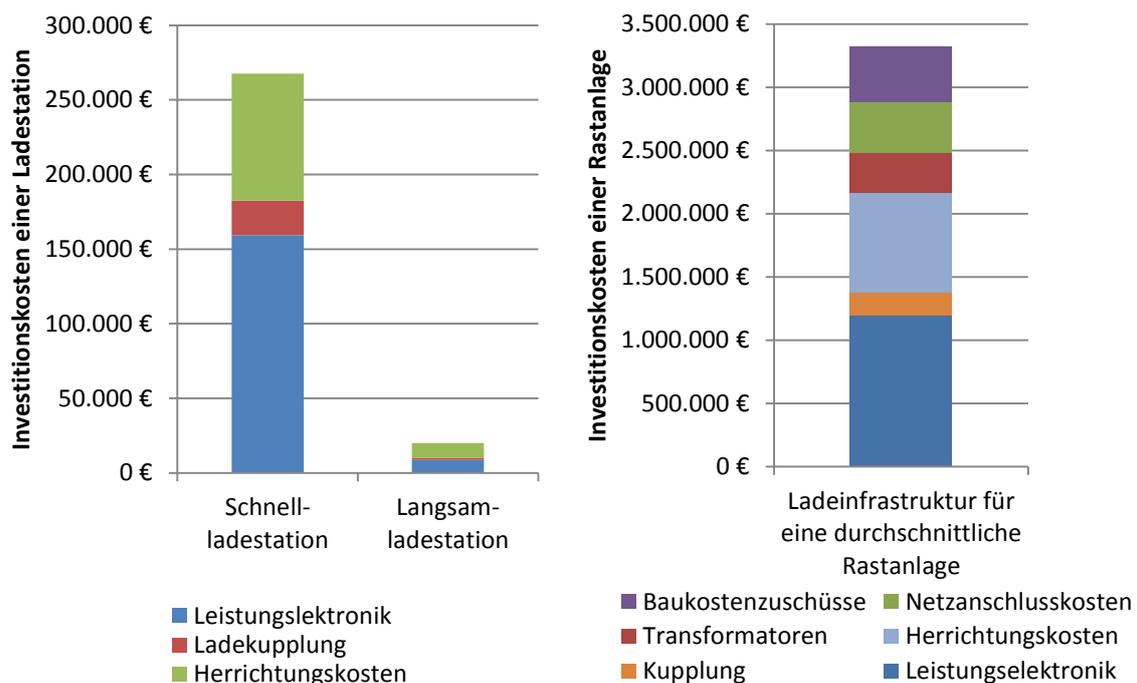


Abbildung 5-15: Investitionskosten für Ladesäulen und Ladeinfrastruktur einer durchschnittlichen Rastanlage (Szenarien 2 und 3).

Im rechten Teil der Abbildung 5-15 sind die Investitionskosten einer durchschnittlichen Rastanlage entsprechend der Tabelle 4-6 mit 6 Schnellladestationen und 28 Langsamladestationen dargestellt. Die Gesamtinvestitionskosten pro Rastanlage belaufen sich auf ca. 3,2 Mio. €, wobei die Leistungselektronik den größten Kostenanteil hat. Ferner sind Herrichtungskosten und Netzkosten relevant. Die letzteren enthalten die Abgaben an Netzbetreiber und bestehen aus Anschlusskosten und Baukostenzuschüssen.

Auf Seite der Oberleitungsinfrastruktur entstehen Kosten für Unterwerke und Oberleitung. Die Abbildung 5-16 zeigt die Investitionskosten für ein Unterwerk mit entsprechendem Oberleitungsabschnitt, der von diesem Unterwerk gespeist wird. Mit der Annahme von 20 Unterwerken pro 100 km Autobahn beträgt diese Einspeisestrecke 5 km. (vgl. Kapitel 4.5.2). Bei durchgehender Oberleitung auf komplettem Autobahnnetz (Ausbaustufe komplett) sind die Unterwerke weniger leistungsfähig dimensioniert als bei partieller Oberleitung, was sich in den Kosten für die Leistungselektronik spiegelt. Deshalb belaufen sich die Investitionskosten eines Unterwerks hier auf rund 3 Mio. € und bei Ausbaustufe partiell dagegen auf ca. 7,5 Mio. €. Hinzu kommen die Investitionskosten für die Oberleitung (inkl. Masten) auf der Einspeisestrecke von 7,3 Mio. €. Die Investitionskosten pro Unterwerk in der Ausbaustufe mittel, bei der 32 % des Autobahnnetzes für oberleitungsversorgte Hybrid-LKW elektrifiziert werden, sind vergleichbar mit den Investitionskosten der Ausbaustufe komplett.

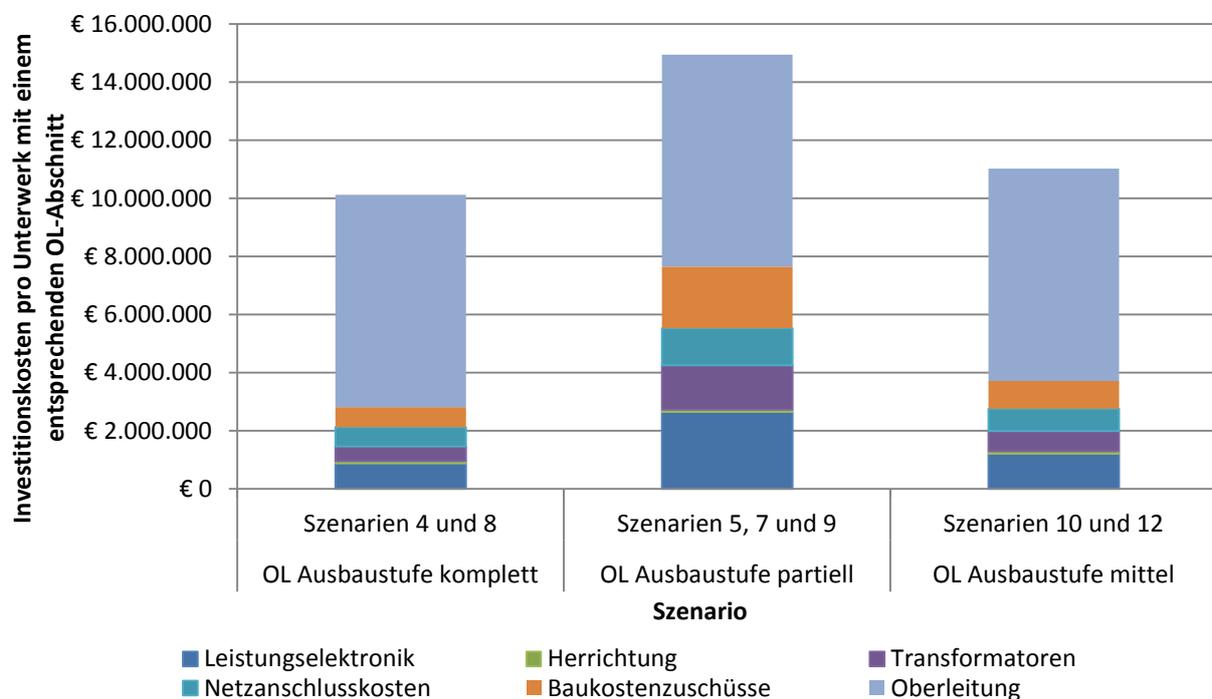


Abbildung 5-16: Investitionskosten pro Unterwerk mit dazugehörigem Oberleitungsabschnitt

Nachdem die Investitionskosten der einzelnen Bestandteile der Infrastruktur aufgezeigt wurden, werden die gesamten Investitionskosten der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur in betrachteten Ausbaustufen miteinander verglichen. Bei Ladeinfrastruktur werden alle Rastanlagen entlang bundesdeutscher Autobahnen mit Ladestationen ausgestattet, sodass komplettes Autobahnnetz elektrifiziert wird. Bei Oberleitungsinfrastruktur wird eine Autobahnlänge entsprechend Tabelle 4-8 elektrifiziert, die sich je nach Ausbaustufe unterscheidet. Abbildung 5-17 zeigt die gesamten Investitionskosten für die verschiedenen Infrastrukturen. Die Kosten der Ladeinfrastruktur summieren sich auf ca. 7 Mrd. € und stellen die geringsten Investitionskosten der untersuchten Infrastrukturarten dar. Für die komplette und die partielle Ausbaustufe der Oberleitung sind die Gesamtkosten für Unterwerke ungefähr gleich, da auch die entlang der Autobahn installierte Leistung ungefähr gleich ist. Den Unterschied machen die Kosten der Oberleitung und Masten aus, die aufgrund der

kleineren Oberleitungslänge bei partieller Ausführung deutlich geringer sind. Bei der mittleren Ausbaustufe ist zu beachten, dass nur 32 % des Autobahnnetzes elektrifiziert werden und die restliche Entfernung im Hybridmodus zurückgelegt wird, sodass die Gesamtkosten dieser Ausbaustufe in dieser Darstellung nur bedingt vergleichbar sind.

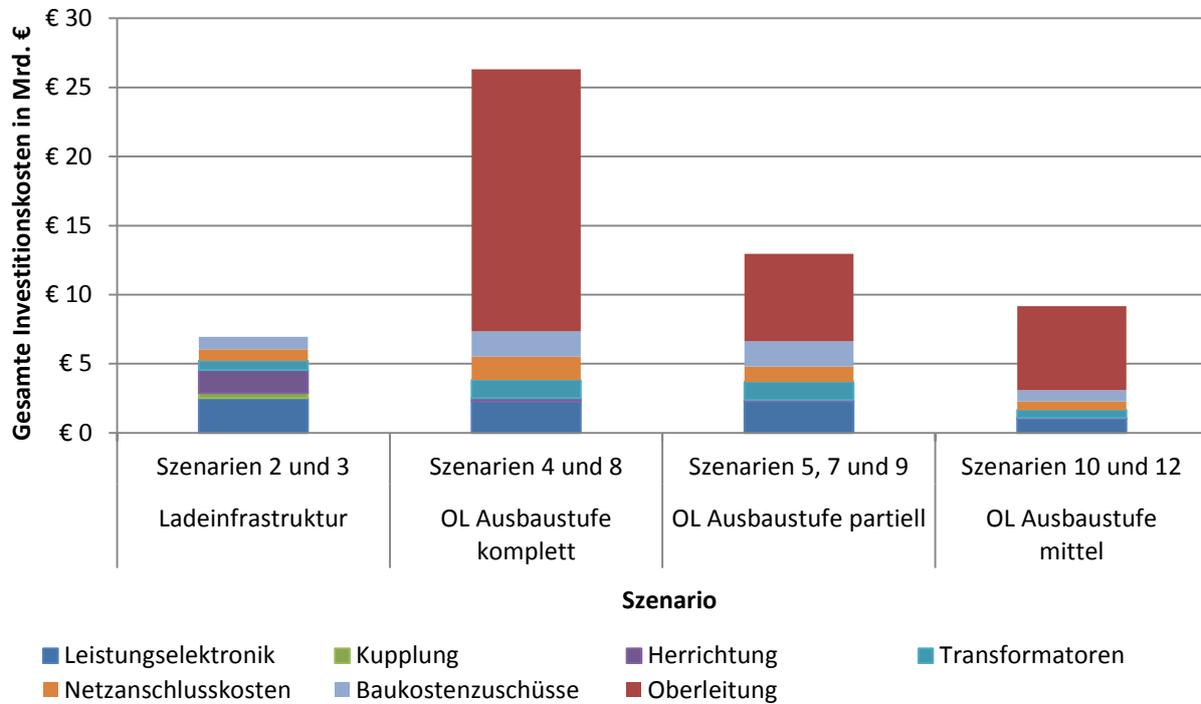


Abbildung 5-17: Gesamte Investitionskosten für den Aufbau der jeweiligen Infrastruktur

Es ist anzumerken, dass in dieser Arbeit der Einfluss höherer Übertragungsleistungen auf die Kosten des Fahrdrachts und der Masten mangels geeigneter Daten nicht evaluiert werden konnte. Bei partiellen Oberleitungen steigt die Übertragungsleistung des Fahrdrachtes an, was eine Erhöhung der Spannung bzw. des Stromes zur Folge hat. Evtl. werden also Komponenten mit höherer Spannungsfestigkeit (z.B. Isolatoren) bzw. ein größerer Leiterquerschnitt für Fahrdraht benötigt. Bei Verwendung von Gleichstrom, wie z.B. bei Straßenbahnen üblich und auch im Rahmen der Forschungsprojekte ENUBA [5], [6] umgesetzt, entfällt jedoch der Skin-Effekt des Wechselstroms, sodass die notwendige Vergrößerung des Leiterquerschnitts kleiner als bei Verwendung von Wechselstrom ausfällt. Der Einfluss dieser Effekte auf die Oberleitung ist weiterhin zu untersuchen.

Schließlich werden die Barwerte der Infrastrukturkosten in den untersuchten Szenarien verglichen, die neben den Investitionskosten auch Restwerte der Komponenten nach Szenariende berücksichtigen. Die Gesamtkosten der Infrastruktur werden über die Anzahl der die Infrastruktur nutzenden LKW auf einen einzelnen LKW aufgeteilt. Die gesamte Anzahl der Ladestationen stellt gleichzeitig auch die Zahl der nachts parkenden LKW dar, die diese Infrastruktur benutzen. Nach Kapitel 4.5.1 beträgt diese Zahl 71.842 LKW. Auch die Kosten der Oberleitungsinfrastruktur werden auf diese Nutzerzahl aufgeteilt. Die Abbildung 5-18 zeigt diese Kosten pro LKW für die untersuchten Infrastrukturarten, die im jeweiligen Szenario zu den anderen Kosten hinzukommen. Die Ladeinfrastruktur ergibt die geringsten

Kosten pro Fahrzeug von rund 31.000 €. Der Großteil der Kosten ist auf die Leistungselektronik zurückzuführen.

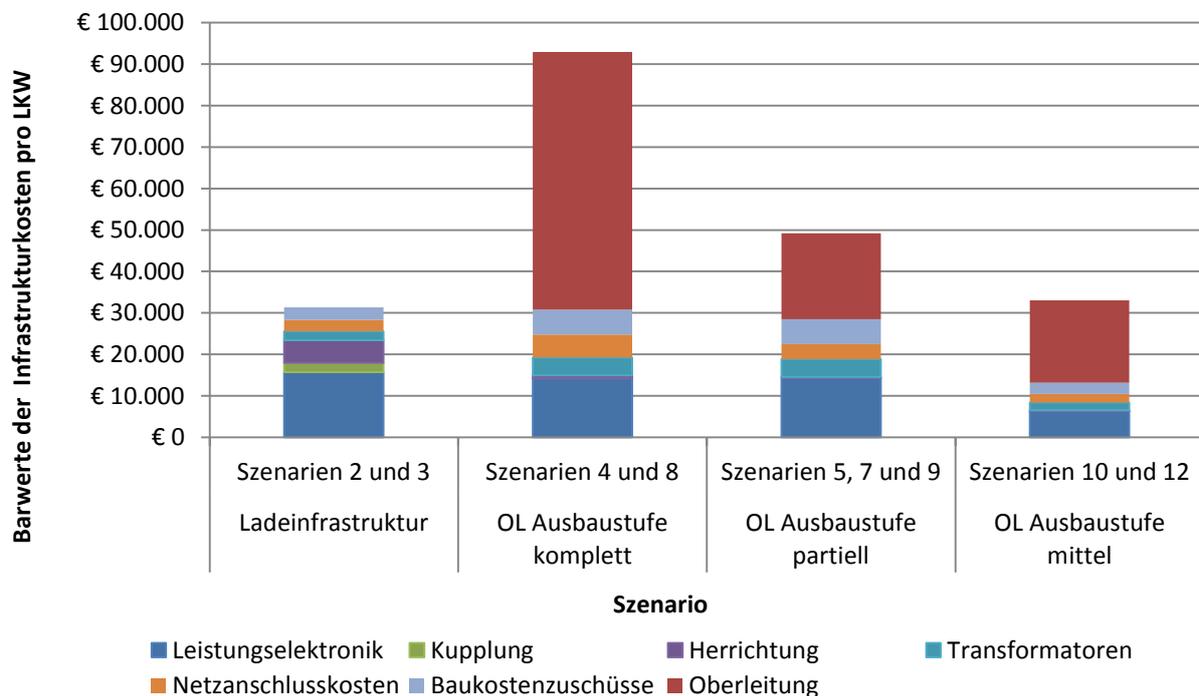


Abbildung 5-18: Barwerte der Infrastrukturkosten in den untersuchten Szenarien

Bei der Oberleitungsausbaustufe komplett entstehen deutlich höhere Infrastrukturkosten von etwa 92.000 € pro LKW. Der hohe Anteil der Oberleitungskosten (inkl. Masten) ergibt sich durch Aufbau der Oberleitung über das komplette Autobahnnetz. Bei partiellen Oberleitungen verringert sich die Länge der notwendigen Oberleitung und somit lassen sich etwa 45 % der gesamten Infrastrukturkosten einsparen. Jedoch sind die o.g. Einschränkungen bei Bewertung der Oberleitungskosten aufgrund höherer Leistungsübertragung zu berücksichtigen. Der Anteil der Unterwerkskosten bleibt dagegen ungefähr gleich, weil ihre Leistung pro Unterwerk zwar steigt, aber die Anzahl der Unterwerke sinkt, die Unterwerkskomponenten also in diesem Fall konzentrierter untergebracht sind. Bei Ausbaustufe mittel ergeben sich geringere Infrastrukturkosten pro LKW dadurch, dass nur ein Teil der Strecke elektrisch gefahren wird und deshalb nur ein Teil der elektrischen Oberleitungsinfrastruktur benötigt wird. Ein anderer Teil der Infrastrukturkosten ist in diesem Fall in den Dieseltreibstoffkosten enthalten.

Die gezeigten Barwerte der Infrastrukturkosten werden im Folgenden mit den anderen Szenarienkosten zu Gesamtkosten aufsummiert.

5.5.3 Energie- bzw. Treibstoffkosten

Die Kosten für elektrische Energie bzw. den Treibstoff berechnen sich aus dem Verbrauch des Fahrzeugs im jeweiligen Szenario und aus den Kostenannahmen zum Energieträger.

Dabei werden der elektrische Energieverbrauch ab Ladestationsausgang bzw. Stromabnehmer und der Wasserstoff- sowie Dieselverbrauch ab Tank angegeben (entsprechend Kapitel 5.4).

Die in Abbildung 5-19 dargestellten spezifischen Verbrauchskosten sind auf die Szenarienfahrleistung von ca. 940.000 km normiert. Die batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW sowie Hybrid-LKW verursachen geringere Verbrauchskosten, die im Durchschnitt bei ca. 0,27 €/km liegen. Die Treibstoffkosten der brennstoffzellengetriebenen LKW sind dagegen um Faktor 2,5 höher. Dies ist einerseits durch höheren Energiebedarf dieses LKW und andererseits durch den höheren spezifischen Wasserstoffpreis zu erklären. Der letztere beträgt beim Wasserstoff umgerechnet 0,213 €/kWh, dagegen bei Strom 0,139 €/kWh und bei Dieseldieselkraftstoff 0,097 €/kWh entsprechend den Kostenparametern im Kapitel 5.3.

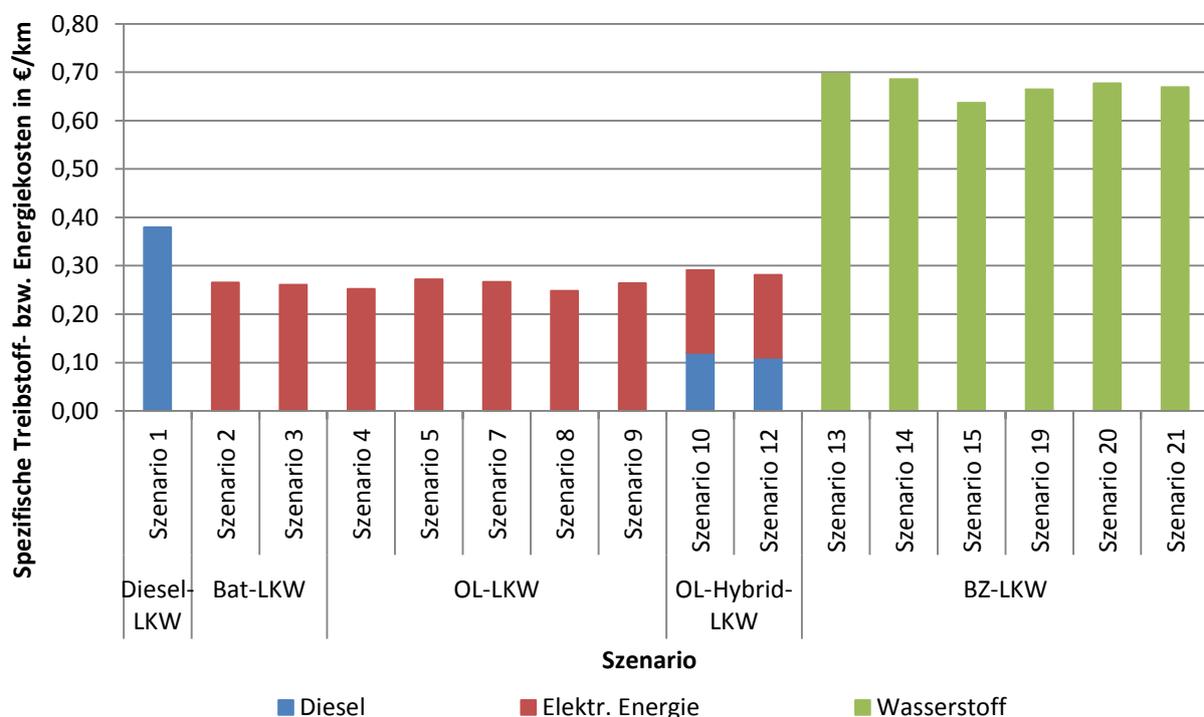


Abbildung 5-19: Kosten des Treibstoffs bzw. elektrischer Energie in den untersuchten Szenarien

5.5.4 Weitere variable Kosten

Als weitere variable Kosten werden bei der vorliegenden Lebenszykluskostenrechnung Wartungskosten der Fahrzeuge sowie kilometerabhängige Mautgebühren für Autobahnen berücksichtigt. Die Abbildung 5-20 zeigt die spezifischen variablen Kosten in den untersuchten Szenarien normiert auf die Szenarienfahrleistung. Hierbei machen die Mautkosten, die abhängig von der Fahrzeugklasse und unabhängig von der Antriebstechnologie sind, den größeren Anteil aus. Bei elektrischen LKW entstehen entsprechend den Wartungskostenparametern geringere Wartungskosten als bei konventionellem Diesel-LKW.

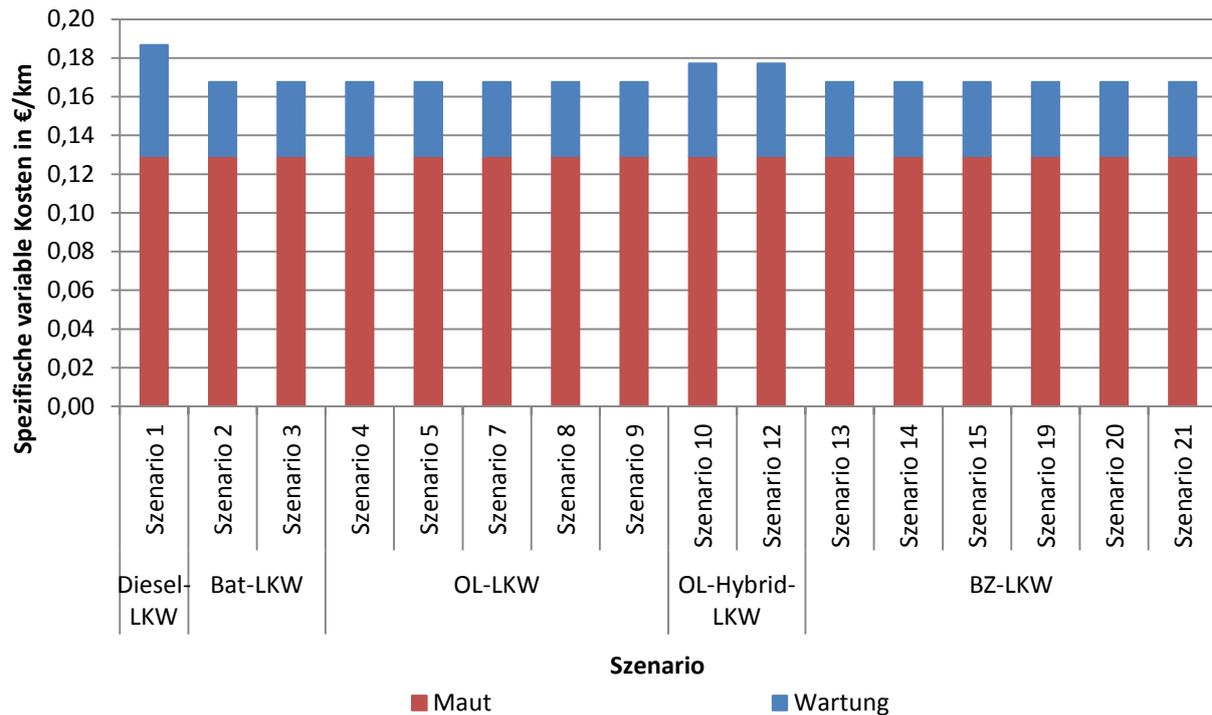


Abbildung 5-20: Spezifische variable Kosten in untersuchten Szenarien

5.5.5 Fixe Kosten

Bei den fixen Kosten, die kilometerunabhängig sind, werden Versicherungskosten und Kraftfahrzeugsteuer berücksichtigt. Zur einheitlichen Darstellung werden hier jedoch auch die fixen Kosten normiert auf die Szenarienfahrleistung angegeben. Die Versicherungskosten sind entsprechend der Annahme unabhängig von der Antriebsstrangtechnologie. Die Kraftfahrzeugsteuer macht nur einen kleinen Anteil der Kosten bei LKW mit Verbrennungsmotor aus und entfällt vollständig bei elektrisch angetriebenen LKW.

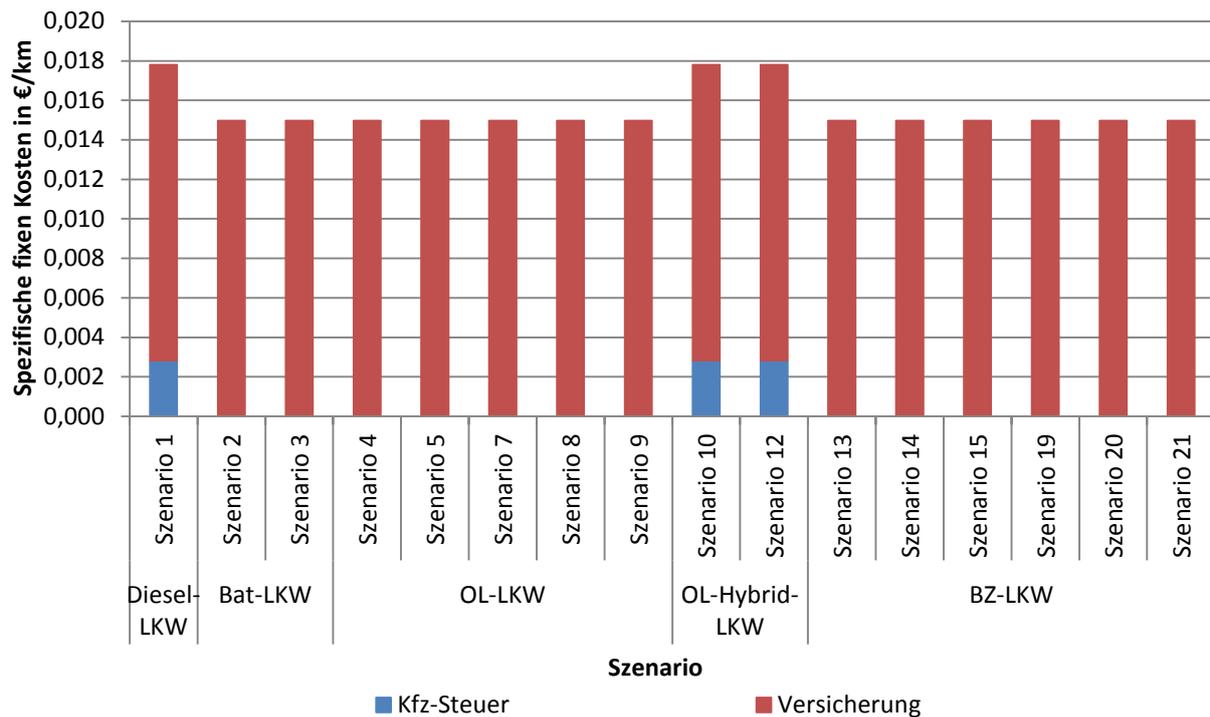


Abbildung 5-21: Spezifischen fixen Kosten in den untersuchten Szenarien

5.5.6 Gesamte Lebenszykluskosten

Die Abbildung 5-22 zeigt die spezifischen Lebenszykluskosten der LKW, die sich aus den zuvor vorgestellten Kostenbestandteilen zusammensetzen, normiert auf die Fahrleistung in den untersuchten Szenarien. Die Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten zeigt, dass die batteriegetriebenen und die oberleitungsversorgten (Hybrid)-LKW das Kostenniveau des konventionellen Diesel-LKW erreichen können. Bei dem Diesel-LKW sind vor allem die Treibstoffkosten aufgrund geringerer Antriebsstrangeffizienz der größte Kostentreiber und machen ca. die Hälfte der Lebenszykluskosten aus. Fahrzeugkosten spielen bei dem Diesel-LKW eine nachrangige Rolle.

Bei den Lebenszykluskosten des batteriegetriebenen LKW kommt den Fahrzeugkosten und dort der Batterie eine entscheidende Rolle zu. Neben dem Batteriepreis ist vor allem die Lebensdauer der Batterie wichtig. So kann der batteriegetriebene LKW bei einer Batterie mit langer Lebensdauer im Szenario 2 auf ähnliche Lebenszykluskosten wie der konventionelle LKW kommen, die nur 6 % höher sind. Jedoch können sich die Lebenszykluskosten stark erhöhen, wenn die Batterie eine kurze Lebensdauer wie im Szenario 3 aufweist. Dann steigen die Lebenszykluskosten um rund 30 % im Vergleich zum Diesel-LKW. Der Kostenanteil des elektrischen Energieverbrauchs besitzt den gleichen oder einen geringeren Anteil wie bzw. als die Fahrzeugkosten. Die Infrastrukturkosten für Ladestationen spielen bei Aufteilung auf die teilnehmenden LKW und Berücksichtigung ihrer längeren Lebensdauer eine untergeordnete Rolle für die gesamten Lebenszykluskosten.

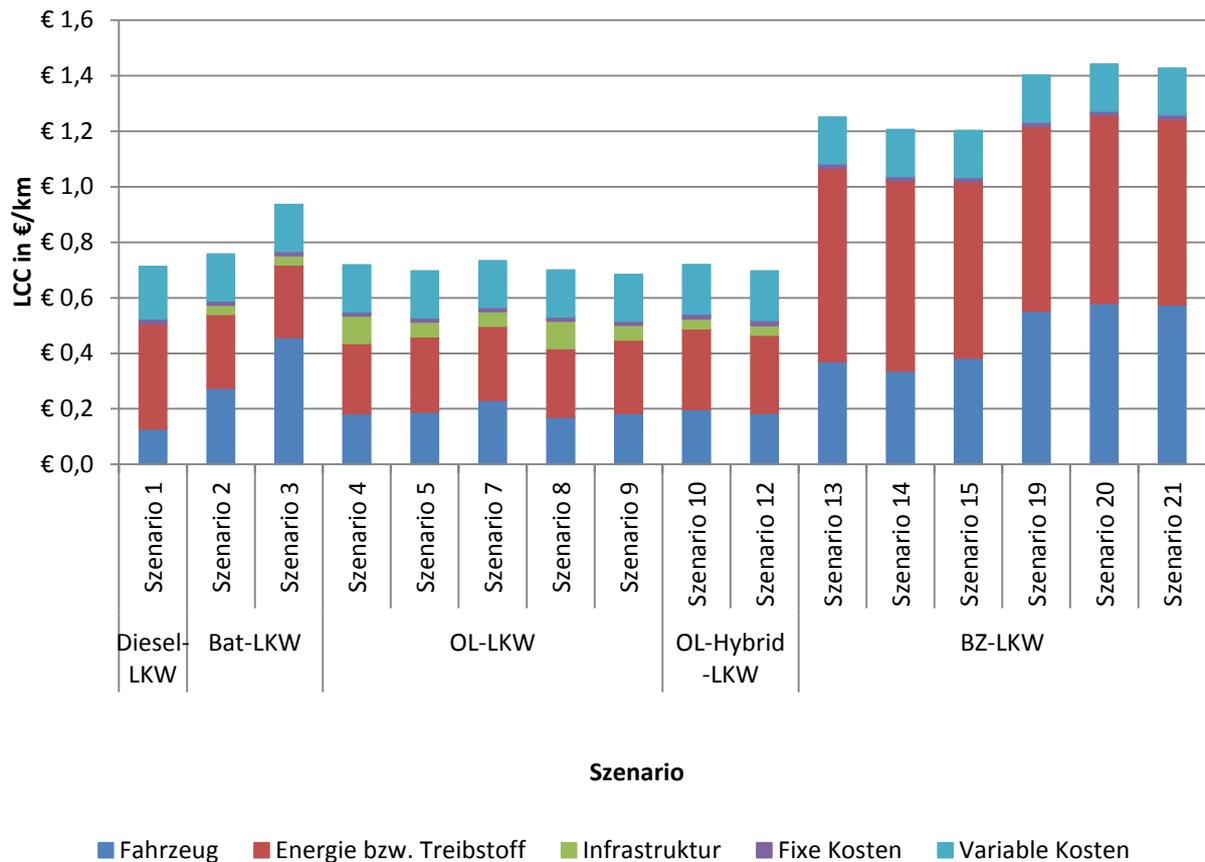


Abbildung 5-22: Spezifische Lebenszykluskosten der LKW in den untersuchten Szenarien⁵

Bei dem oberleitungsversorgten LKW ergeben sich ungefähr die gleichen oder je nach Szenario leicht niedrigeren Lebenszykluskosten als bei Diesel-LKW. Dabei haben die Verbrauchs- und Fahrzeugkosten die größten Anteile an Lebenszykluskosten. Bei Szenarien mit kompletter Ausbaustufe der Oberleitung (Szenarien 4 und 8) ergibt sich ein höherer Anteil der Oberleitungsinfrastrukturkosten. Insgesamt spielen die Infrastrukturkosten aber auch bei oberleitungsversorgtem LKW eine nachrangige Rolle. Szenarien mit partiellen Oberleitungen (Szenarien 5, 7 und 9) zeigen dabei ungefähr die gleichen Lebenszykluskosten wie die Szenarien mit kompletter Ausbaustufe der Oberleitungen. Hier stehen geringere Kosten für Oberleitungsinfrastruktur den leicht höheren Fahrzeugkosten (aufgrund der größeren Batterie) und Verbrauchskosten gegenüber. Beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW wiegen sich die Vorteile der geringeren Infrastrukturkosten im Wesentlichen durch den höheren Verbrauch auf, sodass auch hier die Lebenszykluskosten ungefähr gleich dem oberleitungsversorgten und dem Diesel-LKW sind.

Deutlich höher sind die Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen LKW, die mindestens um Faktor 1,7 höher als die Lebenszykluskosten des Diesel-LKW sind. Dies liegt sowohl an den Wasserstoffkosten als auch an den Fahrzeugkosten. Eine Auslegung der

⁵ Die bei brennstoffzellengetriebenen LKW gezeigten Wasserstoffkosten inkludieren die Kosten für Wasserstoffinfrastruktur (s. Kapitel 5.3.5).

Brennstoffzelle, die die teuerste Komponente im brennstoffzellengetriebenen LKW ist, auf Grundlast des Fahrprofils (Szenarien 13 bis 15) erweist sich hierbei als hilfreich, um die Lebenszykluskosten zu reduzieren. Auch eine Vergrößerung der Lebensdauer der Brennstoffzelle würde die Lebenszykluskosten reduzieren, denn bei der hier angenommenen Lebensdauer der Brennstoffzelle von 2,8 Jahren ist eine Ersatzbeschaffung während Szenarienlaufzeit notwendig.

Insgesamt zeigt sich bei Betrachtung der Lebenszykluskosten also, dass in definierten Szenarien die oberleitungsversorgten LKW sowie Hybrid-LKW ungefähr die gleichen Lebenszykluskosten erreichen können wie der konventionelle Diesel-LKW. Der batteriegetriebene LKW kann ein ähnliches Kostenniveau nur bei guter Lebensdauer der Batterie erreichen. Die Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen LKW in untersuchten Szenarien liegen dagegen um Faktor 1,7 höher.

5.5.7 Einfluss wichtiger Parameter auf Lebenszykluskosten

Die bisher angenommenen Kostenparameter basieren auf aktuellen Kosten und beziehen sich auf das Jahr 2017. Mit den Kostentendenzen für die nähere Zukunft kann abgeschätzt werden, wie sich die Lebenszykluskosten der untersuchten LKW-Technologien entwickeln könnten. Dazu wird pro LKW-Technologie jeweils ein Szenario mit den geringsten Lebenszykluskosten aus Kapitel 5.5.6 genommen. Diese Szenarien sind im linken Teil der Abbildung 5-23 dargestellt. Ferner werden Kostenannahmen zu den wichtigsten Kostenkomponenten des Fahrzeugs und zu den Energieträgern für das Jahr 2030 getroffen, die in Tabelle 5-16 dargestellt sind. Für die Fahrzeugkosten des Diesel-LKW werden gleiche Kosten in 2030 angenommen, obwohl eine Kostensteigerung aufgrund strengerer Abgasnormen und deshalb eines aufwändigeren Antriebs wahrscheinlich ist. Die angenommenen Kostenreduktionen bei Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank basieren auf Skaleneffekten der Massenproduktion. Bei Brennstoffzelle werden ferner Kosteneinsparungen durch Reduktion des Platineinsatzes angenommen. Für die Energieträgerpreise von Diesel und Strom ist eine Steigerung angenommen, während der Preis für Wasserstoff aufgrund von Skaleneffekten durch großflächigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und Nutzung in Personenkraftwagen sinkt.

Die Abbildung 5-23 zeigt die gesamten Lebenszykluskosten in den ausgewählten Szenarien entsprechend den prognostizierten Kostenparametern im Jahr 2030. Es ist zu erkennen, dass beim konventionellen LKW die Kosten hauptsächlich aufgrund der Dieselpreise gegenüber 2017 steigen. Bei batteriegetriebenem LKW steigen zwar die Betriebskosten durch steigende Strompreise, jedoch fangen die sinkenden Batteriepreise diese Mehrkosten auf, sodass die gesamten Lebenszykluskosten leicht sinken. Beim oberleitungsversorgten LKW machen sich die Batteriekosten wegen kleineren Batterien weniger bemerkbar und seine Lebenszykluskosten bleiben fast konstant. Beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW ist eine Kostensteigerung durch steigende Dieselpreise zu beobachten. Die größte Reduzierung der Lebenszykluskosten wird entsprechend der Kostenannahmen für den brennstoffzellengetriebenen LKW prognostiziert. Aufgrund der starken

Kostendegressionsannahmen bei Brennstoffzelle und Wasserstoff, erreicht der brennstoffzellengetriebene LKW im Jahr 2030 zwar kleinere Lebenszykluskosten als der Diesel-LKW, jedoch liegen sie über denen der anderen alternativen LKW. Insgesamt zeigt sich also, dass batteriegetriebener LKW und oberleitungsversorgter, rein elektrischer LKW entsprechend den Kostenprognosen die geringsten Lebenszykluskosten im Jahr 2030 zeigen.

	Jahr 2017	Jahr 2030	Quelle für Annahme 2030
Diesel-LKW	120.000 €	126.000 €	[34]
Batterie	300 €/kWh	150 €/kWh	[43] und eigene Annahme
Brennstoffzelle	550 €/kW	80 €/kW	[34], [111]
Wasserstofftank	960 €/kg _{H2}	565 €/kg _{H2}	[34]
Diesel	0,949 €/l	1,5 €/l	[34], [116]
Strom	0,139 €/kWh	0,17 €/kWh	[18], [34]
Wasserstoff	7,1 €/kg	5 €/kg	[103]

Tabelle 5-16: Annahmen zu Kostenentwicklungen für Jahr 2030

Diese Analyse zeigt, dass der brennstoffzellengetriebene LKW auch im Jahr 2030 höhere Lebenszykluskosten als andere alternativen LKW. Deshalb wird im Folgenden untersucht, welche Parameter für Brennstoffzelle und Wasserstoff notwendig sind, um eine Kostenparität zwischen brennstoffzellengetriebenem LKW und batteriegetriebenem bzw. oberleitungsversorgtem LKW von ca. 0,73 €/km im Jahr 2030 zu erreichen. Da für die Preise der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks bereits eine starke Kostendegression angenommen ist, werden der Wasserstoffpreis und die Lebensdauer der Brennstoffzelle variiert. Die Abbildung 5-24 zeigt die resultierenden Lebenszykluskosten. Es ist zu erkennen, dass die Lebensdauer der Brennstoffzelle aufgrund starker Reduktion ihrer Anschaffungskosten keine erhebliche Senkung der LCC bewirkt. Zum Erreichen der Kostenparität mit batteriegetriebenem und oberleitungsversorgtem LKW ist deshalb eine erhebliche Kostenreduktion des Wasserstoffs auf ca. 3,5 €/kg notwendig. Es sind also erhebliche Kostenreduktionen sowohl bei Brennstoffzelle als auch bei Wasserstoffpreis notwendig.

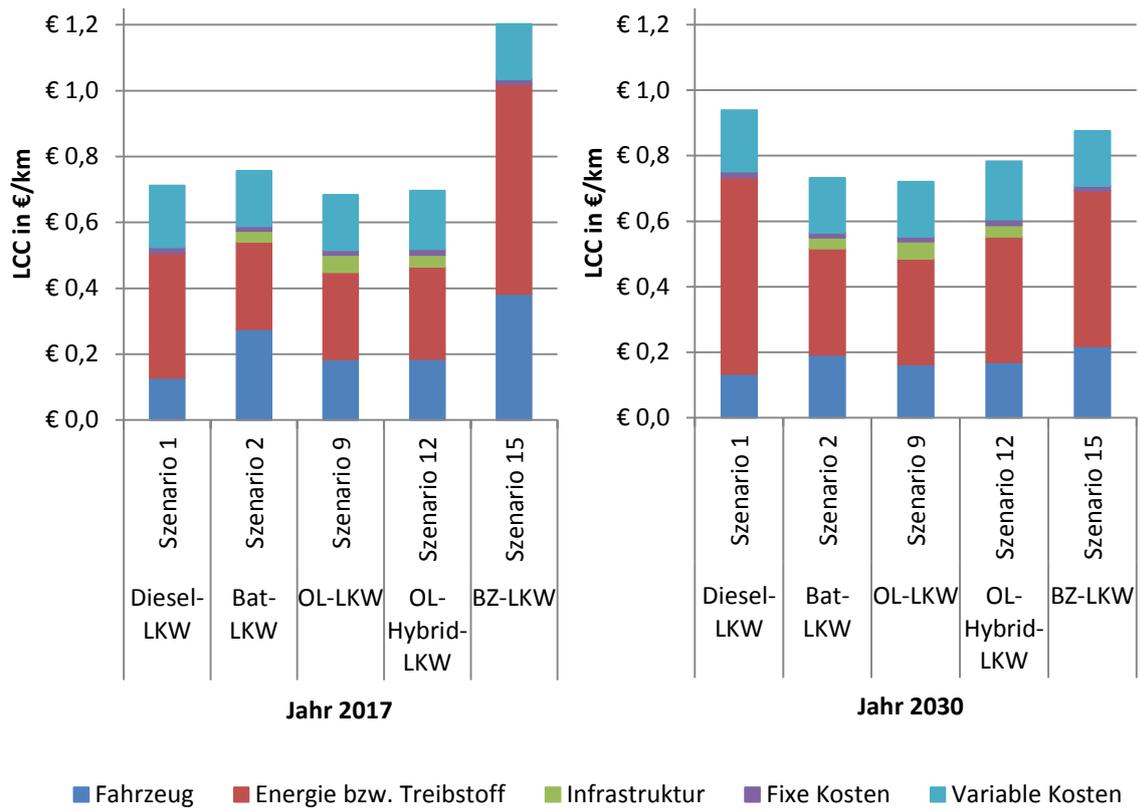


Abbildung 5-23: Entwicklung der gesamten Lebenszykluskosten

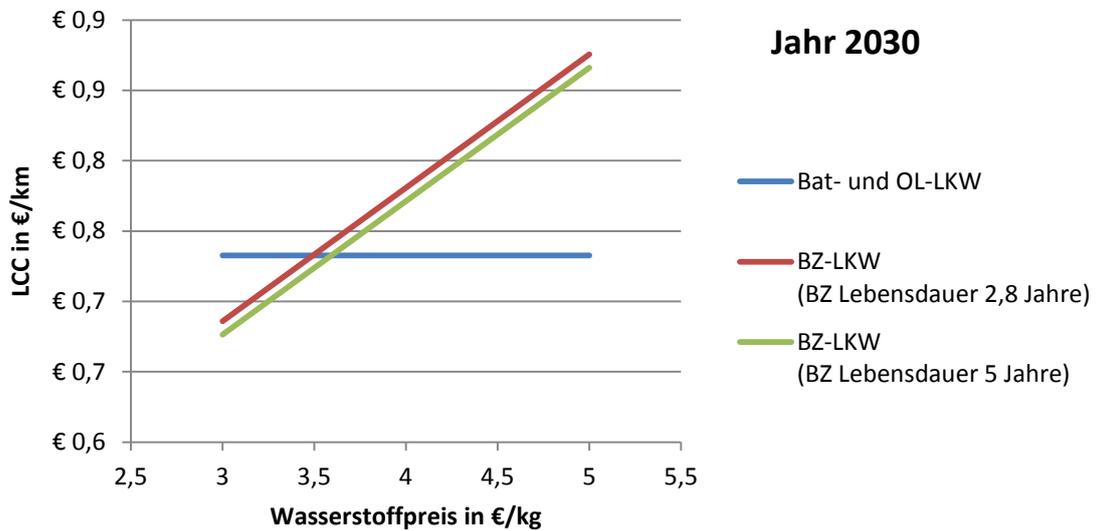


Abbildung 5-24: Spezifische Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen LKW für das Jahr 2030 in Abhängigkeit von Wasserstoffpreis und Lebensdauer der Brennstoffzelle

6 Modellierung der Umweltauswirkungen

Um die Umweltauswirkungen der in dieser Arbeit betrachteten LKW-Technologien zu bewerten, wird eine Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Analysis, kurz LCA) für die jeweiligen LKW und die dazugehörige Infrastruktur durchgeführt. In den folgenden Kapiteln wird auf die Festlegung des Untersuchungsrahmens sowie die Modellierung einzelner Komponenten eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt und der Einfluss wichtiger Parameter wie Strommix und Wasserstoffproduktionsmix untersucht.

6.1 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Das Ziel der hier durchgeführten Lebenszyklusanalyse ist der Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener LKW-Technologien sowie der entsprechenden Infrastruktur in bestimmten Szenarien des Güterfernverkehrs. Dazu gehört sowohl die Herstellung des jeweiligen Fahrzeugs und der Infrastruktur als auch deren Betrieb. Aus diesem Grund werden als funktionelle Einheiten ein LKW-Fahrzeug (in Stück) und eine Lebensfahrleistung (in km) gewählt. Einem LKW-Fahrzeug wird in Abhängigkeit von der gesamten LKW-Zahl die Infrastruktur anteilig zugeordnet, wie dies auch bei der Berechnung der Lebenszykluskosten geschehen ist. Auch die Lebensfahrleistung ergibt sich aus dem bei der Lebenszykluskostenberechnung angenommenen Betriebsszenario (Kapitel 5.1).

Der Untersuchungsrahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Lebenszyklusanalyse ist in Abbildung 6-1 gezeigt. Ausgehend von den benötigten Rohmaterialien und ihrer Gewinnung und Transports umfasst er die Herstellung der LKW und Infrastruktur sowie die Bereitstellung des Kraftstoffes bzw. des Stroms zum Betrieb und deren Transport. Die Lebenszyklusanalyse schließt mit dem Betrieb und der Wartung des LKW in dem definierten Betriebsszenario ab. Die Phase der Entsorgung bzw. des Recyclings wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, weil diese noch Gegenstand aktueller Forschung ist. Für die Batterien ist nach dem Ende ihrer regulären Lebensdauer beispielsweise eine Anwendung im stationären Speicher oder eine Verwertung über Recycling möglich. Weil die Datenlage zur Abschätzung der weiteren Nutzung der Batterien nicht ausreichend ist, wird die Phase der Entsorgung hier nicht betrachtet. Der Einfluss der Batterie- und Fahrzeugentsorgung ist jedoch laut Untersuchungen in [123] und [124] limitiert, wenn Recycling angewendet wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze stammen größtenteils aus den Datenbanken ecoinvent 2.2 [125] und ecoinvent 3.3 [69], die als Hintergrunddatenbanken für die

Sachbilanzierung verwendet werden. Die Datenbanken beinhalten eine Vielzahl von Sachbilanzen für verschiedene Materialien, Produkte und Prozesse sowie unterschiedliche Auswertungsmethoden zur Abschätzung der Umweltauswirkungen. Die Modellierung und Auswertung der Lebenszyklusanalyse erfolgt in der Software zur Stoffstromanalyse Umberto NXT LCA des ifu Hamburg.

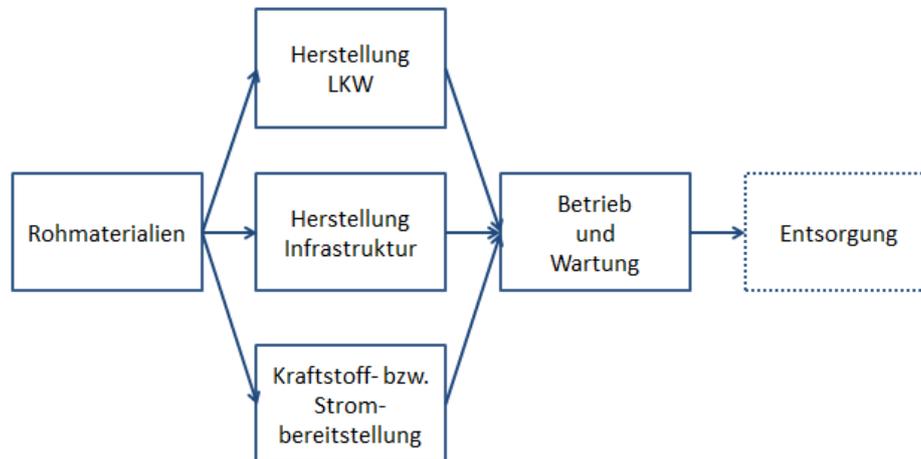


Abbildung 6-1: Untersuchungsrahmen der durchgeführten Lebenszyklusanalyse ausgehend von Rohmaterialien über Herstellung bis zum Betrieb.

Zur Analyse der Herstellung des Fahrzeugs und der Infrastruktur werden Sachbilanzen einzelner Komponenten erstellt bzw. die vorhandenen Datensätze der ecoinvent-Datenbanken verwendet. Die Abbildung 6-2 zeigt die Auflistung aller Komponenten des Fahrzeugs und der Infrastruktur, deren Herstellung in dieser Arbeit betrachtet wird. Dabei orientiert sich die Auswahl der betrachteten Komponenten möglichst an den Bestandteilen der Lebenszykluskostenrechnung in Abbildung 5-4. Bei Herstellung des LKW werden demnach Karosserie sowie die Antriebskomponenten modelliert. Dabei wird die Karosserie für alle LKW-Technologien gleich angenommen und die Zusammensetzung der Antriebskomponenten erfolgt technologiespezifisch. Je nach LKW-Technologie wird die dazugehörige Infrastruktur bilanziert. Für den batteriegetriebenen LKW werden Ladestationen modelliert, für den oberleitungsversorgten LKW sowie Hybrid-LKW wird ein System aus Unterwerken und Oberleitungen modelliert und schließlich werden für den brennstoffzellengetriebenen LKW Wasserstofftankstellen modelliert. Die Tankstelleninfrastruktur wird jedoch mangels geeigneter Daten nicht betrachtet. Es ist zu erwarten, dass der Einfluss dieser Infrastruktur auf Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse umgerechnet auf einen Diesel-LKW nur gering ist, so wie dies auch bei anderen Infrastrukturarten der Fall ist (vgl. Kapitel 6.3.4). In den folgenden Kapiteln wird die Modellierung der einzelnen Komponenten erläutert und die Inventarisierung vorhandener Datensätze beschrieben.

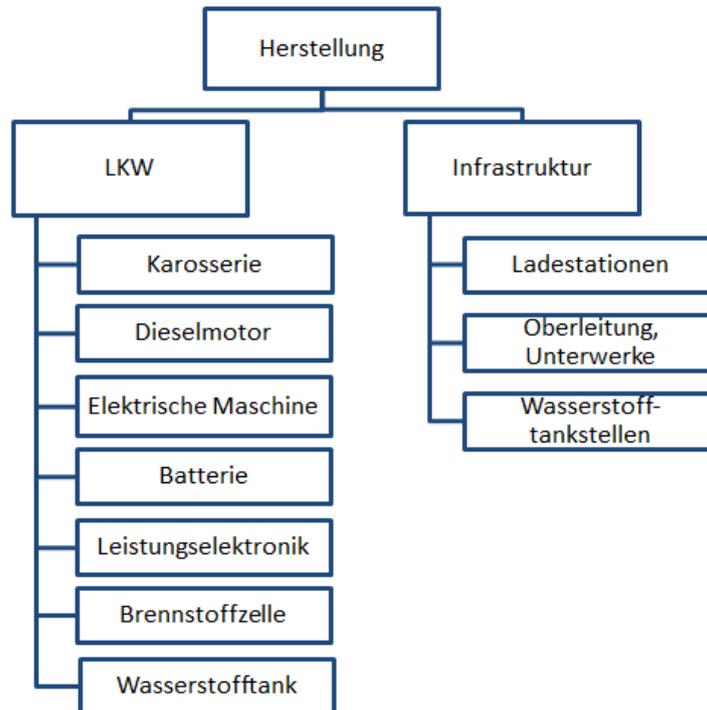


Abbildung 6-2: Bilanzierte Bestandteile des Fahrzeugs und der Infrastruktur

Die Wirkungsabschätzung wird für die Kategorien Treibhauspotential, Versauerungspotential und Eutrophierungspotential mit der Methode CML 2001 ausgewertet. Außerdem wird der kumulierte Energieaufwand für die Bewertung der LKW-Technologien berechnet. Die Wirkungsabschätzung findet in Umberto statt und die Ergebnisse einzelner Wirkungskategorien werden in Matlab übertragen. In Matlab werden diese Ergebnisse entsprechend dem konfigurierten LKW und dem Betriebsszenario skaliert. Dabei wird auf die im Rahmen der Abschlussarbeit [126] entstandenen Programmskripte zurückgegriffen. Die Berechnung zur Lebenszyklusanalyse gliedert sich somit in das Gesamtprogramm entsprechend der Abbildung 5-3 ein. Schließlich werden die skalierten Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen für alle Phasen der Lebenszyklusanalyse zusammengerechnet und analysiert.

6.2 Bilanzierung

6.2.1 Konventionell angetriebener LKW

Zum Bilanzieren eines konventionellen Diesel-LKW wird der Datensatz „lorry production, 40 metric ton [RER]“ aus der Datenbank ecoinvent verwendet, der die Produktion eines LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht inklusive Nutzlast von bis zu 40 t abbildet. Dabei steht die Abkürzung RER für Region Europa (engl. region Europe) und bedeutet, dass dieser Datensatz die durchschnittlichen europäischen Bedingungen für die Produktion dieses LKW wie Materialeinsatz, Stromverbrauch, Transporte etc. abbildet. Der Datensatz startet mit

Materialien, die zur Produktion des Fahrzeugs notwendig sind, und berücksichtigt auch den Stromverbrauch und Emissionen des Produktionsprozesses. Der Datensatz basiert auf den Umwelterklärungen zum Materialeinsatz für die Produktion eines schweren LKW von Volvo Truck Corporation und zum Energieaufwand von MAN Nutzfahrzeuge AG. Da dieser Datensatz auch das Recycling des Fahrzeugs enthält, wurde dieser aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung subtrahiert. Als funktionelle Einheit nutzt der Datensatz die Einheit LKW.

Der Betrieb des Diesel-LKW wird über den Dieserverbrauch inklusive der Kraftstoffbereitstellung sowie über die Wartung des Fahrzeugs modelliert. Der Dieserverbrauch wird über den Datensatz „transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 [RER]“ abgebildet, der die Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung sowie aus Abnutzung der Reifen, Bremsbeläge und Straße beinhaltet. Die im Datensatz abgebildeten Emissionen aus Kraftstoffverbrennung entsprechen der aktuellen Abgasnorm EURO 6. Der Anteil der Emissionen aus Abnutzung von Reifen, Bremsbelägen und Straße liegt bei allen in dieser Arbeit betrachteten Wirkungskategorien unter 1 %, sodass diese sowohl für den konventionellen als auch für die alternativen LKW vernachlässigt werden. Als funktionelle Einheit wird dem Datensatz der Dieserverbrauch vorgegeben, der von dem Fahrzeugsimulationsmodell des Diesel-LKW (Kapitel 3.1) berechnet wurde. Somit entspricht der Verbrauch des durch die Sachbilanz abgebildeten LKW dem Verbrauch des zuvor gewählten Betriebsszenarios (Kapitel 5.1).

Um auch die Kraftstoffbereitstellung zu berücksichtigen, wurde der Datensatz „market group for diesel, low-sulfur [RER]“ verwendet. Dieser enthält die Bilanzdaten sowohl zu den verwendeten Rohmaterialien, der Herstellung des Dieselmotors als auch zur Verteilung des Diesels bis zu den Tankstellen. Als funktionelle Einheit dient hier die produzierte Dieselmenge in Litern. Die Wartung wird über den Datensatz „maintenance, lorry 16 metric ton [CH]“ abgebildet, wobei die Menge der Wartung pro 1 tkm auf den Wert eines LKW mit bis zu 40 t Gesamtgewicht skaliert wurde. Der entsprechende Skalierungsfaktor wurde dem oben erwähnten Transportdatensatz der ecoinvent-Datenbank entnommen.

6.2.2 Batteriegetriebener LKW

6.2.2.1 Herstellung des batteriegetriebenen LKW

Der batteriegetriebene LKW besitzt als Basis die Karosserie, die gleich der Karosserie eines konventionellen LKW angenommen wurde. Um diese zu modellieren, wurden aus dem Datensatz der Herstellung eines konventionellen LKW die Datensätze zur Herstellung des Dieselmotors und des Katalysators zur Abgasnachbehandlung subtrahiert. Somit werden die dieselspezifischen Komponenten aus dem Datensatz herausgerechnet, sodass Komponenten wie Karosserie, Achsen, Getriebe usw. erhalten bleiben. Diese werden für alle alternativen LKW-Technologien gleich angenommen und im Folgenden vereinfachend als Karosserie bezeichnet.

Zur Bilanzierung des Dieselmotors wird der Datensatz „internal combustion engine production, passenger car [GLO]“ verwendet, der in der ecoinvent-Datenbank sowohl für Diesel- als auch für Benzinmotoren jedoch mit unterschiedlicher Skalierung verwendet wird. Die funktionelle Einheit dieses Datensatzes ist Kilogramm. Zum Abbilden eines leistungsfähigeren LKW-Dieselmotors werden die Ergebnisse dieses Datensatzes mit dem Gewicht des LKW-Dieselmotors skaliert.

Ein gängiges System zur Abgasreinigung bei Nutzfahrzeugen ist der SCR-Katalysator (englisch selective catalytic reaction, kurz SCR), bei dem durch eine selektive katalytische Reduktion unter Verwendung der wässrigen Harnstofflösung vor allem die Stickoxide reduziert werden. Daher wird der ecoinvent-Datensatz „catalytic converter production, selective catalytic reduction, 200 litre [RER]“ von dem Datensatz für LKW-Herstellung subtrahiert und die Ergebnisse des bilanzierten SRC-Katalysators auf ein gängiges Katalysatorvolumen bei Nutzfahrzeugen von 20 l [127] skaliert.

Zur Modellierung der Batterie wird auf die Ergebnisse der Abschlussarbeit [128] zurückgegriffen, in welcher die Bilanzierung der Herstellung kompletter Batteriepacks mit unterschiedlichen Zellen durchgeführt wurde. Die Materialinventarisierung unterschiedlicher Zellen basiert dabei auf Daten aus Post-Mortem Analysen einzelner Zellen [129], dem öffentlich verfügbaren Performance- und Kostenmodell der Argonne National Laboratory [130] sowie auf angenommenen Skalierungen der Aktivmaterialien bezüglich der Energiedichte der Zellen [131]. Zur Bilanzierung wurden die Datensätze der Datenbank ecoinvent 2.2 genutzt. Neben den Zellen werden auch weitere Komponenten eines Batteriepacks wie Elektronik, Kühlung, Kontaktierungen und das Gehäuse des Batteriepacks sowie die Integration der Komponenten bilanziert. Der zur Herstellung des Batteriepacks verwendete Energiemix entspricht dem Energiemix des Herstellerlandes. Die funktionelle Einheit des Modells ist eine Kilowattstunde des hergestellten Batteriepacks.

In Tabelle 3-4 (Kapitel 3.2.2) werden die in dieser Arbeit betrachteten Zellen aufgelistet. Um die nach Fahrzeugsimulation durchgeführte Lebensdauerabschätzung konsistent mit der Lebenszyklusanalyse zu halten, werden die Zellen aus Tabelle 3-4 den Zellen im Portfolio der Batteriepackbilanzierung zugeordnet. Während die Hochenergiezelle HEc auch bei der Ökobilanzierung vorhanden ist, wird für die Hochenergiezelle HEa eine ähnliche Zelle mit gleichem Kathodenmaterial NMC aber einer anderen Kapazität verwendet. Deshalb wird aus der Kapazität des Batteriepacks, mit welchem die Fahrzeugsimulation und die Lebenszykluskostenberechnung durchgeführt wurden, eine neue Anzahl von Zellen für die Ökobilanz berechnet. Dabei bleiben die Materialmengen aber näherungsweise gleich. Für die Hochleistungszelle HPa findet sich im Portfolio keine Hochleistungszelle mit gleicher Zellchemie. Im Unterschied zu den Hochenergiezellen besitzen die Hochleistungszellen größere Stromableiter und geringere Mengen an Aktivmaterial [132], sodass sie höhere Leistungen bereitstellen können aber andererseits geringere Energiedichten besitzen. Da die Herstellung der Aktivmaterialien der Kathode und Anode die höheren Umweltauswirkungen verursachen, ist es zu erwarten, dass bei gleicher Zellchemie die Umweltauswirkungen der Hochleistungszellen geringer als die der Hochenergiezellen ausfallen. Aus diesen Gründen wird für die Hochenergiezelle HEa und Hochleistungszelle HPa der Tabelle 3-4 in dieser

Arbeit die Ökobilanzierung einer Hochenergiezelle mit dem Kathodenmaterial NMC verwendet.

Die elektrische Maschine wird mit dem ecoinvent-Datensatz „electric motor production, vehicle (electric powertrain) [GLO]“ modelliert, der die Herstellung einer 100 kW elektrischen Maschine des Herstellers Brusa für einen Personenkraftwagen beschreibt. Die Ergebnisse dieses Datensatzes werden leistungsbezogen auf die im Fahrzeugmodell modellierte elektrische Maschine skaliert. Die Leistungselektronik wird durch den Datensatz „inverter production, for electric passenger car [GLO]“ und die Schützbox durch den Datensatz „power distribution unit production, for electric passenger car [GLO]“ modelliert, die ebenfalls auf den Daten des Herstellers Brusa basieren und leistungsbezogen skaliert werden.

6.2.2.2 Betrieb des batteriegetriebenen LKW

Der Betrieb des batteriegetriebenen LKW wird über den Energieverbrauch und Fahrzeugwartung abgebildet. Der Energieverbrauch wird von dem Fahrzeugmodell für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs berechnet und an die Lebenszykluskostenrechnung und Lebenszyklusanalyse weitergegeben (Abbildung 5-3). Dabei handelt es sich um den Energieverbrauch des Fahrzeugs ab dem Ladestationsausgang. In der ecoinvent-Datenbank kann die Energieversorgung ab Kraftwerk (inklusive Rohstoffgewinnung und Kraftwerkbau) bis zum Mittelspannungsanschluss modelliert werden. Deshalb wird der Energieverbrauch des Fahrzeugs ab dem Ladestationsausgang E_{Fzg} in den Energieverbrauch ab dem Mittelspannungsanschluss E_{MS} nach der folgenden Formel umgerechnet:

$$E_{MS} = 1/\eta_{\text{Trafo}} \cdot 1/\eta_{LE} \cdot E_{Fzg}, \quad (6.1)$$

wobei η_{Trafo} der Wirkungsgrad von dem Transformator ist, der zu 97 % angenommen wird, und η_{LE} der Wirkungsgrad der Leistungselektronik, der zu 95 % angenommen wird.

Die Stromversorgung bis zum Mittelspannungsanschluss wird mit dem ecoinvent-Datensatz „market for electricity, medium voltage [DE]“ bilanziert, der einen Stromerzeugungsmix für Deutschland, Übertragungs- und Transformationsverluste auf Mittel- und Hochspannungsebenen, Stromimporte aus benachbarten Ländern sowie Emissionen des Lachgases und Ozons von Freileitungen und des Schwefelhexafluorids (SF_6) aus Schaltanlagen enthält. Die Letzteren entstehen in geringeren Mengen bei Herstellung, Prüfung und Errichtung der mit SF_6 -Gas isolierten Schaltanlagen [133]. Dieser Datensatz wurde bis auf die Zusammensetzung des Strommixes aufgeschlüsselt, um ihn anschließend zu aktualisieren. Der implementierte Strommix entspricht dem deutschen Strommix im Jahr 2017 [134] und ist in Abbildung 6-3 gezeigt. Ferner wurde ein Strommix mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien von ca. 80 % implementiert, um ein zukünftiges Szenario mit größtenteils dekarbonisierten Energiequellen zu betrachten. Der implementierte Strommix für das Jahr 2050 orientiert sich an dem Zielszenario zum Erreichen einer Reduktion der nationalen Treibhausgasemissionen um 80 % aus einer Studie im Auftrag des

Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [135] und ist ebenfalls in Abbildung 6-3 dargestellt. Auch die Stromimporte wurden für das Jahr 2017 mit Daten aus [136] implementiert.

Die gezeigten Strommische wurden in Umberto für den Stromerzeugungsmix auf Hochspannungsebene implementiert, sodass sie unmittelbare Auswirkung auf die Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge haben. Jedoch werden in den anderen Datensätzen der ecoinvent-Datenbank (z.B. Herstellung der Fahrzeugkomponenten, Gewinnung und Transport der Rohstoffe, Herstellung der Kraftwerke etc.) jeweils eigene regionale Strommische verwendet. Deshalb wirken sich die implementierten Strommische ausschließlich auf den Betrieb der Fahrzeuge aus.

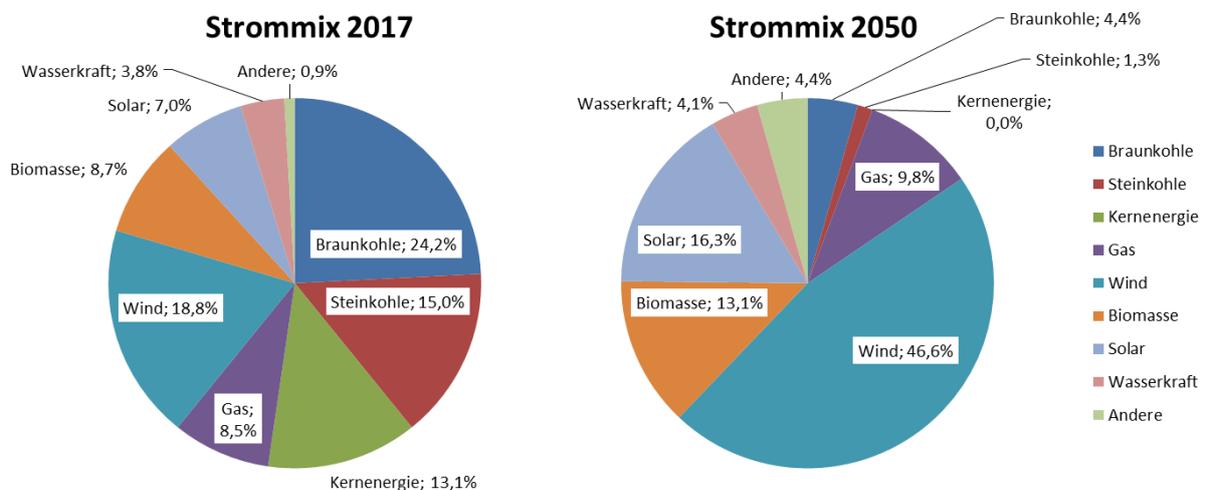


Abbildung 6-3: Die implementierten Strommische für 2017 [134] und 2050 [135]

Außerdem wird beim Betrieb des batteriegetriebenen LKW auch seine Wartung berücksichtigt. Da es jedoch keinen geeigneten Datensatz zur Bilanzierung der Wartung eines batterieelektrischen LKW in der ecoinvent-Datenbank gibt, wird der Datensatz für die Wartung eines konventionellen Diesel-LKW genutzt. Dieser enthält sowohl die Wartung des Dieselmotors als auch weiterer Bestandteile wie Wartung der Reifen und Bremsen, Fahrzeugwäschen etc., die auch bei einem elektrischen LKW anfallen. Tendenziell ist die Wartung eines elektrischen Fahrzeugs allerdings weniger aufwendig, da bei einem Elektromotor im Gegensatz zum Dieselmotor keine Öl- und Filterwechsel notwendig sind. Auch der Bremsverschleiß ist bei einem elektrischen Fahrzeug aufgrund des elektrischen Bremsens geringer.

6.2.3 Oberleitungsversorgter LKW mit Batterie

Grundsätzlich werden die Herstellung und Betrieb des oberleitungsversorgten LKW mit Batterie mit Hilfe der gleichen Datensätze wie bei dem batteriegetriebenen LKW bilanziert. Die Unterschiede bestehen jedoch im Vorhandensein eines Batterieumrichters im

Antriebsstrang des oberleitungsversorgten LKW sowie in Wirkungsgradannahmen beim Betrieb an der Oberleitungsinfrastruktur.

Die Herstellung des Pantographen konnte in dieser Arbeit mangels geeigneter Daten nicht evaluiert werden. Durch sein relativ geringes Gewicht wird der Einfluss der Pantographenherstellung auf die Ergebnisse der Analyse jedoch als gering eingeschätzt. Der elektrische Wirkungsgrad des Pantographen wird beim Energiebedarf weiterhin berücksichtigt.

Entsprechend den im Kapitel 3.3 gemachten Annahmen zum oberleitungsversorgten LKW besitzt sein Antriebsstrang im Vergleich zu dem Antriebsstrang eines batteriegetriebenen LKW zusätzlich einen Batterieumrichter zum Laden bzw. Entladen der Batterie entsprechend der Betriebsstrategie. Dieser Batterieumrichter wird mit dem ecoinvent-Datensatz „converter production, for electric passenger car [GLO]“ bilanziert und entsprechend seiner Leistung skaliert.

Der Betrieb des oberleitungsversorgten LKW mit Batterie wird über die gleichen Datensätze wie der Betrieb eines batteriegetriebenen LKW modelliert. Die Energieversorgung wird bis zum Mittelspannungsanschluss eines Unterwerks modelliert. Der aus der Fahrzeugsimulation resultierende Energieverbrauch stellt in diesem Fall den Verbrauch ab dem Pantographen des LKW dar. Deshalb wird der Energieverbrauch des Fahrzeugs E_{Fzg} in den Energieverbrauch ab dem Mittelspannungsanschluss des Unterwerks E_{MS} entsprechend der folgenden Formel umgerechnet:

$$E_{MS} = 1/\eta_{Trafo} \cdot 1/\eta_{GR} \cdot 1/\eta_{OL} \cdot E_{Fzg}, \quad (6.2)$$

Dabei werden die Wirkungsgrade von Unterwerkstransformator η_{Trafo} mit 97 %, Gleichrichter η_{GR} mit 98 % und Oberleitung η_{OL} mit 95 % angenommen. Die genutzten Wirkungsgrade basieren auf dem Bericht zum Forschungsprojekt ENUBA 2 [6], in dem diese Werte aus Messfahrten auf einer mit Oberleitung ausgestatteten Versuchsstrecke berechnet wurden.

6.2.4 Oberleitungsversorgter Hybrid-LKW

Die Bilanzierung der Herstellung und des Betriebs des oberleitungsversorgten Hybrid-LKW erfolgt über die gleichen Datensätze wie beim oberleitungsversorgten LKW mit Batterie. Die Unterschiede bestehen wiederum bei dem Antriebsstrang, wo der Dieselgenerator berücksichtigt werden muss, und bei dem zusätzlichen Dieselverbrauch im Betrieb.

Der Dieselgenerator wird entsprechend Abbildung 3-6 als bestehend aus Dieselmotor, Generator und Umrichter modelliert. Der Dieselmotor wird mit dem gleichen Datensatz wie der Dieselmotor bei einem konventionellen LKW modelliert. Durch Downsizing hat der Dieselmotor bei einem oberleitungsversorgten LKW allerdings ein geringeres Gewicht, welches bei Skalierung des Dieselmotordatensatzes berücksichtigt wird. Der Generator und der dazugehörige Umrichter werden mit den bereits für den Elektromotor und seinen

Umrichter benutzten Datensätzen „electric motor production, vehicle (electric powertrain) [GLO]“ und „inverter production, for electric passenger car [GLO]“ bilanziert.

Ferner muss für den Serienhybrid-LKW die Abgasnachbehandlung berücksichtigt werden, was mit dem Datensatz „catalytic converter production, selective catalytic reduction, 200 litre [RER]“ für die Herstellung eines SCR-Katalysators (vgl. Kapitel 6.2.2.1) erfolgt.

Beim Betrieb eines oberleitungsversorgten Serienhybrid-LKW wird einerseits Strom verbraucht, der analog zum oberleitungsversorgten LKW bilanziert wird. Andererseits wird auf langen oberleitungsfreien Strecken Dieselkraftstoff verbraucht, der analog zum Dieselverbrauch beim konventionellen LKW bilanziert wird (Kapitel 6.2). Für die Wartung wird der gleiche Datensatz wie bei dem konventionellen LKW verwendet.

6.2.5 Brennstoffzellengetriebener LKW

6.2.5.1 Herstellung des brennstoffzellengetriebenen LKW

Der brennstoffzellengetriebene LKW wird in seiner Herstellung analog zu dem batteriegetriebenen LKW bilanziert. Zusätzlich werden Brennstoffzelle mit dazugehörigem Umrichter und Wasserstofftank entsprechend den Annahmen im Kapitel 3.5 bilanziert.

Die Bilanzierung der Brennstoffzelle erfolgt mit den Ergebnissen der Abschlussarbeit [137], in der u.a. die Herstellung und Wartung eines PEM-Brennstoffzellensystems mit 150 kW Ausgangsleistung zum Einsatz in einem Brennstoffzellenhybridbus bilanziert wurde. Eine Brennstoffzelle dieser Leistungsklasse wird auch in der Fahrzeugsimulation des brennstoffzellengetriebenen LKW im Kapitel 3.5 modelliert. Die Bilanzierung der Brennstoffzelle in [137] basiert auf dem Datensatz eines 2 kW PEM-Brennstoffzellensystems zum Einsatz in einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung aus der Datenbank ecoinvent 2.2. Dieser Datensatz wurde aufgeschlüsselt und der Materialeinsatz der wichtigsten Komponenten des elektrochemischen Stacks wurde entsprechend Angaben aus Literatur geändert. Andererseits wurden auch die zur Herstellung notwendigen Energie und Transportwege sowie andere Komponenten des Brennstoffzellensystems wie z.B. des Gehäuses, der Luftfilter sowie ihre Herstellung mit dem ecoinvent-Datensatz bilanziert.

Weil die Lebensdauer einer Brennstoffzelle begrenzt ist, wurden bei der Bilanzierung des Brennstoffzellensystems 0,8 Ersatzkomponenten (entsprechend der Lebensdauerannahme bei LCC-Berechnung im Kapitel 5.3.5) berücksichtigt, die auf Grundlage des ecoinvent-Datensatzes zur Wartung des Brennstoffzellensystems bilanziert wurden. Im Rahmen der Brennstoffzellenwartung werden diese Ersatzkomponenten installiert, die einen kompletten elektrochemischen Stack und Luftfilter enthalten.

Da in der ecoinvent-Datenbank keine Datensätze zur Bilanzierung des Wasserstofftanks vorliegen wird auf in der Literatur vorhandene Werte für die Wirkungskategorien GWP und PED zurückgegriffen [99]. Die Herstellung des Brennstoffzellenumrichters wird wie auch die

Herstellung des Batterieumrichters mit dem ecoinvent-Datensatz „converter production, for electric passenger car [GLO]“ bilanziert.

6.2.5.2 Betrieb des brennstoffzellengetriebenen LKW

Beim Betrieb werden die Wartung des Fahrzeugs sowie der Wasserstoff und seine Bereitstellung bilanziert.

Die Wartung des Fahrzeugs wird analog zu der Wartung eines konventionellen Diesel-LKW sowie anderer elektrischen LKW bilanziert. Die Brennstoffzellenwartung wurde bereits oben behandelt.

Dem beim Betrieb der Brennstoffzelle entstehenden reinen Wasser wurde keine negative Wirkung zugeordnet, sodass dieses nicht in die Bilanz eingerechnet wird.

Der Wasserstoffverbrauch eines brennstoffzellengetriebenen LKW wird von der Fahrzeugsimulation berechnet und an die Lebenszyklusanalyse weitergegeben. Jedoch wird beim Betanken an der Tankstelle zusätzlich elektrische Energie verbraucht. Der angelieferte flüssige Wasserstoff wird in einem Wasserstoffspeicher in der Tankstelle gespeichert. Bei Betankung eines Fahrzeugs muss der flüssige Wasserstoff aus diesem Speicher mittels einer Kryopumpe herausgepumpt werden, wobei er bereits in diesem Schritt im flüssigen Zustand komprimiert wird, und anschließend in einem Verdampfer in den gasförmigen Zustand überführt werden. Die Effizienz des beschriebenen Betankungsprozesses beläuft sich laut [96] auf 93 %. Dies bedeutet, dass pro 1 kWh des komprimierten Wasserstoffs 0,07 kWh elektrischer Energie notwendig sind. Die zur Betankung benötigte Energie wird deshalb zusätzlich zu dem Wasserstoffverbrauch des LKW berücksichtigt.

Für die Bereitstellung des Wasserstoffs wird sein aktueller Produktionsmix bilanziert [92], [138]. Etwa 96 % des Wasserstoffs wird aktuell aus fossilen Rohstoffen mittels Dampfreformierung von Erdgas, partieller Oxidation von Schweröl und Vergasung von Kohle hergestellt (Abbildung 6-4). Die restlichen 4 % des Wasserstoffs werden mittels Elektrolyse hergestellt.

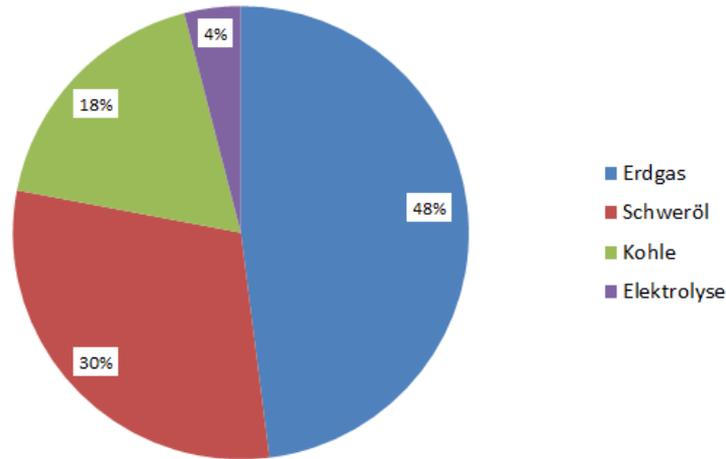


Abbildung 6-4: Produktionsmix für Wasserstoff [92], [138]

Die implementierten Faktoren für die einzelnen Herstellungsverfahren und Wirkungskategorien sind in Tabellen A-1 bis A-4 im Anhang gezeigt. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte, die aus den Daten in den jeweils angegebenen Literaturquellen gebildet wurden. Weil die Daten zu AP und EP nicht alle Herstellungsverfahren abdecken, werden diese Wirkungskategorien für die brennstoffzellengetriebenen LKW nicht ausgewertet. Die im Weiteren genutzten Faktoren für Auswirkungen der Wasserstoffbereitstellung entsprechend des Produktionsmixes sind in Tabelle 6-1 angegeben.

Wasserstoffbereitstellung	
Global Warming Potential (GWP)	13,62 kg CO ₂ -eq/kg _{H2}
Primary Energy Demand (PED)	212,29 MJ-eq/kg _{H2}

Tabelle 6-1: Die implementierten Faktoren für Bereitstellung des Wasserstoffs

Für die Bilanzierung der Elektrolyse wurden die ecoinvent-Datensätze und der darin hinterlegte Elektrolysemix genutzt, der zu 57 % aus Amalgamverfahren, 29 % aus Membranverfahren und 14 % aus Diaphragmaverfahren besteht. Da die Verflüssigung und Transport des Wasserstoffs in einigen Literaturquellen bereits berücksichtigt sind [139], [140], werden sie in dieser Arbeit nicht explizit bilanziert.

Durch die Nutzung der ecoinvent-Datensätze für Elektrolyse wird schließlich die Elektrolyse mit Strommix 2017 und mit dem Strommix 2050 (entsprechend Kapitel 6.2.2.2) untersucht, bei dem ein Großteil der Energien aus erneuerbaren Quellen kommt. Somit können auch die zukünftigen Szenarien für den Betrieb der LKW unterschiedlicher Technologien verglichen werden.

6.2.6 Infrastruktur

6.2.6.1 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur wird über die wichtigsten Komponenten einer Ladestation bilanziert: Trafo, Leistungselektronik und Mittelspannungsanschluss. Die Bau- und Installationsarbeiten für Ladesäulen und Trafostationen werden vernachlässigt, da keine ausreichende Datenlage vorhanden ist.

Für den Aufbau der Leistungselektronik wird angenommen, dass diese aus einer Gleichrichterstufe und einer Umrichterstufe, die die Ausgangsspannung und Strom steuert, besteht. Ähnlich wie bei der Leistungselektronik in Fahrzeugen werden die ecoinvent-Datensätze für Inverter und Umrichter genutzt und leistungsbezogen skaliert. Für den Transformator wird der ecoinvent-Datensatz „transformer production, high voltage use [GLO]“ benutzt. Dieser bildet allerdings einen kleinen Transformator für Kommunikationstechnologie ab, sodass Hochspannung sich in diesem Kontext auf die im Haushalt übliche Spannung von 230 V bezieht. Für die Anwendung in LKW-Ladestationen werden Transformatoren zum Anschluss an Stromübertragungsnetze mit Mittelspannungen im Bereich von mehreren 10 kV benötigt. In vielen Anwendungen wie in Industriegebäuden, Unterwerken der Eisenbahn und Straßenbahn, Windkraftanlagen usw. kommen meist Gießharztransformatoren aufgrund ihrer geringen Brandlast zum Einsatz. Sie haben jedoch wie die kleinen Transformatoren in dem ecoinvent-Datensatz auch Ferrite und Epoxidharz als ihre wichtigsten Materialien. Deshalb wird dieser Datensatz genutzt und leistungsbezogen skaliert. Der spezifische Leistungsfaktor von 4,8 kg/kW wird aus dem Datenblatt eines 500 kVA Gießharztransformators berechnet, der in einer Busladestation eingesetzt wird.

Schließlich wird die Mittelspannungsleitung zum Anschluss an das elektrische Netz bilanziert. Dazu wird der ecoinvent-Datensatz „transmission network construction, electricity, medium voltage [CH]“ genutzt und mit der im Kapitel 5.3.2 angenommenen Länge der Anschlussleistung skaliert.

6.2.6.2 Oberleitungsinfrastruktur

Für die Oberleitungsinfrastruktur werden die Komponenten eines Unterwerks (Transformator, Gleichrichter), die Oberleitungsbestandteile (Masten, Fahrdrabt, Tragseil) und der Mittelspannungsanschluss berücksichtigt. Auch bei Oberleitungsinfrastruktur werden die Bau- und Installationsarbeiten für Unterwerke und Oberleitungen vernachlässigt, da keine ausreichende Datenlage vorhanden ist.

Für den Transformator und Gleichrichter sowie für den Mittelspannungsanschluss werden die gleichen Datensätze wie für die Ladeinfrastruktur im Kapitel 6.2.6.1 genutzt. Der Gleichrichter wird dabei über den ecoinvent-Datensatz eines Inverters bilanziert.

Eine Oberleitung besteht aus einem Fahrdraht, der stromführend ist, und aus einem Trageil zur mechanischen Stabilisierung. Um die Zugfestigkeit des Fahrdrahtes zu erhöhen wird eine Magnesium-Kupfer-Legierung mit einem Magnesiumanteil von 0,5 % verwendet [141]. Der Kupferbedarf pro Streckenkilometer Fahrdraht (je 2 Drähte in beide Richtungen) wird in [6] zu 12,8 t abgeleitet. Daraus lässt sich auch der Magnesiumanteil zu ca. 64 kg berechnen. Für das Trageil wird üblicherweise Bronze mit einem Gewicht von 1060 Kilogramm für einen Kilometer Trageil verwendet [141]. Für die Herstellung der Leitungen werden ecoinvent-Datensätze zum Bilanzieren des Gießens, Walzens und Drahtziehen angewandt [142].

Schließlich werden die Masten mit den Angaben aus [5] modelliert. Bei den Masten handelt es sich um runde Stahlrohre mit einem Durchmesser von 0,4 Metern und einer Höhe mit ca. 6,8 Metern. Es wurden Hohlrohre mit 5 cm Wanddicke angenommen. Außerdem sind die Masten 1,25 Meter tief in die Erde einbetoniert. Ferner wird mit einem Abstand zwischen zwei Masten von 65 m gerechnet [6]. Als Herstellungsprozess wird der ecoinvent-Datensatz für das Walzen genutzt.

Die funktionelle Einheit für Oberleitungsbestandteile ist ein Kilometer Oberleitung. In diesem sind Fahrdraht, Trageil und Masten enthalten.

6.2.6.3 Wasserstoffinfrastruktur

Nachdem der Transport des Wasserstoffs zur Wasserstofftankstelle bereits bei der Kraftstoffbereitstellung und der Energiebedarf zur Wasserstoffkompression beim Betanken berücksichtigt wurden (Kapitel 6.2.5.2), werden in diesem Kapitel die Bestandteile einer Wasserstofftankstelle bilanziert. Die Bau- und Installationsarbeiten werden aufgrund nicht ausreichender Datenlage vernachlässigt, wie dies auch bei anderen in dieser Arbeit betrachteten Infrastrukturarten geschehen ist.

Der konkrete Aufbau einer Wasserstofftankstelle kann deutlich variieren. Bei Anlieferung des flüssigen Wasserstoffs kann dieser in einem kryogenen Speichertank bei niedrigen Temperaturen flüssig gespeichert werden. Beim Tanken wird der Wasserstoff mit einer Kryogenpumpe unter hohem Druck aus dem Speicher entnommen und in einem Verdampfer verdampft [143], aus dem der gasförmige Wasserstoff in den Wasserstofftank des Fahrzeugs gelangt.

Wird der Wasserstoff gasförmig an die Tankstelle angeliefert, wird dieser in einem Druckbehälter gelagert. Mit einem mehrstufigen Kolbenkompressor wird er dann in einem Hochdruckspeicher zwischengespeichert und anschließend an die Fahrzeuge verteilt. Dabei muss der Druck im Hochdrucktank der Tankstelle höher sein als der Druck im Speichertank des Fahrzeugs. Über dieses Druckgefälle wird der Speichertank im Fahrzeug mit Wasserstoff befüllt. Bei Befüllung expandiert der Wasserstoff also, was zu seiner Erwärmung führt. Deshalb wird bei kommerziellen Anlagen der Wasserstoff bei dem Tankvorgang gekühlt [144]. Der Hochdruckspeicher kann auch als Kaskadenanlage bestehend aus mehreren Speichern mit unterschiedlichen Druckhöhen ausgeführt werden. Der Vorteil bei diesen

Anlagen besteht im geringeren Energiebedarf zur Kompression und Kühlung des Wasserstoffs [145].

Da die ecoinvent-Datenbank keine Datensätze zur Modellierung der Wasserstofftankstellen anbietet, wird es mit verfügbaren Daten von Komponenten versucht, die Wasserstofftankstellen nachzubilden. In dieser Studie konnten jedoch nur Daten für die Komponenten einer Tankstelle mit gasförmigem Wasserstoff gefunden werden. Da bei der Kraftstoffbereitstellung flüssiger Wasserstoff bilanziert wird, entsteht an dieser Stelle eine Inkonsistenz aufgrund beschränkter Datenverfügbarkeit. Die Ökobilanzierung der Wasserstoffgastankstellen wird in dieser Arbeit aber trotzdem genutzt, um eine grobe Abschätzung für Infrastruktur zu bekommen.

Als wichtigsten Komponenten der Wasserstofftankstelle werden Hochdruckspeicher, Kompressor und Zapfsäule bilanziert. Der Hochdruckspeichertank einer Wasserstofftankstelle wird mit den Ergebnissen aus [99] modelliert, die bereits für den Wasserstofftank im LKW genutzt wurden (Kapitel 6.2.5.1). Die Bilanzierung des Wasserstoffkompressors erfolgt auf der Grundlage des ecoinvent-Datensatzes „air compressor production, screw-type compressor, 300kW [RER]“. Daraus werden die Herstellungsprozesse wie Walzen, Spritzgießen, Drahtziehen etc. übernommen, die bei Produktion dieses Kompressors anfallen. Die Inventarisierung der benötigten Rohmaterialien wird dagegen aus der Studie [146] genommen, in der u.a. ein Wasserstoffkompressor mit Durchflussmenge von 5,4 kg_{H₂}/h bilanziert wurde. Auch für die Bilanzierung der Wasserstoffzapfsäule wurden die Prozesse aus diesem ecoinvent-Datensatz und die Materialinventarisierung aus der Studie [146] übernommen.

Es wird angenommen, dass die Zahl der Wasserstofftankstellen entlang der bundesdeutschen Autobahnen gleich der Zahl konventioneller Autobahntankstellen ist, die im Jahr 2017 bei 358 Autobahntankstellen lag [147]. Vereinfachend wird ferner angenommen, dass jede Wasserstofftankstelle einen Hochdruckspeicher und eine Zapfsäule besitzt. Die konkrete Ausführung der Wasserstofftankstelle kann jedoch sehr unterschiedlich sein: Zum Beispiel ein großer Druckspeicher und ein kleinerer Zwischenspeicher mit Hochdruck bzw. eine Kaskade aus mehreren Hochdruckspeichern wie oben beschrieben.

Für die Kapazität des Speichertanks wird der tägliche Bedarf von rund 75 kg Wasserstoff pro LKW entsprechend Kapitel 4.1 sowie die Anzahl der verkehrenden LKW von 71842 Fahrzeugen entsprechend wie bei anderen hier untersuchten Infrastrukturarten angenommen (vgl. Kapitel 5.5.2). Bei täglicher Belieferung muss die Speichertankkapazität einer Wasserstofftankstelle somit 15.250 kg Wasserstoff betragen. Der bilanzierte Hochdruckspeichertank wird also mit dieser Kapazität skaliert. Für seine Lebensdauer werden wie beim Fahrzeugwasserstofftank 10 Jahre angenommen (Kapitel 5.3.5).

Für den Wasserstoffkompressor zur Füllung des Zwischenspeichers wird eine Durchflussmenge von 300 kg_{H₂}/h angenommen, um die von einem LKW pro Tankvorgang entnommene Wasserstoffmenge von 150 kg (gleich der Tankkapazität eines im Kapitel 4.3.5 dimensionierten LKW) in einer halben Stunde wieder aufzufüllen. Der bilanzierte

Kompressor wird also mit dieser Durchflussmenge skaliert. Für seine Lebensdauer sowie für die Lebensdauer der Zapfsäule werden 25 Jahre angenommen.

6.3 Auswertung der Umweltauswirkungen

6.3.1 Fahrzeugherstellung

Die Abbildung 6-5 zeigt das Treibhauspotential und den Primärenergiebedarf bei Herstellung der Fahrzeuge in den untersuchten Szenarien. Hierbei wurde die Szenariendauer von 5 Jahren berücksichtigt, indem die Auswirkungen der Ersatzkomponenten einberechnet wurden bzw. bei restlicher Lebensdauer nach Szenariendeckung die Auswirkungen anteilig berücksichtigt wurden. Dieses Vorgehen wurde auch für die Wirkungskategorien Versauerungspotential und Überdüngungspotential angewandt.

Aus Abbildung 6-5 ist ersichtlich, dass die Herstellung eines Diesel-LKW und eines oberleitungsgetriebenen LKW ungefähr die gleichen Umweltauswirkungen (außer im Szenario 7) verursachen. Dabei ist der Großteil dieser auf die Herstellung der Karosserie zurückzuführen, die aus dem Datensatz des konventionellen Diesel-LKW übernommen und für alle alternativen LKW gleich angenommen wurde. Im Szenario 7 steigen die Umweltauswirkungen durch Herstellung der Batterie an, die hier eine größere Kapazität und eine geringere Lebensdauer besitzt und eine Ersatzbatterie erfordert. In anderen Szenarien des oberleitungsversorgten LKW besitzen die Batterien dagegen eine größere Kapazität und Lebensdauer, die über Szenariendauer hinausgeht, sodass ihre Auswirkungen entsprechend kleiner sind. Die Leistungselektronik und der Elektromotor spielen dagegen eine nachrangige Rolle. Bei Hybridvariante des oberleitungsversorgten LKW kommen die Umweltauswirkungen des Dieselantriebsstrangs hinzu, die seine Bilanz jedoch nur gering beeinflussen.

Bei dem batteriegetriebenen LKW beeinflusst vor allem die Batterie aufgrund ihrer hohen Kapazität die Ergebnisse der Ökobilanz. Da die verwendeten Zellen die gleiche Zellchemie benutzen (Tabelle 3-4), ist die Lebensdauer der Batterie von zentraler Bedeutung. So besitzt die Batterie mit Zellen HEc im Szenario 3 eine deutlich geringere Lebensdauer als die Batterie mit Zellen HEa im Szenario 2, was die Umweltauswirkungen der Fahrzeugherstellung vervielfacht (Abbildung 6-5). Selbst bei langer Batterielebensdauer im Szenario 2 sind die Umweltauswirkungen der Fahrzeugherstellung des batteriegetriebenen LKW größer als die eines konventionellen LKW im Szenario 1. Die Umweltauswirkungen der Batterie sind vor allem auf die Herstellung der Zellen und dort auf das Aktivmaterial NMC zurückzuführen [128].

Bei den brennstoffzellengetriebenen LKW in Szenarien 13 bis 15 sind die Umweltauswirkungen der Fahrzeugherstellung in der Größenordnung der des batteriegetriebenen LKW im Szenario 2. Hierbei machen sich neben der Karosserie vor allem die Auswirkungen des Brennstoffzellensystems und des Wasserstofftanks bemerkbar.

Entsprechend den Lebensdauerannahmen muss der Brennstoffzellenstack einmal während der Szenarienlaufzeit ausgetauscht werden. Dabei können das in der Brennstoffzelle verwendete Platin und Stromeinsatz bei Herstellung als die wichtigsten Schwachstellen in der Ökobilanz ausgemacht werden [137]. Bei Szenarien 19 bis 21 macht sich der Einfluss der größer dimensionierten Batterie und der Brennstoffzelle auf die Ökobilanz bemerkbar. Bei Szenario 20 muss die Batterie zusätzlich ausgetauscht werden, wodurch die Umweltauswirkungen steigen. Bei dem Wasserstofftank ist die Herstellung der darin verwendeten Kohlenstofffaser, Epoxidharz und Aluminiums maßgeblich für seine Ökobilanz [99].

Insgesamt zeigt sich also, dass bei den untersuchten Fahrzeugen neben der Karosserie vor allem die Batterie, Brennstoffzelle und der Wasserstofftank die meisten Umweltauswirkungen verursachen, wobei diese stark von ihrer Dimensionierung und Lebensdauer abhängen. So können die oberleitungsversorgten LKW in Szenarien mit relativ klein dimensionierten Batterien und langen Batterielebensdauern ungefähr die gleichen Umweltauswirkungen bei der Fahrzeugherstellung bewirken wie die konventionellen Diesel-LKW. Dies gilt tendenziell auch für die Wirkungskategorien Versauerungspotential und Überdüngungspotential, deren Ergebnisse in Abbildung A-5 im Anhang gezeigt sind.

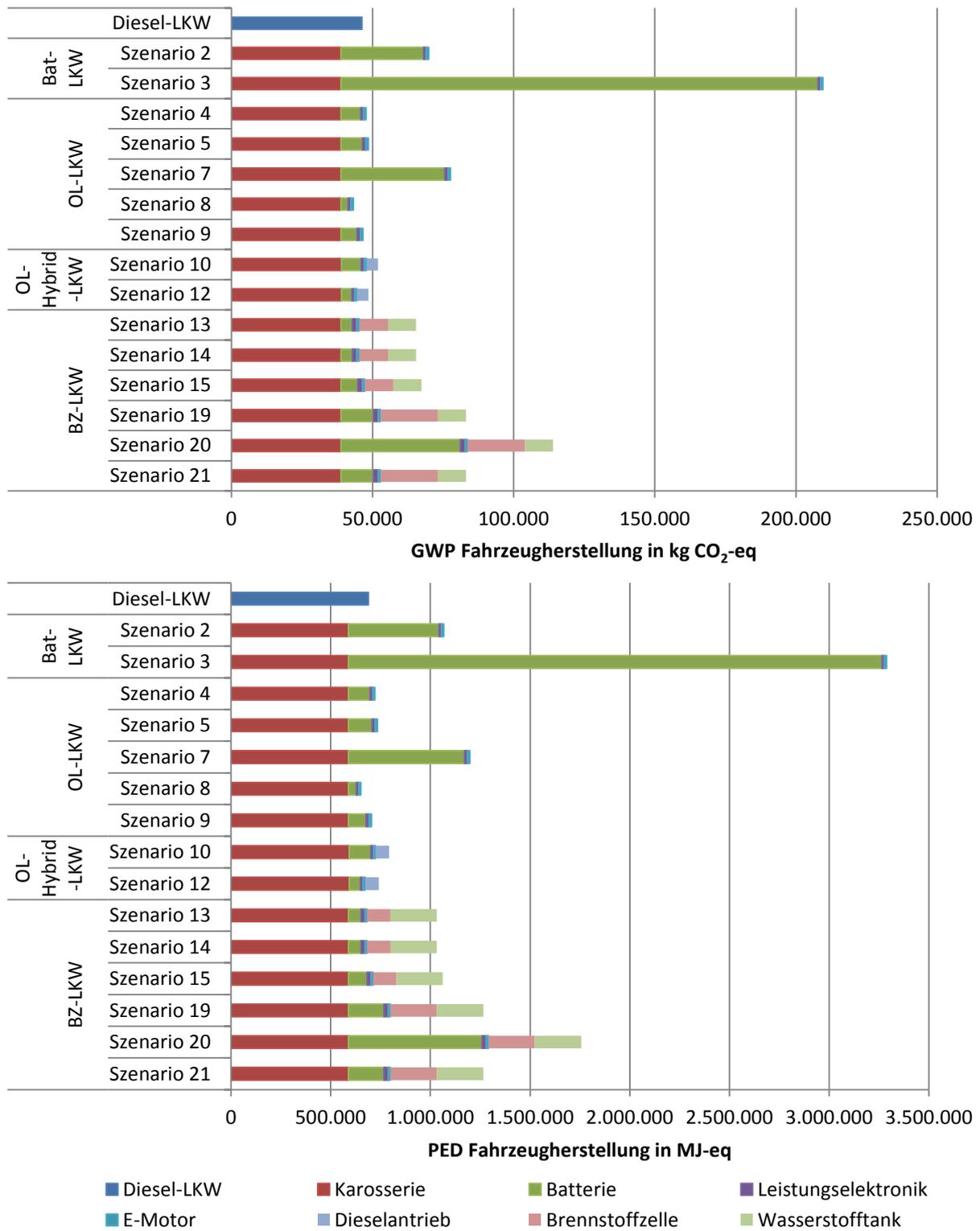


Abbildung 6-5: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf der Fahrzeugherstellung in untersuchten Szenarien

6.3.2 Infrastruktur

Die Abbildung 6-6 zeigt die Umweltauswirkungen der Herstellung der Infrastruktur entsprechend untersuchter Szenarien. Auch hier werden die Umweltauswirkungen anteilig auf die Szenariendauer aufgerechnet, um die längere Lebensdauer der Infrastruktur zu berücksichtigen. Außerdem wurden die Ergebnisse auf die Zahl der teilnehmenden LKW wie auch bei Lebenszykluskosten normiert (Kapitel 5.5.2).

Die Ladeinfrastruktur zeigt in allen untersuchten Wirkungskategorien niedrigere Ergebnisse als die anderen Infrastrukturarten, wobei die Transformatoren und die Leistungselektronik für den Großteil der Umweltauswirkungen verantwortlich sind. Die Netzanschlüsse der Ladestationen an Mittelspannung spielen dagegen eine nachrangige Rolle. Im Gegensatz zu der Oberleitung muss bei Ladeinfrastruktur eine geringere Gesamtleistung installiert werden (Kapitel 4.5.2), was in geringere Umweltauswirkungen der Transformatoren und Leistungselektronik resultiert.

Bei der Oberleitungsinfrastruktur sind dagegen Oberleitungen und Masten maßgeblich für die Umweltauswirkungen verantwortlich. An dieser Stelle ist jedoch zu erwähnen, dass ihre Lebensdauer mangels geeigneter Daten nicht evaluiert werden konnte und zu 25 Jahren angenommen wurde. Bei Vergrößerung ihrer Lebensdauer fallen die Werte der Umweltauswirkungen entsprechend kleiner aus. Jedoch verursachen Transformatoren und Leistungselektronik der Oberleitungsinfrastruktur bereits höhere Umweltauswirkungen als die Ladeinfrastruktur. Bei Ausbaustufe partiell sinkt der Einfluss der Oberleitungen und Masten durch geringere Oberleitungsstrecke. Bei Ausbaustufe mittel müssen weniger ähnlich dimensionierte Unterwerke wie bei Ausbaustufe komplett installiert werden, weil nur die für den LKW-Fernverkehr wichtigsten Strecken elektrifiziert werden (Tabelle 4-5).

Die Herstellung der Wasserstoffinfrastruktur entsprechend Parametrierung im Kapitel 6.2.6.3 weist Umweltauswirkungen im Bereich zwischen den der Lade- und Oberleitungsinfrastruktur auf. Der Großteil ist dabei auf die Herstellung der Wasserstofftanks zurückzuführen, der mangels Daten allerdings nicht in den Kategorien Versauerungspotential und Überdüngungspotential evaluiert werden konnte. Der Anteil der Wasserstoffzapfsäulen an den Umweltauswirkungen ist in den betrachteten Umweltkategorien unter 1 %, sodass ihre Ergebnisse in Abbildung 6-6 nicht dargestellt sind.

Mangels geeigneter Daten wird in dieser Arbeit keine Tankstelleninfrastruktur für Diesel-LKW modelliert. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Umweltauswirkungen dieser Infrastruktur geringer als bei Wasserstoffinfrastruktur sind, weil zum einen die Energiedichte des Wasserstoffs höher als die des Diesels ist und deshalb sowohl kleinere Speichertanks an Tankstellen benötigt werden als auch weniger Belastung durch Kraftstofftransport zur Tankstelle resultiert. Zum anderen wird Diesel ohne Kompression bei Normaldruck gespeichert, sodass auch keine Speichertanks benötigt werden.

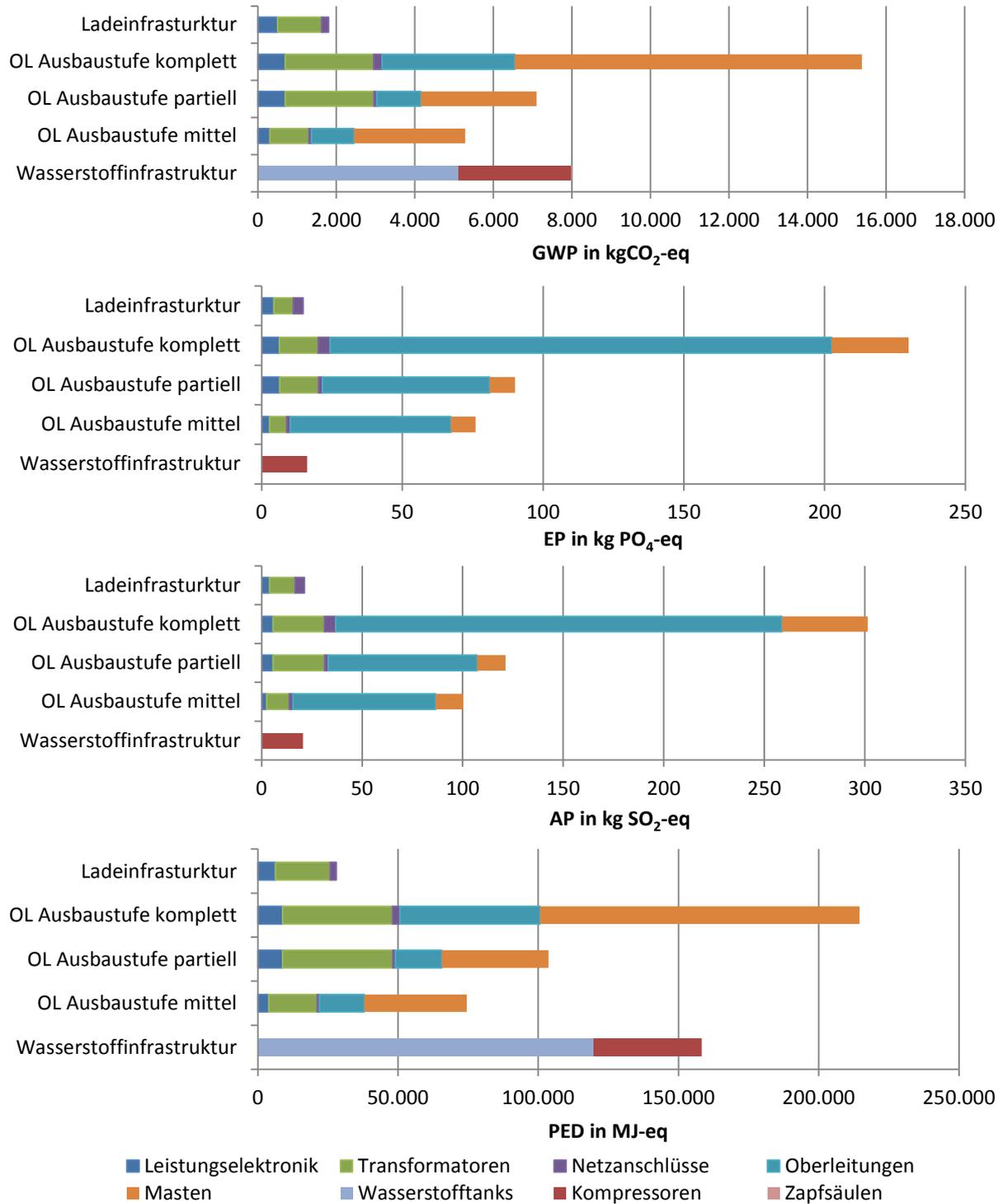


Abbildung 6-6: Ergebnisse der Ökobilanz für Infrastrukturherstellung entsprechend untersuchter Szenarien und normiert auf einen LKW

6.3.3 Betrieb

Bei dem Betrieb der LKW werden die mit dem Verbrauch im jeweiligen Transportszenario verbundenen Emissionen sowie die Fahrzeugwartung berücksichtigt. Bei Betrieb des Diesel-LKW im Szenario 1 werden Kraftstoffbereitstellung und Verbrennung des Diesels im

Fahrzeugmotor berücksichtigt. Die Ergebnisse in den betrachteten Wirkungskategorien sind in Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8 dargestellt. Die meisten Umweltauswirkungen entstehen durch Kraftstoffbereitstellung und Verbrennung des Diesels. Die Fahrzeugwartung trägt dagegen nur sehr gering bei.

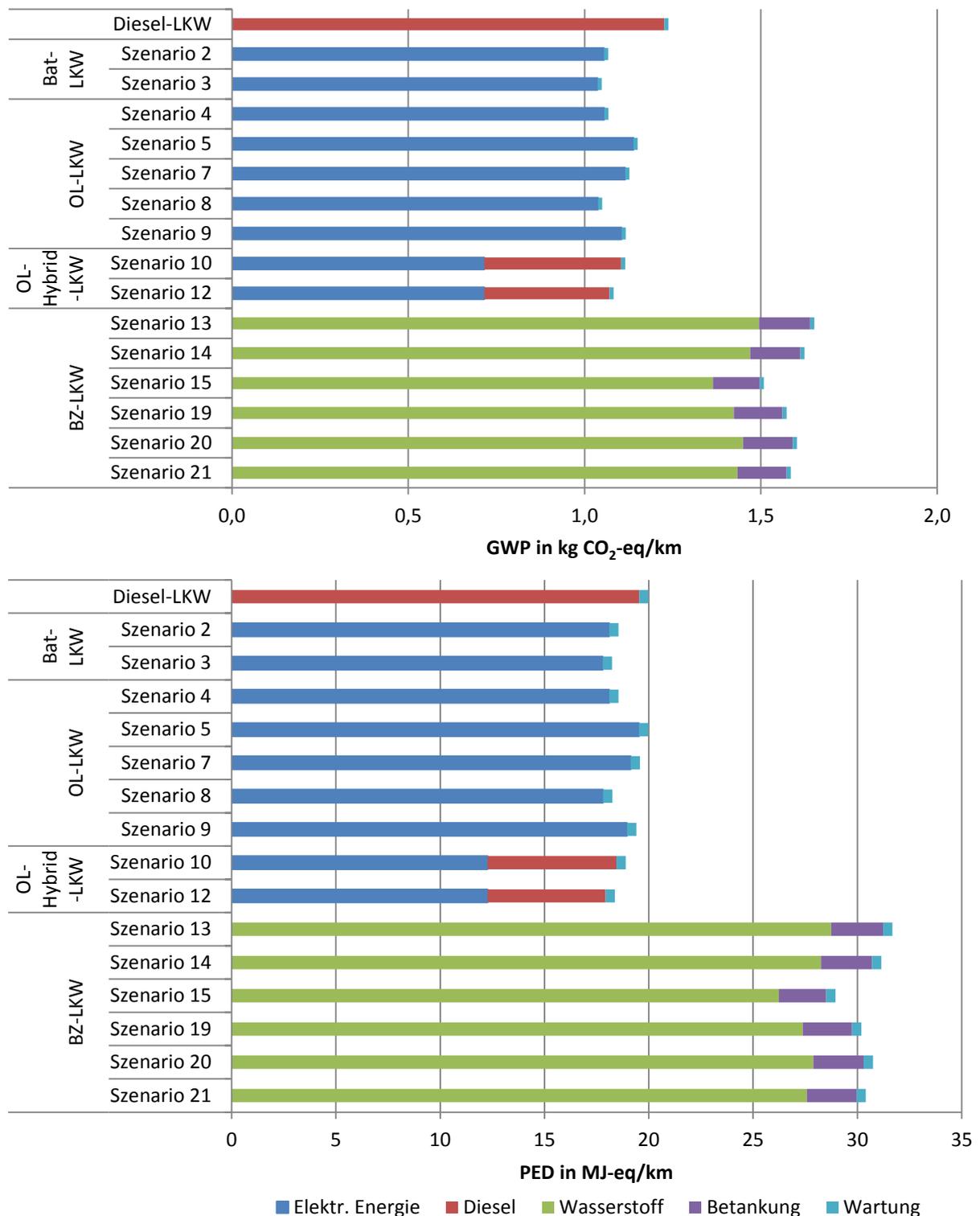


Abbildung 6-7: Treibhauspotential und Primärenergieverbrauch für den Betrieb (Strommix 2017)

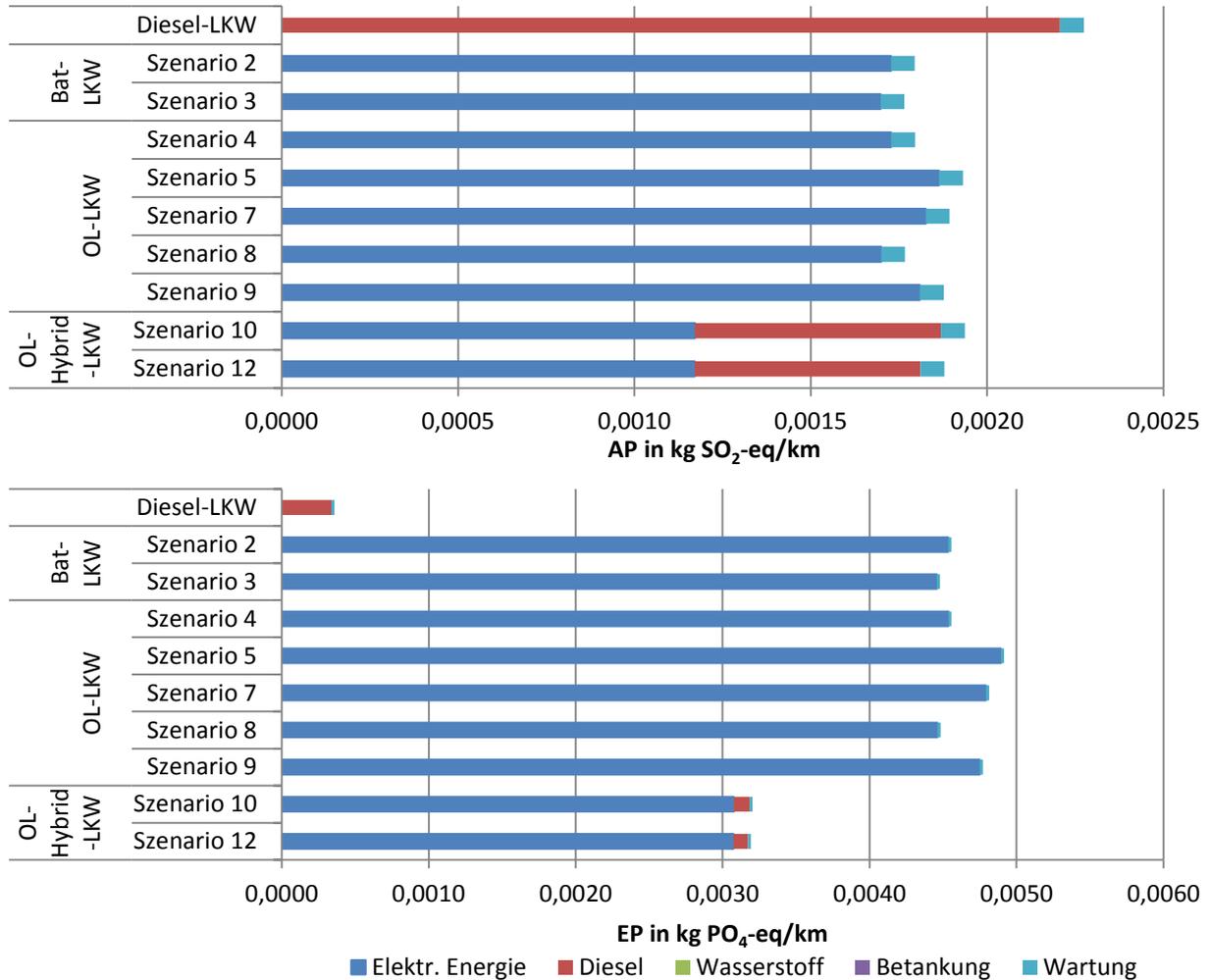


Abbildung 6-8: Versauerungspotential und Überdüngungspotential für den Betrieb (Strommix 2017)

Die Umweltauswirkungen der batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW hängen mit der Stromherstellung (hier mit Strommix 2017, Kapitel 6.2.2.2) und dem Energieverbrauch des Fahrzeugs zusammen. Die Umweltauswirkungen der Fahrzeugwartung wurden hier gleich wie bei konventionellen Fahrzeugen angenommen. In den Umweltkategorien Treibhauspotential, Primärenergiebedarf und Versauerungspotential ergeben die batteriegetriebenen LKW (Szenarien 2 und 3) geringere Umweltauswirkungen als der konventionelle Diesel-LKW, die z.B. beim Treibhauspotential ca. 15 % geringer sind. Bei Überdüngungspotential sind die Emissionen des batteriegetriebenen LKW jedoch um Faktor 12 höher als bei Diesel-LKW, was auf den hinterlegten Strommix 2017 zurückzuführen ist und dort zu etwa 85 % auf die Stromherstellung aus Braunkohle. Anders als bei der hier betrachteten Abgasnorm EURO 6 für den Diesel-LKW, wo ein hoher Aufwand zur Filterung der Stickoxide aus Abgasen mittels Katalysator und Harnstoff betrieben wird, werden bei Braunkohlekraftwerken derzeit keine Katalysatoren zur Filterung der Stickoxide verwendet [148]. Da der Strommix durch Umstellung auf erneuerbare Energien entkarbonisiert wird, werden die Umwelteinflüsse bei Überdüngungspotential ebenfalls sinken. Auf den Effekt der Verwendung des Strommixes 2050 wird in Kapitel 6.3.5 eingegangen.

Die Ergebnisse des Betriebs eines oberleitungsversorgten LKW sehen ähnlich den Ergebnissen eines batteriegetriebenen LKW aus. Die Werte korrelieren mit dem Energieverbrauch, weshalb im Szenario 5 durch ein größeres Gesamtgewicht des Fahrzeugs etwas höhere Werte resultieren. Bei Betrieb des oberleitungsversorgten Hybrid-LKW werden die Umweltauswirkungen durch Einsatz des elektrischen Fahrens in den Kategorien Treibhauspotential, Primärenergiebedarf und Versauerungspotential gesenkt, jedoch liegen die Werte höher als in vergleichbaren Szenarien mit rein elektrischem Oberleitungs-LKW (z.B. Szenario 10 und Szenario 4). In der Kategorie Überdüngungspotential schneidet der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW aufgrund des aktuellen Strommixes dagegen schlechter ab (s. oben).

Beim Betrieb der brennstoffzellengetriebenen LKW wird neben der Wasserstoffbereitstellung und Fahrzeugwartung auch der Energiebedarf der Wasserstoffkompression beim Betankungsvorgang berücksichtigt (Kapitel 6.2.5.2). Durch den hohen Energiebedarf des brennstoffzellengetriebenen LKW und die Erzeugung des Wasserstoffs aus vorwiegend fossilen Ressourcen (s. Produktionsmix in Abbildung 6-4) sind die Umweltauswirkungen in Kategorien Treibhauspotential und Primärenergiebedarf höher als bei anderen untersuchten LKW-Arten. Mangels geeigneter Daten zu Emissionsfaktoren der Wasserstoffherstellung für die Umweltkategorien Versauerungspotential und Eutrophierungspotential wird der Betrieb der brennstoffzellengetriebenen LKW in diesen Kategorien nicht untersucht und ist in Abbildung 6-8 deshalb nicht dargestellt.

6.3.4 Gesamten Umweltauswirkungen

Die gesamten Umweltauswirkungen des jeweiligen Szenarios bestehen aus den oben erläuterten Ergebnissen der Fahrzeugherstellung, der Infrastrukturherstellung und des Betriebs des Fahrzeugs. Die Ergebnisse in den betrachteten Umweltkategorien sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Umweltauswirkungen aus dem Verbrauch die Ökobilanz eines Fernverkehr-LKW maßgeblich beeinflussen. Die Fahrzeugherstellung spielt in den meisten Szenarien wegen der hohen Fahrleistung nur eine untergeordnete Rolle. Auch der Infrastrukturanteil an den Umweltauswirkungen ist in den meisten Szenarien sehr gering, weil die Infrastruktur eine längere Lebensdauer hat und ihre Auswirkungen auf alle teilnehmenden LKW aufgeteilt wurden.

Bei den Szenarien mit batteriegetriebenen LKW zeigt sich eine Reduktion der Umweltauswirkungen in den Kategorien Treibhauspotential und Primärenergiebedarf gegenüber dem Diesel-LKW, wenn die Batterie eine gute Lebensdauer wie im Szenario 2 besitzt. Der Großteil der Umweltauswirkungen entfällt jedoch auch hier auf den Betrieb. Bei Versauerungspotential verschlechtert sich die Bilanz des batteriegetriebenen LKW durch die Herstellung der im Szenario 3 notwendigen Ersatzbatterien deutlich. Bei Überdüngungspotential fällt die Bilanz aller alternativen LKW wesentlich schlechter aus gegenüber der Bilanz des Diesel-LKW aufgrund des Stromproduktionsanteils der Kohlekraftwerke.

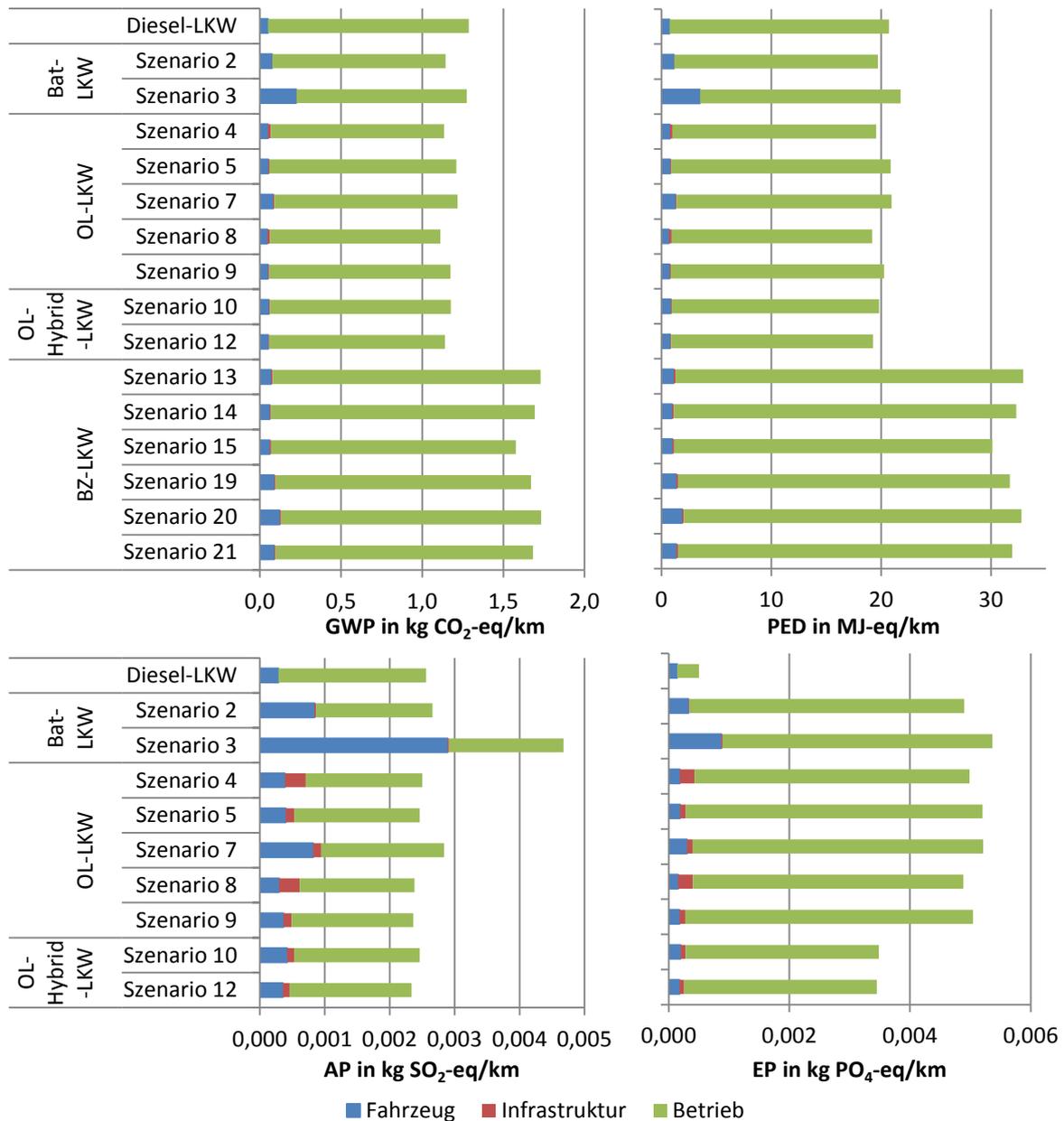


Abbildung 6-9: Gesamten Umweltauswirkungen der untersuchten Szenarien (Strommix 2017)

Der oberleitungsversorgte LKW sowie der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW schneiden in den Umweltkategorien Treibhauspotential, Primärenergiebedarf und Versauerungspotential in den meisten Szenarien besser als der konventionelle LKW ab, was hauptsächlich am geringeren Energieverbrauch liegt. Gegenüber dem batteriegetriebenen LKW ergeben sich Vorteile in der Fahrzeugherstellungsbilanz durch kleiner dimensionierte Batterien. In den Kategorien Treibhauspotential und Primärenergiebedarf erzeugt Szenario 8 die geringsten Umweltauswirkungen, die ca. 15 bzw. 10 % kleiner als die Umweltauswirkungen des Diesel-LKW sind. Dies ist zum einen auf den niedrigeren Energieverbrauch durch die direkte Verwendung der Energie sowie kleineres Fahrzeuggewicht und zum anderen auf relativ

geringe Auswirkungen der Fahrzeugherstellung durch Verwendung langlebiger Hochleistungsbatterie zurückzuführen.

In Szenarien mit brennstoffzellengetriebenen LKW sind die Umweltauswirkungen in Kategorien Treibhauspotential und Primärenergieverbrauch im Schnitt über diese Szenarien ca. 30 bzw. 50 % höher als im Szenario mit Diesel-LKW. Dies liegt in erster Linie an der Herstellung des Wasserstoffs sowie an der Effizienz der brennstoffzellengetriebenen LKW, die geringer als die Effizienz der oberleitungsversorgter und batteriegetriebener LKW ist (Kapitel 4.2).

Insgesamt zeigt die Lebenszyklusanalyse der untersuchten Szenarien, dass durch Verwendung geeigneter Kombinationen aus batteriegetriebenen oder oberleitungsversorgten LKW und entsprechender Infrastruktur die Umweltbilanz eines Fernverkehr-LKW gegenüber dem konventionellen Diesel-LKW verbessert werden kann. So können batteriegetriebene LKW (bei hinreichender Batterielebensdauer wie im Szenario 2) sowie oberleitungsversorgte LKW und Hybrid-LKW auch bei heutigem Strommix eine Verbesserung der Ökobilanz in den Umweltkategorien Treibhauspotential und Primärenergiebedarf erreichen. In der Kategorie Versauerungspotential ist eine Verbesserung mit den oberleitungsversorgten LKW zu erreichen, wobei hier ihre Fahrzeugherstellungsbilanz und Oberleitungsinfrastruktur einen stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse haben. In der Kategorie Überdüngungspotential müssen die Umweltauswirkungen der alternativen LKW durch die Entkarbonisierung des Strommixes bzw. eine effektive Abgasreinigung bei Braunkohlekraftwerken (vgl. Kapitel 6.3.3) deutlich gesenkt werden, da hier vielfach höhere Werte als beim konventionellen LKW resultieren.

6.3.5 Einfluss wichtiger Parameter auf Umweltauswirkungen

Die vorliegenden Ökobilanzergebnisse der Szenarien mit alternativen LKW zeigen insgesamt eine sehr starke Abhängigkeit von Strom- bzw. Wasserstoffherstellung, während die Fahrzeug- und Infrastrukturherstellung in den meisten Szenarien weniger ausschlaggebend ist. Daher soll im Folgenden eine Untersuchung des Einflusses des Strommixes und des Wasserstoffmixes auf die Ergebnisse der Ökobilanz untersucht werden. Dazu wird für die Stromherstellung der im Kapitel 6.2.2.2 implementierte Strommix 2050 mit hohem Anteil erneuerbarer Energien von ca. 80 % verwendet. Für Wasserstoffproduktion wird eine Herstellung mittels Elektrolyse ebenfalls unter Verwendung dieses Strommixes angenommen.

Die Ergebnisse in Abbildung 6-10 zeigen eine deutliche Verbesserung der Ökobilanz durch Verwendung des Strommixes 2050 bei batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW. So reduzieren sich ihre Szenarienergebnisse bei Treibhauspotential im Schnitt auf ca. 40 % des Treibhauspotentials des Diesel-LKW. Beim Primärenergiebedarf sinken ihre Ergebnisse auf durchschnittlich 65 % des Wertes von Diesel-LKW. Auch bei Versauerungspotential vergrößern sich die Vorteile dieser LKW-Technologien. Bei Überdüngungspotential verbessern sich ihre Ergebnisse ebenfalls, jedoch schneiden sie in dieser Kategorie weiterhin schlechter ab als Diesel-LKW. Beim Betrieb dominiert weiterhin die Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken mit ca. 50 % die Ergebnisse in dieser Wirkungskategorie. Somit ist eine

weitere Senkung der Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken oder eine effektivere Entstickung der Rauchgase notwendig.

Die Ergebnisse der oberleitungsversorgten Hybrid-LKW verbessern sich in den betrachteten Wirkungskategorien dagegen weniger als die rein elektrischer LKW, weil bei dieser LKW-Technologie nur ein Teil der Strecke elektrisch gefahren wird.

Die Herstellung des Wasserstoffs aus Elektrolyse unter Verwendung des Strommixes 2050 bringt auch bei Ergebnissen der brennstoffzellengetriebenen LKW eine Verbesserung, sodass sie bei Treibhauspotential besser als Diesel-LKW jedoch schlechter als batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW abschneiden. Auch ihr Primärenergiebedarf reduziert sich ungefähr auf das Niveau der Diesel-LKW, bleibt jedoch hoch aufgrund der Wirkungsgradverluste durch Umwandlung elektrischer Energie mit Elektrolyse in Wasserstoff und rückwärtiger Umwandlung des Wasserstoffs in elektrische Energie im Fahrzeug.

Wie bei Implementierung der Strommixe 2017 und 2050 bereits angemerkt, bezieht sich der Einsatz des Strommixes nur auf unmittelbare Stromversorgung während des Betriebs der Fahrzeuge bzw. zur Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse. Die Vorketten der Stromerzeugung (Rohmaterialienbereitstellung, Kraftwerkbau, Transporte etc.) sowie die Herstellung des Fahrzeugs und der Infrastruktur benutzen ihre eigenen in der Datenbank ecoinvent für diese Datensätze hinterlegten Strommixe. Durch Verwendung eines Strommixes mit hohem Anteil der erneuerbaren Energien auch bei diesen Prozessen kann insgesamt eine weitere Verbesserung der Ökobilanz bewirken.

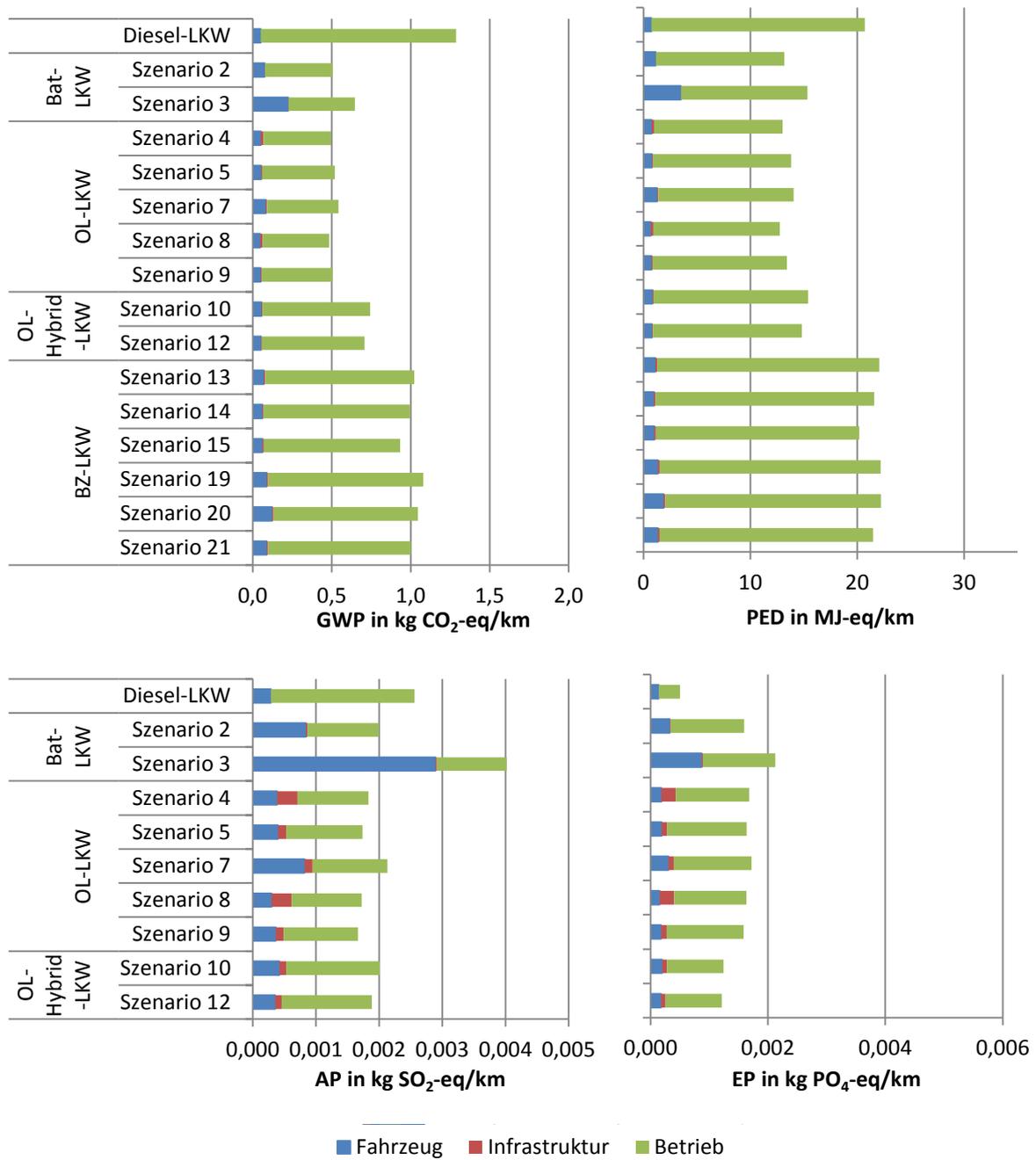


Abbildung 6-10: Gesamten Umweltauswirkungen in den untersuchten Szenarien bei Strommix 2050

7 Transformationskonzepte und zukünftige Entwicklungen

Aktuell wird die Gütertransportleistung im Fernverkehr nahezu ausschließlich durch konventionelle LKW mit Dieselmotor erbracht. Wie durch die Analyse der Lebenszykluskosten und der Umweltauswirkungen gezeigt, können die batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW aber eine wirtschaftlichere und umweltfreundlichere Alternative darstellen. Um einen Umstieg des Güterfernverkehrs von konventionellen LKW auf alternativ angetriebene LKW zu erreichen, muss aber eine Reihe komplementärer Maßnahmen erarbeitet und durchgeführt werden, die im Folgenden beschrieben werden.

Fahrzeugseitig besteht weiterhin Bedarf an Forschungs- und Demonstrationsprojekten, um die Antriebstechnik der alternativen LKW zu optimieren und praktische Erfahrungen zu sammeln. Während zur Erprobung des oberleitungsversorgten LKW bereits Oberleitungsabschnitte auf öffentlichen Autobahnen aufgebaut werden, sind bei batteriegetriebenen Fernverkehr-LKW (außer dem sich in der Entwicklung befindenden Sattelzug des Herstellers Tesla [12]) keine Erprobungsaktivitäten bekannt. Auch das Engagement der Fahrzeughersteller in der Entwicklung alternativ angetriebener schwerer LKW ist anzukurbeln, weil bisherige Modellentwicklungen sich hauptsächlich auf Lieferfahrzeuge und Verteiler-LKW beziehen.

Damit die alternativ angetriebenen LKW sich durchsetzen können, benötigen sie eine ausgebaute Lade- bzw. Oberleitungsinfrastruktur. Weil der Aufbau entsprechender Infrastruktur kostenintensiv ist und diese Kosten bei wenigen Nutzern zu Beginn der Umstellung auf alternativ angetriebene LKW nicht wirtschaftlich auf diese Nutzer aufteilbar sind, sollte die Möglichkeit abgewogen werden, die Infrastruktur staatlich zu fördern. Es ist zu prüfen, ob die Förderung auch für die Fahrzeugkosten der alternativ angetriebenen LKW sinnvoll ist, weil sie hohe Anschaffungskosten aufweisen. Die Förderung kann auch zu Betriebskosten beitragen, zum Beispiel durch Steuernachlässe wie bei Fahrzeugsteuer oder durch Befreiung bzw. Reduktion der Mautgebühren.

Der Infrastrukturaufbau könnte entlang der wichtigsten Autobahnkorridore für den Güterfernverkehr anfangen. So wird vom Sachverständigenrat für Umwelt [48] eine Elektrifizierung der einstelligen Autobahnen vorgeschlagen und in der Studie [18] ein Ausbaukorridor für die ersten Tausend Kilometer von Nord- nach Süddeutschland. Dabei sollte die Infrastruktur in Deutschland keine Insellösung sein, denn Güterfernverkehr ist oft grenzüberschreitend und ein großer Teil der Güterverkehrsleistung im Fernverkehr wird auch über ausländische LKW erbracht. Deshalb ist eine einheitliche EU-weite Lösung mit Auswahl und Elektrifizierung der im europäischen Kontext wichtigsten Güterverkehrskorridore

anzustreben. Ferner sollten Standardisierungen für alternativ angetriebene LKW, Infrastruktur und Schnittstellen erarbeitet werden. Eine einheitliche EU-Strategie ist auch sinnvoll, weil die EU-Kommission das Ziel gesetzt hat, die Treibhausgasemissionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050 um 60 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren [149].

Auch die im Verteilerverkehr eingesetzten mittelschweren LKW sollten bei Erstellung eines Transformationskonzeptes berücksichtigt werden. Aufgrund ihrer Einsatzprofile fahren sie deutlich kürzere Strecken auf der Autobahn als auf Land- und Stadtstraßen. Bei oberleitungsversorgten Verteiler-LKW könnten diese kürzeren Autobahnfahrstrecken nicht ausreichend zum Nachladen der Batterien über Oberleitung sein, sodass hier evtl. batteriegetriebene LKW und Ladestationen in Frage kommen. Ferner sollten Synergien mit Elektrifizierung der Personenkraftwagen geprüft werden, sodass beim Aufbau der elektrischen Infrastruktur für Güterfernverkehr auf Autobahnen auch die Infrastruktur für Personenkraftwagen integriert werden kann. Eventuell ließen sich dadurch Kosten einsparen bzw. könnten die Infrastrukturkosten auf eine größere Nutzerzahl aufgeteilt werden.

Aus den Betrachtungen zu Umweltauswirkungen zeigt sich, dass die Stromherstellung einen hohen Stellenwert für die Emissionen der alternativ angetriebenen LKW hat. Zur Dekarbonisierung und Reduktion der Schadstoffemissionen des Güterfernverkehrs muss der Anteil der erneuerbaren Energien erhöht und insbesondere der Anteil der Energieherstellung aus Kohle gesenkt werden. Diese Veränderung des Strommixes sollte in Einklang mit den Transformationskonzepten zum Umstieg von konventionellen auf alternativ angetriebene LKW gebracht werden.

Zusätzlich zu den oben genannten Aspekten müssen bei Erstellung der Transformationskonzepte auch Einflüsse der zukünftigen Entwicklungen der Fahrzeugtechnik beachtet werden. Zwei für Güterfernverkehr wichtige technologische Tendenzen sind autonomes Fahren und Platooning, deren technische Umsetzung derzeit erforscht wird. Bei Umsetzung einer hohen Automatisierungsstufe soll der Fahrer während des autonomen Fahrens das Führen des Fahrzeugs komplett an das Fahrzeug abgeben können. Dadurch kann sich der Arbeitsablauf des Fahrers stark ändern und andere als die heute geltenden Regelungen zu Lenk- und Ruhezeiten wären denkbar. Würden die Ruhepausen für Fahrer bzw. Standzeiten des LKW auf Rastanlage entfallen, dann entfallen auch die Nachladezeiten für den batteriegetriebenen LKW und die erforderlichen Batteriekapazitäten würden je nach Betriebsstrecke deutlich steigen. Dies spricht für eine direkte Energiezuführung zum Fahrzeug während der Fahrt wie bei oberleitungsversorgtem LKW. Bei Platooning sollen mehrere LKW dicht hintereinander fahren können, wobei nur der vordere LKW aktiv vom Fahrer gesteuert werden muss, während die hinteren LKW automatisch in einem verkürzten Abstand gelenkt werden. Dadurch können die hinteren LKW im Windschatten der vorderen LKW fahren und so ihren Luftwiderstand und damit den Verbrauch um etwa 5 bis 10 % senken [150], [151]. Bei dem batteriegetriebenen LKW würde sich diese Verbrauchsreduzierung auch auf die Fahrzeugkosten positiv auswirken, in dem die Kapazität und Kosten der Batteriespeicher gesenkt werden könnten. Würde sich das autonome Fahren durchsetzen, würden aber auch hier die Standzeiten zum Nachladen entfallen, was für die externe Energiezuführung über Oberleitung spricht. Die Entwicklung dieser Technologien

und die Gesetzgebung zu Lenk- und Ruhezeiten in diesem Zusammenhang müssen bei Erstellung der Transformationskonzepte also im Auge behalten werden.

8 Vergleich mit anderen Studien

In diesem Kapitel wird ein Vergleich der wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bezüglich der Lebenszykluskosten und der Umweltauswirkungen mit zwei ausführlichen Studien zu alternativ angetriebenen LKW durchgeführt. Die Studie Zero Emission Trucks [34] betrachtet u.a. den konventionellen LKW, den batteriegetriebenen LKW und den oberleitungsversorgten LKW für Verteiler- und Fernverkehr bezogen auf die gesamte Europäische Union. Diese LKW-Typen werden auch in der Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-LKW [18] betrachtet, die sich auf den Verkehr in Deutschland bezieht.

Die Studie [34] kommt zu dem Schluss, dass der oberleitungsversorgte LKW im Jahr 2012 ungefähr gleiche Gesamtkosten wie der konventionelle Diesel-LKW aufweist, die je nach Kostenszenario auch etwas höher sein können. Mit den angenommenen Kostenentwicklungen soll der oberleitungsversorgte LKW laut dieser Studie bereits im Jahr 2020 günstiger als der oberleitungsversorgte LKW sein. Auch wenn die absoluten Gesamtkosten aufgrund unterschiedlicher Kostenannahmen, Kostenbestandteile ([34] beinhaltet z.B. auch Fahrerpreise), Fahrleistungen etc. nicht verglichen werden können, deutet diese Studie ebenfalls wie die vorliegende Arbeit auf Kostenparität zwischen dem oberleitungsversorgten LKW und dem Diesel-LKW hin. Ferner kommt die Studie [34] zu dem Schluss, dass der brennstoffzellengetriebene LKW aktuell deutlich teurer ist und nur bei starken Kostendegressionen im Jahr 2030 das Gesamtkostenniveau des konventionellen LKW erreichen kann.

Auch die Studie [18] kommt zu dem Schluss, dass der oberleitungsversorgte LKW wirtschaftlich darstellbar ist, jedoch in der Konfiguration als ein oberleitungsversorgter Hybrid-LKW mit Dieselmotor. Der rein elektrisch betriebene oberleitungsversorgte LKW mit Batterie kann sich laut dieser Studie nicht durchsetzen, was im Wesentlichen an zwei Annahmen liegt. Zum einen ist die Ausbaustufe der Oberleitung auf 4000 km festgelegt und zum anderen beträgt die Reichweite dieses LKW 100 km auf oberleitungsfreier Strecke entsprechend der in dieser Studie durchgeführten Auslegung. Dies führt zu einer geringen Fahrleistung dieses LKW abseits der Autobahn und damit zu einer geringen Jahresfahrleistung unter 50.000 km. Für den brennstoffzellengetriebenen LKW stellt diese Studie ebenfalls wie die vorliegende Arbeit und die Studie [34] höhere Gesamtkosten fest. Für den wirtschaftlichen Betrieb dieses LKW ist laut dieser Studie ein sehr günstiger Strom aus erneuerbaren Energien zur Senkung der Wasserstoffherstellungskosten notwendig.

Anders als in der vorliegenden Studie, in der die batteriegetriebenen LKW auch für Güterfernverkehr eine wirtschaftliche Option darstellen, werden sie in [18] und [34] wegen beschränkter Batteriereichweite für die Verteiler-LKW oder leichtere LKW-Klassen vorgeschlagen.

In der Studie [18] werden auch die Kosten für den Aufbau und Instandhaltung der Oberleitungsinfrastruktur berechnet, die im ausgebauten Zustand in Abhängigkeit der Fahrzeugkonfiguration (Dieselmotor, Batteriegröße) im Bereich von 2 bis 4,1 Mio. €/km Oberleitungsinfrastruktur liegen. Diese Kostenangaben liegen im Bereich der in dieser Arbeit errechneten Kosten (vgl. Kapitel 5.5.2).

In beiden Studien werden Treibhausgasemissionen der jeweiligen LKW-Technologie betrachtet. Wie die vorliegende Arbeit kommen auch diese beiden Studien zum Ergebnis, dass die Reduzierung der Treibhausgase nur bei einem hohen Anteil der erneuerbaren Energien möglich ist. Die Studie [18] betrachtet bei der Ökobilanzierung neben der Nutzungsphase auch die Herstellung und Instandhaltung der Infrastruktur, die bei der Gesamtbilanz verglichen mit der Nutzungsphase jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielt. Ähnlich wie die vorliegende Arbeit stellt diese Studie fest, dass der Großteil der Treibhausgasemissionen bei Herstellung der Infrastruktur auf Masten und Oberleitung zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 6.2.6.2).

Insgesamt lässt sich also festhalten, dass die betrachteten Studien zu tendenziell ähnlichen Ergebnissen für den oberleitungsversorgten und den brennstoffzellengetriebenen LKW wie die vorliegende Arbeit kommen. Die vorliegende Arbeit bewertet jedoch anders als die betrachteten Studien den batteriegetriebenen LKW als eine technisch und wirtschaftlich darstellbare Alternative zum Diesel-LKW.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden batteriegetriebene, oberleitungsversorgte und brennstoffzellengetriebene LKW als alternativ angetriebene Fahrzeuge für den Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland analysiert. Dazu wurden die Fahrzeuge auf typischen Betriebsstrecken beispielhaft simuliert und ausgehend von den gesetzlichen Rahmenbedingungen und Betriebsanforderungen wurden die Antriebsstrangkomponenten der Fahrzeuge sowie die dazugehörige Lade-, Oberleitungs- oder Wasserstoff-tankstelleninfrastruktur für einen flächendeckenden Betrieb dimensioniert. Anschließend wurde eine Berechnung der Lebenszykluskosten für definierte Szenarien mit verschiedenen Auslegungen von Fahrzeug und Infrastruktur durchgeführt. Die Bilanzierung und Beurteilung der Umweltauswirkungen für Fahrzeug- und Infrastrukturherstellung sowie Betrieb in diesen Szenarien rundete die Analyse der alternativen LKW-Technologien ab.

Beim Energieverbrauch der Fahrzeuge (Kapitel 4.1) zeigen sich die Vorteile der alternativ angetriebenen Fahrzeuge gegenüber dem konventionellen Diesel-LKW. Die durchschnittlichen Verbräuche auf den Autobahnen A1 bis A9 zeigen, dass die batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW im Mittel um Faktor 2,5 geringere Energieverbräuche von der Energiequelle im Fahrzeug bis zu den Rädern als Diesel-LKW erzielen. Die brennstoffzellengetriebenen LKW haben einen im Durchschnitt um Faktor 1,3 geringeren Energieverbrauch als Diesel-LKW. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge ist auf die Effizienz ihres jeweiligen Antriebs zurückzuführen. Wie im Kapitel 4.2 gezeigt, verursachen die batteriegetriebenen und die oberleitungsversorgten LKW geringere Verluste im Antriebsstrang von der Energiequelle bis zu den Rädern und haben somit den höchsten Wirkungsgrad von ungefähr 80 % unter den betrachteten LKW-Technologien.

Die Auslegung der Antriebsstrangkomponenten (Kapitel 4.3) zeigt, dass unter Annahme einer Fahrdauer von 4,5 Stunden ohne Nachladung der batteriegetriebene LKW eine Batterie mit hoher Kapazität von 825 kWh benötigt. Die Batteriekapazität kann merklich reduziert werden, wenn Roll- und Luftwiderstand des Fahrzeugs verbessert werden. Für die Integration dieser Batterie in den Sattelzug spielen ihre gravimetrische und volumetrische Energiedichte eine wichtige Rolle. Bei heute üblichen Energiedichten kann eine Integration gelingen, wobei Einschränkungen der Nutzlast beim Vergleich mit der heutigen durchschnittlichen Auslastung der Fahrzeuge akzeptabel bleiben können.

Beim oberleitungsversorgten LKW und beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW werden dagegen deutlich kleinere Batterien zum Überbrücken der oberleitungsfreien Strecken benötigt. Es ist jedoch sicherzustellen, dass die Batterien den erforderlichen Ladestrom aufnehmen können, sodass sich hier eher Hochleistungszellen eignen. Beim

brennstoffzellengetriebenen LKW kann die Brennstoffzelle auf die durchschnittliche Leistung der Fahrstrecke dimensioniert werden, da dieser Antrieb über eine Batterie zur Leistungsaddition verfügt. Bei Dimensionierung des Wasserstofftanks auf eine ähnliche Energiekapazität wie bei Diesel-LKW kann sein Volumen jedoch eine Herausforderung bei Integration ins Fahrzeug darstellen.

Die Ladeinfrastruktur (Kapitel 4.5.1) für den batteriegetriebenen LKW benötigt Schnellladestationen mit hohen Ladeleistungen bis zu 910 kW, um in der kurzen Fahrerpause von 45 min die Batterie nachzuladen. Aus Batteriesicht werden hier aber nur Laderaten im Bereich von 1,2 bis 1,5 C erreicht. Damit entspricht dies zwar einer Ladung mit hoher Leistung, aber keiner Schnellladung aus Sicht der Batterie. Bei einem guten Temperaturmanagement der Batterie lassen sich diese Laderaten mit den heutigen Hochenergiebatterien gut erreichen. Die Tesla-Fahrzeuge zum Beispiel weisen eine vergleichbare Laderate an den SuperCharger-Stationen auf. Jedoch ist ein Anteil von rund 18 % Schnellladestationen an der Gesamtzahl aller Ladestationen ausreichend. Die anderen Ladestationen können als langsamere Ladestationen mit 50-100 kW für die Nachtpause ausgelegt werden. Für die Oberleitungsinfrastruktur (Kapitel 4.5.2) wurden unterschiedliche Ausbaustufen untersucht. Die Leistungen der Unterwerke bei partiell aufgebauter Oberleitung sind hierbei etwa dreimal höher als die eines Unterwerks bei Ausbaustufe komplett mit durchgehenden Oberleitungen.

Anschließend wurden die unterschiedlich ausgelegten LKW in einem definierten Betriebsszenario bei gleicher Nutzlast für alle LKW-Technologien untersucht. Die Simulationsergebnisse des batteriegetriebenen LKW zeigen, dass trotz einer sehr hohen Ladeleistung während der kurzen Ruhepause die Strombelastung der Batteriezellen aufgrund der hohen Batteriekapazität relativ niedrig ist. Mit zwei Zyklen pro Tag ist auch die zyklische Belastung der Batterie gering. Der oberleitungsversorgte LKW mit durchgehenden Oberleitungen erzielt jedoch einen etwas geringeren Verbrauch wegen eines kleineren Fahrzeuggewichts sowie direkter Energienutzung. Der oberleitungsversorgte LKW mit partieller Oberleitung hat dagegen einen Energieverbrauch im Bereich des batteriegetriebenen LKW zum einen wegen des gesteigerten Fahrzeuggewichts und zum anderen wegen der Zwischenspeicherung der Energie in der Batterie für oberleitungsfreie Strecken. Die Beanspruchung der Batterie ist beim oberleitungsversorgten LKW mit partieller Oberleitung höher, sodass hier die Hochleistungszellen besser geeignet sind. Der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW zeigt einen höheren äquivalenten Energieverbrauch, weil der Einsatz des Dieselmotors den Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs verschlechtert. Bei brennstoffzellengetriebenen LKW liegt der äquivalente Energieverbrauch zwischen den Diesel-LKW und den batteriegetriebenen bzw. oberleitungsversorgten LKW, was auf den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle zurückzuführen ist.

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten wurden für jede LKW-Technologie Kostenparameter angenommen (Kapitel 5.3). Die Ergebnisse der Fahrzeugkosten zeigen, dass die alternativ angetriebenen LKW in der Anschaffung deutlich teurer als die konventionellen LKW sind. Dabei zeigt der oberleitungsversorgte LKW die geringsten Fahrzeugkosten, die um etwa 40 % höher als die Fahrzeugkosten des Diesel-LKW sind. Die Fahrzeugkosten des

batteriegetriebenen LKW sind sehr stark von den Batteriepreisen und der Batterielebensdauer abhängig. In den betrachteten Szenarien sind sie mindestens zweimal so hoch wie die Fahrzeugkosten des Diesel-LKW. Bei brennstoffzellengetriebenen LKW sind die Brennstoffzelle und Wasserstofftanks die größten Kostentreiber, sodass ihre Fahrzeugkosten in den günstigeren Szenarien etwa dem Dreifachen des Diesel-LKW entsprechen.

Kostenparameter können immer hinterfragt werden und insbesondere die Projektion in die Zukunft ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Gerade die Economy-of-Scale-Effekte sind schwer abzuschätzen, denn sie hängen in besonderer Weise mit den Technologieentscheidungen zusammen. Die grundlegende in dieser Arbeit entwickelte Methodik ändert sich aber nicht, so dass problemlos verschiedene Kostenparameter und auch Annahmen zum Strommix in Bezug auf die Auswirkungen auf die Gesamtkosten analysiert werden können. Es wird aber auch darauf hingewiesen, dass die in dieser Arbeit verwendeten Zahlenwerte in der Regel eine konservative Abschätzung in Bezug auf die neuen Technologien darstellen. Andere Autoren verwenden hier teilweise geringere Kostenzahlen oder stärker Kostendegressionsannahmen.

Die Infrastrukturkosten wurden für Ladeinfrastruktur und Oberleitungsinfrastruktur evaluiert. Die Ladeinfrastruktur zeigt geringere Kosten aufgrund der insgesamt geringeren installierten Leistung. Bei durchgehender Oberleitung und Elektrifizierung des kompletten Autobahnnetzes entfällt über die Hälfte der Oberleitungsinfrastrukturkosten auf die Oberleitungsdrähte und Masten. Durch partiellen Aufbau der Oberleitungen können die Infrastrukturkosten gesenkt werden, weil bei dieser Variante nur relativ kurze Oberleitungsabschnitte aufgebaut werden müssen. Die Gesamtkosten der partiellen Oberleitungsinfrastruktur betragen jedoch trotzdem das 1,5-fache der Gesamtkosten der Ladeinfrastruktur.

Die Betriebskosten der Fahrzeuge sind auf ihren Verbrauch und die Kraftstoff- bzw. Strompreise zurückzuführen. Hier zeigen die batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten LKW ungefähr die gleichen Kosten, die ca. 30 % kleiner sind als die des Diesel-LKW. Der brennstoffzellengetriebene LKW zeigt etwa 40 % höhere Betriebskosten als der Diesel-LKW. Bei weiteren variablen Kosten und bei fixen Kosten schneiden die untersuchten LKW-Technologien ungefähr gleich ab.

Bei den gesamten Lebenszykluskosten zeigt sich, dass der oberleitungsversorgte LKW ungefähr die gleichen spezifischen Kosten von ca. 0,7 €/km erzielen kann wie der Diesel-LKW oder je nach betrachtetem Szenario leicht niedrigere Kosten erreicht. Dabei ergeben sich für die oberleitungsversorgten LKW in Szenarien mit durchgehenden und partiellen Oberleitungen ungefähr die gleichen Lebenszykluskosten. Die Infrastrukturkosten bei partiellen Oberleitungen sind zwar geringer, es entstehen jedoch höhere Kosten auf Fahrzeugseite durch größere Batterien und etwas höheren Verbrauch. Auch die Kosten des oberleitungsversorgten Hybrid-LKW liegen ungefähr im selben Bereich. Der batteriegetriebene LKW zeigt geringfügig höhere spezifische Lebenszykluskosten von ca. 0,75 €/km im günstigeren Szenario, die jedoch besonders abhängig von Kosten und Lebensdauer der Batterie sind und deswegen stärker steigen können. Die gesamten Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen LKW sind vor allem durch höhere

Betriebs- und Fahrzeugkosten charakterisiert und in den untersuchten Szenarien um mind. 70 % höher als die des konventionellen LKW.

Unter den getroffenen Annahmen zu Kostenentwicklungen bis zum Jahr 2030 (Kapitel 5.5.7) sinken die Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen und des batteriegetriebenen LKW in der Zukunft. Die Lebenszykluskosten des oberleitungsversorgten LKW bleiben ungefähr konstant. Die Lebenszykluskosten des Diesel-LKW wachsen dagegen aufgrund steigender Kraftstoffpreise. Auch der oberleitungsversorgte Hybrid-LKW ist von dieser Entwicklung betroffen, sodass seine Lebenszykluskosten insgesamt steigen. Die Lebenszykluskosten des batteriegetriebenen und des oberleitungsversorgten LKW gleichen sich bei ca. 0,73 €/km an und sind ca. 20 % niedriger als beim Diesel-LKW im Jahr 2030.

Die dritte Säule zur Bewertung der Elektrifizierungskonzepte für Güterfernverkehr bildete die Ökobilanzierung der untersuchten Szenarien. Hierzu wurden die Herstellung der Fahrzeuge und Infrastruktur sowie ihr Betrieb einschließlich der Strom- bzw. Kraftstoffbereitstellung bilanziert und ihre Umweltauswirkungen in den definierten Szenarien untersucht. Hierbei zeigte sich, dass in nahezu allen Szenarien und betrachteten Umweltkategorien die Emissionen aus dem Betrieb maßgeblich sind. Bei Treibhausgaspotential, Versauerungspotential und Primärenergiebedarf können die batteriegetriebenen und oberleitungsversorgten Hybrid-LKW bereits mit heutigem deutschen Strommix die Emissionen im Vergleich zum Diesel-LKW geringfügig senken. Die Emissionen beim Überdüngungspotential sind allerdings aufgrund des hohen Anteils der Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken vielfach höher als bei Diesel-LKW, sodass insbesondere hier noch Handlungsbedarf besteht. Die positive Wirkung der alternativ angetriebenen LKW auf die Ökobilanz entfaltet sich insbesondere bei weitgehender Dekarbonisierung der Stromproduktion. So können die oberleitungsversorgten und batteriegetriebenen LKW bei Benutzung eines Strommixes mit 80 % Energie aus erneuerbaren Quellen ca. 60 % des Treibhauspotentials eines Diesel-LKW einsparen. Auch bei Überdüngungspotential ist in diesem Fall eine deutliche Verbesserung gegenüber dem heutigen Strommix erreichbar.

Insgesamt zeigt die durchgeführte Analyse, dass die untersuchten LKW durchaus eine Alternative zum Diesel-LKW in Bezug auf Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen darstellen können. In den betrachteten Szenarien stellten sich der oberleitungsversorgte LKW und der batteriegetriebene LKW als wettbewerbsfähig heraus, da ihre Lebenszykluskosten ungefähr gleich den Lebenszykluskosten des Diesel-LKW sind. Dabei ist der rein elektrische oberleitungsversorgte LKW dem oberleitungsversorgten Hybrid-LKW aufgrund der tendenziellen Kostenentwicklungen vorzuziehen. Bei batteriegetriebenen LKW können niedrige Lebenszykluskosten vor allem durch Einsatz langlebiger Batterien bei gemäßigten Batteriepreisen erreicht werden. Im Hinblick auf die Ökobilanz hat sich gezeigt, dass hier ebenfalls die oberleitungsversorgten und batteriegetriebenen LKW die besten Optionen darstellen. Insbesondere durch den Einsatz eines Strommixes mit hohem Anteil erneuerbarer Energien können die Treibhausgasemissionen, Versauerungspotential und Primärenergiebedarf deutlich reduziert werden. Ferner muss der Anteil der Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke signifikant sinken oder eine effizientere Abgasreinigungstechnik

eingesetzt werden, damit diese LKW-Technologien auch bei Überdüngungspotential keine Mehremissionen als der Diesel-LKW verursachen.

Bei den zukünftigen Entwicklungen muss insbesondere das autonome Fahren und die damit zusammenhängenden Lenk- und Ruhezeitenregelungen für Fahrer im Auge behalten werden. Durch eine hohe Stufe der Fahrautomatisierung kann die Ruhepause für den Fahrer überflüssig werden und somit die Ladezeit für die Batterie wegfallen, was deutlich größere Batterien für batteriegetriebenen LKW bedeuten würde. Auf der anderen Seite ermöglichen autonome Fahrkonzepte wesentlich mehr Flexibilität. Auch wenn Lenkzeitbeschränkungen beim Verzicht von Fahren wegfallen, ergeben sich aus Sicht der Logistik weiter in vielen Fällen Zeitkorridore, die die reine Fahrzeit übertreffen. So können an den meisten Stellen Ladungen erst morgens früh abgeladen werden und das Eintreffen des LKW bereits in der Nacht hätte nur wenige Vorteile. Bei Erstellung der Transformationskonzepte zum Umstieg auf elektrifizierte LKW sollten auch mögliche Synergien mit den anderen LKW-Klassen und Personenkraftwagen beachtet werden. So könnten z.B. die Nachtladestationen der batteriegetriebenen LKW tagsüber auch für Personenkraftwagen genutzt werden. Ferner sollten auch die energiewirtschaftlichen Auswirkungen dieses Umstiegs und der damit verbundenen Erhöhung der Energie- und Leistungsnachfrage analysiert werden. Zur Entlastung der Energieübertragungsnetze sind die Installation stationärer Speicher in Unterwerken sowie optimierte räumliche Verteilung der Oberleitungsabschnitte zu untersuchen. Diese Aspekte sowie der wachsende Straßengüterverkehr und Erarbeitung einer geeigneten Finanzierung müssen bei Entwicklung der Transformationskonzepte zum Umstieg auf alternativ angetriebene LKW beachtet werden.

A Anhang

In den Abbildungen A-1 bis A-4 ist die Zusammensetzung des Antriebsstranggewichts für alle in dieser Arbeit untersuchten alternativen LKW-Varianten dargestellt. Die Erläuterungen zu den angenommenen Gewichten für die jeweiligen Komponenten des Antriebsstrangs befinden sich im Kapitel 4.4.1.

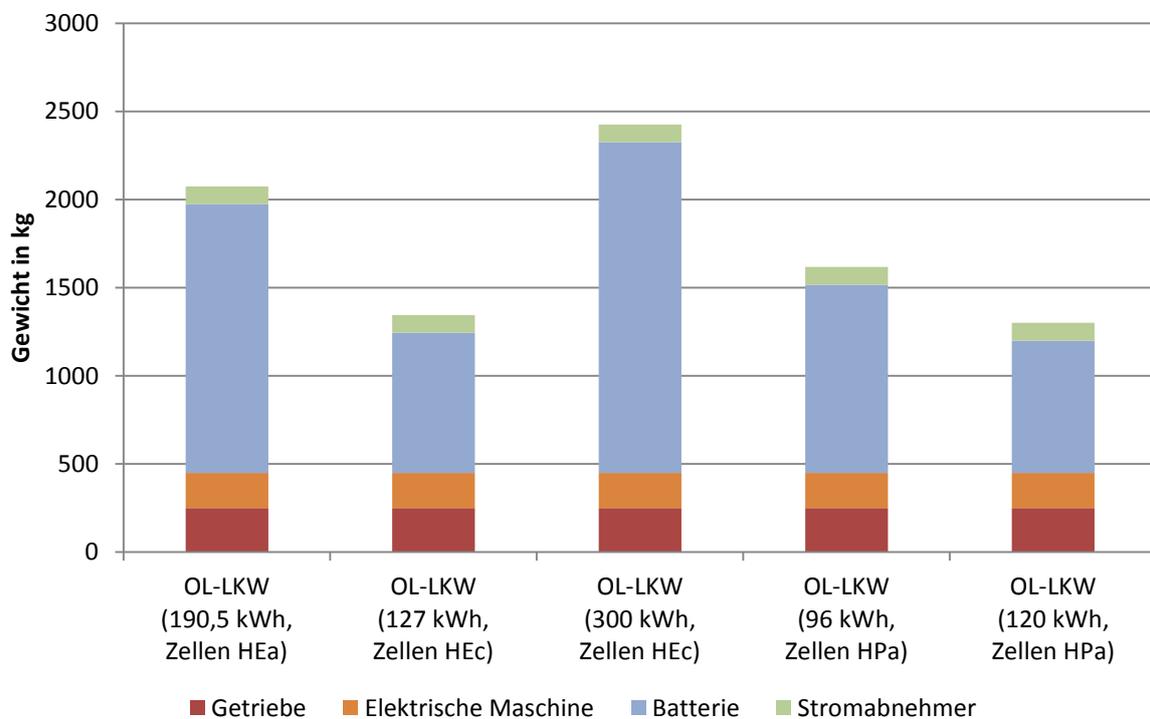


Abbildung A-1: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter oberleitungsversorgter LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten

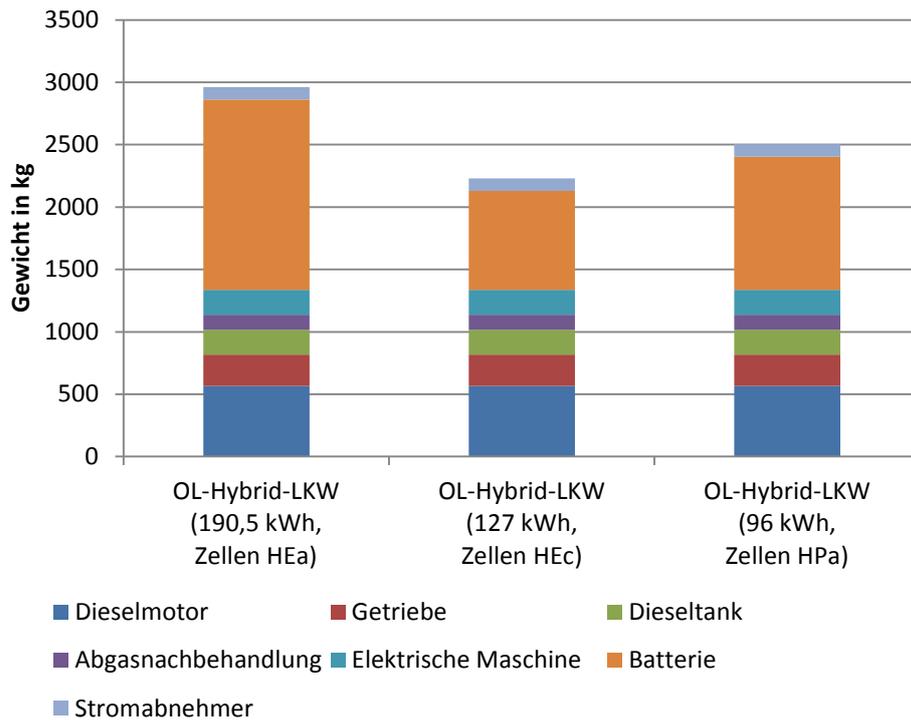


Abbildung A-2: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter oberleitungsversorgter Hybrid-LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten

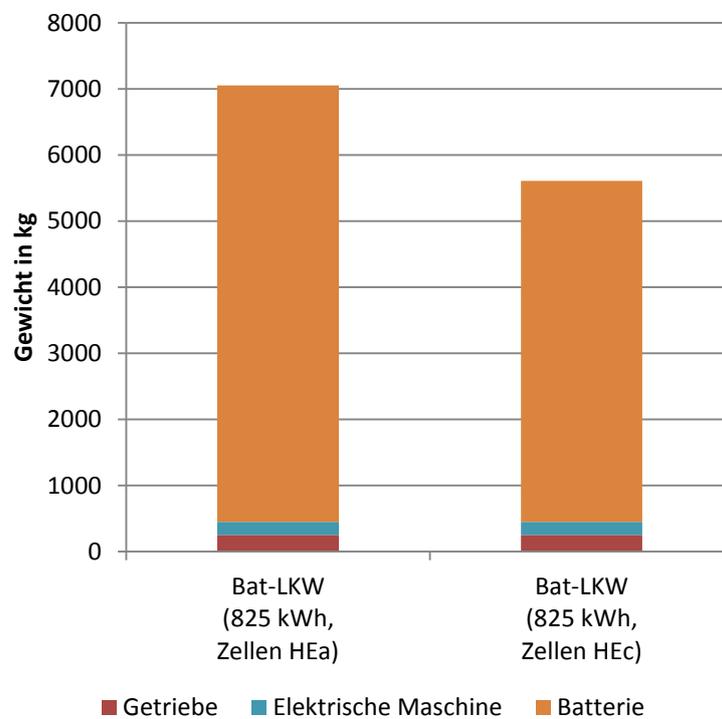


Abbildung A-3: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter batteriegetriebener LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten

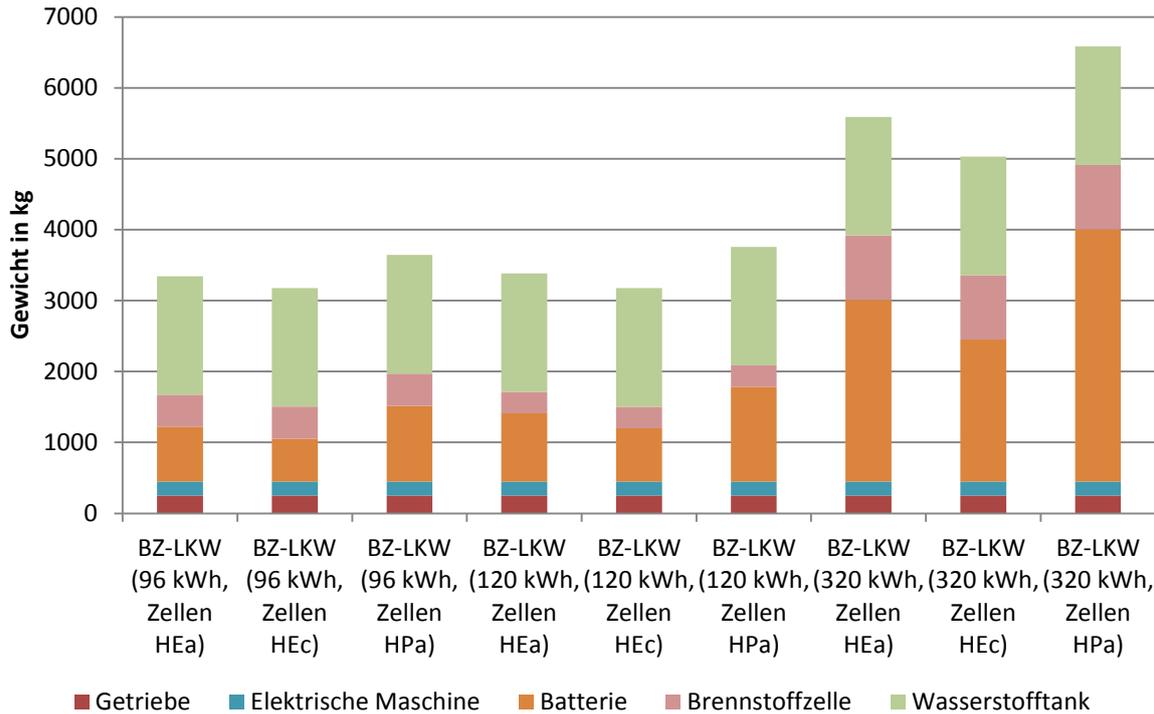


Abbildung A-4: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter brennstoffzellengetriebener LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten

Die nachfolgenden Tabellen A-1 bis A-4 geben die Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels des jeweiligen Herstellungsprozesses in den betrachteten Wirkungskategorien an. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte, die aus den Daten in den jeweils angegebenen Literaturquellen gebildet wurden. Weil die Daten zu AP und EP nicht alle Herstellungsverfahren abdecken, werden diese Wirkungskategorien für die brennstoffzellengetriebenen LKW nicht ausgewertet. Die angegebenen Daten für die Wirkungskategorien GWP und PED wurden im Kapitel 6.2.5.2 entsprechend dem aktuellen Wasserstoffmix gewichtet und zu Faktoren für Wasserstoffbereitstellung zusammengefasst.

	Dampfreformierung	Quellen
GWP	11,04 kg CO ₂ -eq/kg _{H2}	[138]–[140], [152], [153]
AP	0,01565 kg SO ₂ -eq/kg _{H2}	[139], [140]
EP	0,00144 kg PO ₄ -eq/kg _{H2}	[140]
PED	191,73 MJ-eq/kg _{H2}	[138], [152], [153]

Tabelle A-1: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Dampfreformierung in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.

	Partielle Oxidation	Quellen
GWP	12 kg CO ₂ -eq/kg _{H2}	[152]
AP	-	
EP	-	
PED	203,96 MJ-eq/kg _{H2}	[152]

Tabelle A-2: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels partieller Oxidation in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.

	Kohlevergasung	Quellen
GWP	23,2 kg CO ₂ -eq/kg _{H2}	[138], [139], [152]
AP	-	
EP	-	
PED	269,95 MJ-eq/kg _{H2}	[138], [152]

Tabelle A-3: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Kohlevergasung in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.

Elektrolyse	
GWP	13,66 kg CO ₂ -eq/kg _{H2}
AP	0,07064 kg SO ₂ -eq/kg _{H2}
EP	0,0381 kg PO ₄ -eq/kg _{H2}
PED	261,94 MJ-eq/kg _{H2}

Tabelle A-4: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte wurden entsprechend dem angenommenen Elektrolysemix (Kapitel 6.2.5.2) und basierend auf den Elektrolysedatensätzen der ecoinvent-Datenbank [69] berechnet.

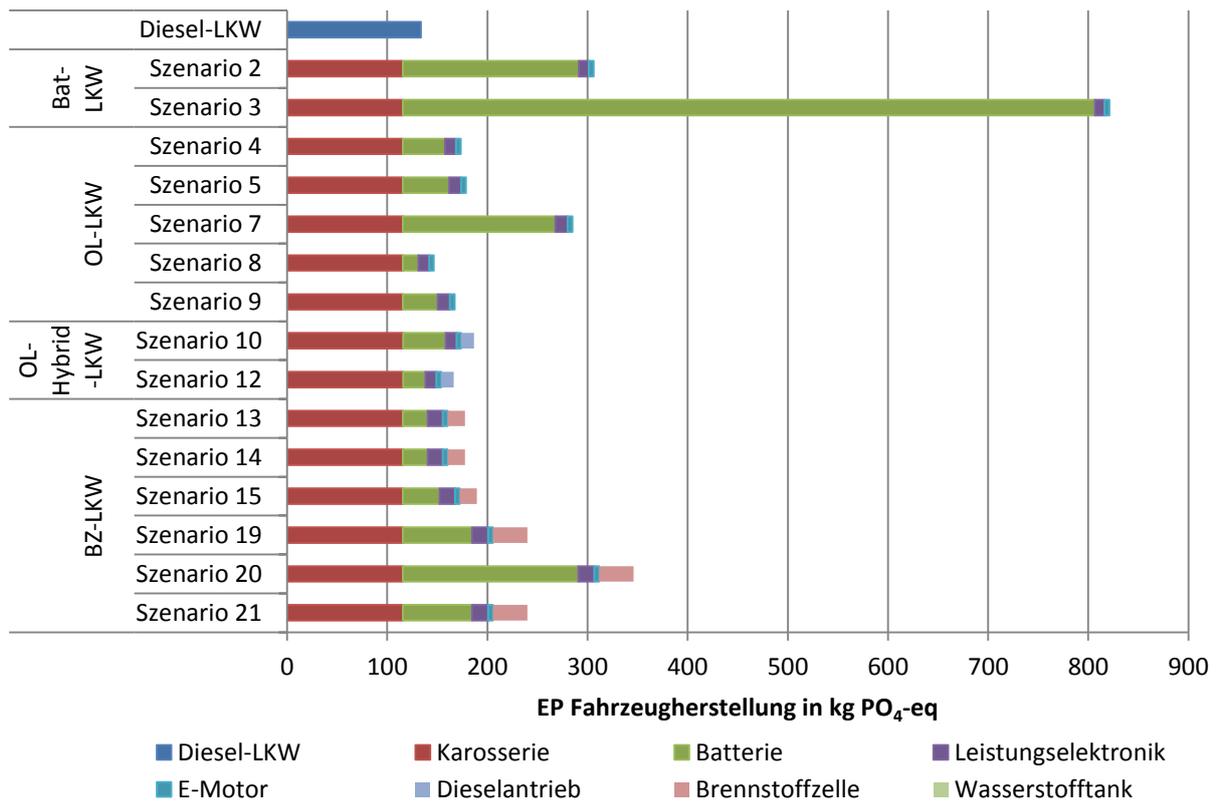
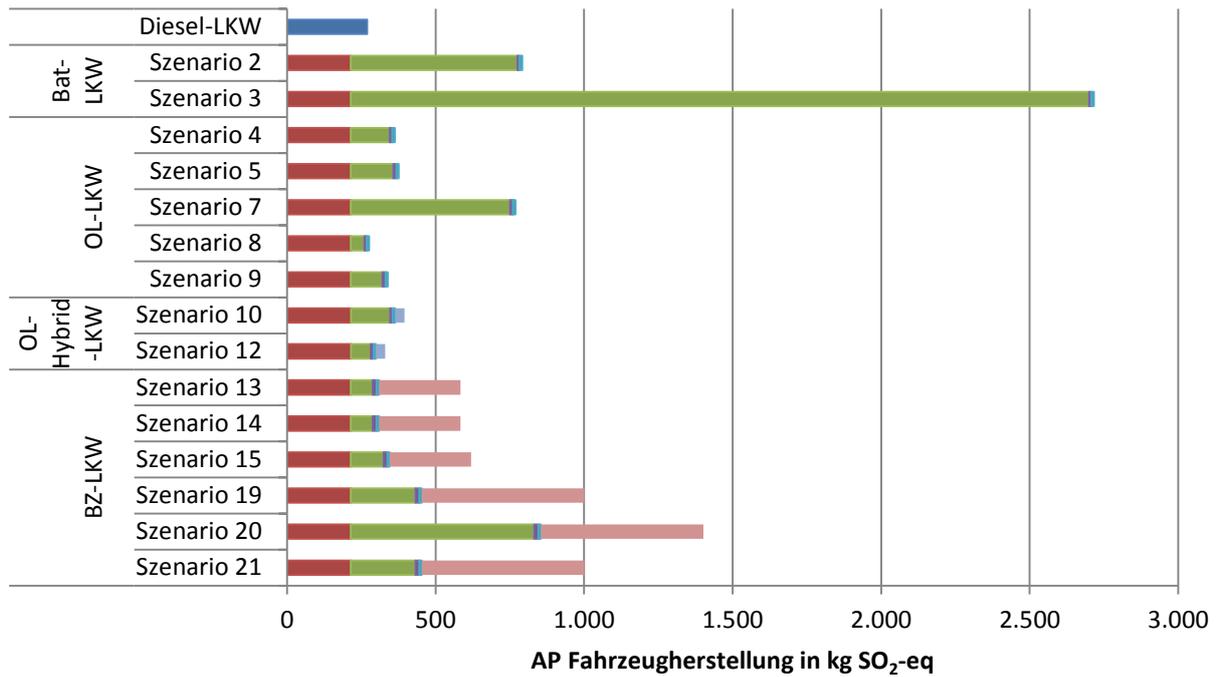


Abbildung A-5: Versauerungspotential und Überdüngungspotential der Fahrzeugherstellung in untersuchten Szenarien

Die Abbildung A-5 zeigt das Versauerungspotential und das Überdüngungspotential, die aus Herstellung eines Fahrzeugs im jeweiligen Szenario resultieren. Die Ergebnisse dieser sowie weiterer betrachteter Wirkungskategorien werden im Kapitel 6.3.1 diskutiert und fließen

danach in die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen entsprechend eines Lebenszyklus ein (Kapitel 6.3.4).

Symbolverzeichnis

a_{soll}	Vorgegebene Beschleunigung
c_{Roll}	Rollwiderstandsbeiwert
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
e	Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch
g	Erdbeschleunigung
i	Jährlicher Zinssatz
i_{Getr}	Getriebeübersetzung
j	Jährliche Inflationsrate
m_{ges}	Fahrzeuggesamtmasse
m_{Rad}	Masse der Fahrzeugräder
n_{langsam}	Anzahl der Langsamladestationen
n_{LKW}	Verkehrsstärke der LKW
$n_{\text{LKW, UW}}$	Anzahl der LKW auf der Einspeisestrecke eines Unterwerks
n_{schnell}	Anzahl der Schnellladestationen
n_{opt}	Drehzahl im verbrauchsoptimalen Arbeitspunkt
n_{UW}	Anzahl der Unterwerke
r_{Rad}	Dynamischer Radius eines Fahrzeugrads
s_{Bat}	Batteriereichweite
s_{OL}	Streckenlänge unter Oberleitung zum Nachladen der Batterie
t	Jahreszahl
t_{lad}	Ladezeit

v_{\emptyset}	Durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{ist}	Aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit
A	Projizierte Stirnfläche des Fahrzeugs
BW	Barwert
C_{Bat}	Batteriekapazität
C_t	Kosten einer Komponente im Jahr t
E_{Fzg}	Energieverbrauch des Fahrzeugs ab dem Ladestationsausgang
E_{MS}	Energieverbrauch des Fahrzeugs ab dem Mittelspannungsanschluss
F_B	Beschleunigungswiderstandskraft
F_{Luft}	Luftwiderstandskraft
F_{Roll}	Rollwiderstandskraft
F_{Steig}	Steigungswiderstandskraft
J_M	Trägheitsmoment der elektrischen Maschine
L_0	Lebensdauer zu Beginn eines Szenarios
$L_{\text{rest}, T}$	Verbleibende Lebensdauer nach Szenariendauer T
M_{opt}	Drehmoment im verbrauchsoptimalen Arbeitspunkt
P_{\emptyset}	Durchschnittlich auf einer Strecke benötigte Leistung
$P_{\text{Anschluss}}$	Gesamtanschlussleistung aller Ladestationen einer durchschnittlichen Rastanlage
$P_{\text{Anschluss, UW}}$	Anschlussleistung eines Unterwerks
$P_{\text{Bat, ist}}$	Aktuelle Ausgangsleistung der Batterie
$P_{\text{Bat, soll}}$	Batterieanfrageleistung
$P_{\text{BZ, soll}}$	Anfrageleistung an die Brennstoffzelle
$P_{\text{Diesel, soll}}$	Anfrageleistung an den Dieselmotor
$P_{\text{FW, ist}}$	Verfügbare Leistung zum Überwinden der Fahrwiderstände
$P_{\text{FW, soll}}$	Soll-Leistung zum Überwinden der Fahrwiderstände

P_{NV}	Nebenverbraucherleistung
$P_{OL, \max}$	Maximal verfügbare Oberleitungsleistung am Fahrzeugpantographen
P_{Pan}	Eingangsleistung des Pantographen
$P_{Station, \text{langsam}}$	Ausgangsleistung einer Langsamladestation
P_{UW}	Ausgangsleistung eines Unterwerks
$P_{Station, \text{schnell}}$	Ausgangsleistung einer Schnellladestation
R_{ela}	Entladestromrate
RW_T	Restwert nach Szenariendauer T
T	Szenariendauer
α	Steigungswinkel
$\eta_{Bat, \text{lad}}$	Wirkungsgrad der Batterie beim Laden
η_{BU}	Wirkungsgrad des Batterieumrichters
η_{BZU}	Wirkungsgrad des Brennstoffzellenumrichters
η_G	Wirkungsgrad des Generators
η_{Getr}	Wirkungsgrad des Getriebes
η_{GR}	Wirkungsgrad des Gleichrichters in einem Unterwerk
$\eta_{Kupplung}$	Wirkungsgrad der Ladekupplung
η_{LE}	Wirkungsgrad der Leistungselektronik in einer Ladestation
η_{MU}	Wirkungsgrad der Antriebsmaschine inklusive des Traktionsumrichters
η_{Pan}	Wirkungsgrad des Pantographen
η_{Trafo}	Wirkungsgrad des Transformators
ρ_{Luft}	Luftdichte

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotential (engl. acidification potential)
Bat-LKW	Batteriegetriebener Lastkraftwagen
BZ-LKW	Brennstoffzellengetriebener Lastkraftwagen
EP	Eutrophizierungspotenzial (engl. eutrophication potential)
GWP	Treibauspotential (engl. global warming potential)
LKW	Lastkraftwagen
OL-LKW	Oberleitungsversorgter Lastkraftwagen
OL-Hybrid-LKW	Oberleitungsversorgter hybridisierter Lastkraftwagen
PED	Primärenergieverbrauch (engl. primary energy demand)
PEM	Polymerelektrolytmembran
SOC	State of Charge, deutsch: Ladezustand

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Verkehrsleistung des Güterlandverkehrs im Jahr 2014 sowie Prognose für Jahr 2030 (Daten aus [15] und [16])	5
Abbildung 2-2: Sinnbild eines Sattelzugs (links) und eines Gliederzugs (rechts).....	6
Abbildung 2-3: Durchschnittliche Gewichtsauslastung aller Fahrzeuge im Inlandsverkehr in Abhängigkeit der Volumenauslastung (Daten aus [23])......	6
Abbildung 3-1: Verbrauchskennfeld eines generischen Dieselmotors mit Volllastkurve und Konstantleistungskurve durch den Arbeitspunkt mit minimalem Verbrauch	19
Abbildung 3-2: Struktur des Systemmodells eines batteriegetriebenen LKW	20
Abbildung 3-3: Die modellierte Topologie eines batteriegetriebenen LKW	21
Abbildung 3-4: Maximale Beschleunigung des voll beladenen Sattelzugs in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit	23
Abbildung 3-5: Antriebstopologie eines Oberleitungs-LKW mit Batterie und Stromabnehmer	26
Abbildung 3-6: Die modellierte Topologie eines Serienhybrid-LKW.....	27
Abbildung 3-7: Betriebsstrategie der Batterie und des Dieselmotors beim oberleitungsversorgten Hybrid-LKW	28
Abbildung 3-8: Antriebstopologie eines brennstoffzellengetriebenen LKW mit Brennstoffzelle (BZ) und Batterie.....	29
Abbildung 3-9: Betriebsstrategie der Brennstoffzelle und Batterie eines brennstoffzellengetriebenen LKW	30
Abbildung 4-1: Höhenprofile der Autobahnstrecken A2 und A8 in Richtung West.....	35
Abbildung 4-2: Energiefluss E ab Energiequelle zum Rad bei unterschiedlichen Antriebssträngen. Die gestrichelten Linien verbinden den jeweiligen Teil des Antriebs eines alternativen LKW mit dem für diese LKW identischen Teil des Antriebsstrangs aus elektrischer Maschine samt Umrichter und mechanischer Achse.....	36
Abbildung 4-3: Spezifische Energieverbräuche unterschiedlicher LKW-Typen bei geringen Fahrwiderständen. Die schwarzen Balken geben die Abweichung vom durchschnittlichen Energieverbrauch des jeweiligen LKW-Typs auf den untersuchten Autobahnen an, die aufgrund der Streckentopographie zustande kommt.	37
Abbildung 4-4: Spezifische Energieverbräuche unterschiedlicher LKW-Typen bei mittleren Fahrwiderständen. Die schwarzen Balken geben die Abweichung vom durchschnittlichen Energieverbrauch des jeweiligen LKW-Typs auf den untersuchten Autobahnen an, die aufgrund der Streckentopographie zustande kommt.	38
Abbildung 4-5: Verluste einzelner Antriebsstrangkomponenten sowie abgegebene Energie an Nebenverbraucher und Räder.....	39
Abbildung 4-6: Die in Simulation erzielten Wirkungsgrade der untersuchten LKW von Energiequelle im Fahrzeug bis zu den Rädern auf einer flachen Autobahnstrecke.....	40
Abbildung 4-7: Gewicht der Antriebsstränge unterschiedlicher LKW aufgeschlüsselt auf die wichtigsten Komponenten.....	47
Abbildung 4-8: Gewichtsverteilung bei den untersuchten LKW. Der Fehlerbalken gibt die mögliche Abweichung des Antriebsstranggewichts in Abhängigkeit von den betrachteten Auslegungen an.	49

Abbildung 4-9: Das Volumen der Antriebskomponenten der untersuchten LKW. Der Fehlerbalken gibt die mögliche Volumenvariation bei anderen betrachteten Auslegungen an. Als Einbauvolumen wird hier der Raum des Verbrennungsmotors, des Tanks und im Rahmen unter dem Sattelaufleger gesehen.....	51
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung eines batteriegetriebenen LKW mit dem Antriebsstrang und einer Ladestation mit elektrischen Komponenten	54
Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Komponenten einer Oberleitungsinfrastruktur und des Antriebsstrangs eines oberleitungsversorgten LKW	56
Abbildung 5-1: Wöchentliches Betriebsszenario bestehend aus 5 Tagesbetriebsszenarien. Anfang der Ladevorgänge für den batteriegetriebenen LKW ist durch Blitzzeichen markiert.	61
Abbildung 5-2: Höhenprofil der Strecke in dem definierten Betriebsszenario.....	62
Abbildung 5-3: Die zur Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) und Lebenszyklusanalyse (LCA) notwendigen Daten	63
Abbildung 5-4: Zusammensetzung der Lebenszykluskosten.....	64
Abbildung 5-5: Spezifischer Energieverbrauch und Durchschnittsgeschwindigkeit der batteriegetriebenen LKW und Diesel-LKW	74
Abbildung 5-6: Batterieladezustand in Szenarien mit batteriegetriebenen LKW	75
Abbildung 5-7: Zellströme während des Schnellladens der Batterie sowie die Temperaturverläufe der Zellen während des kompletten Betriebstages	76
Abbildung 5-8: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten Szenarien für oberleitungsversorgte LKW sowie Diesel-LKW und batteriegetriebenen LKW. Szenario 6 erfüllt nicht die Betriebsanforderungen und wird deshalb nicht gezeigt.	78
Abbildung 5-9: SOC und Zelltemperatur in Szenarien 8 (durchgehende Oberleitung) und 9 (partielle Oberleitung).	78
Abbildung 5-10: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten Szenarien für oberleitungsversorgte Hybrid-LKW sowie die Szenarien mit jeweils niedrigsten Verbräuchen anderer LKW-Technologien. Szenario 11 erfüllt nicht die Betriebsanforderungen und wird deshalb nicht gezeigt.	80
Abbildung 5-11: SOC- und Temperaturverläufe bei untersuchten Szenarien des oberleitungsversorgten Hybrid-LKW	81
Abbildung 5-12: Spezifischer Energieverbrauch der untersuchten brennstoffzellengetriebenen LKW sowie die Szenarien mit jeweils niedrigsten Verbräuchen anderer LKW-Technologien. Szenarien 16 bis 18 erfüllen nicht die Betriebsanforderungen und werden deshalb nicht gezeigt.	83
Abbildung 5-13: Ladezustands- und Temperaturverläufe der Zellen HEa in Szenarien 13, 16 und 19.....	84
Abbildung 5-14: Fahrzeugkosten in den untersuchten Szenarien inklusive der Ersatzanschaffungen von Fahrzeugkomponenten ohne laufende Betriebskosten.....	86
Abbildung 5-15: Investitionskosten für Ladesäulen und Ladeinfrastruktur einer durchschnittlichen Rastanlage (Szenarien 2 und 3).	87
Abbildung 5-16: Investitionskosten pro Unterwerk mit dazugehörigem Oberleitungsabschnitt	88
Abbildung 5-17: Gesamte Investitionskosten für den Aufbau der jeweiligen Infrastruktur....	89
Abbildung 5-18: Barwerte der Infrastrukturkosten in den untersuchten Szenarien.....	90
Abbildung 5-19: Kosten des Treibstoffs bzw. elektrischer Energie in den untersuchten Szenarien	91
Abbildung 5-20: Spezifische variable Kosten in untersuchten Szenarien	92
Abbildung 5-21: Spezifischen fixen Kosten in den untersuchten Szenarien	93
Abbildung 5-22: Spezifische Lebenszykluskosten der LKW in den untersuchten Szenarien .	94
Abbildung 5-23: Entwicklung der gesamten Lebenszykluskosten	97

Abbildung 5-24: Spezifische Lebenszykluskosten des brennstoffzellengetriebenen LKW für das Jahr 2030 in Abhängigkeit von Wasserstoffpreis und Lebensdauer der Brennstoffzelle ..	97
Abbildung 6-1: Untersuchungsrahmen der durchgeführten Lebenszyklusanalyse ausgehend von Rohmaterialien über Herstellung bis zum Betrieb.	99
Abbildung 6-2: Bilanzierte Bestandteile des Fahrzeugs und der Infrastruktur	100
Abbildung 6-3: Die implementierten Strommixe für 2017 [134] und 2050 [135].....	104
Abbildung 6-4: Produktionsmix für Wasserstoff [92], [138].....	108
Abbildung 6-5: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf der Fahrzeugherstellung in untersuchten Szenarien.....	114
Abbildung 6-6: Ergebnisse der Ökobilanz für Infrastrukturherstellung entsprechend untersuchter Szenarien und normiert auf einen LKW.....	116
Abbildung 6-7: Treibhauspotential und Primärenergieverbrauch für den Betrieb (Strommix 2017).....	117
Abbildung 6-8: Versauerungspotential und Überdüngungspotential für den Betrieb (Strommix 2017).....	118
Abbildung 6-9: Gesamten Umweltauswirkungen der untersuchten Szenarien (Strommix 2017).....	120
Abbildung 6-10: Gesamten Umweltauswirkungen in den untersuchten Szenarien bei Strommix 2050.....	123
Abbildung A-1: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter oberleitungsversorgter LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten	134
Abbildung A-2: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter oberleitungsversorgter Hybrid-LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten	135
Abbildung A-3: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter batteriegetriebener LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten	135
Abbildung A-4: Gewicht des Antriebsstrangs unterschiedlich ausgelegter brennstoffzellengetriebener LKW aufgeschlüsselt nach Komponenten	136
Abbildung A-5: Versauerungspotential und Überdüngungspotential der Fahrzeugherstellung in untersuchten Szenarien.....	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Überblick über die wichtigsten gesetzlichen Bestimmungen zu Lenk- und Ruhezeiten für LKW-Fahrer nach [30]	8
Tabelle 3-1: Technische Daten des ursprünglichen Dieselmotors für mittelschwere LKW und des Dieselmotors für schwere LKW	19
Tabelle 3-2: Parameter für Fahrwiderstandsbeiwerte der parametrisierten LKW	22
Tabelle 3-3: Auszug aus dem Datenblatt der gewählten Antriebsmaschine [80]	24
Tabelle 3-4: Parameter der im Batteriemodell genutzten Zellen und die angenommenen Kosten eines Batteriepacks mit jeweiligen Zellen	25
Tabelle 3-5: Literaturwerte des Dieserverbrauchs bei unterschiedlichen Strecken und Gesamtgewichten des Fahrzeugs sowie Simulationswerte des Dieserverbrauchs	31
Tabelle 3-6: Energieverbrauch der oberleitungsversorgten LKW aus Literatur und Simulation	32
Tabelle 3-7: Simulierter Energie- und Dieserverbrauch eines oberleitungsversorgten Serienhybrid-LKW	33
Tabelle 3-8: Wasserstoffverbrauch der brennstoffzellengetriebenen LKW aus Literatur und Simulation	33
Tabelle 4-1: Startparameter zur Bestimmung des durchschnittlichen Energieverbrauchs	36
Tabelle 4-2: Auslegungsdaten der Antriebsstrangkomponenten eines batteriegetriebenen LKW	41
Tabelle 4-3: Untersuchte Varianten der Oberleitungsinfrastruktur und der Batteriekapazität	43
Tabelle 4-4: Kombination der Oberleitungsinfrastruktur, Batteriekapazität und Dieselmotorleistung für den oberleitungsversorgten Hybrid-LKW	44
Tabelle 4-5: Dimensionierung der Komponenten eines brennstoffzellengetriebenen LKW	45
Tabelle 4-6: Durchschnittliche Ausstattung einer Rastanlage mit Ladestationen	55
Tabelle 4-7: Die am Pantographen des LKW benötigte Leistung zur Deckung der Traktion und Nachladung der Batterie	57
Tabelle 4-8: Durchschnittliche Dimensionierung der Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur	58
Tabelle 5-1: Eckdaten des definierten Betriebsszenarios	61
Tabelle 5-2: Kostenparameter für Diesel-LKW	65
Tabelle 5-3: Kostenparameter für den batteriegetriebenen LKW	67
Tabelle 5-4: Kostenparameter für die Ladeinfrastruktur. Die Kostenangaben basieren auf vertraulichen Informationen aus Kommunikation mit Herstellern der Ladesysteme für Elektrobusse [114]	68
Tabelle 5-5: Zusätzlicher Kostenparameter eines oberleitungsversorgten LKW. Andere Kostenparameter sind gleich denen des batteriegetriebenen LKW (Tabelle 5-3).	69
Tabelle 5-6: Kostenparameter für die Oberleitungsinfrastruktur	70
Tabelle 5-7: Abweichende Kostenparameter eines oberleitungsgetriebenen Hybrid-LKW. Andere Kostenparameter sind gleich denen eines vollelektrischen oberleitungsgetriebenen LKW (Tabelle 5-5)	71
Tabelle 5-8: Kostenparameter eines brennstoffzellengetriebenen LKW	72
Tabelle 5-9: Referenzszenario mit Diesel-LKW	73

Tabelle 5-10: Szenarien für batteriegetriebenen LKW	74
Tabelle 5-11: Untersuchte Szenarien für oberleitungsversorgten LKW	77
Tabelle 5-12: Batterielebensdauer in Szenarien mit oberleitungsversorgtem LKW	79
Tabelle 5-13: Untersuchte Szenarien für oberleitungsversorgten Hybrid-LKW	80
Tabelle 5-14: Die untersuchten Szenarien für brennstoffzellengetriebenen LKW	82
Tabelle 5-15: Geschätzte Lebensdauer der Batterien in untersuchten Szenarien des brennstoffzellengetriebenen LKW	84
Tabelle 5-16: Annahmen zu Kostenentwicklungen für Jahr 2030	96
Tabelle 6-1: Die implementierten Faktoren für Bereitstellung des Wasserstoffs	108
Tabelle A-1: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Dampfreformierung in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.	136
Tabelle A-2: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels partieller Oxidation in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.	137
Tabelle A-3: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Kohlevergasung in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte basierend auf angegebener Literatur.	137
Tabelle A-4: Auswirkungen der Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse in jeweiligen Wirkungskategorien. Die angegebenen Werte wurden entsprechend dem angenommenen Elektrolysemix (Kapitel 6.2.5.2) und basierend auf den Elektrolysedatensätzen der ecoinvent- Datenbank [69] berechnet.	137

Literaturverzeichnis

- [1] „Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, 2016.
- [2] European Commission, „Pariser Übereinkommen“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [3] Umweltbundesamt, „Emissionsquellen“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [4] „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2013.
- [5] Siemens AG, „ENUBA - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“, Schlussbericht, 2012.
- [6] M. Lehmann, S. Arnd, und J. Mazzega, „ENUBA 2 - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“, Siemens AG, TU Dresden, DLR e.V., Final Report, 2016.
- [7] NDR, „Countdown für erste Teststrecke für E-Lkw in SH“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [/nachrichten/schleswig-holstein/Countdown-fuer-erste-Teststrecke-fuer-E-Lkw-in-SH,autobahn100.html](http://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Countdown-fuer-erste-Teststrecke-fuer-E-Lkw-in-SH,autobahn100.html). [Zugegriffen: 13-Okt-2018].
- [8] COOP, „Weltweit erster Wasserstoff-LKW mit Anhänger, der die LKW-Anforderungen für die Coop-Logistik erfüllen kann“, de. [Online]. Verfügbar unter: http://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [9] Daimler, „Der Mercedes-Benz Elektro-Lkw“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/produkte/lkw/mercedes-benz/weltpremiere-mercedes-benz-elektro-lkw.html>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [10] MAN SE, „MAN at the IAA Commercial Vehicles 2016: a future-proof portfolio“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.corporate.man.eu/en/press-and-media/presscenter/MAN-at-the-IAA-Commercial-Vehicles-2016_-a-future-proof-portfolio-264385.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [11] „Nikola Motor Company“, *Nikola Motor Company*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.nikolamotor.com/>. [Zugegriffen: 27-März-2018].
- [12] Tesla, Inc., „Tesla Semi“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tesla.com/semi>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [13] M. Muschkiet und G. Ebel, „Begriffe und Systematik“, in *Verkehrs- und Transportlogistik*, 2. Aufl., U. Clausen und C. Geiger, Hrsg. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [14] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, „Binnenschiff und Umwelt“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: http://www.wsv.de/Schifffahrt/Binnenschiff_und_Umwelt/index.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].

- [15] S. Radke, Hrsg., *Verkehr in Zahlen. 44: 2015/2016*, 44. Jg. Hamburg: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.
- [16] M. Schubert, T. Kluth, G. Nebauer, R. Ratzenberger, S. Kotzagiorgis, B. Butz, W. Schneider, und M. Leible, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Intraplan Consult GmbH, BVU Beratergruppe Verkehr +Umwelt GmbH, Planco Consulting GmbH, Schlussbericht, 2014.
- [17] A. Hütter, „Verkehr auf einen Blick“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2013.
- [18] M. Wietschel, T. Gnann, A. Kühn, P. Plötz, C. Moll, D. Speth, J. Buch, T. Boßmann, S. Stütz, M. Schellert, D. Rüdiger, W. Balz, H. Frik, V. Waßmuth, D. Paufler-Mann, A. Rödl, W. Schade, und S. Mader, „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five, Karlsruhe, 2017.
- [19] „Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2017.
- [20] A. Wolf, *Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes: [Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.3406002 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen]*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss, 2010.
- [21] B. Lenz, A. Lischke, G. Knitschky, J. Adolf, F. B. Ceng, J. Stöver, L. Leschus, und M. Bräuninger, „Shell LKW-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030“, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburgischer WeltWirtschaftsinstitut, Hamburg/Berlin, 2010.
- [22] StVZO, „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Mai 2017 (BGBl. I S. 1282) geändert worden ist“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/BJNR067910012.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [23] Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge - Inlandsverkehr, Jahr 2014 (VD 3)“, Flensburg, Dez. 2015.
- [24] A. Fitschen und H. Nordmann, „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2014.
- [25] T. Kathmann, S. Schroeder, und A. Bär, „Lkw-Parken auf BAB - Auswertung der bundesweiten Erhebung der Parkstandnachfrage an BAB 2013“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Schlussbericht, Feb. 2014.
- [26] A. Lüttmerding, M. Gather, F. Heinitz, und N. Hesse, „Belegung der Autobahnplätze durch LKW in Thüringen: Bestandsaufnahme und grundsätzliche Maßnahmenempfehlungen“, Institut Verkehr und Raum der Fachhochschule Erfurt, Juli 2008.
- [27] „Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg: Projektbeschreibung Lkw-Parkplätze“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.svz-bw.de/lkw_parken_projekt.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [28] „Telematische Lösungen zur Überbelegung von LKW-Parkplätzen an Bundesautobahnen (TeleLaB) - Institut Verkehr und Raum der Fachhochschule Erfurt“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fh-erfurt.de/fhe/vur/metaprojektliste/2010/telematische-loesungen-zur-ueberbelegung-von-lkw-parkplaetzen-an-bundesautobahnen-telelab/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [29] Loginvest, „Gewerbegebiete.de“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gewerbegebiete.de/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [30] European Union (EC), „Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the Harmonisation of Certain Social Legislation Relating to Road Transport and Amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and

- (EC) No 2135/98 and Repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85 (Text with EEA relevance) - Declaration“, European Union: City of Brussels, Belgium, März 2006.
- [31] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbau arten)“, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, FZ 25, 2016.
- [32] F. Dünnebeil, C. Reinhard, U. Lambrecht, A. Kies, S. Hausberger, und M. Rexeis, „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasreduzierung bei schweren Nutzfahrzeugen“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, UBA-FB 002058, Feb. 2015.
- [33] F. Hülsmann, M. Mottschall, F. Hacker, und P. Kasten, „Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050“, Öko-Institut e.V., Freiburg, Germany, Working Paper, März 2014.
- [34] E. den Boer, S. Aarnink, F. Kleiner, und J. Pagenkopf, „Zero Emissions Trucks: An Overview of State-of-the-Art Technologies and their Potential“, CE Delft, DLR, Delft, Juli 2013.
- [35] P. Fyhr, G. Domingues, M. Andersson, F. J. Marquez-Fernandez, H. Bangtsson, und M. Alakula, „Electric roads: Reducing the societal cost of automotive electrification“, 2017, S. 773–778.
- [36] D. Laborde, „Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies“, International Food Policy Institute, Washington DC, USA, 2011.
- [37] C. Bowyer, „Anticipated Indirect Land Use Change Associated with Expanded Use of Biofuels and Bioliquids in the EU – An Analysis of the National Renewable Energy Action Plans“, Institute for European Environmental Policy, Brussels, 2010.
- [38] A. Schäfer, L. Dray, E. Andersson, M. E. Ben-Akiva, M. Berg, K. Boulouchos, P. Dietrich, O. Fröidh, W. Graham, R. Kok, S. Majer, B. Nelldal, F. Noembrini, A. Odoni, I. Pagoni, A. Perimenis, V. Psaraki, A. Rahman, S. Safarinova, und M. Vera-Morales, „TOSCA Project Final Report: Description of the Main S&T Results/Foregrounds“, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, Final Report, Mai 2011.
- [39] P. Kasten, M. Mottschall, W. Köppel, C. Degünther, M. Schmied, und P. Wüthrich, „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“, Öko-Institut e.V., DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), INFRAS AG, Berlin, 2015.
- [40] S. Siegemund, M. Trommler, O. Kolb, V. Zinnecker, P. Schmidt, W. Weindorf, W. Zittel, T. Raksha, und J. Zerhusen, „E-Fuels‘ Study: The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU“, Deutsche Energie-Agentur GmbH, Ludwig-Bölkow- Systemtechnik GmbH, Berlin, 2017.
- [41] European Commission, „Report from the Commission on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids“, Brussels, 2010.
- [42] C.-X. Zu und H. Li, „Thermodynamic analysis on energy densities of batteries“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 4, Nr. 8, S. 2614, 2011.
- [43] B. Nykvist und M. Nilsson, „Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles“, *Nat. Clim. Change*, Bd. 5, Nr. 4, S. 329–332, März 2015.
- [44] S. M. Knupfer, R. Hensley, P. Hertzke, P. Schaufuss, N. Laverty, und N. Kramer, „Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability“, McKinsey & Company, New York, NY, USA, Jan. 2017.
- [45] B. Sen, T. Ercan, und O. Tatari, „Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8

- heavy-duty trucks in the United States“, *J. Clean. Prod.*, Bd. 141, S. 110–121, Jan. 2017.
- [46] H. Zhao, A. Burke, und L. Zhu, „Analysis of Class 8 hybrid-electric truck technologies using diesel, LNG, electricity, and hydrogen, as the fuel for various applications“, gehalten auf der EVS27, Barcelona, Spain, 2013, S. 1–16.
- [47] P. Akerman, H. G. Gruenjes, und M. Lehmann, „Designing and Demonstrating an Electric Road System for Efficient and Sustainable Road Freight“, in *TRB 96th Annual Meeting Compendium of Papers*, Washington DC, USA, 2017.
- [48] Sachverständigenrat für Umweltfragen, SRU, Hrsg., *Verantwortung in einer begrenzten Welt: Umweltgutachten 2012*, Juni 2012. Berlin: E. Schmidt, 2013.
- [49] UNECE Inland Transport Committee, „Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions (Revision 2)“. 2013.
- [50] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, 2. Aufl. Wien: Springer, 2014.
- [51] C. Mi, M. A. Masrur, D. W. Gao, und K. Wener, *Hybridkraftfahrzeuge: Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven für die Praxis*. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- [52] C. Mohrdieck, „Mobile Anwendungen“, in *Wasserstoff und Brennstoffzelle*, M. Venturi und K. Breitrück, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 1–23.
- [53] P. Kurzweil und O. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Grundlagen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [54] „Wasserstoffinfrastruktur“. [Online]. Verfügbar unter: <https://cleanenergypartnership.de/faq/wasserstoffinfrastruktur/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [55] S. Leuthner, „Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien“, in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 13–19.
- [56] J. Schmalstieg, „Physikalisch-elektrochemische Simulation von Lithium-Ionen-Batterien: Implementierung, Parametrierung und Anwendung“, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2017.
- [57] J. Lehmann und T. Luschtinetz, *Wasserstoff und Brennstoffzellen: unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [58] Y. Shao, G. Yin, und Y. Gao, „Understanding and approaches for the durability issues of Pt-based catalysts for PEM fuel cell“, *J. Power Sources*, Bd. 171, Nr. 2, S. 558–566, Sep. 2007.
- [59] X. Wang, R. Kumar, und D. J. Myers, „Effect of Voltage on Platinum Dissolution“, *Electrochem. Solid-State Lett.*, Bd. 9, Nr. 5, S. A225, 2006.
- [60] W. Schmittinger und A. Vahidi, „A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells“, *J. Power Sources*, Bd. 180, Nr. 1, S. 1–14, Mai 2008.
- [61] „Lexikon der Nachhaltigkeit | Wirtschaft | Ökobilanz: DIN Norm 33926“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekobilanz_din_norm_33926_1295.htm. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [62] „Definition: Ökobilanz“, *Gabler Wirtschaftslexikon*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekobilanz-44115/version-169608>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].

- [63] „Ökobilanz“, *Umweltbundesamt*, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [64] „Hintergrundpapier ‚Handreichung Bewertung in Ökobilanzen‘“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2000.
- [65] W. Klöpffer und B. Grahl, *Life Cycle Assessment (LCA): a guide to best practice*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014.
- [66] J. B. Guinée, G. Huppes, und R. Heijungs, „Developing an LCA guide for decision support“, *Environ. Manag. Health*, Bd. 12, Nr. 3, S. 301–311, Aug. 2001.
- [67] J. B. Guinée, *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [68] „Kriterien - BNB Unterrichtsgebäude - Neubau (BNB_UN) - Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-unterrichtsgebaeude/bnb-un-2017/kriterien-bnb-unterrichtsgebaeude-neubau-bnb-un.html>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [69] E. Moreno Ruiz, T. Lérovová, J. Reinhard, L. Valsasina, G. Bourgault, und G. Wernet, „Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.3“, Ecoinvent, Zürich, 2016.
- [70] T. Harr, E. Mack, R. Schulze, und W. Schmid, „Der neue Sechszylinder-Dieselmotor OM 906 LA von Daimler-Benz“, *MTZ - Mot. Z.*, Bd. 59, Nr. 9, S. 526–537, Sep. 1998.
- [71] W. Krüger, J. Kleffel, P. Dietrich, und D. Koch, „10,7-L-Nfz-Motor von Daimler für Euro VI und Tier 4“, *MTZ - Mot. Z.*, Bd. 73, Nr. 12, S. 932–939, Dez. 2012.
- [72] Daimler, „Product Brochure: Diesel and gas engine systems for EURO VI on-highway applications“. 2014.
- [73] I. Mareev, J. Becker, und D. U. Sauer, „Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation“, *Energies*, Bd. 11, Nr. 1, S. 55, 2018.
- [74] E. Hoepke und W. Appel, Hrsg., „Fahrmechanik“, in *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, 7., überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 37–119.
- [75] H. Naunheimer, B. Bertsche, G. Lechner, J. Ryborz, und W. Novak, „Überblick über das System Verkehr - Fahrzeug - Getriebe“, in *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*, 2., bearb. und erw. Aufl., Berlin: Springer, 2007, S. 28–72.
- [76] J.-W. Biermann, „Fahrzeugauslegung“, in *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*, J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, M. Roth, und H. Schäfer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 101–162.
- [77] European Union (EC)., „Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 Concerning Type-Approval Requirements for the General Safety of Motor Vehicles, Their Trailers and Systems, Components and Separate Technical Units Intended Therefor“, European Union: City of Brussels, Belgium, Juli 2009.
- [78] DAF Trucks Deutschland, „Modellbeschreibung XF 440 FT 4x2 Sattelzugmaschine“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.daftrucks.de/de-de/trucks/specsheets-search-page>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [79] Volvo Trucks., „Fahrzeugspezifikation Volvo FH 500 4x2 Sattelzugmaschine“, Volvo Trucks, Gothenburg, Sweden, 2015.
- [80] GKN Land Systems, „GKN Electric Motor and Generator Technology: Technical Datasheet.“, 2014. [Online]. Verfügbar unter:

- http://products.gknlandsystems.info/fileadmin/user_upload/pdf/Electrics/DS_GKN_electric_motor_technology_64_GB_1214.pdf. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [81] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker, und D. U. Sauer, „A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries“, *J. Power Sources*, Bd. 257, S. 325–334, Juli 2014.
- [82] S. Käbitz, J. B. Gerschler, M. Ecker, Y. Yurdagel, B. Emmermacher, D. André, T. Mitsch, und D. U. Sauer, „Cycle and calendar life study of a graphite|LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂ Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization“, *J. Power Sources*, Bd. 239, S. 572–583, Okt. 2013.
- [83] M. Ecker, J. B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, und D. U. Sauer, „Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data“, *J. Power Sources*, Bd. 215, S. 248–257, Okt. 2012.
- [84] „FCvelocity -HD6 Integration Manual“, Ballard Power Systems, 2010.
- [85] M. Rexeis, S. Hausberger, J. Kühlwein, und R. Luz, „Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2“, TU Graz, Graz, Austria, Final Report, 2013.
- [86] M. Spielmann, M. Faltenbacher, D. Eichhorn, und A. Stoffregen, „Energiebedarfs- und Emissionsvergleich von LKW, Bahn und Schiff im Güterfernverkehr – Aktualisierung 2011“, PE International, Leinfelden - Echterdingen, 2011.
- [87] H.-J. Wildhage, „Der Kostenbremser“, Bd. Güterverkehr, 2012.
- [88] „Google Maps“, *Google Maps*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [89] „GPS Visualizer“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gpsvisualizer.com/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [90] SRTM, „Shuttle Radar Topography Mission“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [91] J. Hoinkis, *Chemie für Ingenieure*, 14., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- [92] T. Hamacher, „Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger“, in *Wasserstoff und Brennstoffzelle*, J. Töpler und J. Lehmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 1–23.
- [93] M. Faulstich, H. Foth, C. Calliess, O. Hohmeyer, K. Holm-Müller, M. Niekisch, und M. Schreurs, „Umweltgutachten 2012 - Verantwortung in einer begrenzten Welt“, Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2012.
- [94] DAF Components, „MX-11 Euro 6 Coach & Bus Engine“. 2013.
- [95] ZF Friedrichshafen, „Truck & Van Driveline Technology - Product Overview“, 2015.
- [96] S. Campanari, G. Manzolini, und F. Garcia de la Iglesia, „Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations“, *J. Power Sources*, Bd. 186, Nr. 2, S. 464–477, Jan. 2009.
- [97] P. G. Patil, „Developments in Lithium-Ion Battery Technology in The Peoples Republic of China“, Transportation Technology Research and Development Center, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, 2008.
- [98] „350 bar/5075 psi Hydrogen DyneCell® Cylinders @ 15°C/59°F“, Dynetek Industries Ltd., Calgary, Canada, Specifications, 2006.
- [99] R. Gerboni, N. Demaio, L. Maffia, und S. Rossi, „LCA of a carbon fibre wrapped pressure vessel for automotive applications“, gehalten auf der EcoBalance 2004, Torino, 2004.
- [100] Hyundai Motor Deutschland GmbH, „ix35 Fuel Cell - Hyundai Motor Deutschland GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hyundai.de/Modelle/ix35-Fuel-Cell.html>. [Zugegriffen: 27-März-2018].

- [101] Toyota Deutschland GmbH, „Der Toyota Mirai. Die erste Wasserstofflimousine in Groß-Serie.“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.toyota.de/automobile/der-toyota-mirai.json>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [102] M. Hilgers, *Gesamtfahrzeug*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [103] „A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis“, McKinsey and Company, New York, NY, 2010.
- [104] DB Netz, „Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr.8 - Unterwerke“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://www.vde8.de/Unterwerke-----_site.site..ls_dir._nav.358_likecms.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [105] Fraunhofer ISE, „Installierte Leistung in Deutschland“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [106] Fraunhofer ISE, „Stromerzeugung in Deutschland“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2017. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [107] F. Wagner, Hrsg., *Gabler Versicherungslexikon*, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- [108] Statista GmbH, „Durchschnittlicher Dieselpreis in Deutschland bis 2017“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotoren-seit-dem-jahr-1950/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [109] Statista GmbH, „Zusammensetzung des Dieselpreises im Juni 2017“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/803/umfrage/zusammensetzung---verbraucherpreis-fuer-diesel/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [110] KraftStG, „KraftStG - Kraftfahrzeugsteuergesetz“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/kraftstg/BJNR005090927.html>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [111] F. Hacker, R. von Waldenfels, und M. Mottschall, „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen: Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung“, Öko-Institut e.V., Final Report, Apr. 2015.
- [112] Toll Collect GmbH, „Toll Collect - Toll rates“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.toll-collect.de/en/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [113] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014“, Berlin, 2014.
- [114] I. Mareev, „Personal communication with charging equipment manufacturers“, RWTH Aachen, Aachen, 2016.
- [115] N. Nießen, „Umdruck Lehrveranstaltung Eisenbahnwesen I“, RWTH Aachen, 2015.
- [116] T. Gnann, M. Wietschel, A. Kühn, A. Thielmann, A. Sauer, P. Plötz, C. Moll, S. Stütz, M. Schellert, D. Rüdiger, V. Waßmuth, und D. Paufler-Mann, „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe, Karlsruhe, Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, 2017.
- [117] „UTC Hydrogen Fuel Cell Sets Performance Record on Oakland AC Transit Hybrid Electric Bus“, *CleanTechnica*, 15-Aug-2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://cleantechnica.com/2011/08/15/utc-hydrogen-fuel-cell-sets-performance-record-on-oakland-ac-transit-hybrid-electric-bus/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [118] G. Parks, R. Boyd, J. Cornish, und R. Remick, „Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs“, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2014.

- [119] N. Gerhardt, F. Sandau, A. Scholz, H. Hahn, P. Schumacher, C. Sager, F. Bergk, C. Kämper, W. Knörr, J. Kräck, U. Lambrecht, O. Antoni, J. Hilpert, K. Merkel, und T. Müller, „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“, Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, IFEU, Stiftung Umweltenergierecht, Kassel, Endbericht, 2015.
- [120] *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2013.
- [121] „Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Zeitreihen und Trends“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihenuntrends/zeitreihenuntrends.html>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [122] E. Tazelaar, B. Veenhuizen, J. Jagerman, und T. Faassen, „Energy Management Strategies for fuel cell hybrid vehicles; an overview“, 2013, S. 1–12.
- [123] S. Amarakoon, J. Smith, und B. Segal, „Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles“, U.S. Environmental Protection Agency, 2013.
- [124] E. Helmers, J. Dietz, und S. Hartard, „Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario“, *Int. J. Life Cycle Assess.*, Bd. 22, Nr. 1, S. 15–30, Jan. 2017.
- [125] B. Weidema und R. Hischier, „ecoinvent data v2.2“, Swiss Centre for Life Cycle Inventories (ecoinvent Centre), St. Gallen, Apr. 2010.
- [126] C. E. Wittwer, „Anwendung und Weiterentwicklung des integrierten Fahrzeug-, Kosten- und Umweltmodells für Elektro-LKW“, Masterarbeit, RWTH Aachen, Aachen, 2017.
- [127] J. Eberhard, R. Müller, T. Cartus, R. Dreisbach, H.-P. Mai, M. Paulus, und J. Spengler, „Hochleistungs-SCR-Katalysatorsystem: Garant für niedrigste NO(x)-Emission“, in *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik*, Düsseldorf, 2006, S. 240–264.
- [128] A. Böckmann, „Entwicklung, Parametrierung und Anwendung eines Lithium-Ionen-Batterie Kosten- und Umweltmodells“, Masterarbeit, RWTH Aachen, Aachen, 2016.
- [129] M. Maul, „Post-Mortem-Analyse von Prototyp Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge“, Masterarbeit, RWTH Aachen, Aachen, 2016.
- [130] Chemical Science and Engineering Division, Argonne National Laboratory, „BatPaC: A Lithium-Ion Battery Performance and Cost Model for Electric-Drive Vehicles“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.cse.anl.gov/batpac/index.html>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [131] J. Becker, „Flexible Dimensionierung und Optimierung hybrider Lithium-Ionenbatteriespeichersysteme mit verschiedenen Auslegungszielen“, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2017.
- [132] A. Kampker, *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [133] C. Neumann, A. Baur, H. Meyer, A. Büscher, F. Plöger, A. Reimüller, I. Mersiowsky, und A. Schnettler, „Einsatz und Betrieb von SF₆-isolierten Mittelspannungsschaltanlagen unter ökologischen Gesichtspunkten“, in *Technische Innovationen in Verteilungsnetzen: Vorträge der ETG-Fachtagung vom 1. bis 2. März 2005 in Würzburg*, Würzburg, 2005.
- [134] Fraunhofer ISE, „Stromerzeugung in Deutschland in 2017“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2017. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [135] M. Schlesinger, P. Hofer, A. Kemmler, A. Kirchner, S. Koziel, A. Ley, A. Piégsa, F. Seefeldt, S. Straßburg, K. Weinert, D. Lindenberger, A. Knaut, R. Malischek, S. Nick, T. Panke, S. Paulus, C. Tode, J. Wagner, C. Lutz, U. Lehr, und P. Ulrich, „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, Prognos AG, EWI –

- Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, GWS – Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, Basel/Köln/Osnabrück, Endbericht, 2014.
- [136] Fraunhofer ISE, „Stromtausch von Deutschland mit seinen Nachbarländern in 2017“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy-charts.de/exchange_de.htm. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [137] K.-P. Kairies, „Ökobilanzierung und Vergleich (hybrid-) elektrisch angetriebener Nahverkehrsbusse des ÖPNV“, Bachelorarbeit, RWTH Aachen, Aachen, 2010.
- [138] A. Simons und C. Bauer, „Life cycle assessment of hydrogen production“, in *Transition to Hydrogen*, A. Wokaun und E. Wilhelm, Hrsg. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, S. 13–57.
- [139] R. Bhandari, C. A. Trudewind, und P. Zap, „Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods - A Review“, FZ Jülich, Jülich, 2012.
- [140] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, und N. Moussiopoulos, „Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes“, *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 29, Nr. 14, S. 1443–1450, Nov. 2004.
- [141] A. Stephan und B.-W. Zweig, „Energieversorgung elektrischer Bahnen“, in *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, L. Fendrich und W. Fengler, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [142] F. Pupke, „Herstellung und Eigenschaften von Fahrdrähten – Innovation und Installationsempfehlungen“, in *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender 2014: Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik*, VDEI Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V., Hrsg. Hamburg: DVV Media Group, 2013.
- [143] A. Elgowainy, K. Reddi, und M. Wang, „Life-Cycle Analysis of Hydrogen On- Board Storage Options“, gehalten auf der The 2013 DOE Fuel Cell Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Arlington, VA, 2012.
- [144] H. Eichseder und M. Klell, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [145] E. Rothuizen und M. Rokni, „Optimization of the overall energy consumption in cascade fueling stations for hydrogen vehicles“, *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 39, Nr. 1, S. 582–592, Jan. 2014.
- [146] J. Burkhardt, A. Patyk, P. Tanguy, und C. Retzke, „Hydrogen mobility from wind energy – A life cycle assessment focusing on the fuel supply“, *Appl. Energy*, Bd. 181, S. 54–64, Nov. 2016.
- [147] Statista GmbH, „Anzahl der Autobahntankstellen bis 2017, Deutschland“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157962/umfrage/anzahl-der-autobahntankstellen-in-deutschland-seit-2005/>. [Zugegriffen: 12-Okt-2018].
- [148] C. Tebert, „Stickstoffoxid-Emissionen aus Kohlekraftwerken - Minderungspotenzial auf Basis von Messdaten der Jahre 2016 und 2017“, Ökopol GmbH, Institut für Ökologie und Politik, Hamburg, 2018.
- [149] European Commission, „WHITE PAPER: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system“, Brussels, 2011.
- [150] A. Alam, B. Besselink, V. Turri, J. Martensson, und K. H. Johansson, „Heavy-Duty Vehicle Platooning for Sustainable Freight Transportation: A Cooperative Method to Enhance Safety and Efficiency“, *IEEE Control Syst.*, Bd. 35, Nr. 6, S. 34–56, Dez. 2015.
- [151] 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, Sep. 2014.
- [152] M. Yazdanie, F. Noembrini, L. Dossetto, und K. Boulouchos, „A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the

operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways“, *J. Power Sources*, Bd. 249, S. 333–348, März 2014.

- [153] P. L. Spath und M. K. Mann, „Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming“, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2001.

Eigene Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Veröffentlichungen entstanden, die nachstehend aufgeführt sind. Inhalte dieser Veröffentlichungen sind in Teilen in Übereinstimmung mit der Promotionsordnung der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen und in Absprache mit dem betreuenden Professor Dirk Uwe Sauer in dieser Dissertationsschrift verarbeitet. Dabei ist bei Verwendung von Texten, Graphiken, Bildern und Tabellen aus eigenen Veröffentlichungen, sofern sie überwiegend von mir verfasst oder gestaltet worden sind, nicht jeweils explizit auf die jeweilige Veröffentlichung verwiesen. Sind Elemente aus den Veröffentlichungen überwiegend durch meine Co-Autoren beigesteuert worden, findet sich im Text ein Literaturverweis auf die entsprechende Veröffentlichung.

Wissenschaftliche Journale:

- I. Mareev, J. Becker, D. U. Sauer, „Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation“, *Energies*, Bd. 11, Nr. 1, S. 55, 2018
- I. Mareev, D. U. Sauer, „Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation“, *Energies*, Bd. 11, Nr. 12, S. 3446, 2018

Populärwissenschaftliche Texte:

- W. Rohlf, I. Mareev, M. Rogge, „Innovative Schnellladung von E-Bussen im Projekt SEB e-ÖPNV“, *Der Nahverkehr*, Bd. 33, Nr. 5, S. 11-16, 2015

Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Arbeit sind die nachfolgend aufgeführten studentischen Abschlussarbeiten entstanden. Für diese Arbeiten habe ich das Thema definiert und diese Arbeiten inhaltlich und wissenschaftlich betreut. Einige der Themen sind Teilaspekte dieser Dissertationsschrift und finden sich entsprechend auch in dieser Arbeit wieder. Entsprechende Inhalte werden nicht jeweils explizit auf diese Arbeiten referenziert. Studentische Arbeiten, die nicht unter meiner Anleitung entstanden sind, werden wie alle anderen Literaturstellen zitiert.

Masterarbeiten:

- Daniel Matthias Swoboda: Simulation eines batterieelektrischen Lastkraftwagens, 2016
- Christian Eric Wittwer: Anwendung und Weiterentwicklung des integrierten Fahrzeug-, Kosten- und Umweltmodells für Elektro-LKW, 2017

Bachelorarbeiten:

- Joshua Schmidt: Umwelt- und Kostenmodellierung eines batterieelektrischen Lastkraftwagens, 2016
- Sergej Kneib: Simulation eines elektrischen LKWs mit Energieversorgung aus Batterie und Oberleitung, 2016
- Niklas Rossmann: Kosten- und Umweltmodell eines Hybrid-Lastkraftwagens mit Brennstoffzelle und Lithium-Batterie, 2017

ABISEA Band 1

Eßer, A.

Berührungslose, kombinierte Energie- und Informationsübertragung für bewegliche Systeme

1. Auflage 1992, 130 Seiten
ISBN 3-86073-046-0

ABISEA Band 2

Vogel, U.

Entwurf und Beurteilung von Verfahren zur Hochausnutzung des Rad-Schiene-Kraftschlusses durch Triebfahrzeuge

1. Auflage 1992, 130 Seiten
ISBN 3-86073-060-6

ABISEA Band 3

Redehorn, Th.

Stromeinprägendes Antriebssystem mit fremderregter Synchronmaschine

1. Auflage 1992, 130 Seiten
ISBN 3-86073-061-4

ABISEA Band 4

Ackva, A.

Spannungseinprägendes Antriebssystem mit Synchronmaschine und direkter Stromregelung

1. Auflage 1992, 135 Seiten
ISBN 3-86073-062-2

ABISEA Band 5

Mertens, A.

Analyse des Oberschwingungsverhaltens von takt-synchronen Delta - Modulationsverfahren zur Steuerung von Pulsstromrichtern bei hoher Taktzahl

1. Auflage 1992, 170 Seiten
ISBN 3-86073-069-X

ABISEA Band 6

Geuer, W.

Untersuchungen über das Alterungsverhalten von Bleiakkumulatoren

1. Auflage 1993, 100 Seiten
ISBN 3-86073-097-5

ABISEA Band 7

Langheim, J.

Einzelradantrieb für Elektrostraßenfahrzeuge

1. Auflage 1993, 215 Seiten
ISBN 3-86073-123-8
(vergriffen)

ABISEA Band 8

Fetz, J.

Fehlertolerante Regelung eines Asynchron-Doppelantriebes für ein Elektrospeicherfahrzeug

1. Auflage 1993, 136 Seiten
ISBN 3-86073-124-6
(vergriffen)

ABISEA Band 9

Schülting, L.

Optimierte Auslegung induktiver Bauelemente für den Mittelfrequenzbereich

1. Auflage 1993, 136 Seiten
ISBN 3-86073-174-2
(vergriffen)

ABISEA Band 10

Skudelny, H.-Ch.

Stromrichtertechnik

4. Auflage 1997, 259 Seiten
ISBN 3-86073-189-0

ABISEA Band 11

Skudelny, Ch.

Elektrische Antriebe

3. Auflage 1997, 124 Seiten
ISBN 3-86073-231-5

ABISEA Band 12

Schöpe, F.

Batterie-Management für Nickel-Cadmium Akkumulatoren

1. Auflage 1994, 156 Seiten
ISBN 3-86073-232-3
(vergriffen)

ABISEA Band 13

v. d. Weem, J.

Schmalbandige aktive Filter für Schienentriebfahrzeuge am Gleichspannungsfahrdraht

1. Auflage 1995, 125 Seiten
ISBN 3-86073-233-1

ABISEA Band 14

Backhaus, K.

Spannungseinprägendes Direktantriebssystem mit schnelllaufender geschalteter

Reluktanzmaschine

1. Auflage 1995, 156 Seiten
ISBN 3-86073-234-X
(vergriffen)

ABISEA Band 15

Reinold, H.

Optimierung dreiphasiger Pulsdauermodulationsverfahren

1. Auflage 1996, 116 Seiten
ISBN 3-86073-235-8

ABISEA Band 16

Köpken, H.-G.

Regelverfahren für Parallelschwingkreisumrichter

1. Auflage 1996, 125 Seiten
ISBN 3-86073-236-6

ABISEA Band 17

Mauracher, P.

Modellbildung und Verbundoptimierung bei Elektrostraßenfahrzeugen

1. Auflage 1996, 192 Seiten
ISBN 3-86073-237-4

ABISEA Band 18

Protiwa, F.-F.

Vergleich dreiphasiger Resonanz-Wechselrichter in Simulation und Messung

1. Auflage 1997, 178 Seiten
ISBN 3-86073-238-2

ABISEA Band 19

Brockmeyer, A.

Dimensionierungswerkzeug für magnetische Bauelemente in Stromrichteranwendungen

1. Auflage 1997, 182 Seiten
ISBN 3-86073-239-0

Aachener Beiträge des ISEA

ABISEA Band 20

Apeldoorn, O.

Simulationsgestützte Bewertung von Steuerverfahren für netzgeführte Stromrichter mit verringerter Netzrückwirkung

1. Auflage 1997, 132 Seiten
ISBN 3-86073-680-9

ABISEA Band 21

Lohner, A.

Batteriemangement für verschlossene Blei-Batterien am Beispiel von Unterbrechungsfreien Stromversorgungen

1. Auflage 1998, 144 Seiten
ISBN 3-86073-681-7

ABISEA Band 22

Reinert, J.

Optimierung der Betriebseigenschaften von Antrieben mit geschalteter Reluktanzmaschine

1. Auflage 1998, 168 Seiten
ISBN 3-86073-682-5

ABISEA Band 23

Nagel, A.

Leitungsgebundene Störungen in der Leistungselektronik: Entstehung, Ausbreitung und Filterung

1. Auflage 1999, 160 Seiten
ISBN 3-86073-683-3

ABISEA Band 24

Menne, M.

Drehschwingungen im Antriebsstrang von Elektrostraßenfahrzeugen - Analyse und aktive Dämpfung

1. Auflage 2001, 192 Seiten
ISBN 3-86073-684-1

ABISEA Band 25

von Bloh, J.

Multilevel-Umrichter zum Einsatz in Mittelspannungs-Gleichspannungs-Übertragungen

1. Auflage 2001, 152 Seiten
ISBN 3-86073-685-X

ABISEA Band 26

Karden, E.

Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries

1. Auflage 2002, 154 Seiten
ISBN 3-8265-9766-4

ABISEA Band 27

Karipidis, C.-U.

A Versatile DSP/ FPGA Structure optimized for Rapid Prototyping and Digital Real-Time Simulation of Power Electronic and Electrical Drive Systems

1. Auflage 2001, 164 Seiten
ISBN 3-8265-9738-9

ABISEA Band 28

Kahlen, K.

Regelungsstrategien für permanentmagnetische Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden

1. Auflage 2003, 158 Seiten
ISBN 3-8322-1222-1

ABISEA Band 29

Inderka, R.

Direkte Drehmomentregelung Geschalteter Reluktanzantriebe

1. Auflage 2003, 190 Seiten
ISBN 3-8322-1175-6

ABISEA Band 30

Schröder, S.

Circuit-Simulation Models of High-Power Devices Based on Semiconductor Physics

1. Auflage 2003, 124 Seiten
ISBN 3-8322-1250-7

ABISEA Band 31

Buller, S.

Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems

1. Auflage 2003, 136 Seiten
ISBN 3-8322-1225-6

ABISEA Band 32

Schönknecht, A.

Topologien und Regelungsstrategien für das induktive Erwärmen mit hohen Frequenz-Leistungsprodukten

1. Auflage 2004, 170 Seiten
ISBN 3-8322-2408-4

ABISEA Band 33

Tolle, T.

Konvertertopologien für ein aufwandsarmes, zweistufiges Schaltnetzteil zum Laden von Batterien aus dem Netz

1. Auflage 2004, 150 Seiten
ISBN 3-8322-2676-1

ABISEA Band 34

Götting, G.

Dynamische Antriebsregelung von Elektrostraßenfahrzeugen unter Berücksichtigung eines schwingungsfähigen Antriebsstrangs

1. Auflage 2004, 166 Seiten
ISBN 3-8322-2804-7

ABISEA Band 35

Dieckerhoff, S.

Transformatorlose Stromrichterschaltungen für Bahnfahrzeuge am 16 2/3Hz Netz

1. Auflage 2004, 158 Seiten
ISBN 3-8322-3094-7

ABISEA Band 36

Hu, J.

Bewertung von DC-DC-Topologien und Optimierung eines DC-DC-Leistungsmoduls für das 42-V-Kfz-Bordnetz

1. Auflage 2004, 156 Seiten
ISBN 3-8322-3201-X

ABISEA Band 37

Detjen, D.-O.

Characterization and Modeling of Si-Si Bonded Hydrophobic Interfaces for Novel High-Power BIMOS Devices

1. Auflage 2004, 146 Seiten
ISBN 3-8322-2963-9

ABISEA Band 38

Walter, J.

Simulationsbasierte Zuverlässigkeitsanalyse in der modernen Leistungselektronik

1. Auflage 2004, 134 Seiten
ISBN 3-8322-3481-0

ABISEA Band 39

Schwarzer, U.

IGBT versus GCT in der Mittelspannungsanwendung - ein experimenteller und simulativer Vergleich

1. Auflage 2005, 184 Seiten
ISBN 3-8322-4489-1

ABISEA Band 40

Bartram, M.

IGBT-Umrichtersysteme für Windkraftanlagen: Analyse der Zyklenbelastung, Modellbildung, Optimierung und Lebensdauervorhersage

1. Auflage 2006, 195 Seiten
ISBN 3-8322-5039-5

ABISEA Band 41

Ponnaluri, S.

Generalized Design, Analysis and Control of Grid side converters with integrated UPS or Islanding functionality

1. Auflage 2006, 163 Seiten
ISBN 3-8322-5281-9

ABISEA Band 42

Jacobs, J.

Multi-Phase Series Resonant DC-to-DC Converters

1. Auflage 2006, 185 Seiten
ISBN 3-8322-5532-X

ABISEA Band 43

Linzen, D.

Impedance-Based Loss Calculation and Thermal Modeling of Electrochemical Energy Storage Devices for Design Considerations of Automotive Power Systems

1. Auflage 2006, 150 Seiten
ISBN 3-8322-5706-3

ABISEA Band 44

Fiedler, J.

Design of Low-Noise Switched Reluctance Drives

1. Auflage 2007, 183 Seiten
ISBN 978-3-8322-5864-1

ABISEA Band 45

Fuengwarodsakul, N.

Predictive PWM-based Direct Instantaneous Torque Control for Switched Reluctance Machines

1. Auflage 2007, 150 Seiten
ISBN 978-3-8322-6210-5

ABISEA Band 46

Meyer, C.

Key Components for Future Offshore DC Grids

1. Auflage 2007, 196 Seiten
ISBN 978-3-8322-6571-7

ABISEA Band 47

Fujii, K.

Characterization and Optimization of Soft-Switched Multi-Level Converters for STATCOMs

1. Auflage 2008, 206 Seiten
ISBN 978-3-8322-6981-4

ABISEA Band 48

Carstensen, C.

Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines

1. Auflage 2008, 190 Seiten
ISBN 978-3-8322-7118-3

ABISEA Band 49

Bohlen, O.

Impedance-based battery monitoring

1. Auflage 2008, 200 Seiten
ISBN 978-3-8322-7606-5

ABISEA Band 50

Thele, M.

A contribution to the modelling of the charge acceptance of lead-acid batteries - using frequency and time domain based concepts

1. Auflage 2008, 168 Seiten
ISBN 978-3-8322-7659-1

ABISEA Band 51

König, A.

High Temperature DC-to-DC Converters for Downhole Applications

1. Auflage 2009, 160 Seiten
ISBN 978-3-8322-8489-3

ABISEA Band 52

Dick, C. P.

Multi-Resonant Converters as Photovoltaic Module-Integrated Maximum Power Point Tracker

1. Auflage 2010, 192 Seiten
ISBN 978-3-8322-9199-0

ABISEA Band 53

Kowal, J.

Spatially-resolved impedance of nonlinear inhomogeneous devices - using the example of lead-acid batteries -

1. Auflage 2010, 214 Seiten
ISBN 978-3-8322-9483-0

ABISEA Band 54

Roscher, M.

Zustandserkennung von LiFeP04-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

1. Auflage 2011, 194 Seiten
ISBN 978-3-8322-9738-1

ABISEA Band 55

Hirschmann, D.

Highly Dynamic Piezoelectric Positioning

1. Auflage 2011, 156 Seiten
ISBN 978-3-8322-9746-6

Aachener Beiträge des ISEA

ABISEA Band 56

Rigbers, K.

Highly Efficient Inverter Architectures for Three-Phase Grid Connection of Photovoltaic Generators
1. Auflage 2011, 254 Seiten
ISBN 978-3-8322-9816-9

ABISEA Band 57

Kasper, K.

Analysis and Control of the Acoustic Behavior of Switched Reluctance Drives
1. Auflage 2011, 214 Seiten
ISBN 978-3-8322-9869-2

ABISEA Band 58

Köllensperger, P.

The Internally Commutated Thyristor - Concept, Design and Application
1. Auflage 2011, 212 Seiten
ISBN 978-3-8322-9909-5

ABISEA Band 59

Schoenen, T.

Einsatz eines DC/DC-Wandlers zur Spannungsanpassung zwischen Antrieb und Energiespeicher in Elektro- und Hybridfahrzeugen
1. Auflage 2011, 138 Seiten
ISBN 978-3-8440-0622-3

ABISEA Band 60

Hennen, M.

Switched Reluctance Direct Drive with Integrated Distributed Inverter
1. Auflage 2012, 150 Seiten
ISBN 978-3-8440-0731-2

ABISEA Band 61

van Treek, D.

Position Sensorless Torque Control of Switched Reluctance Machines
1. Auflage 2012, 144 Seiten
ISBN 978-3-8440-1014-5

ABISEA Band 62

Bragard, M.

The Integrated Emitter Turn-Off Thyristor. An Innovative MOS-Gated High-Power Device
1. Auflage 2012, 172 Seiten
ISBN 978-3-8440-1152-4

ABISEA Band 63

Gerschler, J. B.

Ortsaufgelöste Modellbildung von Lithium-Ionen-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung
1. Auflage 2012, 350 Seiten
ISBN 978-3-8440-1307-8

ABISEA Band 64

Neuhaus, C.

Schaltstrategien für Geschaltete Reluktanzantriebe mit kleinem Zwischenkreis
1. Auflage 2012, 144 Seiten
ISBN 978-3-8440-1487-7

ABISEA Band 65

Butschen, T.

Dual-ICT- A Clever Way to Unite Conduction and Switching Optimized Properties in a Single Wafer
1. Auflage 2012, 178 Seiten
ISBN 978-3-8440-1771-7

ABISEA Band 66

Plum, T.

Design and Realization of High-Power MOS Turn-Off Thyristors
1. Auflage 2013, 130 Seiten
ISBN 978-3-8440-1884-4

ABISEA Band 67

Kiel, M.

Impedanzspektroskopie an Batterien unter besonderer Berücksichtigung von Batteriesensoren für den Feldeinsatz
1. Auflage 2013, 232 Seiten
ISBN 978-3-8440-1973-5

ABISEA Band 68

Brauer, H.

Schnelldrehender Geschalteter Reluktanzantrieb mit extremem Längendurchmesser-verhältnis
1. Auflage 2013, 202 Seiten
ISBN 978-3-8440-2345-9

ABISEA Band 69

Thomas, S.

A Medium-Voltage Multi-Level DC/DC Converter with High Voltage Transformation Ratio
1. Auflage 2014, 236 Seiten
ISBN 978-3-8440-2605-4

ABISEA Band 70

Richter, S.

Digitale Regelung von PWM Wechselrichtern mit niedrigen Trägerfrequenzen
1. Auflage 2014, 134 Seiten
ISBN 978-3-8440-2641-2

ABISEA Band 71

Bösing, M.

Acoustic Modeling of Electrical Drives - Noise and Vibration Synthesis based on Force Response Superposition
1. Auflage 2014, 208 Seiten
ISBN 978-3-8440-2752-5

ABISEA Band 72

Waag, W.

Adaptive algorithms for monitoring of lithium-ion batteries in electric vehicles
1. Auflage 2014, 242 Seiten
ISBN 978-3-8440-2976-5

ABISEA Band 73

Sanders, T.

Spatially Resolved Electrical In-Situ Measurement Techniques for Fuel Cells
1. Auflage 2014, 138 Seiten
ISBN 978-3-8440-3121-8

ABISEA Band 74

Baumhöfer, T.

Statistische Betrachtung experimenteller Alterungsuntersuchungen an Lithium-Ionen Batterien

1. Auflage 2015, 174 Seiten
ISBN 978-3-8440-3423-3

ABISEA Band 75

Andre, D.

Systematic Characterization of Ageing Factors for High-Energy Lithium-Ion Cells and Approaches for Lifetime Modelling Regarding an Optimized Operating Strategy in Automotive Applications

1. Auflage 2015, 210 Seiten
ISBN 978-3-8440-3587-2

ABISEA Band 76

Merei, G.

Optimization of off-grid hybrid PV-wind-diesel power supplies with multi-technology battery systems taking into account battery aging

1. Auflage 2015, 194 Seiten
ISBN 978-3-8440-4148-4

ABISEA Band 77

Schulte, D.

Modellierung und experimentelle Validierung der Alterung von Blei-Säure Batterien durch inhomogene Stromverteilung und Säureschichtung

1. Auflage 2016, 168 Seiten
ISBN 978-3-8440-4216-0

ABISEA Band 78

Schenk, M.

Simulative Untersuchung der Wicklungsverluste in Geschalteten Reluktanzmaschinen

1. Auflage 2016, 142 Seiten
ISBN 978-3-8440-4282-5

ABISEA Band 79

Wang, Y.

Development of Dynamic Models with Spatial Resolution for Electrochemical Energy Converters as Basis for Control and Management Strategies

1. Auflage 2016, 198 Seiten
ISBN 978-3-8440-4303-7

ABISEA Band 80

Ecker, M.

Lithium Plating in Lithium-Ion Batteries: An Experimental and Simulation Approach

1. Auflage 2016, 170 Seiten
ISBN 978-3-8440-4525-3

ABISEA Band 81

Zhou, W.

Modellbasierte Auslegungsmethode von Temperierungssystemen für Hochvolt-Batterien in Personenkraftfahrzeugen

1. Auflage 2016, 192 Seiten
ISBN 978-3-8440-4589-5

ABISEA Band 82

Lunz, B.

Deutschlands Stromversorgung im Jahr 2050
Ein szenariobasiertes Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Systemvarianten und Flexibilitätsoptionen

1. Auflage 2016, 196 Seiten
ISBN 978-3-8440-4627-4

ABISEA Band 83

Hofmann, A.

Direct Instantaneous Force Control Key to Low-Noise Switched Reluctance Traction Drives

1. Auflage 2016, 244 Seiten
ISBN 978-3-8440-4715-8

ABISEA Band 84

Budde-Meiwes, H.

Dynamic Charge Acceptance of Lead-Acid Batteries for Micro-Hybrid Automotive Applications

1. Auflage 2016, 168 Seiten
ISBN 978-3-8440-4733-2

ABISEA Band 85

Engel, S. P.

Thyristor-Based High-Power On-Load Tap Changers Control under Harsh Load Conditions

1. Auflage 2016, 170 Seiten
ISBN 978-3-8440-4986-2

ABISEA Band 86

Van Hoek, H.

Design and Operation Considerations of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for Low-Power Applications with Wide Voltage Ranges

1. Auflage 2017, 242 Seiten
ISBN 978-3-8440-5011-0

ABISEA Band 87

Diekhans, T.

Wireless Charging of Electric Vehicles - a Pareto-Based Comparison of Power Electronic Topologies

1. Auflage 2017, 156 Seiten
ISBN 978-3-8440-5048-6

ABISEA Band 88

Lehner, S.

Reliability Assessment of Lithium-Ion Battery Systems with Special Emphasis on Cell Performance Distribution

1. Auflage 2017, 202 Seiten
ISBN 978-3-8440-5090-5

Aachener Beiträge des ISEA

ABISEA Band 89

Käbitz, S.

Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Elektroanalytik und elektrochemischer Impedanzspektroskopie
1. Auflage 2016, 258 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2016-12094

ABISEA Band 90

Witzenhausen, H.

Elektrische Batteriespeichermodelle: Modellbildung, Parameteridentifikation und Modellreduktion
1. Auflage 2017, 286 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-03437

ABISEA Band 91

Münnix, J.

Einfluss von Stromstärke und Zyklentiefe auf graphitische Anoden
1. Auflage 2017, 178 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-01915

ABISEA Band 92

Pilatowicz, G.

Failure Detection and Battery Management Systems of Lead-Acid Batteries for Micro-Hybrid Vehicles
1. Auflage 2017, 212 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-09156

ABISEA Band 93

Drillkens, J.

Aging in Electrochemical Double Layer Capacitors: An Experimental and Modeling Approach
1. Aufl. 2017, 179 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2018-223434

ABISEA Band 94

Magnor, D.

Globale Optimierung netzgekoppelter PV-Batteriesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Batteriealterung
1. Auflage 2017, 210 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-06592

ABISEA Band 95

Iliku, M.

Elucidation and Comparison of the Effects of Lithium Salts on Discharge Chemistry of Nonaqueous Li-O₂ Batteries
1. Aufl. 2018, 160 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2018-223782

ABISEA Band 96

Schmalstieg, J.

Physikalisch-elektrochemische Simulation von Lithium-Ionen-Batterien: Implementierung, Parametrierung und Anwendung
1. Aufl. 2017, 176 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-04693

ABISEA Band 97

Soltau, N.

High-Power Medium-Voltage DC-DC Converters: Design, Control and Demonstration
1. Aufl. 2017, 176 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-04084

ABISEA Band 98

Stieneker, M.

Analysis of Medium-Voltage Direct-Current Collector Grids in Offshore Wind Parks
1. Aufl. 2017, 144 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-04667

ABISEA Band 99

Masomtob, M.

A New Conceptual Design of Battery Cell with an Internal Cooling Channel
1. Aufl. 2017, 167 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2018-223281

ABISEA Band 100

Marongiu, A.

Performance and Aging Diagnostic on Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Strategies
1. Aufl. 2017, 222 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-09944

ABISEA Band 101

Gitis, A.

Flaw detection in the coating process of lithium-ion battery electrodes with acoustic guided waves
1. Aufl. 2017, 132 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-099519

ABISEA Band 102

Neeb, C.

Packaging Technologies for Power Electronics in Automotive Applications
1. Aufl. 2017, 132 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2018-224569

ABISEA Band 103

Adler, F. S.

A Digital Hardware Platform for Distributed Real-Time Simulation of Power Electronic Systems
1. Aufl. 2017, 156 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-10761

ABISEA Band 104

Becker, J.

Flexible Dimensionierung und Optimierung hybrider Lithium-Ionenbatteriespeichersysteme mit verschiedenen Auslegungszielen

1. Aufl., 2017, 157 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-09278

ABISEA Band 105

Warnecke, A.

Degradation Mechanisms in NMC Based Lithium-Ion Batteries

1. Aufl. 2017, 158 Seiten
DOI: 10.18154/RWTH-2017-09646

ABISEA Band 106

Taraborrelli, S.

Bidirectional Dual Active Bridge Converter using a Tap Changer for Extended Voltage Ranges

1. Aufl. 2017

ABISEA Band 107

Sarriegi, G.

SiC and GaN Semiconductors – The Future Enablers of Compact and Efficient Converters for Electromobility

1. Aufl. 2017

ABISEA Band 108

Senol, M.

Drivetrain Integrated Dc-Dc Converters utilizing Zero Sequence Currents

1. Aufl. 2017

ABISEA Band 109

Koijma, T.

Efficiency Optimized Control of Switched Reluctance Machines

1. Aufl. 2017

ABISEA Band 110

Lewerenz, M.

Dissection and Quantitative Description of Aging of Lithium-Ion Batteries Using Non-Destructive Methods Validated by Post-Mortem-Analyses

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 111

Büngeler, J.

Optimierung der Verfügbarkeit und der Lebensdauer von Traktionsbatterien für den Einsatz in Flurförderfahrzeugen

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 112

Wegmann, R.

Betriebsstrategien und Potentialbewertung hybrider Batteriespeichersysteme in Elektrofahrzeugen

1. Auflage 2018

ABISEA Band 113

Nordmann, H.

Batteriemanagementsysteme unter besonderer Berücksichtigung von Fehlererkennung und Peripherieanalyse

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 114

Engelmann, G.

Reducing Device Stress and Switching Losses Using Active Gate Drivers and Improved Switching Cell Design

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 115

Klein-Heßling, A.

Active DC-Power Filters for Switched Reluctance Drives during Single-Pulse Operation

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 116

Burkhart, Bernhard

Switched Reluctance Generator for Range Extender Applications - Design, Control and Evaluation

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 117

Biskoping, Matthias

Discrete Modeling and Control of a versatile Power Electronic Test Bench with Special Focus on Central Photovoltaic Inverter Testing

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 118

Schubert, Michael

High-Precision Torque Control of Inverter-Fed Induction Machines with Instantaneous Phase Voltage Sensing

1. Aufl. 2018

ABISEA Band 119

Van der Broeck, Christoph

Methodology for Thermal Modeling, Monitoring and Control of Power Electronic Modules

1. Aufl. 2019

ABISEA Band 120

Hust, Friedrich Emanuel

Physico-chemically motivated parameterization and modelling of real-time capable lithium-ion battery models – a case study on the Tesla Model S battery

1. Aufl. 2019

ABISEA Band 121

Ralev, Iliya

Accurate Torque Control of Position Sensorless Switched Reluctance Drives

1. Aufl. 2019

Aachener Beiträge des ISEA

ABISEA Band 122

Sarah Paul Ayeng'o

Optimization of number of PV cells connected in series for a direct-coupled PV system with lead-acid and lithium-ion batteries

1. Aufl. 2019

ABISEA Band 123

Stefan Andreas Koschik

Permanenterregte Synchronmaschinen mit verteilter Einzelzahnsteuerung - Regelkonzepte und Betriebsstrategien für hochintegrierte Antriebssysteme

1. Aufl. 2019

ABISEA Band 124

Alexander Farmann

A comparative study of reduced-order equivalent circuit models for state-of-available-power prediction of lithium-ion batteries in electric vehicles

1. Aufl. 2019

Zum Erreichen der Klimaziele muss der Verkehrssektor die CO₂-Emissionen deutlich reduzieren, was die Betrachtung alternativer Antriebsmöglichkeiten auch für die energieintensive Anwendung der Lastkraftwagen im Güterfernverkehr erfordert. In dieser Arbeit werden drei aktuell diskutierte Elektrifizierungskonzepte für Fernverkehr-Lastkraftwagen betrachtet, welche die fossilen Antriebe ersetzen könnten: Batteriegetriebene, oberleitungsversorgte und brennstoffzellengetriebene Lastkraftwagen.

Zum Ermitteln des Energieverbrauchs der alternativ angetriebenen Lastkraftwagen und der konventionellen Diesellastkraftwagen werden in dieser Arbeit Fahrzeugsimulationsmodelle entwickelt. Anschließend werden die Antriebskomponenten entsprechend den Anforderungen des Güterfernverkehrs ausgelegt und ihre Integration ins Fahrzeug untersucht.

Neben der technischen Machbarkeit werden die Lebenszykluskosten dieser Fahrzeuge sowie der entsprechenden Infrastruktur aus Ladestationen, Oberleitungen bzw. Wasserstofftankstellen untersucht. Die Lebenszykluskosten werden für verschiedene Auslegungsszenarien der Fahrzeuge und der Infrastruktur (z.B. Batteriekapazität und Oberleitungslänge) ermittelt und verglichen. Die durchgeführte Ökobilanzierung umfasst die Herstellung und den Betrieb der Fahrzeuge und der Infrastruktur und zeigt die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Technologien in den Wirkungskategorien Treibhauspotential, Primärenergiebedarf, Versauerungspotential und Überdüngungspotential.