

Modellbasierte Evaluation der Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten

Adam Waclaw, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Johannes Betz

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr. rer. pol. Christoph Goebel

Die Dissertation wurde am 06.11.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 12.02.2024 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in den Jahren 2016 bis 2020 im Rahmen von zwei Forschungsprojekten der Projektträger Landeshauptstadt München sowie Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, der die Arbeit durch fachliche Anregungen, entgegengebrachtes Vertrauen und die Schaffung eines freien und selbstbestimmten Arbeitsumfeldes hervorragend betreut hat.

Ebenso danke ich meinem Zweitprüfer, Prof. Dr. rer. pol. Christoph Goebel, für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Betz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein herzlicher Dank geht an meine Projektpartner, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Christl von der Handwerkskammer München sowie Herrn Dr. Uwe Hera und Frau Lisa Thalmaier von der Landeshauptstadt München, die mir in fachlichen und organisatorischen Fragen jederzeit eine große Hilfe waren. Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitgliedern der Gruppe Smarte Mobilität für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und Ratschlägen während der gesamten Zeit meiner Arbeit bedanken.

Meinen Korrekturlesern, Michael Wittmann und Johannes Betz, danke ich für die investierte Zeit und die vielen hilfreichen Anregungen.

Bei allen Kollegen und Freunden am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik möchte ich mich für die schöne gemeinsame Zeit bedanken. Die fachlichen Diskussionen, die intensiven Doktorandenkolloquien und die vielen kleinen Heiterkeiten, die den Arbeitsalltag bereichert haben, werden mir immer in bester Erinnerung bleiben.

Ein großes Dankeschön gilt auch allen von mir betreuten Studenten, die durch ihr Engagement und anregende Diskussionen das Forschungsprojekt unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern. Ihr habt mir mein Studium ermöglicht und mich auf meinem Lebensweg bedingungslos unterstützt. Mein größter Dank gilt meiner Frau Sandra und meinem Sohn Vincent. Ihr habt mir auch in den schwierigsten Zeiten des Promotionsvorhabens zur Seite gestanden und mir immer wieder die schönen Seiten des Lebens gezeigt. Euch beiden widme ich diese Arbeit.

München, Oktober 2023

Adam Waclaw

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Grundlagen der Elektromobilität	5
2.1.1 Elektrofahrzeuge.....	5
2.1.2 Ladeinfrastruktur.....	6
2.2 Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten	7
2.2.1 Integrationsansätze für batterieelektrische Fahrzeuge.....	8
2.2.2 Elektrifizierungspotential.....	9
2.2.3 Ladeinfrastrukturkonzept.....	12
2.2.4 Netzanbindung.....	15
2.2.5 Last- und Lademanagement.....	17
2.3 Ableitung der Themenstellung	20
2.3.1 Kritik und Forschungslücken.....	21
2.3.2 Forschungsfragen.....	22
3 Herleitung des Vorgehens	23
3.1 Datensatz	23
3.2 Lösungsansatz	27
3.3 Vorgehen	28
3.4 Aufbau der Arbeit	30
4 Datenaufbereitung und -analyse	31
4.1 Aufbereitung der Fahrprofile	31
4.1.1 Vorverarbeitung.....	31
4.1.2 Klassifikation nach Einsatzzwecken.....	33
4.2 Mobilitätsanalyse	34

4.2.1	Fahrzeugstatus	35
4.2.2	Fahrdistanzen.....	37
4.2.3	Verfügbare Ladefenster	39
5	Simulationsmodell	41
5.1	Architektur des Simulationsmodells	41
5.2	Teilmodelle	42
5.2.1	Längsdynamikmodell	42
5.2.2	Lademodell	47
5.2.3	Last- und Lademanagement-Modell	49
5.2.4	Optimierungsalgorithmus.....	50
5.3	Bewertungsmaße	52
5.3.1	Auswirkungen auf Flottenbetrieb	52
5.3.2	Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit.....	55
6	Simulationsszenarien	59
6.1	Erste Simulationsstudie: Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge	59
6.1.1	Definition batterieelektrischer Fahrzeuge.....	59
6.1.2	Definition der Ladeinfrastruktur	61
6.1.3	Zusammenfassung der Simulationsszenarien	61
6.2	Zweite Simulationsstudie: Aufbau einer eigenen Ladeinfrastruktur	62
6.2.1	Modellierung batterieelektrischer Flotten	62
6.2.2	Definition der Ladeinfrastruktur	66
6.2.3	Zusammenfassung der Simulationsszenarien	67
7	Ergebnisse	69
7.1	Auswirkungen auf Flottenbetrieb	69
7.1.1	Fahrzeugantriebsleistung	69
7.1.2	Fahrzeugreichweite	72
7.1.3	Zwischenladebedarf	75
7.2	Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit	78
7.2.1	Energiekosten für Laden an eigener Ladeinfrastruktur	78
7.2.2	Energiekosten für Laden an fremder Ladeinfrastruktur und Gesamtenergiekosten	85
8	Diskussion	89
8.1	Forschungsfragen	89
8.1.1	Mobilitätsmerkmale typischer Einsatzzwecke.....	89
8.1.2	Auswirkungen auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit	90

8.1.3 Einfluss von Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl	93
8.1.4 Am besten geeignete Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur.....	94
8.2 Allgemeine Bewertung	95
8.3 Einschränkungen	96
8.4 Relevanz	96
9 Zusammenfassung und Ausblick	99
Abbildungsverzeichnis.....	i
Tabellenverzeichnis	iii
Vorveröffentlichungsliste	xxi
Betreute Studienarbeiten.....	xxiii
Anhang	xxv

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
BEV	Battery Electric Vehicle
DC	Direct Current
EQUAL	Equal Distribution
EVDB	Electric Vehicle Database
FCFS	First Come First Serve
GPS	Global Positioning System
KEP	Kurier-, Express- und Paketdienst
KID	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010
Lkw	Lastkraftwagen
LIS	Ladeinfrastruktur
LSOCF	Lowest State of Charge First
Nfz	Nutzfahrzeug
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
TCO	Total Cost of Ownership
WLAN	Wireless Local Area Network
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
#	-	Platzhalterindex
α	°	Neigungswinkel der Straße
A	%	Autarkierate eines Flottenfahrprofils
A_f	m ²	Stirnfläche eines Elektrofahrzeugs
$b_{100\text{km},\text{EVDB}}$	kWh/100km	Durchschnittsverbrauch eines Elektrofahrzeugs laut EVDB-Datenbank
$b_{100\text{km},\text{sim}}$	kWh/100km	Durchschnittsverbrauch eines Elektrofahrzeugs laut Simulationsmodell
$b_{100\text{km},\text{WLTP}}$	kWh/100km	Durchschnittsverbrauch eines Elektrofahrzeugs laut WLTP-Fahrzyklus
c_r	-	Rollwiderstandsbeiwert eines Elektrofahrzeugs
c_d	-	Luftwiderstandsbeiwert eines Elektrofahrzeugs
C_{batt}	kWh	Nennkapazität der Batterie eines Elektrofahrzeugs
D_{day}	km	Fahrdistanz pro Tag (Tagesdistanz)
D_{tour}	km	Fahrdistanz pro Tour (Tourdistanz)
ϵ_m	-	Drehmassenzuschlagsfaktor eines Elektrofahrzeugs
η^*	-	Mitte der Lösungsliste des Optimierungsalgorithmus
η_{tot}	-	Gesamtwirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs
η_{dr}	-	Antriebsstrangwirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs
$\eta_{\text{dr,down}}$	-	Untere Schranke für den Antriebsstrangwirkungsgrad
$\eta_{\text{dr,up}}$	-	Obere Schranke für den Antriebsstrangwirkungsgrad
η_{ch}	-	Ladewirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs
η_{rec}	-	Rekuperationswirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs
$E_{\text{i-ch,Fzg,w}}$	MWh/Fzg./Woche	Zwischenladeenergie einer Flotte pro Fahrzeug und Woche
$E_{\text{FS,a,vor}}$	MWh/Jahr	Energieverbrauch am Firmenstandort pro Jahr vor der Flottenelektrifizierung (Grundlastverbrauch)
$E_{\text{FS,a,nach}}$	MWh/Jahr	Energieverbrauch am Firmenstandort pro Jahr nach der Flottenelektrifizierung

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$E_{ch,sum}$	kWh	Ladeenergie einer Flotte
$E_{ch,sum,a}$	kWh/Jahr	Ladeenergie einer Flotte pro Jahr
$E_{ch,sum,inf}$	kWh	Ladeenergie einer Flotte ohne Lastmanagement
E_{tot}	kWh	Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs
$E_{tot,sum,a}$	kWh/Jahr	Energieverbrauch einer Flotte pro Jahr
EG_{RW}	%	Erfüllungsgrad eines Fahrprofils bzgl. der Fahrzeugreichweite
EG_{FL}	%	Erfüllungsgrad eines Fahrprofils bzgl. der Fahrzeugleistung
F_{tot}	N	Fahrwiderstandskraft eines Elektrofahrzeugs
F_r	N	Rollwiderstandskraft eines Elektrofahrzeugs
F_a	N	Luftwiderstandskraft eines Elektrofahrzeugs
F_g	N	Steigungswiderstandskraft eines Elektrofahrzeugs
F_m	N	Beschleunigungswiderstandskraft eines Elektrofahrzeugs
i	-	Allgemeiner Index
I_{LA}	C-Rate	Ladeabschaltstrom der Batterie eines Elektrofahrzeugs
JBD	h/a	Jahresbenutzungsdauer
$k_{ch,BEV}$	-	Ladekorrekturfaktor der Batterie eines Elektrofahrzeugs
k	-	Allgemeiner Index
k_{APr}	Ct/kWh	Arbeitspreis
k_{GPr}	€/Jahr	Grundpreis pro Jahr
k_{f-LIS}	€/kWh	Strompreis für Laden an fremder Ladeinfrastruktur
k_{LPr}	€/kW	Leistungspreis
$K_{e-LIS,Fzg,a}$	€/Fzg./Jahr	Energiekosten für Laden einer Flotte an eigener Ladeinfrastruktur pro Fahrzeug und Jahr
$K_{f-LIS,Fzg,a}$	€/Fzg./Jahr	Energiekosten für Laden einer Flotte an fremder Ladeinfrastruktur pro Fahrzeug und Jahr
$K_{LIS,Fzg,a}$	€/Fzg./Jahr	Gesamtenergiekosten für Laden einer Flotte pro Fahrzeug und Jahr
$K_{NEG,vor}$	€/Jahr	Netzentgelte einer Flotte pro Jahr vor der Flottenelektrifizierung
$K_{NEG,nach}$	€/Jahr	Netzentgelte einer Flotte pro Jahr nach der Flottenelektrifizierung
$K_{Str,vor}$	€/Jahr	Stromkosten einer Flotte pro Jahr vor der Flottenelektrifizierung
$K_{Str,nach}$	€/Jahr	Stromkosten einer Flotte pro Jahr nach der Flottenelektrifizierung
l	-	Allgemeiner Index

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
λ	W/°C	Umrechnungsfaktor des Klimatisierungsmodells
μ	-	Erwartungswert
m_{veh}	kg	Fahrzeuggewicht eines Elektrofahrzeugs
m_{per}	kg	Gewicht des Fahrers
$m_{\text{veh,empty}}$	kg	Fahrzeugleergewicht eines Elektrofahrzeugs
m_{PI}	kg	Fahrzeugzuladung eines Elektrofahrzeugs
MLG	km/h	Mindestladegeschwindigkeit eines Ladefensters
N_{FP}	-	Anzahl der Fahrprofile eines Einsatzzwecks
N_{FFP}	-	Anzahl der Flottenfahrprofile eines Einsatzzwecks
N_{Fzg}	-	Anzahl der Fahrprofile eines Flottenfahrprofils (Flottengröße)
N_{KW}	-	Anzahl der Kalenderwochen im Jahr
$N_{\text{t,BEV}}$	-	Anzahl der Zeitschritte des Längsdynamikmodells
$N_{\text{t,LIS}}$	-	Anzahl der Zeitschritte des Lademodells
N_{tour}	-	Anzahl der Touren eines Fahrprofils
$N_{\text{tour,RW}}$	-	Anzahl erfolgreich absolvierter Touren bzgl. Fahrzeugreichweite
N_{trip}	-	Anzahl der Fahrten eines Fahrprofils
$N_{\text{trip,FL}}$	-	Anzahl erfolgreich absolvierter Fahrten bzgl. Fahrzeugleistung
$N_{\text{ÜS}}$	-	Anzahl sich überschneidender Fahrprofile zweier Flottenfahrprofile
P^*	kW	Mitte der Lösungsliste des Optimierungsalgorithmus
P_{12V}	kW	Leistung des 12-Volt-Bordnetzes eines Elektrofahrzeugs
P_{dr}	kW	Antriebsleistung eines Elektrofahrzeugs
$P_{\text{em,max}}$	kW	Maximalleistung des Elektromotors eines Elektrofahrzeugs
$P_{\text{em,nom}}$	kW	Nennleistung des Elektromotors eines Elektrofahrzeugs
P_{GL}	kW	Grundlast bzw. Grundlastprofil am Firmenstandort
$P_{\text{GL,min}}$	kW	Minimum des Grundlastprofils
P_{cli}	kW	Leistung der Innenraumklimatisierung eines Elektrofahrzeugs
$P_{\text{cli,max}}$	kW	Maximale Leistung der Innenraumklimatisierung
$P_{\text{cli,stat}}$	kW	Leistung der Innenraumklimatisierung während der stationären Phase
P_{ch}	kW	Ladeleistung eines Elektrofahrzeugs

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$P_{ch, BEV}$	kW	Fahrzeugseitig zur Verfügung stehende Ladeleistung
$P_{ch, BEV, max}$	kW	Fahrzeugseitige Maximalladeleistung
$P_{ch, inst}$	kW	Installierte Ladeleistung einer Ladestation
$P_{ch, LIS}$	kW	Infrastrukturseitig zur Verfügung stehende Ladeleistung
$P_{ch, sum}$	kW	Gesamtladeleistung einer Flotte
$P_{ch, sum, max}$	kW	Maximale Gesamtladeleistung einer Flotte
P_{LA}	kW	Ladeabschaltleistung der Batterie eines Elektrofahrzeugs
$P_{LSp, nach}$	W	Lastspitze am Firmenstandort nach der Flottenelektrifizierung
P_{LSp}	W	Lastspitze am Firmenstandort vor der Flottenelektrifizierung
$P_{MXL, down}$	kW	Untere Schranke für die Maximallast
$P_{MXL, dyn}$	kW	Maximallast eines dynamischen Lastmanagements
$P_{MXL, stat}$	kW	Maximallast eines statischen Lastmanagements
$P_{MXL, up}$	kW	Obere Schranke für die Maximallast
P_{net}	kW	Netzleistung am Firmenstandort
$P_{net, max}$	kW	Maximale Netzleistung
P_{aux}	kW	Nebenverbraucherleistung eines Elektrofahrzeugs
P_{tot}	kW	Gesamtleistung eines Elektrofahrzeugs
$Q_{0,25}$	-	Erstes bzw. unteres Quartil
$Q_{0,75}$	-	Drittes bzw. oberes Quartil
r_{act}	s/°C	Umrechnungsfaktor des Klimatisierungsmodells
r_{inact}	s/°C	Umrechnungsfaktor des Klimatisierungsmodells
ρ_a	kg/m ³	Luftdichte
σ	-	Standardabweichung
S	-	Eignung eines Elektrofahrzeugs für ein Fahrprofil
Δt_{LIS}	s	Zeitschrittweite des Lademodells
Δt_{BEV}	s	Zeitschrittweite des Längsdynamikmodells
$\Delta t_{cli, act}$	s	Dauer der ersten instationären Phase des Klimatisierungsmodells
$\Delta t_{cli, inact}$	s	Dauer der zweiten instationären Phase des Klimatisierungsmodells
Δt_{olr}	s	Dauer des Überlastbereichs

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Δt_{vrz}	s	Verzögerung des Fahrtendes
Δt_{stop}	s	Dauer eines Ladefensters bzw. Stopps
Δt_{trip}	s	Dauer einer Fahrt
t_k	-	k -te Zeitschritt des Längsdynamikmodells
t_j	-	j -te Zeitschritt des Lademodells
t_{start}	-	Zeitschritt, der den Beginn einer Fahrt definiert
t_{end}	-	Zeitschritt, der das Ende einer Fahrt definiert
$t_{tour,end}$	-	Zeitschritt, der das Ende einer Tour definiert
T_{ext}	°C	Außentemperatur
T_{int}	°C	Innenraumtemperatur eines Elektrofahrzeugs
$T_{int,target}$	°C	Soll-Innenraumtemperatur eines Elektrofahrzeugs
U_{LS}	V	Ladeschlussspannung der Batterie eines Elektrofahrzeugs
U_{nom}	V	Nennspannung der Batterie eines Elektrofahrzeugs
VG	%	Verzögerungsgrad einer Fahrt
VG_{max}	%	Höchster ausreißerbereinigter Verzögerungsgrad eines Fahrprofils
VG	%	Menge der Verzögerungsgrade eines Fahrprofils
x	-	Menge der Fahrprofil eines Einsatzzwecks
x_i	-	i -tes Fahrprofil eines Einsatzzwecks
ζ	%	Ladezustand der Batterie eines Elektrofahrzeugs (SOC)
ζ_{end}	%	Ladezustand der Batterie am Ende einer Tour (Rest-SOC)
ζ_{end}	%	Menge der Rest-SOC eines Fahrprofils
$\zeta_{end,min}$	%	Tiefester ausreißerbereinigter Rest-SOC eines Fahrprofils
ζ_{min}	%	Untere Grenze des SOC
ζ_{LUP}	%	Ladeumschaltpunkt der Batterie eines Elektrofahrzeugs

1 Einleitung

1.1 Motivation

Um Deutschland als Leitmarkt für Elektromobilität zu etablieren, hat sich die Bundesregierung das Ziel von „15 Millionen vollelektrische[n] Pkw“ [1, S. 27] sowie „einer Million öffentlich und diskriminierungsfrei zugänglichen Ladepunkten“ [1, S. 51-52] bis 2030 gesetzt. Zu Beginn des Jahres 2023 waren in Deutschland erst 1,0 Millionen vollelektrische Personenkraftwagen (Pkw) zugelassen [2]. Dies bedeutet, dass bis zum Jahr 2030 14-mal mehr vollelektrische Pkw integriert werden müssen als bisher, um das Ziel der Bundesregierung zu erreichen.

Neben privaten Fahrzeugnutzern zählen insbesondere gewerbliche Fahrzeugnutzer als Schlüssel für den Durchbruch der Elektromobilität. Zum einen stellen sie einen wesentlichen Bestandteil des Fahrzeugmarktes dar. So entfallen rund 65 % der Neuzulassungen in Deutschland auf das Gewerbe [3], [4]. Zum anderen werden gewerbliche Fahrzeuge typischerweise nach wenigen Jahren weiterverkauft [5, S. 20], sodass sie durch den Gebrauchtwagenmarkt die Zusammensetzung des privaten Fahrzeugbestands maßgeblich beeinflussen [6, S. 15]. Gewerblich genutzte Fahrzeuge sind daher ein wesentlicher Hebel, um das ambitionierte Ziel der Bundesregierung zu erreichen.

Hinzu kommt die relativ hohe Eignung des gewerblichen Bereichs für den Einsatz von Elektrofahrzeugen [7]. Im gewerblichen Verkehr sind die beiden Haupthindernisse von Elektrofahrzeugen, die begrenzte Reichweite und die hohen Anschaffungskosten, leichter zu überwinden als im privaten Pkw-Einsatz [8].

So sind die täglich zurückgelegten Strecken im gewerblichen Bereich in der Regel bekannt [9, S. 1941]. Sei es, weil die Fahrer gesetzlich verpflichtet sind, ein Fahrtenbuch zu führen, weil das Fuhrparkmanagement diese Daten für interne Statistiken aufzeichnet oder, weil das Unternehmen die Routen im Rahmen seiner Geschäftstätigkeit plant [9, S. 1941]. Bei der Routenplanung können die Einschränkungen von Elektrofahrzeugen entsprechend berücksichtigt werden [10, S. 87]. Zudem werden viele gewerbliche Flotten auf mehr oder weniger festen Routen eingesetzt [10, S. 87]. Die Fahrten weisen somit eine hohe Regelmäßigkeit auf [11]. Dadurch sind potenzielle Reichweitenüberschreitungen besser vorhersehbar, sodass die jeweilige Fahrt im Zweifelsfall leichter auf konventionelle Fahrzeuge oder Fahrzeuge mit höherer Reichweite umdisponiert werden kann.

Dem hohen Anschaffungspreis von Elektrofahrzeugen stehen geringere Betriebskosten gegenüber, wobei die jährliche Fahrleistung im gewerblichen Bereich üblicherweise höher als im privaten Bereich ist [12], [13], [14].

Folgerichtig wächst auch das Interesse der Unternehmen an Elektrofahrzeugen stetig. So haben laut einer Umfrage aus dem Jahr 2021 bereits 27 % der befragten Unternehmen bereits Elektrofahrzeuge eingeführt. Weitere 26 % ziehen die Einführung von Elektrofahrzeugen in den nächsten drei Jahren in Betracht [15, S. 32]. Die einzelnen Motive für die Einführung von Elek-

tromobilität sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich gewichtet. Laut Umfragen und Studien (Stand 2021) zählen zu den wichtigsten Motiven der Umwelt- und Klimaschutz, wirtschaftliche Vorteile durch geringere Betriebskosten und steuerliche Anreize sowie aktuelle oder zukünftige restriktive öffentliche Regelungen (Umweltzonen, Parkraum, etc.) [16, S. 10], [15, S. 36ff]. Waren vor einigen Jahren noch die Erprobung der neuen Technologie und ein positiver Imageeffekt wichtige Motive [14, S. 130], [17, S. 32f], [5, S. 24], so werden diese heute als weniger wichtig angesehen.

Vor diesem Hintergrund scheint der Weg für die Elektromobilität im Gewerbe geebnet und der Umstieg auf Elektrofahrzeuge in vollem Gange zu sein. Tatsächlich war jedoch im Jahr 2022 nur etwa jede vierte Neuzulassung im Gewerbe ein batterieelektrisches Fahrzeug [18]. Knapp drei Viertel der neu zugelassenen Fahrzeuge im gewerblichen Bereich werden also weiterhin überwiegend von Verbrennungsmotoren angetrieben, was den Gebrauchtwagenmarkt voraussichtlich noch einige Jahre prägen wird.

Insbesondere für gewerbliche Flottenbetreiber ist der Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge mit großen Herausforderungen verbunden. Die größten Herausforderungen sehen Flottenbetreiber in der mangelnden Flexibilität aufgrund hoher Ladedauer und geringer Verfügbarkeit öffentlicher Lademöglichkeiten, in der geringen Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge sowie in wirtschaftlichen Nachteilen aufgrund hoher Anschaffungskosten [16, S. 10f], [15, S. 46].

Um diesen Herausforderungen erfolgreich begegnen zu können, ist insbesondere im komplexen Umfeld gewerblicher Fahrzeugflotten eine sorgfältige und detaillierte Planung der Elektrifizierung erforderlich [19, S. 20f]. So sollte bereits im Vorfeld der Elektrifizierung geklärt werden, wie Elektrofahrzeuge integriert und die dafür in der Regel notwendige Ladeinfrastruktur aufgebaut werden kann, um negative Auswirkungen auf den Flottenbetrieb und die Wirtschaftlichkeit möglichst zu vermeiden. Hier sind insbesondere kleinere Unternehmen, die keine Elektromobilitätsexperten beschäftigen oder externe Dienstleister bezahlen können, auf Erfahrungswerte und Best-Practice-Empfehlungen angewiesen. Diese fehlen jedoch bislang weitgehend.

1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund ist es das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten abzuleiten. Dies soll auf Basis einer modellbasierten Evaluation der Flottenelektrifizierung erfolgen. Die daraus abzuleitenden Aussagen und Empfehlungen sollen Flottenbetreiber bei der Planung der Elektrifizierung der eigenen Flotte unterstützen und somit eine flächendeckende Elektrifizierung im Gewerbe fördern.

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist ein Bewegungsdatensatz verschiedener gewerblicher Fahrzeugflotten aus dem Großraum München. Zunächst sollen die Einsatzzwecke dieser Fahrzeugflotten identifiziert und anhand ihrer wesentlichen Mobilitätsmerkmale beschrieben werden. Damit soll die Möglichkeit geschaffen werden, die nachfolgenden Untersuchungen in Abhängigkeit dieser Einsatzzwecke durchzuführen, um die Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung flottenübergreifend ableiten zu können.

Für die Untersuchung der Flotten sollen Methoden und Modelle entwickelt werden, mit denen eine Elektrifizierung der Flotten simuliert und ausgewertet werden kann. Dabei soll sowohl der Umstieg auf Elektrofahrzeuge als auch der Aufbau einer unternehmenseigenen Ladeinfrastruktur untersucht werden. Die Simulationen und Auswertungen sollen zum einen die Auswirkungen

gen der Elektrifizierung auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit aufzeigen. Zum anderen sollen die für die jeweilige Flotte am besten geeigneten Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastrukturen identifiziert werden.

Die Ergebnisse dieser Simulationen und Auswertungen sollen schließlich in Abhängigkeit der Einsatzzwecke umfassend analysiert werden, um darauf aufbauend flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung für die untersuchten Einsatzzwecke abzuleiten.

2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel zeigt zunächst die Grundlagen der Elektromobilität auf. Danach folgt eine Übersicht bisheriger Forschungsarbeiten zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten. Abschließend werden auf Basis einer Zusammenfassung sowie einer Kritik am bisherigen Forschungsstand die Forschungsfragen dieser Dissertation abgeleitet.

2.1 Grundlagen der Elektromobilität

Elektromobilität umfasst laut Hildebrandt [20, S. 20] neben einem Verkehrssystem (Straßen, Parkraum, etc.) und einem energiewirtschaftlichen System (Stromnetz, Energielieferung etc.) insbesondere Elektrofahrzeuge sowie eine Ladeinfrastruktur (LIS) (Unterkapitel 2.1.2) als zentrale Schnittstelle zwischen den Teilsystemen. Die folgenden Unterkapitel befassen sich daher mit den Grundlagen der Elektrofahrzeuge (Unterkapitel 2.1.1) und der LIS (Unterkapitel 2.1.2).

2.1.1 Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeugkategorien: Im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung [21, S. 6f] werden fünf unterschiedliche Elektrofahrzeugkategorien definiert:

- Batterieelektrische Fahrzeuge (engl.: Battery Electric Vehicle (BEV)): Der Antrieb erfolgt ausschließlich durch einen Elektromotor, der durch eine am Stromnetz aufladbare Batterie mit elektrischer Energie versorgt wird.
- Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung: Der Antrieb erfolgt ausschließlich durch einen Elektromotor, der durch eine am Stromnetz aufladbare Batterie mit elektrischer Energie versorgt wird. Zur Reichweitenverlängerung wird die Batterie durch einen kleinen Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank während der Fahrt zusätzlich aufgeladen.
- Plug-In-Hybridfahrzeug: Der Antrieb erfolgt durch einen Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank und einen Elektromotor, der durch eine am Stromnetz aufladbare Batterie mit elektrischer Energie versorgt wird.
- Hybridfahrzeuge: Der Antrieb erfolgt durch einen Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank und einen Elektromotor, der durch eine am Stromnetz nicht-aufladbare Batterie mit elektrischer Energie versorgt wird.
- Brennstoffzellenfahrzeuge: Antrieb erfolgt ausschließlich durch einen Elektromotor, der durch eine Brennstoffzelle mit elektrischer Energie versorgt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich BEV untersucht. Gründe hierfür sind insbesondere die lokale Emissionsfreiheit [22, S. 8f], die geringere Lärmbelastung [22, S. 11] und

der im Vergleich zu den anderen Elektrofahrzeugkategorien deutlich einfachere Aufbau des Antriebsstrangs [23, S. 67ff]. Dementsprechend wird dem BEV langfristig sowohl ökologisch als auch ökonomisch die größere Bedeutung beigemessen [24, S. 4].

Technische Grundlagen von BEV: Ein BEV ist ein Fahrzeug, dessen Antriebssystem elektrische in mechanische Energie umwandelt [25, S. 11]. Im Gegensatz zum konventionellen Antriebssystem, d. h. Verbrennungsmotor und Kraftstofftank, wird ein BEV von einem Elektromotor angetrieben, der über eine Leistungselektronik mit elektrischer Energie aus der Traktionsbatterie versorgt wird [26, S. 12]. Als Elektromotoren kommen fast ausschließlich Drehstrommotoren (sowohl als permanent- und fremderregte Synchronmaschinen als auch als Asynchronmaschinen) zum Einsatz [27, S. 64]. Unter den Traktionsbatterien hat sich die Lithium-Ionen-Batterie aufgrund hoher Energie- und Leistungsdichten sowie hoher Lade- und Entladewirkungsgrade durchgesetzt [28, S. 169]. Damit erreichen BEV einen bis zu dreimal höheren Wirkungsgrad als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dennoch ist die Energiedichte heutiger Batterien im Vergleich zu einem Kraftstofftank deutlich geringer, sodass die Reichweite von BEV begrenzt ist [26, S. 14]. Zudem ist sie die teuerste Komponente im Antriebsstrang und damit hauptverantwortlich für den hohen Anschaffungspreis [28, S. 166]. Für weiterführende Informationen und Erläuterungen wird auf die Arbeiten von Karle [27], Braun [26] und Braess und Seiffert [28] verwiesen.

2.1.2 Ladeinfrastruktur

Möglichkeiten der Energieübertragung: BEV verwenden eine Traktionsbatterie zum Speichern der elektrischen Antriebsenergie [26, S. 13]. Zum Aufladen der Traktionsbatterie ist eine Hardware-Einheit nötig, die elektrische Energie aus dem Stromnetz bezieht und sie dem BEV bereitstellt. Die Energieübertragung kann im Allgemeinen kabelgebunden, induktiv als auch über einen Batteriewechsel erfolgen [29, S. 17-18].

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich das kabelgebundene Laden betrachtet, weil induktives Laden und der Batteriewechsel derzeit kommerziell keine Rolle spielen.

Technische Grundlagen des kabelgebundenen Ladens: Ein BEV kann per Kabel sowohl mit Wechselstrom (engl.: Alternating Current (AC)) als auch mit Gleichstrom (engl.: Direct Current (DC)) geladen werden [29, S. 17-18]. Beim Wechselstromladen wandelt ein On-Board-Ladegerät im BEV den Wechselstrom aus dem Stromnetz in Gleichstrom um, beim DC-Laden ist das Ladegerät Teil der LIS [26, S. 14]. Der Ladevorgang kann durch vier in der Systemnorm IEC 61851-1 [30] definierte Ladebetriebsarten [19, S. 7], [31] über unterschiedliche Schnittstellen [32, S. 9] und mit verschiedenen Leistungen erfolgen. Die tatsächliche Ladeleistung hängt vom BEV und von der LIS ab und kann zwischen 3,6 kW und 350 kW liegen [33, S. 162].

Als Ladevorrichtungen kommen Wandladestationen, sogenannte Wallboxen, zum Einsatz. Diese sind vor allem für geschützte Bereiche wie z. B. Carports, Garagen oder Tiefgaragen konzipiert und werden üblicherweise an einer Wand montiert [34, S. 13]. In ungeschützten Bereichen und offen Plätzen werden hingegen typischerweise wetterfeste Ladesäulen verwendet [34, S. 13]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird in beiden Fällen vereinfachend von Ladestationen gesprochen. Generell können Ladestationen über einen oder mehrere Ladepunkte verfügen. Diese Arbeit beschränkt sich auf Ladestationen mit einem Ladepunkt.

2.2 Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten

Elektrifizierung einer Fahrzeugflotte: Nach [35, S. 12] spricht man von einer Fahrzeugflotte, wenn diese mindestens drei Fahrzeuge umfasst. Siefen [36, S. 8] erweitert diese Definition und definiert eine gewerbliche Fahrzeugflotte als die Gesamtheit aller Fahrzeuge, die von einem Unternehmen zur Erbringung einer internen oder externen Dienstleistung in einem definierten Geschäftsgebiet eingesetzt werden. Nach Nesbitt [37, S. 300-301] werden Fahrzeugflotten im Wesentlichen durch ihren Einsatzzweck, ihre Zusammensetzung, ihre Größe und ihren Eigentümer charakterisiert. Schulz [10, S. 87] bestätigt diese These und führt zudem im Kontext der Elektromobilität das Mobilitätsverhalten der Fahrzeugflotte als weiteres entscheidendes Merkmal an.

Unter der Elektrifizierung einer gewerblichen Fahrzeugflotte wird im Rahmen dieser Arbeit der gesamte Transformationsprozess einer gewerblichen Fahrzeugflotte hin zur Elektromobilität verstanden. Die Elektrifizierung umfasst somit insbesondere die Integration der BEV in die Flotte sowie die Anbindung der BEV an das Stromnetz über eine LIS.

Vorgehen bei der Flottenelektrifizierung: Flottenbetreiber, die bereits erfolgreich Elektrofahrzeuge in ihre Flotten eingeführt haben, halten folgende Aspekte für besonders wichtig [5, S. 32]:

1. Akzeptanz zukünftiger Nutzer sicherstellen und sie einweisen
2. für den Einsatz von BEV geeignete Nutzerprofile identifizieren
3. ausreichende Verfügbarkeit von LIS sicherstellen
4. Kosten ermitteln und Wirtschaftlichkeit sicherstellen

Grausam et al. [5, S. 34f] leiten ein Vorgehen zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten ab (Abbildung 2.1). Demnach beginnt die Elektrifizierung mit strategischen Aspekten, wie der Definition von Zielen und der Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für Elektromobilität im Fuhrpark. Anschließend werden im Rahmen einer Fuhrparkanalyse der Fuhrparkbestand, der Mobilitätsbedarf und die Nutzungsbereitschaft untersucht. Darauf aufbauend folgt die bedarfsgerechte Fuhrparkkonfiguration. Dabei wird der durch BEV abdeckbare Mobilitätsbedarf ermittelt, die entsprechenden Fahrzeuge und LIS ausgewählt und der Anschluss an das Stromnetz geklärt. Für die Beschaffung der BEV sowie gegebenenfalls von LIS werden vorab geeignete Beschaffungskriterien definiert sowie die Finanzierung und Förderung geklärt. Nach erfolgter Beschaffung steht die Organisation der elektrifizierten Fahrzeugflotte im laufenden Betrieb im

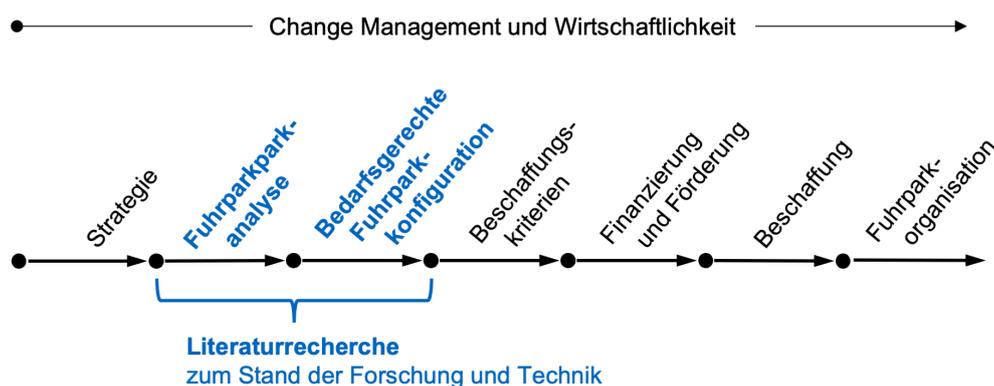


Abbildung 2.1: Vorgehen bei der Flottenelektrifizierung in Anlehnung an [5, S. 34]

Vordergrund. Der gesamte Elektrifizierungsprozess wird von den Querschnittsthemen „Change Management“ und „Wirtschaftlichkeit“ begleitet.

Aufbau der Literaturrecherche: Mit Blick auf das Ziel dieser Arbeit, Flottenbetreiber bei der Planung der Elektrifizierung zu unterstützen, spielen insbesondere die beiden Schritte „Fuhrparkanalyse“ und „bedarfsgerechte Fuhrparkkonfiguration“ eine herausragende Rolle. In diesen beiden Schritten wird das Konzept der Elektrifizierung entwickelt, das für den zukünftigen Erfolg der elektrifizierten Fahrzeugflotte entscheidend ist. Die folgende Literaturrecherche zum Stand der Technik und Forschung bezieht sich daher vorrangig auf diese beiden Schritte.

Vor diesem Hintergrund wird zunächst im Unterkapitel 2.2.1 ein Überblick über verschiedene Ansätze zur Integration von BEV in gewerbliche Fahrzeugflotten gegeben. Im daran anschließenden Unterkapitel 2.2.2 werden Vorarbeiten zur Ermittlung und Bewertung des Elektrifizierungspotentials gewerblichen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugflotten vorgestellt. Das daran anknüpfende Unterkapitel 2.2.3 behandelt verschiedene LIS-Konzepte. Anschließend wird die Anbindung der LIS an das Stromnetz sowie die Dimensionierung der Netzanschlussleistung näher beleuchtet (Unterkapitel 2.2.4). Abschließend wird auf Forschungsarbeiten eingegangen, die die Potentiale durch den Einsatz von Last- und Lademanagement-Systemen in gewerblichen Fahrzeugflotten analysieren (Unterkapitel 2.2.5).

2.2.1 Integrationsansätze für batterieelektrische Fahrzeuge

Die Integration von BEV in bestehende Fahrzeugflotten kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Grundsätzlich können BEV zusätzlich angeschafft werden oder bestehende Fahrzeuge ersetzen [5, S. 45]. Die zusätzliche Anschaffung stellt laut Frenzel [38, S. 124] eine Ausnahme dar. Dabei wird üblicherweise das später ersetzte Fahrzeug nur vorübergehend parallel zum BEV genutzt und innerhalb von zwölf Monaten stillgelegt. Ersetzen BEV hingegen bestehende Fahrzeuge, so kann das in der Regel entweder mit Übernahme aller damit bisher verbundenen Fahrten erfolgen, oder die Fahrten werden zukünftig innerhalb der Fahrzeugflotte umverteilt [39, S. 11-14].

Fahrzeuge mit fester Bindung zum Fahrer: Besteht eine feste Bindung zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug, so muss das BEV in der Lage sein, die gesamten bisherigen Fahrten des zu ersetzenden Fahrzeugs abzubilden [40, S. 51]. Dies stellt insbesondere bei Dienstfahrzeugen mit Privatnutzung eine größere Herausforderung dar. Denn diese Fahrzeuge werden neben den regulären Dienstfahrten auch für Urlaubsreisen, private Ausflüge und Fahrten zwischen Wohnort und Arbeitsstätte genutzt [40, S. 54]. Außerdem existiert häufig (noch) kein BEV, das in Klasse, Ausstattung und Kosten mit dem zu ersetzenden konventionellen Fahrzeug vergleichbar ist [19, S. 16]. Obwohl ein Trend zu kleineren Fahrzeugen beim Umstieg auf Elektromobilität zu beobachten ist, wird ein Großteil der Fahrzeuge durch ein BEV aus dem gleichen Fahrzeugsegment ersetzt, wie eine Umfrage von Frenzel et al. [17, S. 35] zeigt.

Fahrzeuge ohne fester Bindung zum Fahrer: Besteht hingegen keine feste Bindung zwischen Fahrer und Fahrzeug, so ist in der Regel eine Umverteilung der Fahrten möglich [5, S. 45]. Gerade gemeinschaftlich genutzte Fahrzeugpools mit einer Mischung aus großen und kleinen Elektro- und konventionellen Fahrzeugen - man spricht von sogenannten Poolfahrzeugen - bieten optimale Einsatzbedingungen für Elektromobilität [19, S. 15], [40, S. 52], [5, S. 45]. Eine entsprechende Software kann die Fahrzeuge für alle anstehenden Fahrten nach dem Prinzip von Angebot und Nachfrage intelligent disponieren und damit die Kosten- und Ressourceneffizienz optimieren [39, S. 78], [41], [42], [43]. Die energetische Kopplung einer solchen

Dispositionsoftware mit dem Stromnetz durch ein intelligentes Energie- und/oder Lademanagement birgt zudem weiteres Optimierungspotential [39, S. 77ff].

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Fahrzeuge mit fester Bindung zum Fahrer untersucht. Fokus liegt daher auf einer Elektrifizierung von Fahrzeugflotten, bei der alle Fahrten des zu ersetzenden Fahrzeugs durch das BEV übernommen werden.

2.2.2 Elektrifizierungspotential

Die hohe Ladedauer, die mangelnde Verfügbarkeit von LIS, die geringe Reichweite sowie die hohen Anschaffungskosten von BEV stellen wesentliche Herausforderungen beim Umstieg auf Elektrofahrzeuge dar [16, S. 10f], [15, S. 46]. Um BEV erfolgreich in eine Fahrzeugflotte zu integrieren, sollte deshalb der Einsatz von BEV anstelle der bisher eingesetzten konventionellen Fahrzeuge im Voraus bewertet werden [5, S. 45]. Das daraus resultierende Potential des Einsatzes von BEV wird in der Literatur als Elektrifizierungspotential bezeichnet [39].

Im folgenden Unterkapitel werden zunächst die Grundlagen zur Ermittlung des Elektrifizierungspotentials vorgestellt. Der darauffolgende Abschnitt befasst sich mit Ergebnissen bisheriger Forschungsarbeiten zum Elektrifizierungspotential.

Grundlagen

In der Literatur wird zwischen technischem und wirtschaftlichem Elektrifizierungspotential unterschieden.

Technisches Elektrifizierungspotential: Das technische Elektrifizierungspotential eines konventionellen Fahrzeugs hängt von verschiedenen Kenngrößen ab. Dazu zählen laut 244 befragten Fuhrparkverantwortlichen insbesondere [44, S. 82]:

- der typische Einsatzradius des Fahrzeugs
- die maximale tägliche Fahrtstrecke des Fahrzeugs
- die Eignung des Fahrzeugstandorts für die eigene LIS
- die Standzeiten zwischen den Fahrten zum Aufladen

Die Stadt Hamburg fordert bei der Dienstwagenwahl ihrer Angestellten die Bevorzugung eines BEV gegenüber allen anderen Antriebsarten, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind [45]: die tägliche Fahrtstrecke beträgt nicht mehr als 80 km; die meisten Fahrten enden an Orten, an denen eine Lademöglichkeit besteht; und ein Elektrofahrzeug ist mit der erforderlichen Größe oder Ausstattung verfügbar. Laut Flämig und Rosenberger [46] beträgt die Standzeit an Orten mit Lademöglichkeit, z. B. am Wohnort oder Firmenstandort, idealerweise mehr als sieben Stunden pro Tag. Vogel [47, S. 6] nennt zudem den Einsatz im städtischen Verkehr sowie eine gewisse Planbarkeit der Routen als vorteilhaft für ein hohes technisches Elektrifizierungspotential.

Betz et al. [48] fassen diese Kenngrößen in einer Metrik zusammen. Dazu wird das Elektrifizierungspotential durch die Fähigkeit eines BEV beschrieben, alle Fahrten des zu ersetzenden Fahrzeugs zu bewältigen, ohne dass die Batterie den Ladezustand (engl.: State of Charge (SOC)) von 0 % erreicht. Dieser sogenannte Erfüllungsgrad ist wie folgt definiert:

$$\text{Erfüllungsgrad} = \frac{\text{Anzahl erfolgreich absolvierter Fahrten}}{\text{Anzahl aller Fahrten}} \quad (2.1)$$

Zur Berechnung wird ein Simulationsmodell verwendet, das den Energieverbrauch eines BEV sowie dessen Ladevorgänge an definierten Standorten mit vorgegebener Ladeleistung virtuell nachbildet.

Wirtschaftliches Elektrifizierungspotential: Das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential entspricht dem Verhältnis der über die Haltedauer des BEV anfallenden Gesamtkosten (engl.: Total Cost of Ownership (TCO)) zu den TCO eines vergleichbaren konventionellen Fahrzeugs [11, 49]. Im Allgemeinen verursachen BEV höhere Investitionskosten und geringere Betriebskosten als konventionelle Fahrzeuge [50], [51]. Aufgrund der geringeren Betriebskosten sind hohe Laufleistungen aus Sicht der TCO wünschenswert [11, S. 177], [52], [53, S. 49f]. Da jedoch das technische Elektrifizierungspotential mit steigenden Fahrdistanzen abnimmt, entsteht an dieser Stelle ein Zielkonflikt zwischen technischem und wirtschaftlichem Elektrifizierungspotential [11, S. 177], [54, S. 14f]. Um diesem Zielkonflikt entgegenzuwirken, führen Gnann et al. [11] einen weiteren Einflussfaktor ein: die Regelmäßigkeit der täglichen Fahrdistanzen. Regelmäßige und hohe tägliche Fahrdistanzen erhöhen sowohl das technische als auch das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential [11, S. 177]. Hacker et al. [53] heben zusätzlich die Restwertentwicklung [53, S. 49f] sowie die Haltedauer [53, S. 65] als starke Einflussparameter auf das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential hervor, wobei sich eine lange Haltedauer positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten

Die Abschätzung, Bewertung und Analyse des Elektrifizierungspotentials ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten lassen sich unterteilen in Ergebnisse, die sich auf das Gewerbe allgemein beziehen, sowie Ergebnisse, die einen bestimmten Teil (z. B. Wirtschaftszweig oder Einsatzzweck) betreffen.

Gewerbe allgemein: Einen ersten Überblick über das technische Elektrifizierungspotential im Gewerbe gibt die Mobilitätsstudie Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KID) [55] (Tabelle 2.1). Die daraus extrahierten statistischen Merkmale der gewerblichen Mobilität lassen auf ein hohes technisches Elektrifizierungspotential schließen. So liegt die durchschnittliche Tagesdistanz mit 61 bis 72 km unter den typischen Reichweiten aktueller BEV [56]. Darüber hinaus stehen die Fahrzeuge häufig auf dem Firmengelände, sodass die Verfügbarkeit von LIS durch firmeneigene Ladestationen gewährleistet ist [56]. Diese These wird durch zahlreiche Studien bestätigt. So ermitteln Betz et al. [48] einen Erfüllungsgrad (Gleichung (2.1)) von über 85 % für 77 % der 35 untersuchten Fahrzeuge. Gnann et al. [11, S. 179f] kommen zu einem Erfüllungsgrad von rund 87 % als Mittelwert über alle Wirtschaftszweige. Weitere Forschungsarbeiten mit vergleichbaren Ergebnissen sind [57], [54] und [58].

Tabelle 2.1: Wesentliche Mobilitätsmerkmale gewerblicher Pkw und Lastkraftwagen (Lkw) bis einschließlich 3,5 Tonnen Nutzlast nach der Mobilitätsstudie KID [55]

Mobilitätsmerkmale	Pkw	Lkw
Fahrzeugstandort entspricht dem Firmenstandort	69 %	73 %
Einsatzradius um Fahrzeugstandort (80tes Perzentil)	50 km	50 km
Distanz pro Tag (Mittelwert)	72 km	61 km
Fahrtenhäufigkeit pro Tag	3,62	8,14
Fahrtende am Firmenstandort (ohne Pendeln)	30 %	19 %

Das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential im Gewerbe entwickelt sich deutlich dynamischer als das technische Elektrifizierungspotential. So war noch im Jahr 2012 ein wirtschaftlicher Betrieb nur für BEV mit geringen Reichweiten und mit geringem Nebenverbrauch denkbar [59, S. 112], [60, S. 710], [53, S. 65]. Vor allem aufgrund sinkender Batteriekosten [61] ist das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential seitdem stetig gestiegen. Zahlreiche Vergleichsrechnungen zeigen, dass BEV mittlerweile überwiegend vergleichbare oder geringere TCO als konventionelle Fahrzeuge aufweisen [62], [63], [64], [65], [66]. Hinzu kommen Sekundäreffekte, wie ein Imagegewinn oder eine erhöhte Medianpräsenz durch ökologische Effekte, die das wirtschaftliche Elektrifizierungspotential gewerblicher Fahrzeuge weiter erhöhen [5, S. 73], [53, S. 128], [54, S. 13].

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf das Elektrifizierungspotential gewerblicher Fahrzeuge im Allgemeinen. Differenzierungsmerkmale, wie z. B. Branche, Einsatzzweck oder Fahrzeugtyp bzw. -größe, bleiben dabei weitestgehend unberücksichtigt. Der Wirtschaftsverkehr ist jedoch hinsichtlich solcher Differenzierungsmerkmale heterogen [12, S. 34]. Pauschale Aussagen zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeuge sind daher kaum möglich, wie zahlreiche Forschungsarbeiten hervorheben [39, S. 29], [67, S. 376], [14, S. 132], [59, S. 112], [5, S. 45]. Im Folgenden werden daher Forschungsergebnisse vorgestellt, die eine in dieser Hinsicht differenziertere Einschätzung des Elektrifizierungspotentials liefern.

Differenzierung nach Wirtschaftszweigen: Schulz [59, S. 48] zeigt anhand des KID-Datensatzes, dass mit einer Reichweite von 90 km rein statistisch betrachtet mehr als 90 % der Fahrten aller Wirtschaftszweige (Definition der Wirtschaftszweige nach [68]) absolviert werden könnten. Allerdings weist Schulz auch auf die zum Teil unterschiedlichen Fahrweiten in den einzelnen Wirtschaftszweigen hin [59, S. 76], die bei der Elektrifizierung berücksichtigt werden sollten.

Gnann et al. [11] gehen einen Schritt weiter und analysieren den Erfüllungsgrad (Gleichung (2.1)) der größten Wirtschaftszweige (gemessen an den Fahrzeugzulassungen) auf Basis realer Bewegungsdaten, die im Projekt „REM2030“ [58] erhoben wurden. Demnach weisen Fahrzeuge aus dem Gesundheitswesen, der öffentlichen Verwaltung sowie der Energieversorgung mit 94 % bis 97 % das höchste technische Elektrifizierungspotential auf (Tabelle 2.2).

Differenzierung nach typischen Einsatzzwecken: Das Taxi stellt einen besonders häufig untersuchten Einsatzzweck für BEV dar. So zeigen Bischoff et al. [69] anhand einer agentenbasierten Simulation, dass BEV in Taxiflotten eingesetzt werden können, ohne dass sich das Verhalten der Fahrer oder Kunden ändert [69, S. 197]. Schulz weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass eine Elektrifizierung von Taxiflotten häufig größere Umdisponierungen innerhalb der Flotten erfordert, um die hohen täglichen Fahrleistungen realisieren zu können [59, S. 112]. Konkrete Aussagen zum Elektrifizierungspotential im Taxigewerbe konnten im Forschungsprojekt „VEM“ abgeleitet werden [70]. So zeigen Hann et al. [70, S. 32] in verschiedenen Szenarioanalysen, dass je nach gewähltem Fahrzeugkonzept und LIS-Ausbaugrad der prozentuelle Anteil der erfüllten Kundenaufträge zwischen 80 % und 99 % liegt. Funke und Burgert [71] ermitteln ähnlich hohe Erfüllungsgrade für Taxis, betonen aber auch die Wichtigkeit von Schnellladesäulen mit einer Ladeleistung von mindestens 50 kW Ladeleistung an den Taxiständen.

Ein weiterer häufig untersuchter Einsatzzweck sind Kurier-, Express- und Paketdienst (KEP). Im Forschungsprojekt „E-City-Logistik“ wurde festgestellt, dass der Einsatz von BEV aus einer rein technischen Sicht kein Problem darstellt [72, S. 134f]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Schulz et al. [10]. Sie fügen hinzu, dass die geringen Reichweiten und langen Lade-

Tabelle 2.2: Technisches Elektrifizierungspotential für verschiedene Wirtschaftszweige nach [11, S. 179f]

Wirtschaftszweig	Zulassungen in 2012	ausgewertete Fahrprofile	Erfüllungsgrad in %
G - Handel	699 506	45	86,5
C - Verarbeitendes Gewerbe	380 367	101	77,4
N - Administratives Gewerbe	357 835	43	86,1
S - Andere Dienstleistungen	265 926	51	88,1
Q - Gesundheitswesen	33 391	67	94,6
F - Konstruktion	31 150	38	92,3
O - Öffentliche Verwaltung	28 546	66	97,4
H - Verkehr und Lagerei	27 269	45	51,0
K - Finanzdienstleistung	18 582	5	93,3
J - Information und Kommunikation	16 271	10	90,7
M - Wissenschaftliche Dienstleistung	12 065	4	89,3
D - Energieversorgung	7 452	16	97,4
E - Wasserversorgung	3 938	7	92,3
Gesamt	1 892 212	498	87,4

zeiten zwar die Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes einschränken, die planbaren Routen und die geringen täglichen Fahrdistanzen jedoch ein hohes technisches Elektrifizierungspotential versprechen [59, S. 112]. Das Forschungsprojekt „Smart Distribution Logistik“ [73] kommt zum Ergebnis, dass optimal eingesetzte BEV bereits ab dem ersten Einsatzjahr (hier 2021) wirtschaftlich betrieben werden können. Weitere Forschungsarbeiten deuten ebenfalls auf ein hohes Elektrifizierungspotential im KEP-Bereich hin [47, S. 6], [74], [75, S. 35-47].

Auch das Elektrifizierungspotential von Stadtverwaltungen ist Gegenstand einiger Arbeiten. Klausmann et al. [67] zeigen anhand einer Potentialanalyse des Fuhrparks der Stadt Ludwigsburg, dass BEV bereits im Jahr 2013 kostengünstiger in Flotten eingesetzt werden können, als konventionelle Fahrzeuge. Gillessen [34, S. 16ff], Radowitz [19, S. 20] und Vogel [47, S. 6] bestätigen das generell hohe Elektrifizierungspotential von Stadtverwaltungen.

Darüber hinaus werden häufig Lieferdienste, ambulante Pflegedienste sowie Handwerksbetriebe als Einsatzzwecke mit hohem Elektrifizierungspotential genannt [34, S. 16ff], [19, S. 20], [74], [70].

2.2.3 Ladeinfrastrukturkonzept

Damit der Betrieb einer gewerblichen Fahrzeugflotte durch die Elektrifizierung nicht beeinträchtigt wird, muss die Verfügbarkeit von LIS sichergestellt werden. Dies kann im Vorfeld der Elektrifizierung durch ein entsprechendes LIS-Konzept erfolgen.

Das folgende Unterkapitel beginnt mit Grundlagen zu LIS-Konzepten im Kontext der Flotten-elektrifizierung. Im darauf folgenden Abschnitt werden Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten vorgestellt, die sich mit solchen LIS-Konzepten befassen.

Grundlagen

Aus dem Nutzungs- und Mobilitätsprofil der Fahrzeugflotte lassen sich wesentliche Anforderungen an die LIS ableiten [76, S. 25-29], [5, S. 48f], [32, S. 13]. Dazu zählen insbesondere:

- Standorte der Ladestationen
- Anzahl der Ladestationen je Standort
- Ladeleistungen der Ladestation
- Steckertypen (Typ 1, Typ 2, etc.) der Ladestation
- sonstige Ausstattungsmerkmale der Ladestationen (Kommunikation, Zugangsschutz, etc.)

Dabei spielt der Standort einer Ladestation eine entscheidende Rolle. Der Standort kann je nach Nutzerkreis und Zugänglichkeit in unterschiedliche Kategorien unterteilt werden. Tabelle 2.3 zeigt in Anlehnung an [29, S. 49] und [19, S. 7] die möglichen Standortkategorien.

Tabelle 2.3: Standortkategorien von Ladestationen in Anlehnung an [29, S. 49], [19, S. 7], [77]

	Privat	Halbprivat	Halböffentlich	Öffentlich
Standortbeispiel	Arbeitnehmerwohntort	Arbeitnehmerparkplätze beim Unternehmen	Kundenparkplätze beim Einkaufszentrum	Öffentliche Parkplätze
Besitzfläche	Privat	Privat	Privat	Öffentlich (Stadt/Gemeinde)
Leistung	2,3 bis 11 kW	11 bis 50 kW	22 bis 300 kW	22 bis 300 kW
Infrastruktur	Schuko, CEE oder Wallbox	Wallbox oder Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule

Private LIS am Wohnort der Fahrer: Für privat genutzte Flottenfahrzeuge ist der Wohnort des jeweiligen Fahrers ein potentiell geeigneter Ladestandort [76, S. 26]. Grundsätzlich stellen Haushalts- oder Industriesteckdosen die einfachsten Möglichkeiten für das Laden zu Hause dar [19, S. 7]. Dennoch empfehlen Experten den Arbeitgebern, ihren Mitarbeitern eine spezielle Ladestation zur Verfügung zu stellen [40, S. 62]. Der Grund hierfür ist, dass eine Ladestation speziell abgesichert ist und zudem als kommunikationsfähige Variante die Abrechnung des geladenen Stroms ermöglicht [76, S. 26]. Da die Fahrzeuge üblicherweise über Nacht, also über einen relativ langen Zeitraum, am Wohnorten stehen, reichen Ladestationen mit maximal 11 kW aus [76, S. 12]. Darüber hinaus besteht für LIS mit einer Leistung bis zu 11 kW keine Genehmigungspflicht, sondern lediglich eine formelle Meldepflicht gegenüber dem Netzbetreiber [78].

Halbprivate LIS am Firmenstandort: Für Fahrzeuge, die häufig auf dem Firmengelände stehen, stellt außerdem der Firmenstandort einen potentiell geeigneten Ladestandort dar [40, S. 62]. Im Gegensatz zu Wohnorten müssen am Firmenstandort häufig mehrere Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden. In der Regel empfiehlt es sich daher, so viele Ladestation zu installieren, wie üblicherweise gleichzeitig Fahrzeuge auf dem Firmengelände parken, z. B. während der Arbeitszeit oder über Nacht [76, S. 28]. Um beim gleichzeitigen Laden mehrerer BEV den Gesamtladeleistungsbedarf kontrollieren und steuern zu können, sind Ladestationen erforderlich, die mit einem sogenannten Last- und Lademanagement (Kapitel 2.2.5) kommunizieren können [76, S. 29]. Das Laden über eine einfache Haushaltssteckdose oder einen

Industriestecker ist daher nicht zu empfehlen. Die Höhe der Ladeleistung ergibt sich aus den Standzeiten und täglichen Fahrdistanzen der Fahrzeuge sowie den maximalen fahrzeugseitigen Ladeleistungen [32, S. 13], [34, S. 14]. Von Ladeleistungen unter 11 kW wird abgeraten, weil Batteriekapazitäten und Reichweiten absehbar steigen werden [76, S. 11]. Die Installation von DC-Ladestationen mit 50 kW und mehr sollte in Betracht gezogen werden, wenn Fahrzeuge in kurzer Zeit wieder aufgeladen zur Verfügung stehen sollen [76, S. 11].

(Halb-)Öffentliche LIS: Auch an öffentlichen und halböffentlichen LIS können Fahrzeugflotten geladen werden [5, S. 48].

Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten

Die Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten zu LIS-Konzepten lassen sich in die Analyse der Relevanz typischer Ladestandorte, des Bedarfs an Ladeleistung sowie der optimalen Positionierung und Dimensionierung von LIS unterteilen.

Relevanz typischer Ladestandorte: Ein zentrales Thema vieler Forschungsarbeiten ist die Analyse und Bewertung der Relevanz typischer Ladestandorte. Krallmann et al. [79] definieren geeignete Ladestandorte als Orte, an denen die Fahrzeuge ohnehin stehen bleiben.

Bereits 1998 betonten Nesbitt und Sperling [80] die Bedeutung des Firmenstandortes zum Laden von BEV. Auch die Ergebnisse der Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ [55, S. 21] verdeutlichen die Bedeutung des Firmengeländes als Ladestandort (Tabelle 2.1). Betz et al. [48, 81] zeigen schließlich auf Basis von Bewegungsdaten gewerblicher Fahrzeuge, dass der Firmenstandort für alle betrachteten Fahrzeuge der wichtigste Ladestandort ist. Sie stellen fest, dass die Verweildauer der Fahrzeuge am Firmenstandort in den meisten Fällen deutlich über der notwendigen Ladedauer liegt. Weitere Arbeiten bestätigen die hohe Relevanz einer halbprivaten LIS am Firmenstandort [44, S. 114 und 138], [17, S. 50], [5, S. 51].

Laut Betz et al. [48, 81] ist der Wohnort des Fahrers ein weiterer essentieller Ladestandort, sofern das Fahrzeug privat genutzt wird und eine Ladestation am Wohnort installiert werden kann [48, 81]. Diese Ergebnisse werden unter anderem bestätigt von [82, S. 26], [70, S. 16], [40, S. 62], [44, S. 114, S. 138], [17, S. 50], [5, S. 51].

Betz et al. [48, 81] zeigen außerdem, dass (halb-)öffentliche LIS nur für das Zwischenladen auf längeren Strecken oder in Notfällen relevant und sich nicht zur Deckung des Grundladebedarfs eignen. Trümper [9, S. 1942] bestätigt dies und weist zusätzlich auf das Problem hin, dass (halb-)öffentliche Ladestationen häufig belegt sind. Neben der unsicheren Verfügbarkeit stellen laut Hildebrandt [20, S. 198] die hohen Kosten für das Laden an (halb-)öffentlichen Ladestationen ein weiteres Problem dar. So zeigt Hildebrandt [20, S. 198], dass der Einstieg in die Elektromobilität für gewerbliche Nutzer mit einem hohen Bedarf an Zwischenladungen wirtschaftlich unattraktiv ist. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in [44, S. 114, S. 138], [17, S. 50], [5, S. 51]. Ausdrücklich ausgenommen sind laut Hildebrandt [20, S. 204] Taxis. Diese kommen in der Regel nicht mit einer firmeneigenen LIS an einem regelmäßigen Parkort aus und sind auf das Zwischenladen an (halb-)öffentlichen Ladestationen angewiesen.

Bedarf an Ladeleistung: Einige Forschungsarbeiten widmen sich dem Bedarf an Ladeleistung in Abhängigkeit vom Ladestandort. So zeigen Hann et al. [70, S. 29] mittels einer Simulation von gewerblichen Fahrzeugen, dass eine Kombination aus hohen und geringen Ladeleistungen (22 kW am Unternehmensstandort und 3,6 kW an den Wohnorten) zum höchsten Erfüllungsgrad nach Gleichung (2.1) führt. Betz et al. [81] bestätigen das in einer Analyse des Erfüllungsgrades einer Fahrzeugflotte von 32 Fahrzeugen für 17 verschiedene LIS-Szenarien.

Zudem zeigen sie, dass bei ausreichend hoher Ladeleistung (halb-)öffentliche Ladestationen an häufig angefahrenen Orten den Erfüllungsgrad der Fahrzeugflotte erhöhen können.

Yang et al. [83] analysieren den Umstieg einer Taxiflotte in Nanjing, China, auf Elektrofahrzeuge und die dafür notwendige LIS. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Installation von DC-Schnellladestationen für das Taxigewerbe unerlässlich ist, um während der Betriebszeit tagsüber aufladen zu können. Bestätigt werden diese Ergebnisse unter anderem von [59, S. 112], [71]. Auch Funke und Burgert [71] zeigen in einer Potentialanalyse der Elektrifizierung des Taxigewerbes, dass für ein hohes Elektrifizierungspotential Schnellladesäulen, d. h. mindestens 50 kW, an Taxiständen notwendig sind. In einer weiteren Forschungsarbeit analysieren Funke und Burgert [84] die Wirtschaftlichkeit einer LIS im öffentlichen Raum der Stadt Karlsruhe (Taxistände), die ausschließlich von Taxis genutzt wird. Ihre Analysen verdeutlichen das hohe Elektrifizierungspotential im Taxigewerbe. Sie zeigen, dass bereits Lademöglichkeiten an der Hälfte der Taxistände ausreichen würden, sich die hohen Investitionskosten aber nur in Ausnahmefällen amortisieren.

Schulz [59, S. S. 94] zeigt, dass eine Erhöhung der Ladeleistung von 3 kW auf 22 kW beim Nachladen eines KEP bei längeren Pausen, wie beispielsweise der Mittagspause, nur zu marginalen Verbesserungen führt. Zum gleichen Ergebnis kommt Schulz [59, S. 102] bei der Analyse einer Pharmalogistikflotte.

Optimale Positionierung und Dimensionierung: Die bisher gezeigten Forschungsarbeiten untersuchen LIS an fest-definierten Standorten. Ein weiteres Forschungsfeld im Zusammenhang mit LIS-Konzepten ist die optimale Positionierung und Dimensionierung von Ladestationen.

Die Mehrheit der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet beschäftigt sich mit der Auslegung von öffentlichen LIS ohne konkreten Bezug zu gewerblichen Fahrzeugflotten. Vielmehr besteht das Ziel darin, den Bedarf an Lademöglichkeiten eines Stadtgebiets, einer Stadt oder eines Landes zu decken [85], [86], [87].

Es existieren jedoch auch Ansätze zur Auslegung von LIS für gewerbliche Fahrzeugflotten. So legen Dashora et al. [88, S. 14] eine LIS für eine Plug-in Hybridfahrzeugflotte am Campus des Oak Ridge National Laboratorys mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsmodells aus. Mit dem Ziel, die Installations- und Netzanbindungskosten der LIS sowie die Wege zwischen Parkplatz und Arbeitsplatz zu minimieren, bestimmt das Modell Standort und Anzahl der Ladepunkte. Siefen [36] nutzt ein Simulation- und Optimierungsmodell, um für einen Car Sharing Anbieter eine eigene LIS im öffentlichen Raum hinsichtlich Standortpositionen und Betriebskapazitäten auszulegen. Einen ähnlichen Ansatz nutzen die Autoren von [89], um eine LIS zu bestimmen, die den Ladebedarf einer Taxiflotte hinsichtlich maximaler Auftragserfüllungsrate und minimaler Ladezeiten optimal abdeckt. Für einen vertiefenden Einblick in dieses Forschungsfeld wird auf [90], [91], [79] verwiesen.

2.2.4 Netzanbindung

Netzanschlussmöglichkeiten: (Halb-)Private LIS müssen an das Stromnetz angebunden werden, um BEV mit elektrischer Energie versorgen zu können. Im Allgemeinen gibt es dafür zwei Möglichkeiten [32, S. 24]. Zum einen kann die LIS über einen bereits vorhandenen Netzanschluss des Firmenstandortes erfolgen [32, S. 24]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der vorhandene Netzanschluss unter Umständen für die Größe der Flotte nicht ausreicht und entsprechend ausgebaut werden muss [29, S. 26-27]. In vielen Fällen sind die verfügbaren Ka-

kapazitäten bereits vor der Einführung von Elektromobilität bis an die Grenzen ausgeschöpft, sodass für den Betrieb einer LIS keine ausreichenden Kapazitäten zur Verfügung stehen [19, S. 19]. Da eine Kapazitätserhöhung in der Regel mit hohen Kosten verbunden ist [92], weil beispielsweise neue Transformatoren installiert werden müssen, sollte eine möglichst geringe Kapazitätserhöhung angestrebt werden [19, S. 19].

In einigen Fällen kann es daher auch sinnvoll sein, die LIS über einen zusätzlichen, separaten Netzanschluss an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz anzuschließen [32, S. 24]. Insbesondere bei größeren Fahrzeugflotten, die mit hohen Ladeleistungen laden müssen, kann ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz (Ortsnetztransformator) erforderlich sein [76, S. 14].

Dimensionierung des Netzanschlusses: In beiden Fällen hat die richtige Dimensionierung der Netzanschlussleistung maßgeblichen Einfluss auf den zuverlässigen und wirtschaftlichen Ladebetrieb [32, S. 13]. Laut [76, S. 15] und [32, S. 13] sollten bei der Dimensionierung der Netzanschlussleistung folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Anzahl der Fahrzeuge am Standort
- Ladeleistung der anzuschließenden Fahrzeuge
- die erwartete durchschnittliche Parkdauer
- Ladebedarf der Fahrzeugnutzer

Ein entscheidender Faktor bei der Dimensionierung der Netzanschlussleistung ist der sogenannte Gleichzeitigkeitsfaktor [76, S. 15]. Nach der geltenden Norm DIN VDE 0100-722 [93] ist bei der Dimensionierung der Netzanschlussleistung davon auszugehen, dass alle Ladestationen gleichzeitig genutzt werden (Gleichzeitigkeitsfaktor = 1). Wie eine Analyse von Greis zeigt, liegt der maximale Gleichzeitigkeitsfaktor in der Praxis deutlich darunter [94]. Ein Gleichzeitigkeitsfaktor kleiner eins kann laut der Norm nur dann angenommen werden, wenn ein Last- und Lademanagement das Laden steuert.

Laufende Energiekosten: Des Weiteren muss ein Vertrag mit einem Elektrizitätsversorgungsunternehmen geschlossen werden, um elektrische Energie beziehen zu können [95]. Übliche Stromtarife für Gewerbekunden setzen sich aus Netznutzungsentgelten bzw. Netzentgelten, Steuern und Umlagen sowie einem vom Energielieferanten beeinflussbaren Preisbestandteil zusammen [96, S. 274]. Der vom Energielieferanten beeinflussbare Preisbestandteil sowie die Steuern und Umlagen sind ausschließlich von der verbrauchten Energiemenge abhängig [76, S. 16]. Die Netzentgelte richten sich ebenfalls nach der verbrauchten Energiemenge. Für Kunden mit einem Jahresenergieverbrauch von mehr als 100 MWh enthalten die Netzentgelte zusätzlich eine leistungsabhängige Komponente [97]. Diese Leistungskomponente ist abhängig von der sogenannten Lastspitze, die während dem Berechnungszeitraum, z. B. einem Jahr, gemessen wird. Die leistungsabhängige Komponente ist zusätzlich zu den energieabhängigen Verbrauchskosten zu entrichten, selbst wenn die Lastspitze nur einmal im Jahr erreicht wird [76, S. 16].

Erfassung der Lastspitze: Die Lastspitze wird durch den Energieversorger mittels konventionellen Stromzählern oder intelligenten bzw. modernen Messsystemen (engl.: Smart Meter) erfasst [98, S. 34ff]. Gemäß der deutschen Stromnetzzugangsverordnung sind Standorte mit einem Jahresenergieverbrauch von mehr als 100 MWh zu einer solchen registrierenden Leistungsmessung verpflichtet [99]. Dabei erfasst die Messeinrichtung für jede Viertelstunde die jeweils verbrauchte Energiemenge. Daraus wird die durchschnittliche Leistung während einer Messperiode errechnet [100], [101, S. 15]. Diese Leistungsmittelwerte werden in regelmäßigen

Abständen an den Verteilnetzbetreiber übermittelt [98, S. 34ff]. Zwar ergibt aus der Stromnetzzugangsverordnung keine Verpflichtung zu einer solchen Leistungsmessung für Standorte mit weniger als 100 MW h. Jedoch sind Messstellenbetreiber seit September 2016 zur Ausstattung von Messstellen mit Smart Metern bei Verbrauchern mit einem Jahresenergieverbrauch über 6 MW h verpflichtet, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist [102, S. 18]. Auch wenn in der Praxis noch längst nicht jeder dieser Standorte mit einer solchen Messeinrichtung ausgestattet ist, so ist doch ein deutlicher Trend in diese Richtung zu erkennen. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass an den Firmenstandorten eine solche Messeinrichtung vorhanden ist.

2.2.5 Last- und Lademanagement

Beim gleichzeitigen Laden von BEV entspricht der gesamte Leistungsbedarf der Summe der einzelnen Ladeleistungen [76, S. 17]. Dadurch kann der Gesamtleistungsbedarf eines Standorts stark ansteigen [6, S. 78]. Wie im vorangegangenen Unterkapitel 2.2.4 erläutert, kann eine damit einhergehende Erhöhung der Netzanschlussleistung zu erheblichen Mehrkosten führen. Außerdem steigt die leistungsabhängige Komponente der Netzentgelte, wenn der Energieverbrauch 100 MW h übersteigt.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Grundlagen des Last- und Lademanagements erläutert. Anschließend wird auf die Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten eingegangen.

Grundlagen

Ziele des gesteuerten Ladens: Durch gesteuertes Laden wird die verfügbare Ladeleistung flexibel und bedarfsgerecht verteilt. Dadurch können einige Kostenbestandteile des Strompreises positiv beeinflusst werden [6, S. 78], [103, S. 102]. Die Volkswagen AG spricht von 30 bis 70 % Kosteneinsparung [76, S. 17]. Das Ziel der Kosteneinsparung wird typischerweise durch einen oder mehrerer der folgenden Effekte erreicht:

- Begrenzung des notwendigen Ausbaus der Netzanschlussleistung und der daraus resultierenden Anforderungen an die Belastbarkeit der Installation durch einen geringen Gleichzeitigkeitsfaktor [29, S. 45], [32, S. 14], [76, S. 16]
- Reduzierung von Lastspitzen, um die vorhandene Netzanschlussleistung nicht zu überschreiten und/oder den Leistungspreis auf der Stromrechnung nicht zu erhöhen [104], [32, S. 14], [105], [106]
- Lastverschiebung in Zeiten geringer Stromkosten, z. B. durch Verwendung von sogenannten Hochtarif-/Niedertarif-Modellen [6, S. 80], [107, S. 15], [105]
- Erhöhung des Eigenverbrauchs der produzierten Solarenergie von Photovoltaik (PV)-Anlagen [6, S. 80], [76, S. 16]
- Fahrzeugseitige Optimierungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Maximierung der jährlichen Laufleistungen [108], die Aufrechterhaltung des Gesundheitszustandes der Batterie (engl.: State of Health (SOH)) [109] oder die optimale Routenerstellung [110]

Gesteuertes Laden kann außerdem zur Reduktion von CO₂-Emissionen [111, 112] und zur Netzstabilität [113–117] beitragen.

Komplexitätsstufen des gesteuerten Ladens: Brendle [111, S. 5-15] definiert in seiner Dissertation verschiedene Komplexitätsstufen des gesteuerten Ladens. Beim einfachen Laden wird das Fahrzeug mit der technisch maximal möglichen Leistung geladen, solange es mit der Ladesäule verbunden ist. Das zeitgesteuerte Laden beschreibt Ladevorgänge, die von der Ladesteuerung ab einer bestimmten Uhrzeit mit der technisch maximal möglichen Leistung gestartet werden. Das intelligente Laden ermöglicht eine Kommunikation zwischen dem Energiesystem und dem Fahrzeug in Echtzeit. Dabei entscheidet das Energiesystem, wann der optimale Zeitpunkt zum Laden des Fahrzeugs gekommen ist. Die letzte Komplexitätsstufe stellt das bidirektionale Laden dar. Es entspricht dem intelligenten Laden, allerdings mit der Option der Energierückspeisung. Die gleiche Einstufung findet sich auch in den Arbeiten von Liu et al. [118] und Brylawski et al. [119].

Die Standardisierung und Normung der Kommunikation zwischen BEV und Ladestation sowie zwischen Ladestation und Backend-System umfasst zwar auch das bidirektionale Laden (ISO 1511 [120], [121]; IEC 61851-1 [30]; OCPP 2.0 [122]). Bidirektionales Laden ist jedoch noch nicht in kommerziellen Anwendungen verfügbar. Auch wenn es technisch bereits möglich ist, sind beim bidirektionalen Laden erhebliche regulatorische und wirtschaftliche Herausforderungen zu bewältigen [123, S. 5]. Aus den genannten Gründen wird das bidirektionale Laden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Last- und Lademanagement: Nach Garcia-Villalobos et al. [124, S. 720 ff] kann die Steuerung des Ladens zentral oder dezentral erfolgen. In kommerziellen Anwendungen wird gesteuertes Laden meist zentral durch sogenannte Last- und Lademanagement-Systeme realisiert [104]. Ein solches Last- und Lademanagement kann zudem die Autorisierung der Fahrzeuge [103, S. 48] sowie die Abrechnung von Mitarbeitern, Kunden oder Besuchern [125] übernehmen.

Das Funktionsprinzip eines Last- und Lademanagements lässt sich in zwei Hauptaufgaben unterteilen: Lastmanagement und Lademanagement [104]. Das Lastmanagement steuert die Gesamtleistung, die einem Verbund von Ladestationen zur Verfügung steht. Das Lademanagement verteilt die vom Lastmanagement zur Verfügung gestellte Gesamtleistung auf die einzelnen Ladestationen.

Lastmanagement-Ansätze: In kommerziellen Anwendungen wird zwischen dem statischen und dynamischen Lastmanagement-Ansatz unterschieden [126, S. 135], [104], [125]. Abbildung 2.2 veranschaulicht den Unterschied zwischen diesen beiden Ansätzen. Bei beiden Lastmanagement-Ansätzen wird dem System ein Leistungswert als obere Schranke vorgegeben,

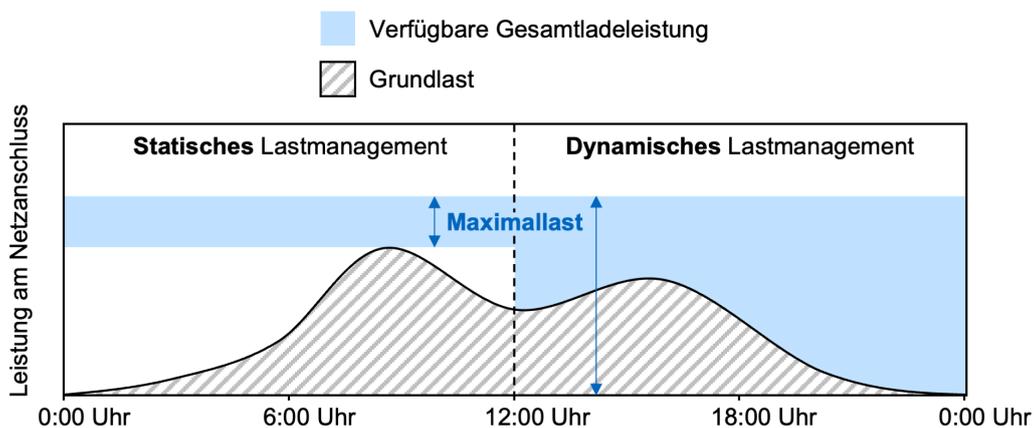


Abbildung 2.2: Vergleich von statischen und dynamischen Lastmanagement

dessen Einhaltung durch das System sichergestellt wird [125]. Dieser Systemparameter wird im Folgenden als Maximallast bezeichnet.

Beim statischen Lastmanagement entspricht die Maximallast der verfügbaren Gesamtladeleistung [104]. Das Lastmanagement stellt also sicher, dass die Summe aller Ladeleistungen die Maximallast nicht überschreitet. Im Gegensatz dazu richtet sich beim dynamischen Lastmanagement die Gesamtladeleistung nach dem aktuellen Leistungsbedarf der restlichen Verbraucher am Firmenstandort [104], [125]. Ein dynamisches Lastmanagement kennt also zu jedem Zeitpunkt die Gesamtleistung der übrigen Verbraucher am Standort, die sogenannte Grundlast. Es kann somit die verfügbare Gesamtladeleistung dynamisch so steuern, dass die Summe aus Gesamtladeleistung und Grundlastprofil die Maximallast nicht überschreitet.

Beide Lastmanagement-Ansätze sind in der Lage, Lastspitzen zu reduzieren. Das Optimierungspotential des dynamischen Lastmanagements ist jedoch größer [125]. Da ein dynamisches Lastmanagement das Grundlastprofil kennt, kann es im Vergleich zum statischen Lastmanagement ungenutzte Kapazitäten des Grundlastprofils effektiver zum Laden von BEV nutzen.

Lademanagement-Verfahren: Die vom Lastmanagement bereitgestellte Gesamtladeleistung wird vom Lademanagement nach einem bestimmten Verfahren auf die Ladestationen verteilt. In der Literatur wird zwischen regelbasierten bzw. heuristischen Verfahren und optimalen Verfahren unterschieden [39, S. 17].

Optimale Verfahren sind in Kombination mit einem dynamischen Lastmanagement in der Lage, zu jedem Zeitpunkt ein Optimum zu finden [39, S. 17]. Die Optimierung kann nach der verfügbaren Zeit, der verfügbaren Netzkapazität oder den Energiekosten erfolgen [127]. Einen detaillierten Überblick über diese Verfahren geben unter anderem [128–132].

In der Praxis scheitern solche Systeme noch an der Robustheit und an der Verfügbarkeit der dafür notwendigen Echtzeitdaten der Fahrzeugflotte, der LIS und dem Gebäude [133, S. 425]. Zudem sind die zugrundeliegenden mathematischen Optimierungsprobleme NP (Nichtdeterministische Polynomialzeit) schwer und damit für kommerzielle Systeme zu rechenintensiv [134]. Sie müssen daher meist durch heuristische Näherungsverfahren gelöst werden [135]. Aus den genannten Gründen spielen optimale Verfahren aktuell kommerziell kaum eine Rolle. Sie werden daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Regelbasierte Verfahren zeichnen sich hingegen durch ihre Robustheit und Einfachheit aus [136, S. 128]. Die wichtigsten regelbasierten Verfahren sind in der Tabelle 2.4 aufgelistet.

Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten

Regelbasiertes Last- und Lademanagement ist nicht im Fokus der Forschung und daher nur vereinzelt Gegenstand von Forschungsarbeiten. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten beziehen sich entweder auf den Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Laden oder auf den Vergleich von regelbasierten Lademanagement-Verfahren.

Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Laden: In zahlreichen Forschungsarbeiten wird zwar die hohe Bedeutung des Last- und Lademanagements bei der Elektrifizierung von Fahrzeugflotten betont [141], [142], [143]. Allerdings sind dem Autor nur wenige Studien bekannt, die diese qualitative Aussage auch tatsächlich mit belastbaren Zahlen belegen.

Ottensmann et al. [144] vergleichen die Auswirkungen von gesteuertem und ungesteuertem Laden auf das Grundlastprofil einer Pflegedienst-Flotte. Sie zeigen, dass ungesteuertes Laden

Tabelle 2.4: Regelbasierte Strategien für Last- und Lademanagement-Systeme

Bezeichnung	Erklärung	Literatur
Equal distribution	Gesamtleistung wird auf alle Ladestationen gleichmäßig verteilt	[126, S. 136], [76, S. 18], [137]
First come first serve	Leistungsaufteilung erfolgt priorisiert nach dem Zeitpunkt des Beginns des Ladevorgangs	[126, S. 136], [138, S. 167], [137], [139, S. 116]
Priority scheduling	Fahrzeug mit der höchsten, vorher festgelegten Priorität erhält volle Ladeleistung (z. B. Geschäftsführerfahrzeug)	[140], [76, S. 18], [139, S. 116f]
Round robin	Fahrzeuge bekommen nacheinander eine Zeit zugeteilt, in der sie mit voller Leistung laden können	[140], [76, S. 18], [139, S. 116f]
Longest processing time first	Priorisierung des längsten Ladevorgangs	[140], [139, S. 116], [138]
Shortest processing time first	Priorisierung des kürzesten Ladevorgangs	[140], [139, S. 116], [138]

von zehn BEV die Lastspitze des Grundlastprofils um bis zu 88 % erhöhen kann. Dies würde zur Überlastung des bestehenden Netzanschlusses führen. Durch die Verwendung eines Last- und Lademanagements kann die Lastspitze deutlich reduziert werden, sodass eine Verstärkung des Netzanschlusses nicht erforderlich ist.

Plota [6, S. 103-112] untersucht die wirtschaftlichen Vorteile von gesteuertem gegenüber ungesteuertem Laden für ein Unternehmen mit acht BEV, einer PV-Anlage und Hoch-/Niedertarifen. Es zeigt sich, dass gesteuertes Laden durch die Minimierung der Lastspitze zu einem Kostenvorteil von 30 % bei 3,7 kW Ladeleistung und 70 % bei 22 kW Ladeleistung führen kann. Betz et.al [145] bestätigen das hohe wirtschaftliche Potential des gesteuerten Ladens.

Vergleich regelbasierter Lademanagement-Verfahren: Mit Blick auf regelbasierte Lademanagement-Verfahren sind dem Autor nur die folgenden zwei Forschungsarbeiten bekannt.

Pronobis und Kurrat [140] kombinieren in einer Simulation ein Lademanagement mit Methoden der Risikoanalyse, um das Laden einer Polizeiflotte mit hochdynamischen und unvorhersehbaren Einsätzen zu optimieren. Sie finden heraus, dass bei hohem Risiko das Priority Scheduling-Verfahren am effektivsten ist. Dabei wird das Fahrzeug mit dem höchsten Risiko priorisiert, während sich die restlichen Fahrzeuge die verbleibende Leistung gleichmäßig teilen.

Pronobis et al. [126] vergleichen die Verfahren Equal Distribution (EQUAL) und First Come First Serve (FCFS) (Tabelle 2.4) hinsichtlich der durchschnittlichen Ladezeit. Dabei zeigt sich unter anderem, dass das FCFS-Verfahren zu kürzeren durchschnittlichen Ladezeiten führt als das EQUAL-Verfahren.

2.3 Ableitung der Themenstellung

Die vorangegangene Literaturlanalyse zeigt den aktuellen Stand der Forschung und Technik zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten auf. In den folgenden Unterkapiteln werden die dabei identifizierten Forschungslücken aufgezeigt und die Forschungsfragen abgeleitet.

2.3.1 Kritik und Forschungslücken

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Technologien, die eine erfolgreiche Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten ermöglichen, weitgehend erforscht und in Form von zahlreichen Produkten kommerziell verfügbar sind. Die geeignete Implementierung dieser Technologien bzw. Produkte in bestehende, konventionelle Fahrzeugflotten ist hingegen wissenschaftlich noch nicht vollständig geklärt. Insbesondere aus Sicht der Flottenbetreiber ist nach wie vor unklar, wie eine erfolgreiche Elektrifizierung aussehen kann und welche Auswirkungen auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit durch die Elektrifizierung zu erwarten sind. Dieser Forschungsbedarf lässt sich vor allem anhand der folgenden Kritikpunkte und Forschungslücken am aktuellen Stand der Forschung und Technik festmachen.

Mangel an flottenübergreifenden Ergebnissen: Pauschale Aussagen zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten sind kaum möglich [39, S. 29], [67, S. 376], [14, S. 132]. Vielmehr ist der jeweilige Einsatzzweck der Flotte zu berücksichtigen [10, S. 92], [59, S. 112]. Hierbei spielen insbesondere die individuellen Mobilitätsmerkmale einer Flotte, wie beispielsweise Fahrdistanzen, Standorte und Standzeiten, eine herausragende Rolle [5, S. 45].

Die meisten Vorarbeiten befassen sich daher mit individuellen Fahrzeugflotten. Hierbei sind im Besonderen die Arbeiten von Betz et al. [39, 145, 146], Schulz et al. [10, 59], Funke und Burgert [71, 84] und Pronobis et al. [126, 140] zu nennen. Aus diesen Vorarbeiten lassen sich zwar praxisrelevante Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung ableiten. Diese Aussagen und Empfehlungen gelten jedoch nur für die individuell untersuchten Fahrzeugflotten. Ihre Übertragbarkeit auf andere Flotten ist hingegen weitgehend ungeklärt.

Gnann et al. [11, 12] und Plötz et al. [54] gehen daher einen anderen Weg. Sie untersuchen die Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten nach Wirtschaftszweigen. Dadurch können Aussagen zur Flottenelektrifizierung abgeleitet werden, die relativ viele verschiedene Flotten aus der Praxis adressieren. Der Fokus dieser Vorarbeiten liegt jedoch auf Machbarkeits- und Potentialanalysen. Dabei wird vorrangig die Frage untersucht, ob ein Einsatz von BEV generell überhaupt möglich ist. Praxisrelevante Empfehlungen zur konkreten Umsetzung von Elektromobilität in gewerblichen Fahrzeugflotten fehlen.

Mangelnde Ganzheitlichkeit der Elektrifizierung: Der Großteil der bisherigen Forschung betrachtet den Umstieg auf BEV sowie die Planung von LIS isoliert voneinander. Es existieren kaum wissenschaftliche Untersuchungen, die eine ganzheitliche Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten beleuchten. Dadurch sind Wechselwirkungen und mögliche Synergien zwischen den Teilsystemen „Flotte“, „LIS“ sowie „Standortlastprofil“ einer elektrifizierten Fahrzeugflotte bisher weitestgehend unbekannt. Als Ausnahmen sind hier explizit die Arbeiten von Betz [39, 145, 146] und Schulz [59] zu nennen.

Geringe Marktreife der untersuchten Ladetechnologien: Die Mehrzahl der bisherigen Forschungsarbeiten im Bereich des gesteuerten Ladens untersucht Technologien, deren Marktreife aktuell noch nicht erreicht und somit ungewiss ist. Für Flottenbetreiber, die einen sofortigen Umstieg anstreben, sind Untersuchungen zukünftiger Technologien nur bedingt relevant. Eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit kommerziell verfügbaren Ladestrategien ist dem Autor nur aus Pronobis et al. [126, 140] bekannt.

Geringe Modellierungstiefe von BEV: In Übereinstimmung und Erweiterung zu Betz [39, S. 29] ist auch die BEV-Modellierung vieler genannten Studien kritisch zu sehen. Zahlreiche wegweisende Vorarbeiten bilden den Energieverbrauch sowie das Mobilitätsverhalten der BEV stark vereinfacht ab. So basieren die Ergebnisse von Gnann et al. [11, 12], Plötz et al. [54]

und Pronobis et al. [126, 140])) im Wesentlichen auf einfachen Fahrtenbüchern mit Ankunfts- und Abfahrtszeiten an potentiellen Ladestandorten sowie auf Durchschnittswerten zu Fahrzeugreichweiten bzw. Energieverbräuchen. Für möglichst realitätsgetreue und praxisnahe Ergebnisse ist es wünschenswert, das Mobilitätsverhalten der BEV auf Basis dynamischer Bewegungsdaten und die Energieverbräuche mittels fahrzeugspezifischer Simulationsmodelle zu ermitteln.

Fehlender Bezug zur Fahrzeugflotte: In vielen Arbeiten werden Aussagen zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten abgeleitet, indem einzelne Fahrzeuge losgelöst von der Fahrzeugflotte betrachtet werden. Hierzu zählen beispielsweise die Arbeiten von Gnann et al. [11, 12] und Plötz et al. [54]. Kritisch ist anzumerken ist hierbei, dass potentielle Wechselwirkungen beim gleichzeitigen Laden mehrerer Fahrzeuge an einem Firmenstandort vernachlässigt werden. Auch der Einfluss unterschiedlicher Flottengrößen sowie Firmenstandortgrößen darauf ist bisher ungeklärt.

2.3.2 Forschungsfragen

Wie aus den identifizierten Forschungslücken (Kapitel 2.3.1) hervorgeht, ist die Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten wissenschaftlich noch nicht vollständig geklärt. Insbesondere aus Sicht der Flottenbetreiber ist noch unklar, wie eine erfolgreiche Elektrifizierung aussehen könnte und welche Auswirkungen auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit durch die Elektrifizierung zu erwarten sind. Flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen hierzu fehlen bislang weitgehend.

Die Kritik am Stand der Forschung und Technik (Kapitel 2.3.1) macht außerdem deutlich, dass eine differenzierte Betrachtung gewerblicher Fahrzeugflotten notwendig ist. Zahlreiche Vorarbeiten weisen darauf hin, dass der jeweilige Einsatzzweck, insbesondere im Hinblick auf die wesentlichen Mobilitätsmerkmale, bei der Elektrifizierung zu berücksichtigen ist.

Zentrale Fragestellung

Vor diesem Hintergrund leitet sich die zentrale Fragestellung dieser Arbeit ab.

Welche flottenübergreifenden Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung lassen sich für typische Einsatzzwecke gewerblicher Fahrzeugflotten ableiten?

Teilfragestellungen

Aus dieser zentralen Fragestellung leiten sich folgende Teilfragestellungen ab, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erörtert werden sollen.

1. Durch welche Mobilitätsmerkmale zeichnen sich typische Einsatzzwecke gewerblicher Fahrzeugflotten aus?
2. Welche Auswirkungen hat jeweils eine Flottenelektrifizierung auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit?
3. Welchen Einfluss hat jeweils die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit?
4. Welche BEV und LIS sind zur Flottenelektrifizierung jeweils am besten geeignet?

3 Herleitung des Vorgehens

Grundlage dieser Arbeit bildet ein umfangreicher Bewegungsdatensatz verschiedener gewerblicher Fahrzeugflotten. Dieser Datensatz wird im folgenden Unterkapitel 3.1 vorgestellt. Darauf aufbauend wird im Unterkapitel 3.2 der Lösungsansatz hergeleitet. Abschließend werden das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit vorgestellt (Unterkapitel 3.3 und 3.4).

3.1 Datensatz

Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München wurden im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten verschiedene Flottenversuche durchgeführt. Dabei wurden Bewegungsdaten unterschiedlichster Fahrzeuge erfasst. Der gesamte Datensatz eines Fahrzeugs wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Fahrprofil bezeichnet.

Flottenversuche und Fahrprofile

Für die vorliegende Arbeit sind nicht alle aufgezeichneten Fahrprofile relevant. Da die Elektrifizierung von gewerblichen Flotten untersucht wird, sind Fahrprofile von privaten oder bereits elektrifizierten Fahrzeugen keine geeigneten Fahrprofile. Es werden daher nur Fahrprofile von verbrennungsmotorisch-betriebenen gewerblichen Fahrzeugen untersucht.

Nicht alle aufgezeichneten Fahrprofile sind für die vorliegende Arbeit relevant. Da die Elektrifizierung gewerblicher Flotten untersucht wird, sind Fahrprofile von privaten oder bereits elektrifizierten Fahrzeugen keine geeigneten Fahrprofile. Es werden daher nur Fahrprofile von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen untersucht.

Die aufgezeichneten Fahrprofile unterscheiden sich in Art und Umfang der erfassten Daten. Manche Fahrprofile erfüllen daher nicht die Mindestvoraussetzungen an das Vorhandensein bestimmter Daten. Zum einen werden Informationen über die Flotte benötigt, zu der das Fahrzeug gehört. Dazu zählen insbesondere der Betriebszweck des Unternehmens und der Firmenstandort, an dem das Fahrzeug regelmäßig verkehrt. Zum anderen werden Informationen über das Fahrzeug selbst sowie dessen Einsatzzweck benötigt. Die Flottenversuche mit den relevanten Fahrprofilen sind in Abbildung 3.1 spezifiziert.

Die Aufzeichnung erfolgte hauptsächlich im Großraum München. Im Projekt „VEM - Virtuelle Elektromobilität für den Taxi- und Handwerksverkehr München“ wurde das Fahrverhalten von Fahrzeugen aus Handwerks- und Taxibetrieben erfasst [70]. Aus diesem Projekt erfüllen insgesamt 29 Fahrzeuge aus zwölf Flotten die geforderten Voraussetzungen. Weitere 50 Fahrprofile wurden in zwölf unterschiedlichen Flotten im Rahmen des Forschungsvorhabens „WATE - Web-basiertes Analyse-Tool Elektromobilität“ erfasst [148]. Eine weitere Flotte von neun Fahrzeugen aus dem Forschungsvorhaben „M^e - München elektrisiert“ ergänzt den Datensatz [149].

Projekt	Zeitraum	Branche	Relevante Fahrprofile
VEM	03.2013 - 12.2015	Handwerk & Taxi	29 Fahrzeuge aus 13 Flotten
WATE	01.2017 - 03.2018	Handwerk & Industrie	50 Fahrzeuge aus 12 Flotten
M^e	06.2020 - 08.2020	Handwerk	9 Fahrzeuge aus einer Flotte

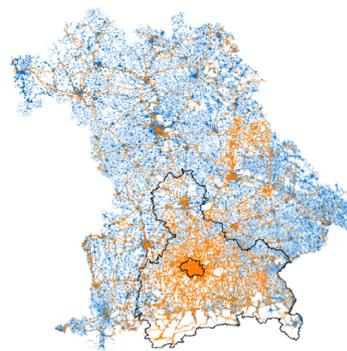


Abbildung 3.1: Zusammenfassung der Flottenversuche (Heatmap übernommen von [147])

In der Regel wurden nicht alle, sondern nur ausgewählte Fahrzeuge einer Flotte aufgezeichnet. Meist wurden die Fahrzeuge ausgewählt, deren Elektrifizierung erfolgsversprechend erschien oder deren Bewegungsdaten für das Unternehmen interessant waren.

Datenerfassung

Die Aufzeichnung der Bewegungsdaten erfolgte durch eine Applikation für Smartphones. Diese Applikation wurde auf Smartphones installiert, die in den Fahrzeugen verbaut wurden. Die Smartphone-Applikation ermöglicht das Erfassen von Daten des globalen Positionierungssystem (engl.: Global Positioning System (GPS)). Dabei werden Zeitstempel, Position, Geschwindigkeit und geographische Höhe mit einer Aufzeichnungsrate d erfasst. Der Aufzeichnungsvorgang wird automatisch in Abhängigkeit vom Zündzustand des Fahrzeugs eingeleitet. Die erfassten Daten werden auf dem Smartphone gespeichert, bis sie über ein drahtloses lokales Netzwerk (engl.: Wireless Local Area Network (WLAN)) an einen Server im Back-End übermittelt werden. Der Server empfängt, verarbeitet und speichert die Daten anschließend in einer relationalen Datenbank. Dabei werden die GPS-Daten unter anderem mit Temperatur-Daten angereichert, die über eine stationäre Messtation im Großraum München kontinuierlich erfasst werden. Zusätzlich zu diesen von der Zeit abhängigen Bewegungs- und Umgebungsdaten, den sogenannten Sensordaten, wurden im Rahmen der Flottenversuche statische Daten zu den Fahrzeugen und Flotten erfasst. Eine detaillierte Beschreibung der Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung ist in [147] und [150] veröffentlicht.

Datenstruktur

Abbildung 3.2 visualisiert die Struktur des Datensatzes. Die feinste Auflösungsstufe stellen die Sensordaten dar. Aus den Sensordaten werden während der Datenverarbeitung die einzelnen Fahrten abgeleitet. Eine Fahrt zeichnet sich durch einen Start- und Endzeitstempel, eine Start- und Endposition sowie eine Distanz aus. Jeder Fahrt ist ein Fahrzeug zugeordnet. Ein Fahrzeug weist eine Fahrzeugklasse gemäß [151] (Tabelle A.1 im Anhang) und eine Fahrzeugart, d. h. entweder Pkw oder Nutzfahrzeug (Nfz), auf. Ein Nfz bezeichnet dabei Hochdachkombis, Kastenwagen oder Kleintransporter mit einer Nutzlast von mindestens 0,5 Tonnen bis maximal 3,5 Tonnen. Nfz transportieren in der Regel Güter und weisen daher eine bestimmte Zuladung auf. Ein Fahrzeug hat außerdem einen der folgenden Einsatzzwecke:

- Management (Geschäftsführung, Vertrieb, etc.)
- Dienstleistung (Montage, Wartung, technischer Support, ambulante Pflege, etc.)

- Gütertransport
- Personenbeförderung

Darüber hinaus sind die typischen Arbeitstage bekannt, an denen das Fahrzeug geschäftlich genutzt wird. Wenn das Fahrzeug auch privat verwendet wird, so ist der Wohnort des Fahrers ebenfalls bekannt. Die durchschnittliche Zuladung exklusive des Fahrers ist ebenfalls bekannt. Jedes Fahrzeug gehört schließlich zu einer Flotte, die über einen Firmenstandort sowie einen Betriebszweck definiert ist.

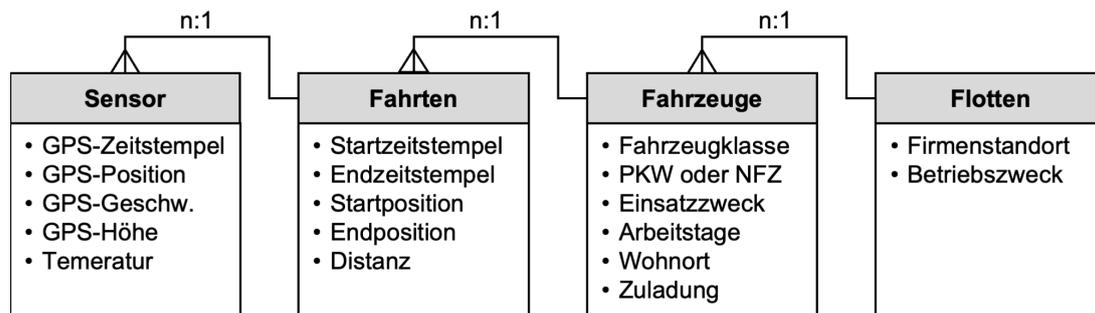


Abbildung 3.2: Datenstruktur des Datensatzes

Beschreibung des Datensatzes

Einsatzzwecke: Tabelle 3.1 zeigt den Umfang des Datensatzes in Abhängigkeit vom Einsatzzweck auf. Die Dienstleistung ist mit 34 Fahrzeugen am stärksten vertreten. Dienstleistungsfahrzeuge weisen auch die meisten Wochen mit aufgezeichneten Daten auf. Die meisten Fahrten und höchsten Fahrdistanzen weisen hingegen Fahrzeuge zur Personenbeförderung auf. Die insgesamt 88 Fahrprofile umfassen somit 2 234 Wochen an Bewegungsdaten. Dies entspricht über 100 000 Fahrten bzw. knapp 1,2 Mio. km. Auffällig dabei ist die relativ hohe Anzahl der aufgezeichneten Wochen im Vergleich zur Anzahl der aufgezeichneten Fahrzeuge. Im Schnitt umfasst ein Fahrprofil rund 25 Wochen an Bewegungsdaten.

Tabelle 3.1: Umfang des Datensatzes in Abhängigkeit vom Einsatzzweck

Einsatzzweck	Fahrzeuge	Wochen	Fahrten	Distanz in km
Management	13	315	6 443	104 639
Dienstleistung	34	960	26 571	194 185
Gütertransport	30	318	16 824	127 756
Personenbeförderung	11	641	57 771	772 389
Summe	88	2 234	107 609	1 198 969

Betriebszwecke: Abbildung 3.3 zeigt die Anzahl der Flotten, der Fahrzeuge und die Verteilung der Einsatzzwecke aufgeschlüsselt nach den Betriebszwecken der jeweiligen Unternehmen. Die Mehrheit der insgesamt 26 Flotten sind dem Handwerk zuzuordnen. Neben diesen Handwerksflotten sind auch Flotten aus den Bereichen Energiedienstleistung, Kommunikationstechnik und Maschinenbau vertreten. Sonderfälle stellen hierbei ambulante Pflegedienste sowie Taxiflotten dar.

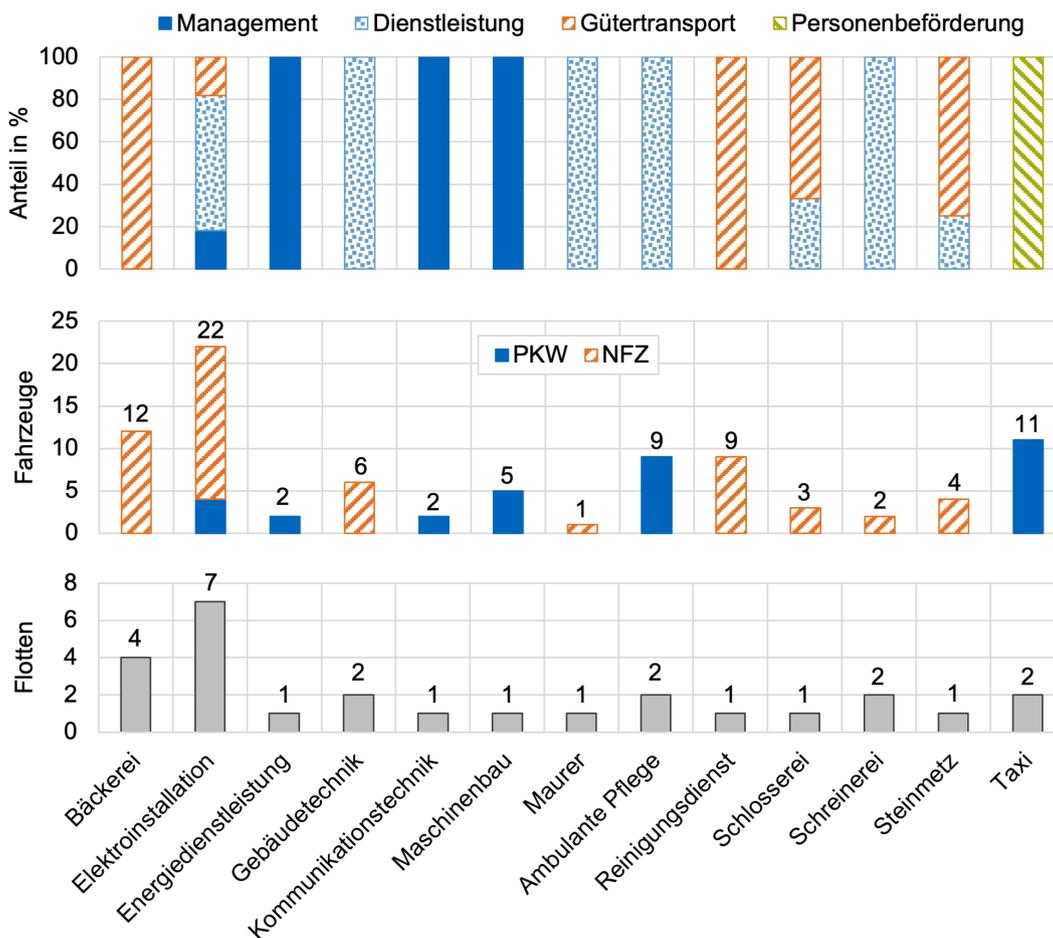


Abbildung 3.3: Umfang des Datensatzes in Abhängigkeit vom Betriebszweck

Die meisten Flotten und Fahrzeuge sind aus dem Bereich der Elektroinstallation. Der Datensatz umfasst sieben Elektroinstallations-Flotten mit insgesamt 22 Fahrzeugen. Schlusslicht dahingehend bildet eine Maurer-Flotte mit einem einzigen Fahrzeug. Im Durchschnitt umfasst der Datensatz drei Fahrzeuge je Flotte. Die beiden Merkmale Fahrzeugart und Einsatzzweck sind je Betriebszweck überwiegend homogen ausgeprägt. Lediglich die Betriebszwecke Elektroinstallation, Schlosserei und Steinmetz stellen hierbei Ausnahmen dar.

Privatnutzung: Es ist außerdem bekannt, dass alle 13 Management-Fahrzeuge sowie 14 der insgesamt 34 Dienstleistungs-Fahrzeuge sowohl geschäftlich als auch privat genutzt werden (in Abbildung 3.3 nicht dargestellt). Die jeweiligen Wohnorte der Fahrer sind bekannt. Die restlichen Fahrzeuge sind zwar nicht für die Privatnutzung vorgesehen. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fahrzeuge ab und zu nach der Arbeit mit nach Hause genommen, und nicht am Firmenstandort abgestellt werden. Die Wohnorte der Fahrer sind in diesen Fällen allerdings nicht bekannt.

Arbeitstage: Alle Fahrzeuge werden von Montag bis Freitag eingesetzt. Der Samstag stellt für 31 der insgesamt 88 Fahrprofile einen Arbeitstag dar. Sonntags sind nur 24 Fahrzeuge regelmäßig im Einsatz. Lediglich die Fahrzeuge der Bäckereien, der ambulanten Pflegedienste sowie der Taxibetriebe werden auch am Wochenende eingesetzt.

3.2 Lösungsansatz

Aus dem oben beschriebenen Datensatz (Unterkapitel 3.1) sollen flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung für typische Einsatzzwecke gewerblicher Fahrzeugflotten abgeleitet werden.

Problem: Mit Blick auf die Vorarbeiten erscheint es zunächst naheliegend, die verfügbaren Flotten (Abbildung 3.3) hierzu einzeln zu untersuchen, um auf Basis ihres Einsatzzwecks flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen abzuleiten. Die Aussagekraft solcher Aussagen und Empfehlungen wäre allerdings stark eingeschränkt, weil sie nur auf 26 verschiedenen Flotten basieren würden.

Während die Anzahl der verfügbaren Flotten im vorliegenden Datensatz gering ist, ist die Aufzeichnungsdauer der einzelnen Fahrprofile vergleichsweise hoch. Ein durchschnittliches Fahrprofil umfasst 25 Wochen an Bewegungsdaten, sodass insgesamt 2 234 Wochen an Bewegungsdaten zur Verfügung stehen (Tabelle 3.1).

Lösung: Der Lösungsansatz dieser Arbeit sieht daher vor, die Fahrprofile in ihre einzelnen Wochen zu zerlegen (Abbildung 3.4). Dadurch entsteht eine Vielzahl an neuen Fahrprofilen mit einer Dauer von einer Woche. Diese neuen Fahrprofile werden anschließend zu zusammenhängenden Flottenfahrprofilen zusammengesetzt.

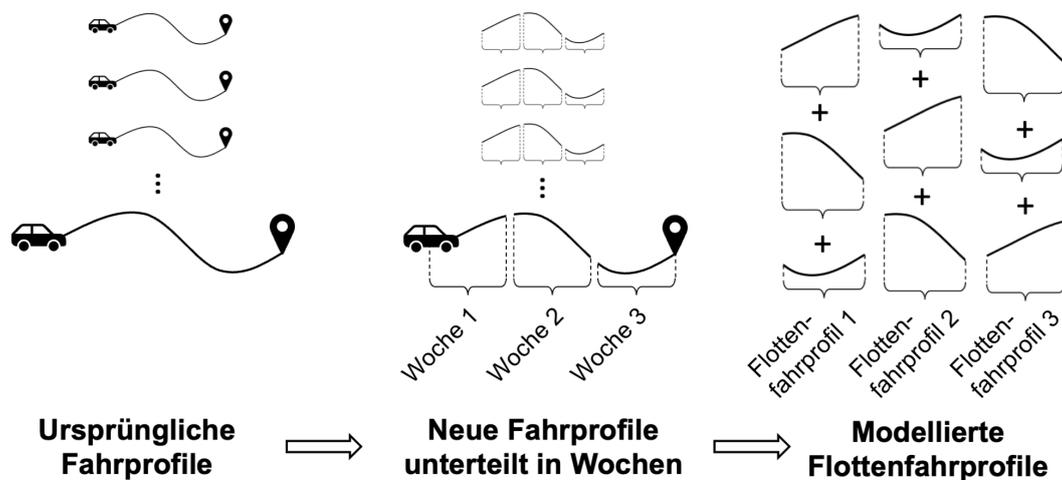


Abbildung 3.4: Lösungsansatz

Dabei kann ein und dieselbe Woche eines ursprünglichen Fahrprofils explizit Teil mehrerer verschiedener Flottenfahrprofile sein. Ebenso können mehrere unterschiedliche Wochen desselben ursprünglichen Fahrprofils Teil eines gemeinsamen Flottenfahrprofils sein. Aufgrund solcher Überschneidungen zwischen Flottenfahrprofilen kann das Mobilitätsverhalten beliebig vieler unterschiedlicher Flotten modelliert werden.

Es ist vorgesehen, dass ein Flottenfahrprofil ausschließlich aus Fahrprofilen mit gleichem Einsatzzweck besteht. Zwar weisen reale Flotten in der Praxis in der Regel keine derart homogenen Strukturen auf. Jede heterogene Flotte kann jedoch in kleinere homogene Teilflotten unterteilt werden. Für diese homogenen Teilflotten gelten die Ergebnisse dieser Arbeit wiederum, sodass sie auf die heterogene Gesamtflotte extrapoliert werden können. Durch Variation der Fahrprofile und der Flottengröße können so für jeden Einsatzzweck unterschiedliche Flottenfahrprofile modelliert werden.

Diese neuen Fahrprofile sowie die daraus zusammengesetzten Flottenfahrprofile bilden die Grundlage für anschließende Simulationen und Auswertungen, mit deren Hilfe schließlich flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung schließlich abgeleitet werden.

3.3 Vorgehen

Aus dem oben beschriebenen Lösungsansatz leitet sich das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen ab. Das Vorgehen gliedert sich in vier Schritte: die Datenaufbereitung und -analyse, die Entwicklung eines Simulationsmodells, die Definition von Simulationsszenarien sowie die abschließende Auswertung der Simulationsergebnisse.

Datenaufbereitung und -analyse

Zu Beginn werden im Kapitel 4 die Fahrprofile aus dem Datensatz (Unterkapitel 3.1) aufbereitet und einer Mobilitätsanalyse unterzogen.

Aufbereitung der Fahrprofile: Die Aufbereitung der Fahrprofile im Unterkapitel 4.1 beginnt mit einer Vorverarbeitung, in der unter anderem die Fahrprofile gemäß dem oben beschriebenen Lösungsansatz (Unterkapitel 3.2) in ihre einzelnen Wochen zerlegt werden. Anschließend werden die Fahrprofile im Hinblick auf die zentrale Fragestellung dieser Arbeit (Unterkapitel 2.3.2) nach Einsatzzwecken klassifiziert.

Mobilitätsanalyse: Anschließend werden im Unterkapitel 4.2 die nach Einsatzzwecken klassifizierten Fahrprofile im Hinblick auf das Mobilitätsverhalten analysiert (erste Teilfragestellung dieser Arbeit).

Simulationsmodell

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Entwicklung eines Simulationsmodells zur Bewertung der Elektrifizierung einer Flotte.

Teilmodelle: Das Simulationsmodell umfasst vier Teilmodelle (Unterkapitel 5.2): ein Längsdynamikmodell, ein Lademodell, ein Last- und Lademanagement-Modell sowie einen Optimierungsalgorithmus. Mit Hilfe dieser Teilmodelle wird der Energiefluss zwischen den BEV einer Flotte, einer entsprechenden LIS und dem Firmenstandort simuliert.

Bewertungsmaße: Zur Auswertung der Simulationsergebnisse kommen verschiedene Bewertungsmaße zum Einsatz (Unterkapitel 5.3). Die Bewertungsmaße zeigen mit Blick auf die zweite Teilfragestellung dieser Arbeit (Unterkapitel 2.3.2) die Auswirkungen einer Elektrifizierung auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit auf.

Simulationsszenarien

Im Kapitel 6 werden die Simulationsszenarien zweier, aufeinander aufbauender Simulationsstudien definiert. Die Simulationsstudien bilden den gesamten Prozess der Flottenelektrifizierung nach dem Stand der Technik ab (Unterkapitel 2.2.1 bis 2.2.5). Dabei ist der Umstieg auf BEV (erste Simulationsstudie) vom Aufbau einer eigenen LIS (zweite Simulationsstudie) getrennt. Auf diese Weise kann der Rechenaufwand erheblich reduziert werden, sodass für jede Flotte

unterschiedliche BEV und LIS untersucht werden können. Grundlage für diese Vorgehensweise bildet die in [152] veröffentlichte Methodik zur Umsetzung ganzheitlicher Elektromobilitätslösungen in gewerblichen Flotten.

Erste Simulationsstudie: Ziel der ersten Simulationsstudie ist es, eine Entscheidungsgrundlage für den Umstieg auf BEV zu schaffen. Dazu wird für jedes aufbereitete Fahrprofil der Einsatz verschiedener BEV-Varianten mit Hilfe des Simulationsmodells (Kapitel 5) isoliert von den anderen Fahrprofilen simuliert und bewertet. Unterkapitel 6.1 befasst sich daher mit der Definition der zu simulierenden BEV- sowie LIS-Varianten.

Zweite Simulationsstudie: Die zweite Simulationsstudie zielt auf den Aufbau einer eigenen LIS ab. Hierbei ist entsprechend dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.5) insbesondere das gleichzeitige Laden zu berücksichtigen, weil dies zu hohen Kosten führen kann. Eine isolierte Betrachtung der Fahrprofile, wie in der ersten Simulationsstudie, ist daher nicht ausreichend.

Deshalb umfasst die Definition der Simulationsszenarien (Unterkapitel 6.2) die Modellierung batterieelektrischer Flotten. Dabei wird zunächst auf Basis der Ergebnisse der ersten Simulationsstudie für jedes Fahrprofil das am besten geeignete BEV ausgewählt. Anschließend werden die Fahrprofile gemäß dem Lösungsansatz dieser Arbeit zu Flottenfahrprofilen zusammengesetzt. Schließlich werden für jede modellierte Flotte verschiedene LIS-Varianten definiert, die mit Hilfe einer Simulation der modellierten Flotten (Simulationsmodell aus Kapitel 5) im Rahmen der zweiten Simulationsstudie bewertet werden.

Ergebnisse

Im Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Simulationsstudien anhand der Bewertungsmaße aus Unterkapitel 5.3 ausgewertet. Die Ergebnisse werden entsprechend der Bewertungsmaße in Auswirkungen einer Elektrifizierung auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit (zweite Teilfragestellung dieser Arbeit) unterteilt.

Auswirkungen auf den Flottenbetrieb: Die Auswirkungen auf den Flottenbetrieb werden anhand der drei Bewertungskriterien Fahrzeugantriebsleistung, Fahrzeugreichweite und Zwischenladebedarf quantifiziert. Die Auswertung dieser Bewertungsmaße erfolgt im Unterkapitel 7.1 in Abhängigkeit von verschiedenen Simulationsszenarien, also verschiedenen BEV und LIS (dritte und vierte Teilfragestellung dieser Arbeit).

Auswirkungen auf die Flottenwirtschaftlichkeit: Zur Beschreibung der Auswirkungen auf die Flottenwirtschaftlichkeit werden die Energiekosten herangezogen, die beim Laden an der eigenen sowie fremden LIS entstehen. Diese Energiekosten werden im Unterkapitel 7.1 in Abhängigkeit von verschiedenen Simulationsszenarien, d. h. BEV- und LIS-Varianten (dritte und vierte Teilfragestellung dieser Arbeit), ausgewertet.

3.4 Aufbau der Arbeit

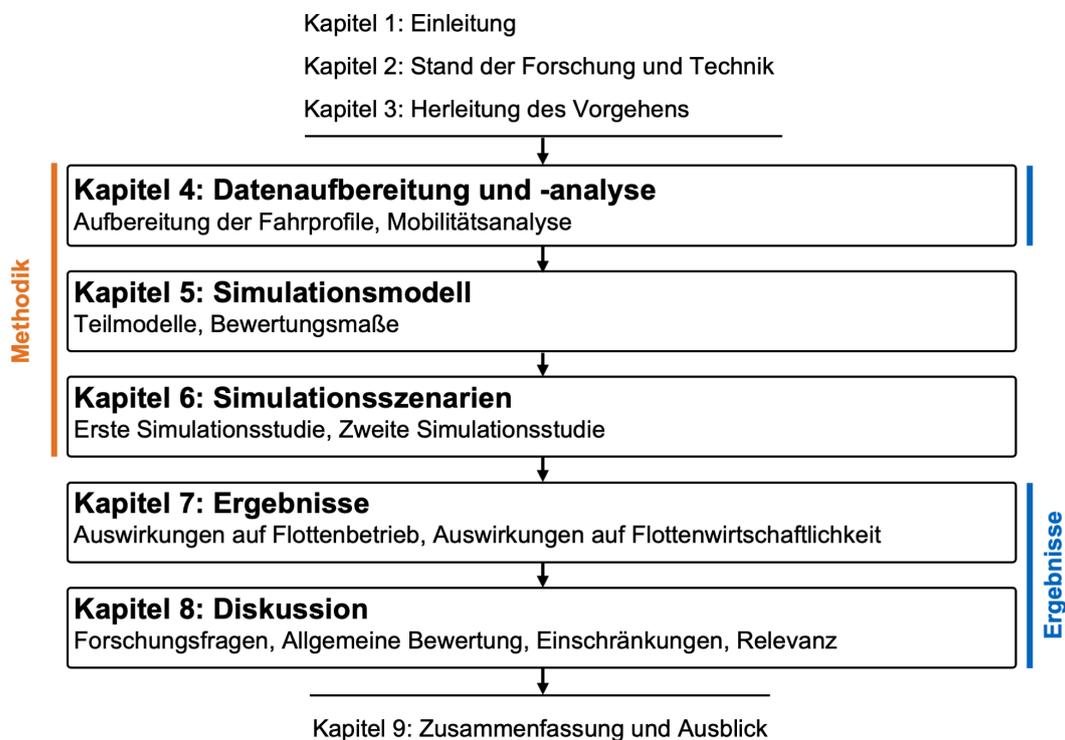


Abbildung 3.5: Aufbau der Arbeit

4 Datenaufbereitung und -analyse

Im folgenden Kapitel wird die Aufbereitung der Fahrprofile beschrieben (Unterkapitel 4.1) und das zugrunde liegende Mobilitätsverhaltens analysiert (Unterkapitel 4.2).

4.1 Aufbereitung der Fahrprofile

Die Aufbereitung der Fahrprofile beginnt mit einer Vorverarbeitung, in der die Fahrprofile unter anderem in ihre einzelnen Wochen zerlegt, nach bestimmten Kriterien selektiert sowie auf einen gemeinsamen Zeitraum synchronisiert werden. Anschließend werden die Fahrprofile nach den Einsatzzwecken klassifiziert, für die im weiteren Verlauf der Arbeit flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung abgeleitet werden.

4.1.1 Vorverarbeitung

Zerlegung in Wochen

Gemäß dem Lösungsansatz dieser Arbeit (Unterkapitel 3.2) werden die Fahrprofile in einzelne Wochen zerlegt. Der virtuelle Schnittpunkt der Zeitachse liegt um Mitternacht zwischen Sonntag und Montag. Es wird nur in den Standphasen des Fahrprofils geschnitten. Beginnt eine Fahrt vor diesem virtuellen Schnittpunkt und endet erst danach, so bleibt diese Fahrt im Fahrprofil erhalten.

Detektion potentieller Ladestopps

Für die weitere Verarbeitung der Fahrprofile ist die Kenntnis der Stopps an Ladestandorten nötig.

Definition der Ladestandorte: Entsprechend dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.3) wird als primärer Ladestandort der Firmenstandort gewählt. Wird das Fahrzeug auch privat genutzt, stellt der Wohnort des Fahrers einen weiteren Ladestandort dar. Auf (halb-)öffentliche Ladestandorte wird hingegen verzichtet, weil diese kaum planbar sind und sich daher nicht zur Deckung des Grundladebedarfs eignen (Unterkapitel 2.2.3). Der Bedarf an solcher (halb-)öffentlicher LIS wird im Rahmen dieser Arbeit durch entsprechende Bewertungsmaße berücksichtigt (Unterkapitel 5.3.1).

Erkennung von Stopps an Ladestandorten: Die Erkennung von Stopps an Ladestandorten erfolgt analog zu Betz et al. [48] über den Abgleich der GPS-Positionen von Fahrzeug- und Ladestandort. Ist der Abstand zwischen beiden Positionen kleiner als 500 m, so handelt es sich um einen Stopp an einem Ladestandort [153]. Damit wird also angenommen, dass Fahrer grundsätzlich dazu bereit sind, bis zu 500 m vom eigentlichen Ziel entfernt zu parken.

Selektion von Fahrprofilen

Die Selektion der Fahrprofile erfolgt in zwei Stufen.

Aussortieren von Messlücken und -aussetzern: Bei der Verwendung von Smartphones zur Datenerfassung können Messlücken und -aussetzer in den aufgezeichneten Fahrprofilen nicht ausgeschlossen werden. Übliche Messfehler bei Verwendung von Smartphones werden in der Arbeit von Ritzer [154] quantifiziert und analysiert. Gerade in Städten zwischen hohen Gebäuden oder in Tunneln können Abbrüche im GPS-Signal auftreten [155, S. 87f] und zu Lücken in den Fahrprofilen führen. Darüber hinaus konnte im Rahmen der Flottenversuche auch nicht immer sichergestellt werden, dass der Aufzeichnungsvorgang rechtzeitig oder überhaupt gestartet wurde. Da das Smartphone nur bei eingeschalteter Zündung mit Energie versorgt wird, kann sich die Batterie des Smartphones bei längeren Standphasen bis zum selbstständigen Ausschalten entladen. In diesem Fall startet der Aufzeichnungsvorgang erst dann, wenn das Smartphone wieder genug Energie hat, um sich selbstständig anzuschalten und die Applikation zu starten. Dieser Vorgang kann je nach Batteriealter und -entladungstiefe einige Minuten dauern. Zudem können Störungen und Aussetzer in der physischen Verbindung des Smartphones mit dem Fahrzeug, z. B. durch einen Wackelkontakt, nicht ausgeschlossen werden. Fahrprofile mit einer hohen Quote an solchen Messfehler, -lücken oder -aussetzern können die Ergebnisse stark verfälschen.

Um diese fehlerbehafteten Fahrprofile auszusortieren, werden die Fahrprofile selektiert, deren prozentualer Anteil an fehlerhaften Fahrten unter 20 % liegt. Dabei wird eine Fahrt als fehlerhaft definiert, wenn ihre Startposition von der Endposition der vorhergehenden Fahrt mehr als 500 m entfernt ist. Die Entfernung von 500 m entspricht dabei dem Radius, der zur Detektion von Stopps an Ladestandorten herangezogen wird.

Stimmt also die Endposition einer Fahrt nicht mit der Startposition der nächsten Fahrt überein, so hat das Fahrzeug offenbar eine Distanz zurückgelegt, die in den Daten nicht abgebildet ist. Fahrten mit Messlücken und -aussetzern sowie fehlende Fahrten mit unterschiedlichen Start- und Endpositionen können auf diese Weise zuverlässig erkannt und aussortiert werden. Fehlende Fahrten mit gleicher Start- und Endposition können mit diesem Verfahren hingegen nicht identifiziert werden. Sie werden allerdings in der zweiten Selektionsstufe berücksichtigt.

Auswahl repräsentativer Fahrprofile: Entsprechend dem Lösungsansatz dieser Arbeit soll jedes einzelne Fahrprofil das gesamte Mobilitätsverhalten eines Flottenfahrzeugs repräsentieren. Ein Fahrprofil umfasst aber lediglich Bewegungsdaten über einen Zeitraum von einer Woche. Die Mobilitätsmuster dieser Woche müssen also für ein Flottenfahrzeug des betrachteten Einsatzzwecks repräsentativ sein.

Nicht jedes Fahrprofil ist repräsentativ. So sind Fahrprofile mit besonderen Ereignissen, wie z. B. längere Geschäftsreisen, Urlaubsfahrten oder wartungs- oder krankheitsbedingte Ausfälle, nicht geeignet, um eine typische Woche des Flottenfahrzeugs zu repräsentieren. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass Fahrzeuge ohne Privatnutzung nach der Arbeit mit nach Hause genommen, und nicht am Firmenstandort abgestellt werden. In solchen Fällen würde die Definition der Einsatzzwecke von dem tatsächlichen Mobilitätsverhalten abweichen und die Ergebnisse dahingehend verfälschen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Aufzeichnung der Fahrprofile in vielen Fällen nicht am Stück, sondern in einzelnen Phasen erfolgte. Beginn und Ende einer Aufzeichnungsphase lagen dabei in der Regel unter der Woche. Die davon betroffenen Wochen sind unvollständig und daher ebenfalls nicht repräsentativ. Hinzu kommen längere Messlücken und -aussetzer, die in der ersten Selektionsstufe aufgrund gleicher Start- und Endposition nicht aussortiert werden können.

Die oben beschriebenen Kriterien für nicht repräsentativer Fahrprofile lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass über einen längeren Zeitraum keine Aktivität am Firmenstandort registriert wurde. Laut der Mobilitätsstudie KID [55] legen gewerbliche Pkw an Arbeitstagen 3,62 Fahrten zurück, wovon 30 % am Firmenstandort enden (Tabelle 2.1). Demnach endet also im Durchschnitt eine Fahrt pro Tag am Firmenstandort.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Arbeit ein Fahrprofil dann als repräsentativ angesehen, wenn es maximal einen Arbeitstag ohne Abfahrt oder Ankunft am Firmenstandort aufweist. Es wird also gefordert, dass an allen anderen Arbeitstagen das Fahrzeug mindestens einmal eine Tour am Firmenstandort beginnt oder beendet.

Zusammenfassung: Das Ergebnis beider Selektionsstufen ist in Tabelle 4.1 gezeigt.

Tabelle 4.1: Ergebnis der Selektion in der Datenvorverarbeitung

Selektionsstufe	Fahrprofile	Distanz in km
Vor der Selektion	2 234 ($\hat{=}$ 100 %)	1 198 969 ($\hat{=}$ 100 %)
Aussortieren von Messlücken und -aussetzern	1 572 ($\hat{=}$ 70 %)	1 006 937 ($\hat{=}$ 84 %)
Auswahl repräsentativer Fahrprofile	399 ($\hat{=}$ 18 %)	263 260 ($\hat{=}$ 22 %)

Aggregation von Fahrten zu Touren

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit sind nur Stopps an Ladestandorten relevant. Aus diesem Grund werden alle Fahrten eines Fahrprofils zwischen zwei Ladestandorten zu Touren aggregiert. Eine Tour wird somit als eine Kette von Fahrten definiert, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stopps an einem Ladestandort stattfinden.

Synchronisation der Fahrprofile

Damit die Fahrprofile miteinander zu Flotten kombiniert werden können, müssen alle Zeitwerte der Fahrprofile auf eine gemeinsame Woche synchronisiert werden. Die Wahl der Woche beeinflusst sowohl die Lastprofile am Hauptstandort, weil diese von der Jahreszeit abhängen, als auch den Energieverbrauch der BEV, weil insbesondere der Energieverbrauch der Nebenverbraucher von der Außentemperatur abhängt. Da die BEV die geforderte Mobilität zu jeder Jahreszeit gewährleisten müssen und der Winter tendenziell den kritischsten Fall darstellt, wird eine zufällige Woche im Winter 2020 gewählt, nämlich die Woche vom 20.01.2020 bis zum 26.01.2020.

4.1.2 Klassifikation nach Einsatzzwecken

Die vorverarbeiteten Fahrprofile werden entsprechend dem Lösungsansatz nach Einsatzzwecken klassifiziert. Der Datensatz (Unterkapitel 3.1) enthält die vier Einsatzzwecke „Management“, „Dienstleistung“, „Gütertransport“ und „Personenbeförderung“ auf. Diese Einsatzzwecke werden um drei weitere erweitert, sodass insgesamt sieben Einsatzzwecke E1 bis E7 im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden (Tabelle 4.2). Im Folgenden werden die Erweiterungen der vier ursprünglichen Einsatzzwecke beschrieben.

Laut Unterkapitel 3.1 werden nur dem Einsatzzweck „Dienstleistung“ sowohl Fahrzeuge mit Privatnutzung als auch Fahrzeuge ohne Privatnutzung zugeordnet. Der Stand der Technik zeigt

Tabelle 4.2: Definition der Einsatzzwecke E1 bis E7

Abk.	Bezeichnung	Beschreibung
E1	Management	Überwiegend Pkw für Management, Vertrieb, etc.
E2	Dienstleistung mit Privatnutzung	Überwiegend Nfz für Wartung, Montage, etc.
E3	Dienstleistung ohne Privatnutzung	Überwiegend Nfz für Wartung, Montage, etc.
E4	Gütertransport	Nfz zum Transport von Gütern (außer Backwaren)
E5	Bäckerei	Nfz zur Auslieferung von Backwaren
E6	Pflegedienst	Pkw für ambulanten Pflegedienste
E7	Taxi	Pkw zur Personenbeförderung

dabei, dass die private Nutzung eines gewerblichen Fahrzeugs einen erheblichen Einfluss auf dessen Elektrifizierung haben kann (Unterkapitel 2.2.1). Insbesondere sollte bei der Elektrifizierung von geschäftlich und privat genutzten Fahrzeugen neben dem Firmenstandort auch der Wohnort des Fahrers als potentieller Ladestandort berücksichtigt werden (Unterkapitel 2.2.3). Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird zwischen Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung und Dienstleistungs-Fahrzeugen ohne Privatnutzung unterschieden (E2 und E3 in Tabelle 4.2).

Die Bäckerei-Fahrzeuge aus Abbildung 3.3 werden ebenfalls getrennt von den übrigen Gütertransport-Fahrzeugen betrachtet. Denn nach Meier et al. [156] weisen Bäckereien ein spezielles Grundlastprofil auf, das sich von anderen gewerblichen Grundlastprofilen abhebt. Es zeichnet sich durch einen besonders hohen Energieverbrauch in den frühen Morgenstunden von Werk- und Samstagen aus. Um dies zu berücksichtigen, werden die Lieferfahrzeuge der Bäckerei-Flotten dem Einsatzzweck „Bäckerei“ zugewiesen (E5 in Tabelle 4.2).

Im Gegensatz zu den restlichen Dienstleistungs-Fahrzeugen werden Pflegedienst-Fahrzeuge sowohl unter der Woche als auch am Wochenende eingesetzt (Unterkapitel 3.1). Die Grundlastprofile am Wochenende weisen im Allgemeinen ein anderes Verhalten als unter der Woche auf [156]. Deshalb wird Pflegedienst-Fahrzeugen ein eigener Einsatzzweck „Pflegedienst“ zugewiesen (E6 in Tabelle 4.2).

4.2 Mobilitätsanalyse

Tabelle 4.3 fasst die aufbereiteten Fahrprofile in Abhängigkeit vom Einsatzzwecken (E1 bis E7 aus Tabelle 4.2) zusammen. Diese Fahrprofile bilden die Datengrundlage für die weiteren Schritte dieser Arbeit. Die den Fahrprofilen zugrundeliegenden Mobilitätsmerkmale definieren und konkretisieren dabei die Einsatzzwecke. Sie haben somit maßgeblichen Einfluss auf die Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung, die für die Einsatzzwecke abgeleitet werden.

Daher werden die Fahrprofile im folgenden Unterkapitel anhand unterschiedliche Mobilitätskennzahlen ausgewertet und analysiert. Die Mobilitätskennzahlen umfassen die Fahrzeugstatus (Unterkapitel 4.2.1), die Fahrdistanzen (Unterkapitel 4.2.2) sowie die verfügbaren Ladefenster (Unterkapitel 4.2.3).

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der aufbereiteten Fahrprofile

Flottenklasse	Fahrprofile	Distanz in km
E1 - Management	55	27 329
E2 - Dienstleistung mit Privatnutzung	51	18 274
E3 - Dienstleistung ohne Privatnutzung	69	14 054
E4 - Gütertransport	49	21 116
E5 - Bäckerei	56	28 262
E6 - Pflegedienst	37	20 875
E7 - Taxi	82	133 349
Summe	399	263 600

4.2.1 Fahrzeugstatus

Um zu verstehen, wann Fahrzeuge stehen und daher laden könnten und wann sie fahren, wird der Fahrzeugstatus im Zeitverlauf untersucht. Der Fahrzeugstatus zeigt gibt an, ob ein Fahrzeug am Firmenstandort, am Wohnort oder einem anderen Standort, d. h. Nicht-Ladestandort, steht, oder ob das Fahrzeug gerade fährt. Abbildung 4.1 zeigt die Fahrzeugstatus der Einsatzzwecke E1 bis E7 als prozentuale Verteilung über die Uhrzeit eines durchschnittlichen Werktages. Im Folgenden werden die Mobilitätsmerkmale vorgestellt, die sich aus Abbildung 4.1 für die Einsatzzwecke E1 bis E7 ableiten lassen.

Fahrzeugstatus während der Arbeitszeit

Als erstes wird der Fahrzeugstatus während der Arbeitszeit ausgewertet. Zur besseren Übersicht sind die Auswertungen nach Einsatzzwecken mit ähnlichem Status gruppiert.

E1: Fahrzeuge stehen überwiegend am Firmenstandort; Management-Fahrzeuge (E1) stehen als einzige während der Arbeitszeit mehrheitlich am Firmenstandort. Während vormittags nur rund 30 % dieser Fahrzeuge unterwegs ist, sind es nachmittags bis zu 40 %.

E2, E3 und E6: Fahrzeuge stehen überwiegend an einem Nicht-Ladestandort; Dienstleistungs- und Pflegedienst-Fahrzeuge (E2, E3 und E6) sind während der Arbeitszeit überwiegend unterwegs. Dabei verbringen sie die meiste Zeit stehend. Dienstleistungs-Fahrzeuge (E2 und E3) sind verstärkt vormittags unterwegs. Pflegedienst-Fahrzeuge (E6) zeichnen sich durch einen Zwei-Schicht-Betrieb mit einem Schichtwechsel um ca. 14:00 Uhr aus, wobei vormittags nahezu alle Fahrzeuge unterwegs sind und nachmittags mehr als die Hälfte der Fahrzeuge am Firmenstandort steht.

E4 und E7: Fahrzeuge fahren oder stehen an einem Nicht-Ladestandort; Gütertransport-Fahrzeuge (E4) sowie Taxis (E7) sind ebenfalls während der Arbeitszeit überwiegend unterwegs. Allerdings werden diese Fahrzeuge im Vergleich zu den vorstehend genannten (E2, E3 und E6) deutlich mehr bewegt. Die Anteile „Fahren“ und „Stehen“ sind also nahezu gleich hoch.

Im Unterschied zu allen übrigen Einsatzzwecken sind Taxis zudem rund um die Uhr im Einsatz, unterbrochen nur durch Schichtwechsel gegen 6:30 Uhr und gegen 18:30 Uhr. Diese Schichtwechsel finden offensichtlich nur teilweise am Firmenstandort statt.

E5: Fahrzeuge fahren überwiegend; Bäckerei-Fahrzeuge (E5) weisen mit Abstand die wenigsten Standzeiten auf. Bäckerei-Fahrzeuge sind zwar im Vergleich zu den anderen relativ

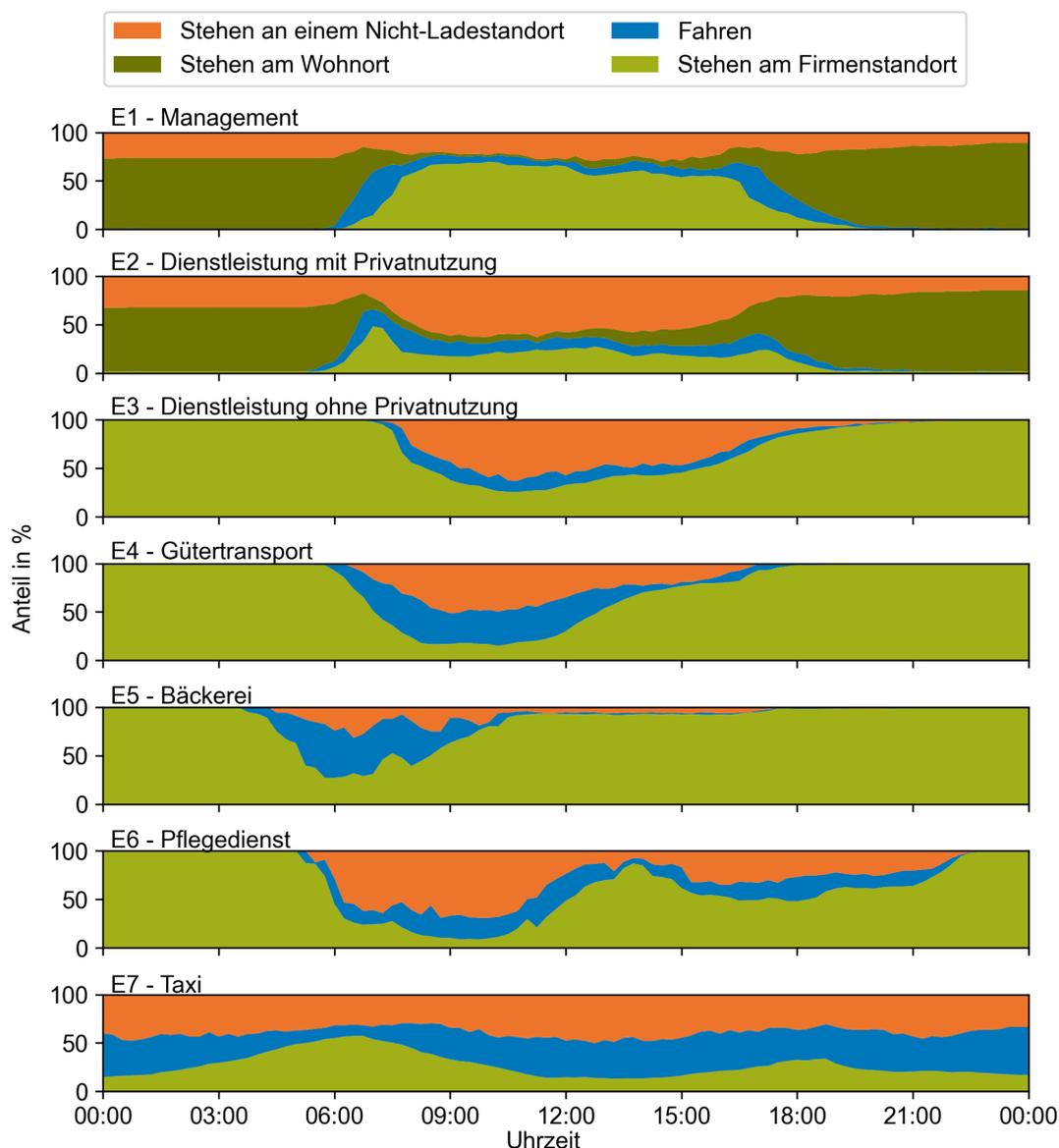


Abbildung 4.1: Fahrzeugstatus in Abhängigkeit vom Einsatzzweck

kurz im Einsatz (ca. 4:00 bis 11:00 Uhr). Wenn sie jedoch im Einsatz sind, wird überwiegend gefahren.

Fahrzeugstatus außerhalb der Arbeitszeit

Nachfolgend wird der Fahrzeugstatus außerhalb der Arbeitszeit ausgewertet, wobei die Auswertungen wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichem Status gruppiert sind.

E1 und E2: Fahrzeuge sehen überwiegend am Wohnort; Die überwiegende Mehrheit der privat genutzten Fahrzeuge (E1 und E2) steht außerhalb der Arbeitszeit am Wohnort des Fahrers. Diese Fahrzeuge treffen bis spätestens 19:00 Uhr am Wohnort ein und übernachten dort bis mindestens 6:00 Uhr am nächsten Morgen. Die Standzeit am Wohnort beträgt somit an typischen Werktagen mindestens 11 h.

E3-E6: Fahrzeuge stehen überwiegend am Firmenstandort; Fahrzeuge ohne Privatnutzung (E3 bis E6) stehen außerhalb der Arbeitszeit überwiegend am Firmenstandort. Dienst-

leistungsfahrzeuge ohne Privatnutzung (E3) stehen ab spätestens 19:00 Uhr für mindestens 10 h am Firmenstandort. Auch Gütertransport-Fahrzeuge (E4) verbringen mindestens 10 h am Firmenstandort, allerdings schon ab spätestens 17:30 Uhr. Mit Abstand am meisten Zeit am Firmenstandort verbringen Bäckerei-Fahrzeuge (E5). Bereits um 11:00 Uhr treffen die letzten Bäckerei-Fahrzeuge am Firmenstandort ein, und stehen dort bis mindestens 4:00 Uhr des folgenden Tages. Im ambulanten Pflegedienst (E6) steht die Mehrheit der Fahrzeuge kurz zum Schichtwechsel um ca. 14:00 Uhr sowie ab 22:00 Uhr mindestens 7 h, also bis mindestens 5:00 Uhr, am Firmenstandort.

E7: Fahrzeuge stehen am Firmenstandort, an einem Nicht-Ladestandort oder Fahren; Bei Taxis beschränkt sich die Zeit außerhalb der Arbeitszeit auf die beiden Schichtwechsel. Selbst dann stehen nur maximal 50 % der Fahrzeuge am Firmenstandort. Beim zweiten Schichtwechsel um 18:00 Uhr ist sogar nur noch rund ein Drittel der Fahrzeuge am Firmenstandort. Eventuell findet also der Schichtwechsel nicht zwingend immer am Firmenstandort statt.

4.2.2 Fahrdistanzen

Die wohl am häufigsten verwendete Mobilitätskennzahl im Bereich der Flottenelektrifizierung ist die tägliche Fahrdistanz bzw. Tagesdistanz (Unterkapitel 2.2.2). Für Fahrzeuge, die über Nacht laden können, spiegelt die Tagesdistanz D_{day} die benötigte Reichweite relativ gut wider. Dies trifft zwar auf den Großteil der gewerblichen Fahrzeuge zu [157, S. 28]. Allerdings vernachlässigt die tägliche Fahrdistanz potentielle Ladevorgänge während des Tages, die entscheidend sein können. Daher wird zusätzlich zur Tagesdistanz D_{day} die Tourdistanz D_{tour} , d. h. die Fahrdistanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stopps an Ladestandorten, untersucht. Abbildung 4.2 zeigt die Tagesdistanz D_{day} und Tourdistanz D_{tour} in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7). Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Mobilitätsmerkmale zusammen, die sich aus Abbildung 4.2 für die Einsatzzwecke E1 bis E7 ableiten lassen.

Tourdistanzen

In diesem Abschnitt werden zunächst die Tourendistanzen aus Abbildung 4.2 ausgewertet. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Tourdistanzen gruppiert.

E1 - E3, E5 und E6: Median-Tourdistanz = 16 - 38 km/Tour; Fahrzeuge der Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E5 und E6 legen im Median zwischen 16 und 38 km/Tour zurück. Die höchsten Tourdistanzen weisen dabei Management- und Pflegedienst-Fahrzeuge (E1 und E6) auf, die im Maximalfall 120 km pro Tour zurücklegen.

E4: Median-Tourdistanz = 63 km/Tour; Gütertransport-Fahrzeuge weisen eine Median-Tourdistanz von 63 km auf. Ein Viertel der Touren ist länger als 114 km (oberes Quartil), wobei im Maximalfall 261 km erreicht werden. Damit liegen Gütertransport-Fahrzeuge zwischen den Taxis (E7) und den übrigen Fahrzeugen.

E7: Median-Tourdistanz = 161 km/Tour; Die mit Abstand längsten Touren werden mit dem Taxi zurückgelegt. Der Median liegt hier bei 161 km. Das obere Viertel reicht sogar von 253 bis 477 km.

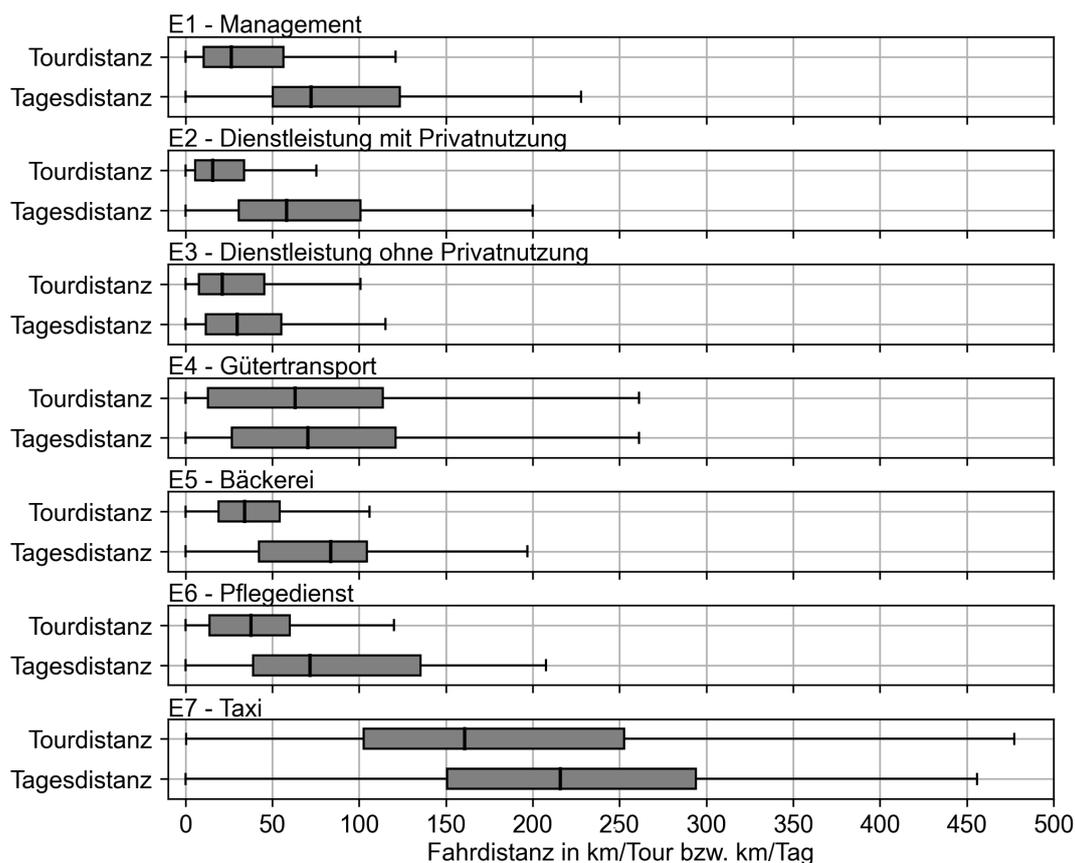


Abbildung 4.2: Tourdistanz und Tagesdistanz in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

Tagesdistanzen

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Tagesdistanzen aus Abbildung 4.2. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Tagesdistanzen gruppiert.

E3: Median-Tagesdistanz = 30 km/Tag; Dienstleistungs-Fahrzeuge ohne Privatnutzung legen an der Hälfte der Tage nicht mehr als 30 km (Median) zurück. Nur ein Viertel der Tagesdistanzen liegt über 55 km/Tag. Maximal werden 115 km/Tag erreicht. Damit weisen Dienstleistungs-Fahrzeuge ohne Privatnutzung im Vergleich zu den übrigen Einsatzzwecken die geringsten Tagesdistanzen auf.

E1, E2, E4 - E6: Median-Tagesdistanz = 58 - 83 km/Tag; Fahrzeuge der Einsatzzwecke E1 und E2 sowie E4 und E6 bilden das Mittelfeld zwischen Dienstleistungs-Fahrzeuge ohne Privatnutzung (E3) und Taxis (E7). Das Schlusslicht stellen dabei Fahrzeuge mit Privatnutzung (E2) dar, die nur 58 km/Tag (Median) zurücklegen. Die höchsten Median-Tagesdistanzen weisen Bäckerei-Fahrzeuge (E5) mit 83 km/Tag auf. Das Maximum mit 261 km/Tag wird dagegen von Gütertransport-Fahrzeugen gebildet.

E7: Median-Tagesdistanz = 216 km/Tag; Die meisten Kilometer am Tag werden mit dem Taxi zurückgelegt. An 50 % der Tage liegen die Tagesdistanzen bei 216 km/Tag (Median) oder darüber. An 25 % der Tage reichen sie sogar von 294 km/Tag (oberes Quartil) bis 456 km/Tag (Maximum).

Touren pro Tag

Um die Anzahl der potentiellen Ladevorgänge pro Tag abzuschätzen, wird die Anzahl der Touren pro Tag ausgewertet. Diese ergibt sich aus der Division der Tagesdistanz durch die Tourdistanz aus Abbildung 4.2. Die Auswertungen sind wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Tourenzahlen gruppiert.

E3, E4 und E7: Median-Tourenzahl = 1,1 - 1,4 Touren / Tag; Gütertransport-Fahrzeuge (E4) führen im Median 1,1 Touren / Tag durch. Auch Taxis (E7) mit 1,3 Touren / Tag sowie Dienstleistungs-Fahrzeuge ohne Privatnutzung (E3) mit 1,4 Touren / Tag sind überwiegend nur einmal am Tag unterwegs.

E1, E2, E5 und E6: Median-Tourenzahl = 1,9 - 3,7 Touren/Tag; Fahrzeuge der Einsatzzwecke E1, E2, E5 und E6 fahren dagegen eher zwei oder mehr Touren am Tag. Pflegedienst-Fahrzeuge (E6) fahren im Median 1,9 Touren/Tag. Sie kommen also entsprechend der Abbildung 4.1 während der Arbeitszeit meist nur zum Schichtwechsel an den Firmenstandort. Fahrzeuge mit Privatnutzung (E1 und E2) fahren allein für die Fahrten zwischen Wohnort und Firmenstandort 2 Touren/Tag. Bei Management-Fahrzeugen (E1) kommen zusätzlich 0,7 Touren/Tag und bei Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung (E2) 1,7 Touren/Tag hinzu.

4.2.3 Verfügbare Ladefenster

Mit Blick auf das Laden von BEV spielen die Standphasen bzw. Stopps eine entscheidende Rolle. Die Dauer einer Standphase allein ist allerdings nur bedingt aussagekräftig. Ob ein bestimmtes Ladefenster ausreicht, um die benötigte Energie nachzuladen, hängt neben der verfügbaren Ladeleistung insbesondere von der benötigten Energiemenge ab. Diese wiederum wird maßgeblich durch die vor einer Standphase zurückgelegte Fahrdistanz bestimmt.

Zur Bewertung der verfügbaren Ladefenster wird daher die Mindestladegeschwindigkeit MLG eines Ladefensters als weitere Mobilitätskennzahl definiert:

$$MLG = \frac{D_{\text{tour}}}{\Delta t_{\text{stop}}} \quad (4.1)$$

Dabei stellt Δt_{stop} die Dauer des Ladefensters dar. Die Mindestladegeschwindigkeit MLG setzt die Tourdistanz D_{tour} in Verhältnis zur daran anschließenden Standzeit Δt_{stop} . Sie gibt also an, wie viele Kilometer pro Stunde nach einer Tour aufgeladen werden müssen, um wieder den SOC zu erreichen, den die Batterie vor der Tour hatte. Die Mindestladegeschwindigkeit ist somit ein Maß für die Höhe der erforderliche Ladeleistung des betrachteten Ladefensters. Bei einer Ladeleistung von 11 kW und einem exemplarischen Verbrauch von 25 kWh/100 km beträgt die Mindestladegeschwindigkeit $MLG = 44 \text{ km/h}$.

Abbildung 4.3 zeigt die Mindestladegeschwindigkeit MLG nach Gleichung (4.1) in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7). Die Mobilitätsmerkmale, die sich aus Abbildung 4.3 für die Einsatzzwecke E1 bis E7 ableiten lassen, sind im Folgenden gruppiert nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Mindestladegeschwindigkeiten beschrieben.

E1 - E6: Median-Mindestladegeschwindigkeit = 1,8 - 10,2 km/h; Die Mindestladegeschwindigkeiten der Einsatzzwecke E1 bis E6 liegen größtenteils deutlich unter der 11 kW Schwelle, d. h. 44 km/h. Lediglich Bäckerei-Fahrzeuge (E4) weisen in Extremfällen Mindestladegeschwindigkeiten bis zu 84 km/h.

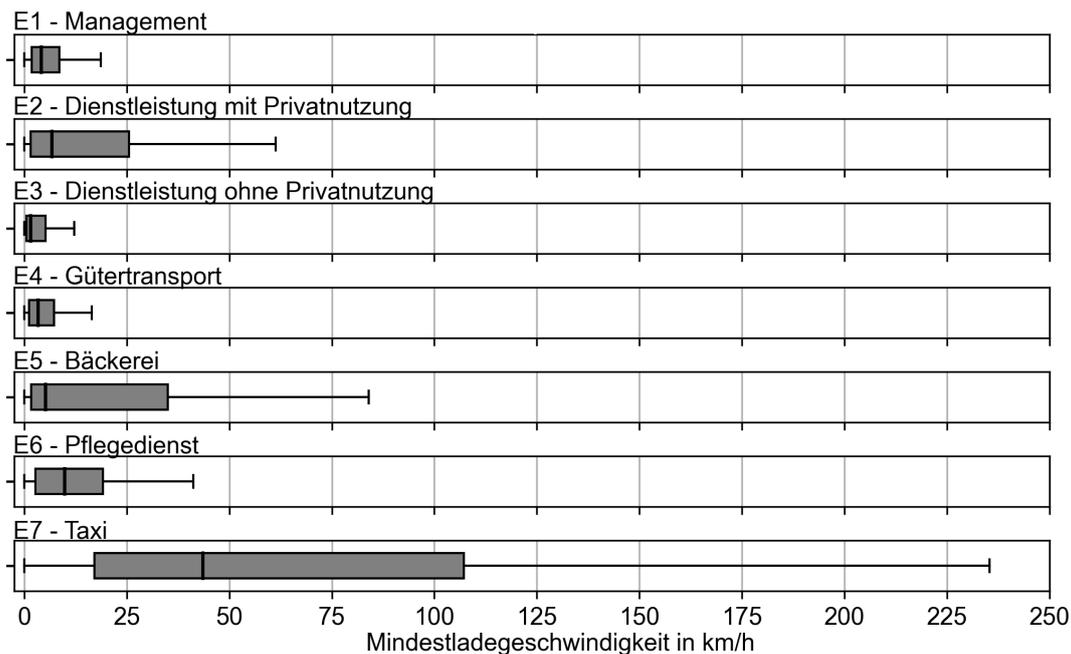


Abbildung 4.3: Mindestladegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

E7: Median-Mindestladegeschwindigkeit = 43,8 km/h; Die Median-Mindestladegeschwindigkeit von Taxis liegt bei 43,8 km/h, also genau an der 11 kW Schwelle. Ein Viertel der Ladefenster weisen Mindestladegeschwindigkeiten von 108 bis 234 km/h auf. Bei einem Verbrauch von 25 kWh/100 km werden damit Ladeleistungen von rund 21 bis 47 kW benötigt.

5 Simulationsmodell

Dieses Kapitel behandelt die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Bewertung der Elektrifizierung einer Flotte. Im Unterkapitel 5.1 wird die Architektur des Simulationsmodells vorgestellt. Das anschließende Unterkapitel 5.2 befasst sich mit der Modellierung der einzelnen Teilmodelle des Simulationsmodells. Abschließend werden im Unterkapitel 5.3 verschiedene Bewertungsmaße beschrieben, die Basis der Simulationsergebnisse die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit aufzeigen.

5.1 Architektur des Simulationsmodells

Die Architektur des Simulationsmodells ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Ausgangspunkt für die erste Simulationsstudie (Unterkapitel 6.1) sind die aufbereiteten Fahrprofile. Im Fall der zweite Simulationsstudie (Unterkapitel 6.2) dienen die modellierten Flotten als Eingangsgröße des Simulationsmodells. Die eigentliche Simulation erfolgt durch ein Zusammenspiel von vier Teilmodellen (Unterkapitel 5.2). Zur Auswertung der Simulationsergebnissen kommen Bewertungsmaße zum Einsatz (Unterkapitel 5.3).

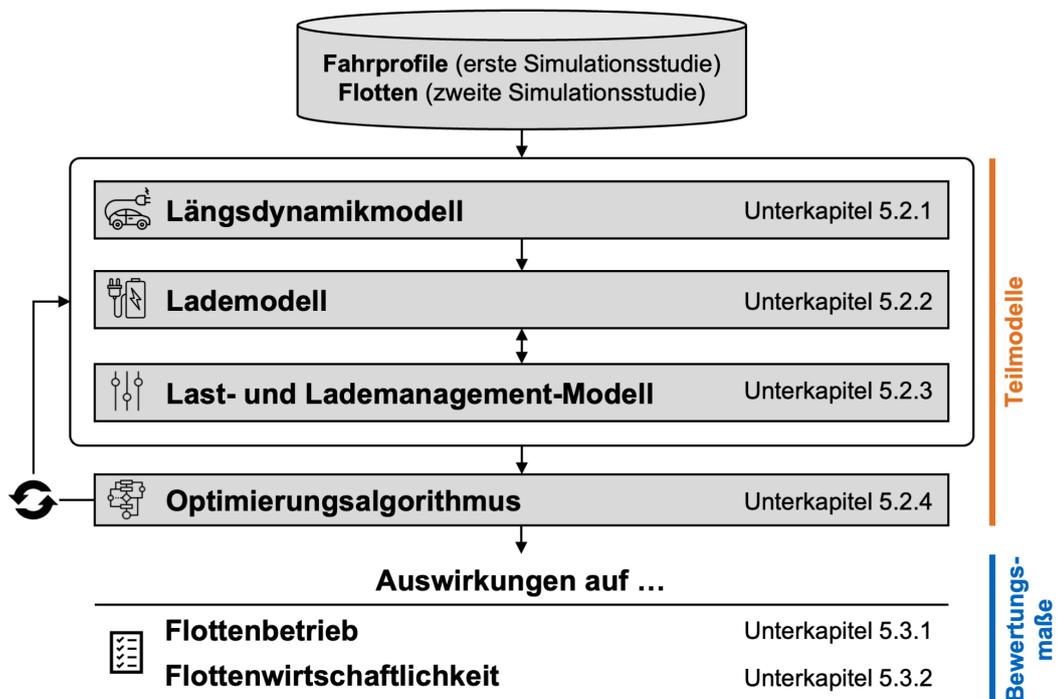


Abbildung 5.1: Architektur des Simulationsmodells

5.2 Teilmodelle

Das Simulationsmodell umfasst vier Teilmodelle (Abbildung 5.1). Ein Längsdynamikmodell (Unterkapitel 5.2.1) bildet als erstes Teilmodell den Energieverbrauch eines BEV ab, der beim Nachfahren der Fahrten eines Fahrprofils entsteht. Das Lademodell (Unterkapitel 5.2.2) simuliert als zweites Teilmodell die Ladevorgänge des BEV, falls es zwischen den Fahrten an einer firmeneigenen Ladestation steht. Um das gleichzeitige Laden mehrerer BEV am Firmenstandort zu steuern, wird ein Last- und Lademanagement simuliert. Hierzu kommt ein Last- und Lademanagement-Modell (Unterkapitel 5.2.2) als drittes Teilmodell zum Einsatz. Es steuert die Leistungsverteilung zwischen den BEV, die gleichzeitig am Firmenstandort laden. Ein Optimierungsalgorithmus (Unterkapitel 5.2.4) minimiert als viertes Teilmodell die Maximallast des Last- und Lademanagements.

5.2.1 Längsdynamikmodell

Das folgende Unterkapitel betrifft das Längsdynamikmodell des Simulationsmodell aus Abbildung 5.1. Zunächst wird der Modellierungsansatz des Längsdynamikmodell hergeleitet. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der Modellbildung.

Modellierungsansatz

Der Energieverbrauch eines BEV kann durch verschiedene Verfahren ermittelt werden. Laut Grubwinkler [158, S. 11ff] wird zwischen modell-, karten- und datenbasierten Verfahren unterschieden. Während modellbasierte Verfahren die physikalischen Zusammenhänge genau beschreiben, schätzen karten- und datenbasierte Verfahren den Energieverbrauch auf Basis größerer Datenmengen, wie beispielsweise Durchschnittsverbräuchen, ab. Ein ausführlicher Vergleich der Methoden ist in der Arbeit von Grubwinkler [158, S. 15] zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die hohe Genauigkeit modellbasierter Verfahren von Vorteil. Denn um den Einfluss der Fahrzeugwahl bewerten (dritte Teilfragestellung im Unterkapitel 2.3.1) und die am besten geeigneten BEV identifizieren zu können, sind möglichst genaue und fahrzeugspezifische Energieverbräuche notwendig. Daher wird der modellbasierte Modellierungsansatz gewählt.

Die physikalische Modellierung einer Energieverbrauchssimulation kann laut Guzzella und Sciarretta [23, S. 69] über zwei Ansätze erfolgen - den quasi-statischen, rückwärtsgerichteten oder den dynamischen, vorwärtsgerichteten Ansatz. Beim quasi-statischen, rückwärtsgerichteten Ansatz sind die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs sowie der Neigungswinkel der Straße die Eingangsgrößen des Simulationsmodells [23, S. 37]. Mit diesen Informationen wird die Kraft berechnet, die auf die Räder wirken muss, um das gewählte Profil mit einem BEV nachzufahren [23, S. 37]. Die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung ist gegenüber der Realität umgedreht [23, S. 39]. Der dynamische, vorwärtsgerichtete Ansatz basiert hingegen auf der physikalischen Kausalität des realen Fahrzeugs mit einem Fahrermodell, der als Regler für die vorgegebene Geschwindigkeit fungiert [159, S. 731]. Dynamische, vorwärtsgerichtete Modelle sind gegenüber quasi-statischen, rückwärtsgerichteten Modellen rechenintensiver, weil der Fahrzeugzustand über Differentialgleichungen modelliert wird [160, S. 13], [23, S. 41], [161]. Dadurch können Rückkopplungsregelungen implementiert und transiente Effekte abgebildet werden [160, S. 11ff]. Für einen ausführlichen Vergleich beider Ansätze wird auf die Arbeit von Tschochner [160, S. 11ff] verwiesen.

Die Vorteile der dynamischen, vorwärtsgerichteten Ansätzen kommen im Rahmen dieser Arbeit nicht zum Tragen. Die höhere Recheneffizienz von quasi-statischen, rückwärtsgerichteten Ansätzen wiegt deutlich mehr. Aus diesem Grund wird der quasi-statische, rückwärtsgerichtete Ansatz gewählt.

Modellbildung

Zeitdiskretisierung: Der quasi-statische, rückwärtsgerichtete Ansatz sieht ein zeitdiskretes Model vor, wobei die diskrete Zeitvariable t_k durch folgende Gleichung bestimmt ist [23, S. 24]:

$$\begin{aligned} t_k &= k \Delta t_{\text{BEV}} \\ k &= 0, 1, \dots, N_{t,\text{BEV}} - 1 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Um eine möglichst hohe Genauigkeit des zu simulierenden Energieverbrauchs sicherzustellen, wird die Zeitschrittweite Δt_{BEV} gleich der Aufzeichnungsrate der GPS-Daten von 1 Hz gewählt (Kapitel 3.1), d. h. $\Delta t_{\text{BEV}} = 1$ s. Die Anzahl der Zeitschritte $N_{t,\text{BEV}}$ beträgt dabei 604 800, sodass der Simulationszeitraum genau eine Woche beträgt.

Energieverbrauch und Fahrwiderstände: Der Energieverbrauch E_{BEV} eines BEV folgt aus der Integration der Antriebsleistung P_{dr} , die zur Überwindung der Fahrwiderstände F_{tot} mit der Geschwindigkeit v aufgebracht werden muss [23, S. 14 ff], [28, S. 50 ff], [162] (Abbildung 5.2).

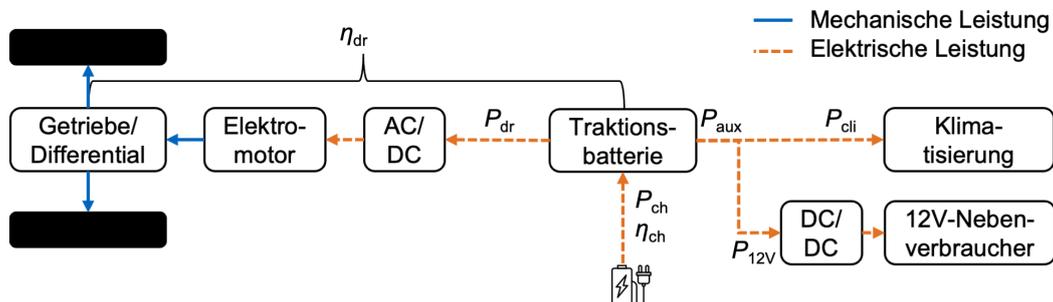


Abbildung 5.2: Energiefluss in einem BEV in Anlehnung an [158, S. 5])

Die Benutzung von Nebenverbrauchern kann die Reichweite von BEV stark reduzieren [117, S. 76f], [163, S. 119], [164, S. 29]. Daher sollte für eine praxisnahe Abschätzung des Energieverbrauchs die Nebenverbraucherleistung P_{aux} berücksichtigt werden. Der Energieverbrauch E_{BEV} eines BEV kann somit nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$E_{\text{tot}} = \sum_{t_k=0}^{N_{t,\text{BEV}}-1} (P_{\text{tot}}(t_k) \cdot \Delta t_{\text{BEV}}) \quad (5.2)$$

Die Fahrzeuggesamtleistung P_{tot} setzt sich zusammen aus der Antriebsstrangleistung P_{dr} und der Nebenverbraucherleistung P_{aux} :

$$P_{\text{tot}}(t_k) = P_{\text{dr}}(t_k) + P_{\text{aux}}(t_k) = \frac{F_{\text{tot}}(t_k) \cdot v(t_k)}{\eta(t_k)_{\text{tot}}} + P_{\text{aux}}(t_k) \quad (5.3)$$

In Gleichung (5.3) stellt η den Gesamtwirkungsgrad des BEV dar, der weiter unten im Detail besprochen wird. Der Fahrwiderstand F_{tot} entspricht der Summe aus dem Rollwiderstand F_r , dem Luftwiderstand F_a , dem Steigungswiderstand F_g und dem Beschleunigungswiderstand F_m :

$$\begin{aligned}
 F_{\text{tot}}(t_k) &= F_r(t_k) + F_a(t_k) + F_g(t_k) + F_m(t_k) \\
 F_r(t_k) &= m \cdot g \cdot \cos\alpha(t_k) \cdot c_r \\
 F_a(t_k) &= \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v(t_k)^2 \cdot c_d \\
 F_g(t_k) &= m \cdot g \cdot \sin\alpha(t_k) \\
 F_m(t_k) &= m \cdot \epsilon \cdot a(t_k)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Die Gleichungen (5.4) umfassen zum einen fahrzeugunabhängige Parameter, nämlich die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, den Neigungswinkel der Straße α (Teil der GPS-Daten), den Rollwiderstandsbeiwert $c_r = 0,01$, die Luftdichte $\rho_a = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und den Drehmassenzuschlagsfaktor $\epsilon_m = 1,1$ [165], der die Massenträgheitsmomente aller rotierenden Teile des Antriebsstrangs zusammenfasst [166, S. 39f]. Zum anderen sind fahrzeugspezifische Parameter Bestandteil der Gleichungen (5.4), die im Unterkapitel ?? bestimmt werden. Hierzu zählen der Luftwiderstandsbeiwert c_d , die Stirnfläche A_f des BEV und das Fahrzeuggewicht m_{veh} . Das Fahrzeuggewicht m_{veh} setzt sich zusammen aus dem Fahrzeugleergewicht $m_{\text{veh,empty}}$ des BEV und der Masse des Fahrers $m_{\text{per}} = 80 \text{ kg}$. Hinzu kommt eine Zuladung m_{pl} , falls es sich um ein Nfz handelt:

$$m = m_{\text{veh,empty}} + m_{\text{per}} + m_{\text{pl}} \tag{5.5}$$

Die Zuladung m_{pl} der Nfz ist zwar im Datensatz (Unterkapitel 3.1) umfasst, allerdings nicht für jedes Nfz bekannt. Daher werden die Mittelwerte der bekannten Zuladungen pro Fahrzeugklasse herangezogen: $m_{\text{pl}} = 300 \text{ kg}$ für die untere Mittelklasse, $m_{\text{pl}} = 550 \text{ kg}$ für die Mittelklasse, $m_{\text{pl}} = 600 \text{ kg}$ für die obere Mittelklasse und $m_{\text{pl}} = 750 \text{ kg}$ für die Oberklasse.

Rekuperation: Aufgrund des Vier-Quadrantenbetriebs von Elektromotoren haben BEV beim Verzögern die Möglichkeit einen Teil der Beschleunigungsleistung in die Traktionsbatterie zurückzuspeisen (Rekuperation) [158, S. 7]. Die Höhe der rekuperierbaren Energiemenge wird vom Bremssystem bestimmt, das die Aufteilung der angeforderten Leistung zwischen mechanischer und elektrischer Bremse festlegt [167, S. 455ff]. Je nach Rekuperationsstrategie und Betriebspunkt des Elektromotors kann der rekuperierbare Anteil der Beschleunigungsleistung zwischen 0 % und 100 % liegen [168].

Um den rekuperierbaren Anteil der Beschleunigungsleistung bei Verzögerungen in einem Simulationsmodell zu bestimmen, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den Verlusten im Antriebsstrang η_{dr} (Abbildung 5.2) kann die Rekuperationsstrategie den rekuperierbaren Anteil reduzieren [169, S. 85]. Des Weiteren kann der rekuperierbare Anteil durch den Betriebspunkt des Elektromotors [165, S. 5] und durch das Batteriemangement [169, S. 85] beeinflusst werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Einflussfaktoren, die zusätzlich zu den Verlusten im Antriebsstrang η_{dr} wirken, im Rekuperationswirkungsgrad η_{rec} berücksichtigt.

Wirkungsgrade: Für den Gesamtwirkungsgrad η des BEV aus Gleichung (5.2) gilt damit folgender Zusammenhang:

$$\eta_{\text{tot}}(t_k) = \begin{cases} \eta_{\text{dr}}(t_k) \approx \eta_{\text{dr}} = \text{konst.} & \text{für } P_{\text{dr}}(t_k) \geq 0 \text{ W} \\ \frac{1}{\eta_{\text{dr}}(t_k) \cdot \eta_{\text{rec}}(t_k)} \approx \frac{1}{\eta_{\text{dr}} \cdot \eta_{\text{rec}}} = \text{konst.} & \text{für } P_{\text{dr}}(t_k) < 0 \text{ W} \end{cases} \tag{5.6}$$

Gleichung (5.6) unterliegt der Annahme, dass der Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} im generativen und motorischen Betrieb gleich ist. In Übereinstimmung mit dem Großteil der verwandten Literatur [170, S. 29, 165, 168, 171, 172] wird ein konstanter und vom Fahrzeug unabhängiger Rekuperationswirkungsgrad von $\eta_{rec} = 80\%$ angenommen.

Zur Modellierung des Antriebsstrangwirkungsgrades η_{dr} existieren unterschiedlich aufwändige Modelle. Ein weit verbreiteter Ansatz besteht in der Annahme eines konstanten Wirkungsgrades [173, 174]. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Wirkungsgradkennfeldern, die experimentell ermittelt werden [165, S. 4], [175], [176, S. 125f]. Durch Interpolation kann aus solchen Kennfeldern der Wirkungsgrad für jeden beliebigen Betriebspunkt bestimmt werden [177, S. 44ff]. Allerdings ist die experimentelle Ermittlung solcher Kennfelder mit hohem Aufwand verbunden und die Verfügbarkeit in der Literatur eingeschränkt. Aus diesem Grund wird ein konstanter, aber fahrzeugspezifischer Antriebsstrangwirkungsgrad verwendet. Somit ist auch der gesamte untere Term in Gleichung (5.6) konstant.

Geschwindigkeitsdrosselung: Ein Nachteil des quasi-statischen, rückwärtsgerichteten Modellierungsansatzes ist, dass aufgrund der unidirektionalen Berechnungsrichtung technische und physikalische Grenzen nur rückwirkend berücksichtigt werden können [165, S. 2]. Muss beispielsweise die Maximalleistung des Elektromotors im Simulationsmodell überschritten werden, um ein bestimmtes Fahrprofil nachzufahren, wird das vom Simulationsmodell zunächst zugelassen. Insbesondere bei der Verwendung von realen Bewegungsdaten als Eingangsgröße können Grenzen des Elektromotors in der Simulation überschritten werden. Denn zumindest bei der Analyse des Umstiegs auf BEV entspricht das Fahrzeug, mit dem die Bewegungsdaten aufgezeichnet wurden, im Allgemeinen nicht dem Simulierten. Damit sind im Allgemeinen auch die technischen und physikalischen Grenzen, d. h. im Wesentlichen die Antriebsleistung P_{dr} , anders. Aus diesem Grund wird P_{dr} dahingehen nachträglich überprüft.

Überschreitet P_{dr} im motorischen Betrieb zum Zeitpunkt t_{olr} die tatsächliche möglich Maximalleistung, dann wird die Geschwindigkeit v derart gedrosselt, dass P_{dr} die Maximalleistung gerade so nicht überschreitet. Die Maximalleistung entspricht dabei für eine bestimmte Zeit Δt_{olr} (Überlastbereich) der Maximalleistung des Elektromotors $P_{em,max}$ [178, S. 92ff]:

$$P_{dr} \leq \begin{cases} P_{em,max} & \text{für } t_{olr} \leq t_k \leq t_{olr} + \Delta t_{olr} \\ P_{em,nom} & \text{für } t_{olr} + \Delta t_{olr} < t_k \end{cases} \quad (5.7)$$

Danach ist maximal die Nennleistung des Elektromotors $P_{em, nen}$ abrufbar. In Übereinstimmung mit Qi et al. [179] wird $\Delta t_{olr} = 5$ min angenommen. Durch die Drosselung der Geschwindigkeit verlängert sich die Fahrt um Δt_{vrz} . Das BEV kommt also in der Simulation später am Zielort an, als es in der Realität der Fall war.

Im generatorischen Betrieb, d. h. während der Rekuperation, sind die technischen und physikalischen Grenzen durch eine entsprechende Begrenzung der Rekuperationsleistung berücksichtigt.

Nebenverbraucher: Die Nebenverbraucherleistung P_{aux} kann laut Grubwinkler [158, S. 5] in einen Leistungsanteil für die Innenraumklimatisierung P_{cli} und einen Leistungsanteil für den Verbrauch des 12-Volt-Bordnetzes P_{12V} unterteilt werden (Abbildung 5.2):

$$\begin{aligned} P_{aux}(t_k) &= P_{cli}(t_k) + P_{12V}(t_k) \\ P_{12V}(t_k) &\approx P_{12V} = \text{konst.} \end{aligned} \quad (5.8)$$

In Übereinstimmung mit Grubwinkler [158, S. 58] wird P_{12V} als konstante und fahrzeugunabhängige Leistung modelliert und gemäß Literaturwerte [180, S. 26, 48, 181] mit $P_{12V} = 500\text{ W}$ veranschlagt. Da P_{cli} um bis zu ein Zehnfaches höher als P_{12V} sein kann [117, S. 66], wird für P_{cli} ein detaillierteres Modellierungsverfahren gewählt.

Laut Schüppel [182, S. 37ff] und Grubwinkler [158, S. 58f] kann die Innenraumklimatisierung vereinfacht in drei Phasen unterteilt werden (Abbildung 5.3). Die erste Phase bildet das instationäre Verhalten während dem Aufheizen oder Abkühlen der Innenraumtemperatur T_{int} auf die Soll-Innenraumtemperatur $T_{int,target} = 20^\circ\text{C}$ ab. Die anschließende stationäre Phase stellt das Aufrechterhalten von T_{int} dar. Abschließend wird durch eine instationäre Phase das Angleichen von T_{int} an die Außentemperatur T_{ext} ohne aktive Aufheizung oder Abkühlung modelliert.

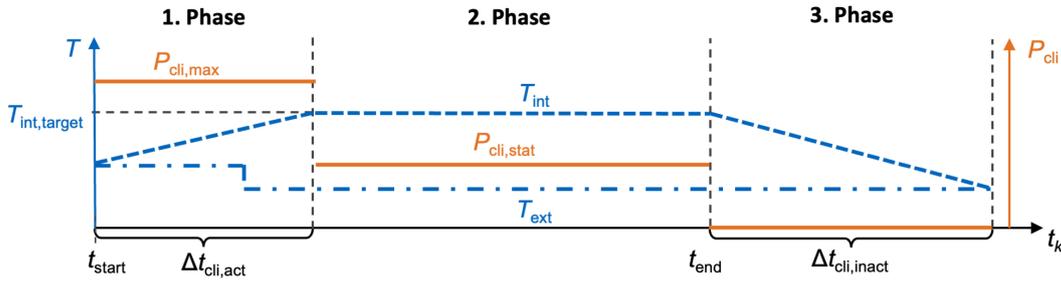


Abbildung 5.3: Drei Phasen der Innenraumklimatisierung

Der Leistungsbedarf für die Innenraumklimatisierung P_{cli} kann laut Grubwinkler [158, S. 58ff] wie folgt berechnet werden:

$$P_{cli}(t_k) = \begin{cases} P_{cli,max} = \text{konst.} & \text{für } t_{start} \leq t_k < t_{start} + \Delta t_{cli,act} \\ P_{cli,stat}(t_k) & \text{für } t_{start} + \Delta t_{cli,act} \leq t_k < t_{end} + \Delta t_{cli,inact} \\ 0\text{ W} & \text{für } t_k < t_{start} \text{ oder } t_{end} \leq t_k \end{cases} \quad (5.9)$$

Demnach wird in der instationären Phase mit der maximal verfügbaren Leistung $P_{cli,max}$ aufgeheizt oder abgekühlt. In der stationären Phase wird die Innenraumtemperatur mit der geringeren Leistung $P_{cli,stat}$ aufrechterhalten. Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Aufheiz- oder Abkühlvorgang gleichzeitig mit der Fahrt, d. h. zum Zeitpunkt t_{start} , beginnt und die Innenraumklimatisierung gleichzeitig mit dem Ende der Fahrt t_{end} ausgeschaltet wird. Die erste instationäre Phase weist eine Dauer $\Delta t_{cli,act}$ und die zweite instationäre Phase eine Dauer $\Delta t_{cli,inact}$ auf. Falls die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrten kleiner als $\Delta t_{cli,inact}$ ist, also falls die Zeit bis zur nächsten Fahrt zum Angleichen der Innen- an die Außentemperatur nicht ausreicht, dann ist $T_{int}(t_{start}) \neq T_{ext}(t_{start})$. In allen anderen Fällen gilt $T_{int}(t_{start}) = T_{ext}(t_{start})$.

Die maximale Leistung der Innenraumklimatisierung $P_{cli,max}$ variiert zwischen Fahrzeugmodellen und beträgt üblicherweise 4 bis 6 kW [181, 33, S. 106, 182, S. 35f, 165, 183, 117, S. 44]. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb für alle BEV eine maximale Innenraumklimatisierungsleistung von $P_{cli,max} = 5\text{ kW}$ angenommen.

Die Leistung $P_{cli,stat}$ sowie die beiden Zeitintervalle $\Delta t_{cli,act}$ und $\Delta t_{cli,inact}$ hängen hingegen vom Strahlungseingang der Sonne, von der Längsbeschleunigung und insbesondere von der Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen ab [182, S. 38]. Grubwinkler [158, S. 59f] nutzt experimentell ermittelte Kennfelder, um diese Abhängigkeiten abzubilden. Unter Vernachlässigung der Abhängigkeit vom Strahlungseingang und der Längsbeschleunigung kann laut Herr-

berger [184, S. 23ff] $P_{\text{cli,stat}}$, $\Delta t_{\text{cli,act}}$ und $\Delta t_{\text{cli,inact}}$ auch wie folgt abgeschätzt werden:

$$\begin{aligned} P_{\text{cli,stat}}(t_k) &\approx \lambda \cdot |T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{ext}}(t_k)| \quad \text{mit} \quad \lambda = \text{konst.} \\ \Delta t_{\text{cli,act}}(t_k) &\approx r_{\text{act}} \cdot |T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{ext}}(t_k)| \quad \text{mit} \quad r_{\text{act}} = \text{konst.} \\ \Delta t_{\text{cli,inact}}(t_k) &\approx r_{\text{inact}} \cdot |T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{ext}}(t_k)| \quad \text{mit} \quad r_{\text{inact}} = \text{konst.} \end{aligned} \quad (5.10)$$

In Gleichung (5.10) wird gemäß Literaturwerten $\lambda = 50 \text{ W}/^\circ\text{C}$ [185, S. 79], $r_{\text{act}} = 0,03 \text{ s}/^\circ\text{C}$ und $r_{\text{inact}} = 0,01 \text{ s}/^\circ\text{C}$ [184, S. 30] angenommen.

Batterieladezustand: Mit dem Fahrwiderstand F_{tot} (Gleichung (5.4)), dem Wirkungsgrad η (Gleichung (5.6)) und der Nebenverbraucherleistung P_{aux} (Gleichung (5.8) bis (5.10)) kann der Energieverbrauch E_{tot} für das Nachfahren eines Geschwindigkeitsprofils v mit einem BEV gemäß Gleichung (5.2) vollständig simuliert werden. Damit kann dann der SOC ζ unter Berücksichtigung der fahrzeugspezifischen Nenn-Batteriekapazität C_{batt} nach folgender Vorschrift berechnet werden [23, S. 105]:

$$\zeta(t_{k+1}) = \zeta(t_k) - \frac{E_{\text{tot}}(t_k)}{C_{\text{batt}}} \quad (5.11)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der SOC ζ in der Simulation auch Werte unter 0 % annehmen kann. Die Energieverbrauchssimulation geht also zunächst von einer unerschöpflichen Batterie aus und lässt das BEV das Fahrprofil bis zum nächsten Ladestandort zu Ende abfahren.

Tabelle B.1 im Anhang fasst alle fahrzeugunabhängigen Parameter des Längsdynamikmodells zusammen. Für die Bestimmung aller fahrzeugspezifische Parameter wird auf Unterkapitel ?? verwiesen.

5.2.2 Lademodell

Wenn das BEV am Ende einer Fahrt mindestens 15 min lange an einem Ladestandort steht, dann wird ein Ladevorgang simuliert. Bei kürzeren Stopps wird davon ausgegangen, dass kein Ladevorgang stattfindet, weil die Ladezeit im Verhältnis zur Standzeit zu lang ist [153].

Zeitdiskretisierung: Das Lademodell bildet den Leistungsverlauf zwischen Ladebeginn und -ende durch die Zeitvariable t_j zeitdiskret ab:

$$\begin{aligned} t_j &= j \cdot \Delta t_{\text{LIS}} \\ j &= 0, 1, \dots, N_{t,\text{LIS}} - 1 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Darin bezeichnet Δt_{LIS} die Zeitschrittweite und $N_{t,\text{Lad}}$ die Anzahl der Zeitschritte einer Simulation. Das Lademodell stellt das Bindeglied zwischen Fahrzeug und Stromnetz dar, wobei es am Firmenstandort über ein Last- und Lademanagement-Modell (Unterkapitel 5.2.3) mit dem Stromnetz verbunden ist. Im Unterschied zum Längsdynamikmodell (Unterkapitel 5.2.1), das Bewegungsdaten mit einer Auflösung von 1 s (Unterkapitel 3.1) verarbeitet, wertet das Last- und Lademanagement-Modell Grundlastprofile mit einer Auflösung von 15 min aus. Vor diesem Hintergrund wird als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Recheneffizienz $\Delta t_{\text{LIS}} = 1 \text{ min}$ als Zeitschrittweite des Lademodells gewählt. Das Lademodell bildet damit die simulierte Woche über $N_{t,\text{LIS}} = 10\,080$ Zeitschritte ab.

Um die Kompatibilität zwischen Lademodell und Längsdynamikmodell sicherzustellen, wird der Ladebeginn auf die nächste volle Minute und das Ladeende auf die vorherige volle Minute ge-

rundet. Darüber hinaus wird berücksichtigt, dass das An- und Ausstecken des Ladekabels eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Zeit mit 2 min angenommen.

Batterieladezustand: Während eines Ladevorgangs nimmt der SOC ζ unter Berücksichtigung der Ladeleistung P_{ch} und dem Ladewirkungsgrad η_{ch} gemäß folgender Gleichung zu:

$$\zeta(t_{j+1}) = \zeta(t_j) + \frac{P_{\text{ch}}(t_j) \cdot \eta_{\text{ch}} \cdot \Delta t_{\text{LIS}}}{C_{\text{batt}}} \quad (5.13)$$

Hierbei wird in Übereinstimmung mit dem Stand der Technik [33, S. 338, 186, S. 38] ein konstanter Ladewirkungsgrad $\eta_{\text{ch}} = 90\%$ angenommen wird.

Falls der SOC bei Ankunft an einem Ladestandort unter der Schranke ζ_{min} liegt, dann beginnt der Ladevorgang bei $\zeta = \zeta_{\text{min}}$. Die untere Schranke ζ_{min} repräsentiert die Reichenweitenangst, die beim Umstieg auf Elektrofahrzeugen zu berücksichtigen ist [187, 188]. Das Simulationsmodell ignoriert in so einem Fall also die Tatsache, dass das BEV außerhalb der Komfortzone ($\zeta < \zeta_{\text{min}}$) bewegt und unter Umständen sogar liegen geblieben wäre. Allerdings wird dies in den Bewertungsmaßen (Unterkapitel 5.3) berücksichtigt. Da laut Studien in weniger als 5 % der Fällen ein SOC unter 20 % bei Ankunft an einer Ladestation erreicht wird [153, 189, 190, 38, S. 122], wird im Rahmen dieser Arbeit $\zeta_{\text{min}} = 20\%$ angenommen.

Ladeleistung: Die Ladeleistung P_{ch} aus Gleichung (5.13) hängt sowohl von der LIS als auch vom BEV ab [191, S. 16]:

$$P_{\text{ch}}(t_j) = \begin{cases} P_{\text{ch,LIS}}(t_j) & , \text{ wenn } P_{\text{ch,inst}} \leq P_{\text{ch,BEV}} \\ P_{\text{ch,BEV}}(t_j) & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.14)$$

Auf der einen Seite ist die Ladeleistung P_{ch} durch die Leistung $P_{\text{ch,LIS}}$ beschränkt, die der Ladestation infrastruktureseitig zur Verfügung steht. Diese infrastruktureseitig zur Verfügung stehende Leistung $P_{\text{ch,LIS}}$ ist maximal so hoch, wie die installierte Leistung der Ladestation $P_{\text{ch,inst}}$:

$$P_{\text{ch,LIS}}(t_j) \leq P_{\text{ch,inst}} = \text{konst.} \quad (5.15)$$

Darüber hinaus kann ein Last- und Lademanagement $P_{\text{ch,LIS}}$ zusätzlich einschränken (Unterkapitel 5.2.3).

Auf der anderen Seite ist die Ladeleistung P_{ch} durch die Ladeleistung $P_{\text{ch,BEV}}$ des BEV beschränkt. $P_{\text{ch,BEV}}$ bildet somit eine fahrzeugseitige Leistungsgrenze, die durch die Traktionsbatterie bestimmt und typischerweise nicht konstant ist. Für Lithium-Ionen-Batterie kann dieses Ladeverhalten durch das sogenannte I/U-Verfahren angenähert werden [192]. Das I/U-Ladeverfahren sieht zwei Ladehasen vor. In der ersten Phase (I-Phase) ist der Ladestrom konstant, während sich die Zellenspannung nur minimal erhöht. Deshalb kann in der I-Phase von einer konstanten Ladeleistung $P_{\text{ch,BEV}}$ des BEV ausgegangen werden, die der Maximalladeleistung $P_{\text{ch,BEV,max}}$ des BEV entspricht:

$$P_{\text{ch,BEV}}(t_j) \approx P_{\text{ch,BEV,max}} = \text{konst.} \quad (5.16)$$

Die Maximalladeleistung $P_{\text{ch,BEV,max}}$ ist fahrzeugspezifisch und vom Steckertyp abhängig [19, S. 7]. Die konstante I-Phase hält an, bis die für Lithium-Ionen-Batterien typische Ladeschlussspannung $U_{\text{LS}} = 4,2\text{V}$ am Ladeumschaltspunkt ζ_{LUP} erreicht ist [33, S. 160]. In der anschließenden U-Phase nimmt der Ladestrom immer weiter ab, während die Spannung auf die La-

deschlussspannung U_{LS} festgesetzt ist [33, S. 160ff]. Laut Schuster [193, S. 83f] kann dieses Ladeverhalten über eine Exponentialfunktion angenähert werden:

$$P_{ch, BEV}(t_j) \approx P_{ch, BEV, max} \cdot e^{(\zeta_{LUP} - \zeta) \cdot k_{ch, BEV}^{-1}} \quad (5.17)$$

Dabei wird der Ladekorrekturfaktor $k_{ch, BEV}$ wie folgt berechnet wird:

$$k_{ch, BEV} = \frac{100\% - \zeta_{LUP}}{\ln\left(\frac{P_{ch, BEV, max}}{P_{LA}}\right)} \quad (5.18)$$

$$P_{LA} = \frac{U_{LS}}{U_{nen}} \cdot I_{LA} \cdot C_{batt}$$

Die Lithium-Ionen-Batterie-Kenngrößen aus Gleichung (5.18) werden aus der Arbeit von Schuster [193, S. 84] übernommen: Nennspannung $U_{nom} = 3,6V$, Ladeumschaltzeitpunkt $\zeta_{LUP} = 80\%$ und Ladeabschaltstrom $I_{LA} = 0,03$ C-Rate.

Tabelle B.1 im Anhang fasst alle fahrzeugunabhängigen Parameter des Lademodells zusammen. Für die Definition der fahrzeugspezifischen Parameter wird auf Unterkapitel ?? verwiesen.

5.2.3 Last- und Lademanagement-Modell

Die Ladestationen am Firmenstandort werden in der Simulation entsprechend der heute vorherrschenden Praxis (Stand der Technik in Kapitel 2.2.4) über den bereits vorhandenen Netzanschluss an das Stromnetz angeschlossen. Ein Last- und Lademanagement-Modell steuert dabei die Ladeleistungen der Ladestationen.

Leistungs- und Informationsfluss: Der Leistungsfluss zwischen den BEV, den Ladestationen, dem Firmenstandort und dem Stromnetz ist in der Abbildung 5.4 visualisiert. Die Gesamtladeleistung $P_{ch, sum}$ aller BEV entspricht der Summe der einzelnen Ladeleistungen P_{ch} (Gleichungen (5.14) bis (5.18)), wobei die infrastrukturseitig zur Verfügung stehende Leistung $P_{ch, LIS}$ aus Gleichung (5.14) durch das Last- und Lademanagement-System vorgegeben ist.

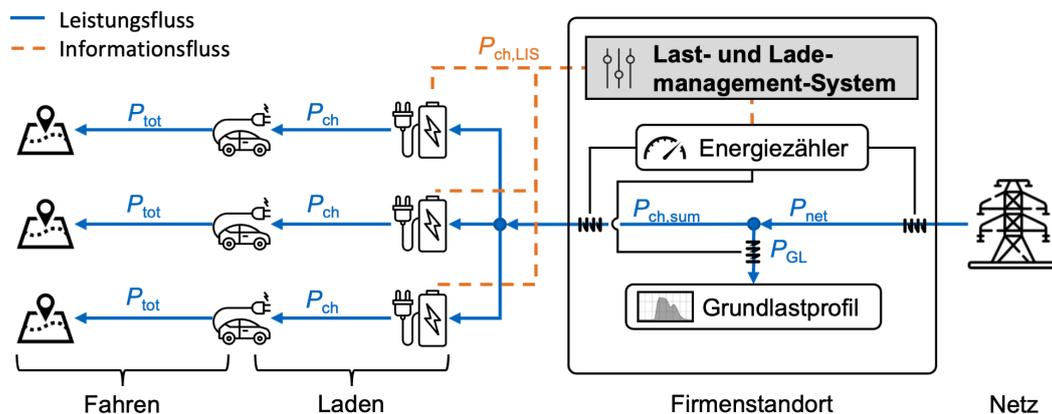


Abbildung 5.4: Leistungs- und Informationsfluss des Last- und Lademanagement-Modells

Die über den Netzanschluss aus dem Netz bezogene Leistung P_{net} entspricht der Summe aus der Grundlast P_{GL} des Firmenstandortes und der Gesamtladeleistung $P_{ch, sum}$. Damit kann die Netzleistung P_{net} wie folgt berechnet werden:

$$P_{net}(t_j) = P_{ch, sum}(t_j) + P_{GL}(t_j) \quad (5.19)$$

Das Last- und Lademanagement-Modell kommuniziert mit den Ladestationen. Dadurch kennt es zu jeder Zeit die einzelnen Ladeleistungen P_{ch} der BEV und kann dementsprechend in den Leistungsfluss eingreifen. Ausgangspunkt der Modellierung des Last- und Lademanagements stellt die Definition aus dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.5) dar, wonach das Lastmanagement die Gesamtladeleistung begrenzt, die wiederum durch das Lademanagement auf die Ladestationen verteilt wird.

Lastmanagement: In Übereinstimmung mit dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.5) wird sowohl der statische als auch der dynamische Lastmanagement-Ansatz modelliert. Ein statisches Lastmanagement sorgt dafür, dass die Gesamtladeleistung $P_{ch,sum}$ die vorgegebene Maximallast $P_{MXL,stat}$ zu keinem Zeitpunkt überschreitet:

$$P_{ch,sum}(t_j) \leq P_{MXL,stat} \quad (5.20)$$

Ein dynamisches Lastmanagement kennt hingegen zusätzlich zu den einzelnen Ladeleistungen P_{ch} auch die aktuelle Grundlast P_{GL} , die über entsprechende Energiezähler gemessen wird. In diesem Fall ist das Last- und Lademanagement dafür zuständig, dass die Summe aus Gesamtladeleistung $P_{ch,sum}$ und Grundlast P_{GL} zu keinem Zeitpunkt die vorgegebene Maximallast $P_{MXL,dyn}$ überschreitet:

$$P_{ch,sum}(t_j) \leq P_{MXL,dyn} - P_{GL}(t_j) \quad (5.21)$$

Lademanagement: Aus dem Stand der Technik sind unterschiedliche Lademanagement-Verfahren bekannt (Tabelle 2.4). Die Verfahren FCFS und EQUAL sind weit verbreitet [126] und werden daher im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Das FCFS-Verfahren verteilt die Gesamtladeleistung $P_{ch,sum}$ priorisiert nach dem frühesten Ladebeginn auf die an eine Ladestation angeschlossenen BEV auf. Dabei erhält jedes BEV die maximal mögliche Ladeleistung unter Berücksichtigung der fahrzeug- und infrastrukturseitigen Restriktionen und abzüglich der bereits aktiven Ladevorgänge.

Nach dem EQUAL-Verfahren $P_{ch,sum}$ wird die verfügbare Leistung gleichmäßig auf die an einer Ladestation angeschlossenen BEV aufgeteilt. Hierbei erhält jede Ladestation zunächst die gleiche Leistung zur Verfügung gestellt. Dies entspricht $P_{ch,sum}$ dividiert durch die Anzahl der angeschlossenen BEV. Kann eine Ladestation aufgrund fahrzeug- oder infrastrukturseitiger Einschränkungen nicht die gesamte ihr zur Verfügung gestellte Ladeleistung abrufen, so wird diese ungenutzte Leistungsreserve auf die übrigen Ladestationen verteilt.

Darüber hinaus wird in Anlehnung an das Verfahren Longest Processing Time First das Verfahren Lowest State of Charge First (LSOCF) in dieser Arbeit modelliert. Das LSOCF-Verfahren ist ähnlich zum FCFS-Verfahren prioritätsbasiert. Im Unterschied zum FCFS-Verfahren wird $P_{ch,sum}$ allerdings priorisiert nach dem geringsten SOC, und nicht nach dem frühesten Ladebeginn, aufgeteilt. Die Priorisierung wird für jeden Zeitschritt neu bestimmt und bei einer Änderung der Priorisierung wird die Leistung neu verteilt.

5.2.4 Optimierungsalgorithmus

Aus dem Stand der Technik ist bekannt (Unterkapitel 2.2.5), dass die Maximallast einen Systemparameter des Last- und Lademanagements darstellt, der vor dem Betrieb des Last- und Lademanagements eingestellt wird. Die Maximallast $P_{MXL,stat}$ bzw. $P_{MXL,dyn}$ bestimmt die obere Grenze für die Gesamtladeleistung einer Flotte $P_{ch,sum}$ gemäß den Gleichungen (5.20) und

(5.21). Sie hat damit einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten (Unterkapitel 2.2.4 und 2.2.5). Daher kommt ein Optimierungsalgorithmus zum Einsatz, der die Maximallast minimiert.

Zieldefinition

Um die Kosten möglichst gering zu halten, ist eine möglichst geringe Maximallast $P_{\text{MXL,stat}}$ bzw. $P_{\text{MXL,dyn}}$ anzustreben. Allerdings darf die Maximallast nicht zu niedrig gewählt werden. Denn dann droht die Gefahr, dass das Last- und Lademanagement den BEV nicht genügend Ladeleistung zur Verfügung stellen kann. Aus diesem Grund wird für jede Flotte das Minimum bzw. Optimum von $P_{\text{MXL,stat}}$ bzw. $P_{\text{MXL,dyn}}$ ermittelt, bei dem das Laden der Flotte gerade so nicht negativ beeinträchtigt wird.

Ziel ist es also, einen minimalen Wert für $P_{\text{MXL,stat}}$ bzw. $P_{\text{MXL,dyn}}$ zu finden, bei dem die gesamte Ladeenergie einer Flotte $E_{\text{Lad, sum}}$ gerade so nicht reduziert und damit das Laden nicht negativ beeinträchtigt wird. Das Laden der Fahrzeuge soll also durch das Last- und Lademanagement nicht eingeschränkt, sondern nur in andere Zeiten verschoben werden. Damit ist sichergestellt, dass das Last- und Lademanagement keinen Einfluss auf die Mobilität, sondern nur auf den Ladevorgang hat.

Algorithmus

Problemdefinition: Die Maximallast $P_{\text{MXL,\#}} \in \{P_{\text{MXL,stat}}, P_{\text{MXL,dyn}}\}$ kann im allgemeinen Werte zwischen einer unteren Schranke $P_{\text{MXL,down}}$ und einer oberen Schranke $P_{\text{MXL,up}}$ annehmen. Beim statischen Lastmanagements stellt gemäß Gleichung (5.20) $P_{\text{MXL,up}} = 0 \text{ kW}$ die untere Schranke dar. Die obere Schranke $P_{\text{MXL,up}}$ wird hingegen durch die maximal auftretende Gesamtladeleistung $P_{\text{ch,sum,max}}$ gebildet. Beim dynamischen Lastmanagement ist gemäß Gleichung (5.21) die untere Schranke $P_{\text{MXL,down}}$ durch das Minimum des Grundlastprofils $P_{\text{GL,min}}$ gegeben. Die obere Schranke $P_{\text{MXL,up}}$ entspricht somit dem Maximum der Netzleistung $P_{\text{net,max}}$, die ohne Last- und Lademanagement während der simulierten Woche am Netzanschluss maximal anliegt.

Vor diesem Hintergrund kann der Lösungsraum als eine sortierte Liste aufsteigender Leistungswerte von $P_{\text{MXL,unt}}$ bis $P_{\text{MXL,obe}}$ definiert werden. Dabei wird eine Schrittweite zwischen zwei aufeinanderfolgender Leistungswerten von 1 kW gewählt. Gesucht ist nun die Maximallast $P_{\text{MXL,\#}}$ aus dieser Lösungsliste, die die gesamte Ladeenergie der Flotte $E_{\text{ch,sum}}$, die ohne Last- und Lademanagement auftritt, gerade so nicht reduziert. Dieser Fall entspricht einer Ladung mit der technisch möglichen Maximalleistung, die nicht durch ein Last- und Lademanagement eingeschränkt wird. Die Ladeenergie der Flotte $E_{\text{ch,sum}}$ ergibt sich dabei durch Addition der einzelnen Fahrzeugenergieverbräuche aus Gleichung (5.2).

Lösungsansatz: Eine einfache Möglichkeit, die gesuchte Maximallast $P_{\text{MXL,\#}}$ zu finden, bilden Methoden der Parameterschätzung [194]. Das Brute Force-Verfahren stellt die einfachste Variante dar, die gesuchte Maximallast zu finden. Dazu wird jeder einzelne Wert der Lösungsliste durch Simulation separat ausgewertet. Nachteilig dabei ist allerdings der hohe Rechenaufwand [195, S. 84], der einen Einsatz im Rahmen dieser Arbeit ausschließt. Im Gegensatz dazu ist die binäre Suche eine deutlich effizientere Methode, um die gesuchten Maximallast zu finden [196, S. 65ff].

Binäre Suche: Die binäre Suche sucht im diskreten Lösungsraum nach einem Wert für $P_{\text{MXL,\#}}$, der in einem Szenario mit Last- und Lademanagement zur gleichen Ladeenergie $E_{\text{ch,sum}}$ der

Flotte wie ohne Last- und Lademanagement führt. Abbildung 5.5 zeigt die der binären Suche zu Grunde liegende Methodik schematisch auf.

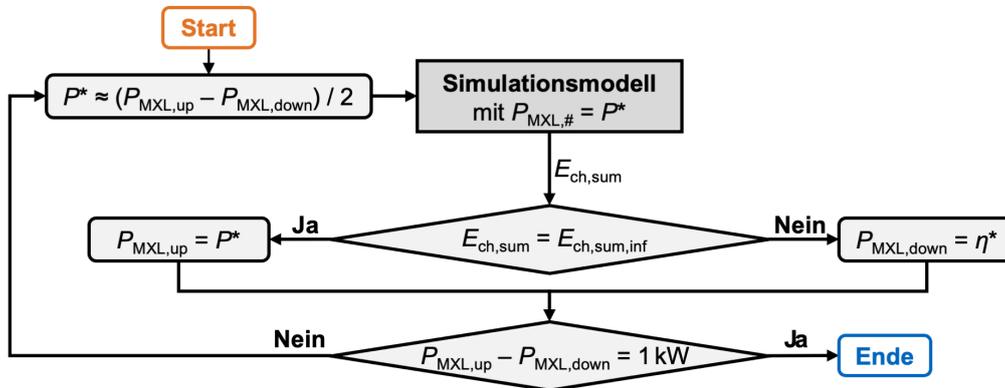


Abbildung 5.5: Optimierungsalgorithmus

Die binäre Suche ermittelt nun den Wert P^* , der in der Mitte der beiden Schranken $P_{MXL,down}$ und $P_{MXL,up}$ liegt. Anschließend wird die Ladeenergie $E_{MXL,sum}$ bei $P_{MXL} = P^*$ simuliert. Entspricht die Ladeenergie $E_{ch,sum}$ der unbeschränkten Ladeenergie $E_{ch,sum,inf}$, d.h. ohne Last- und Lademanagement-System, dann muss die gesuchte Maximallast kleiner oder gleich P^* sein. Alle Werte, die über P^* liegen, werden folglich aus dem Lösungsraum gestrichen, indem als neue obere Schranke $P_{MXL,up} = P^*$ gewählt wird. Anschließend wird ein neuer Rechendurchlauf mit einem neuen P^* gestartet, der wieder die Mitte zwischen den Schranken $P_{MXL,down}$ und $P_{MXL,up}$ darstellt. Ist hingegen die Ladeenergie $E_{ch,sum}$ kleiner als die unbeschränkte Ladeenergie $E_{ch,sum,inf}$, so wird die untere Schranke $P_{MXL,down}$ durch $P_{MXL,down} = P^*$ nach oben korrigiert. Entspricht der Abstand zwischen oberer Schranke $P_{MXL,up}$ und unterer Schranke $P_{MXL,down}$ der Schrittweite 1 kW, so ist die gesuchte Maximallast P_{MXL} gefunden. P_{MXL} entspricht dann entweder $P_{MXL,down}$ oder $P_{MXL,up}$, je nach dem welche Maximallast zu einer geringeren Abweichung von der unbeschränkten Ladeenergie $E_{ch,sum,inf}$ führt.

5.3 Bewertungsmaße

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt durch verschiedene Bewertungsmaße. Diese Bewertungsmaße betreffen zum einen die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb (Unterkapitel 5.3.1) und zum anderen die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf die Flottenwirtschaftlichkeit (Unterkapitel 5.3.2).

5.3.1 Auswirkungen auf Flottenbetrieb

Die Bewertungsmaße zu den Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb lassen sich in drei Bewertungskriterien unterteilen: Fahrzeugantriebsleistung, Fahrzeugreichweite und Zwischenladebedarf.

Fahrzeugantriebsleistung

Der Flottenbetrieb kann durch eine zu geringe Fahrzeugantriebsleistung negativ beeinflusst werden. Wie bei der Modellbildung des Längsdynamikmodells beschrieben (Unterkapitel 5.2.1),

kann es vorkommen, dass die Antriebsleistung nicht ausreicht, um dem ursprünglichen Geschwindigkeitsprofil zu folgen. Dadurch verzögert sich die Ankunft am Ziel.

Erfüllungsgrad: Um die Fahrzeugantriebsleistung zu bewerten, wird analog zur Fahrzeugreichweite ein Erfüllungsgrad EG_{FL} herangezogen. Dieser ist wie folgt definiert:

$$EG_{FL} = \frac{N_{\text{trip,FL}}}{N_{\text{trip}}} \cdot 100 \quad (5.22)$$

$N_{\text{trip,FL}}$ stellt hierbei die Anzahl der in Bezug auf die Fahrzeugantriebsleistung erfolgreich abgeschlossenen Fahrten und N_{trip} die Anzahl aller Fahrten eines Fahrprofils dar. Eine Fahrt gilt als erfolgreich abgeschlossen, wenn in der Simulation zu keinem Zeitpunkt die technisch maximal mögliche Leistung des Elektromotors gemäß Gleichung (5.7) überschritten werden muss, um dem Geschwindigkeitsprofil folgen zu können. Da das BEV in einem solchen Fall langsamer unterwegs ist, als durch das Fahrprofil vorgegeben, verlängert sich die Fahrt um Δt_{vrz} (Unterkapitel 5.2.1).

Der Erfüllungsgrad der Fahrzeugantriebsleistung EG_{FL} weist Schwächen auf, weil nicht zwischen kleinen und großen zeitlichen Verspätungen bzw. Verzögerungen Δt_{vrz} unterschieden wird.

Verzögerungsgrad: Um in dieser Hinsicht eine differenziertere Bewertung zu ermöglichen, wird zusätzlich der Verzögerungsgrad VG als weiteres Bewertungsmaß eingeführt. Der Verzögerungsgrad VG einer Fahrt ist wie folgt definiert:

$$VG = \frac{\Delta t_{\text{vrz}}}{\Delta t_{\text{trip}}} \cdot 100 \quad (5.23)$$

Dabei stellt Δt_{trip} die Dauer einer Fahrt dar. Der Verzögerungsgrad VG gibt somit an, um wie viel Prozent sich die Ankunft einer Fahrt verzögert.

Fahrzeugreichweite

Aus dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.2) ist die Fahrzeugreichweite als Kriterium zur Bewertung der Auswirkungen einer Elektrifizierung auf den Flottenbetrieb bekannt.

Erfüllungsgrad: Um die Fahrzeugreichweite zu bewerten, wird typischerweise der Erfüllungsgrad nach Gleichung (5.24) herangezogen. Im Rahmen dieser Arbeit werden jedoch nicht Fahrten, sondern Touren im Sinne der Definition aus Unterkapitel 4.1.1 ausgewertet. Der Erfüllungsgrad der Reichweite EG_{RW} eines Fahrprofils ist damit wie folgt definiert:

$$EG_{RW} = \frac{N_{\text{tour,RW}}}{N_{\text{tour}}} \cdot 100 \quad (5.24)$$

Dabei steht $N_{\text{tour,RW}}$ für die Anzahl der in Bezug auf die Reichweite erfolgreich abgeschlossenen Touren und N_{tour} die Anzahl der Touren eines Fahrprofils dar. Eine Tour gilt als erfolgreich abgeschlossen, wenn der SOC am Tourende ζ_{end} , d. h. bei Ankunft an einem Ladestandort, über der unteren SOC-Schranke $\zeta_{\text{min}} = 20\%$ (Unterkapitel 5.2.2) liegt.

Die Aussagekraft EG_{RW} ist mit Blick auf eine praxisorientierte Bewertung der Eignung beschränkt. Erreicht beispielsweise ein BEV in der Simulation den Ladestandort mit einem nur geringfügig geringeren SOC als ζ_{min} , so wird die Tour als nicht erfolgreich abgeschlossen

gewertet. Sie wird damit einer Tour gleichgestellt, die beispielsweise deutlich früher die untere Schranke ζ_{\min} unterschreitet.

Rest-SOC: Um eine differenziertere Bewertung zu ermöglichen, wird außerdem der Rest-SOC $\zeta_{\text{end}}(t)$ am Tourende $t_{\text{tour, end}}$, also der SOC bei Ankunft an einem Ladestandort nach einer Tour t , als Bewertungsmaße eingeführt:

$$\zeta_{\text{end}} = \zeta(t_{\text{tour, end}}) \quad (5.25)$$

Zwischenladebedarf

Der Bedarf an Zwischenladen, d. h. Laden unterwegs bzw. während einer Tour, stellt das dritte Kriterium zur Bewertung der Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb dar. Die Ermittlung des Zwischenladebedarfs erfolgt anhand der Energiemenge, die in der Simulation nicht geladen werden konnte. Dies liegt daran, dass das Simulationsmodell nur Ladevorgänge während Standphasen des Fahrprofils berücksichtigt, also zu Zeiten, in denen das Fahrzeug ohnehin an der eigenen LIS steht (Unterkapitel 5.2.2).

Da das Simulationsmodell nur Ladevorgänge während der Standphasen des Fahrprofils abbildet, wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass diese Ladevorgänge keine Auswirkungen auf den Flottenbetrieb haben. Reichen diese Ladevorgänge jedoch nicht aus, um den gesamten Ladebedarf zu decken, so sind (negativen) Auswirkungen auf den Flottenbetrieb durch zusätzliche Zwischenladestops, beispielsweise an öffentlicher LIS, zu erwarten.

Autarkierate: Um die Deckung des Ladebedarfs durch das Laden während der Standphasen des Fahrprofils an der eigenen LIS zu bewerten, wird die Autarkierate A eines Flottenfahrprofils als weiteres Bewertungsmaß eingeführt:

$$A = \frac{E_{\text{ch, sum, a}}}{E_{\text{tot, sum, a}}} \cdot 100 \quad (5.26)$$

Hierbei stellt $E_{\text{ch, sum, a}}$ die pro Jahr geladenen Energiemenge und $E_{\text{tot, sum, a}}$ und die pro Jahr verbrauchte Energiemenge einer simulierten Flotte. Die Autarkierate A ist somit ein Maß dafür, wie viel Energie an der eigenen LIS ohne Änderung des Mobilitätsverhaltens geladen werden kann.

Zur Bestimmung von $E_{\text{ch, sum, a}}$ bzw. $E_{\text{tot, sum, a}}$ wird die Annahme getroffen, dass sich die Ladeenergie bzw. der Energieverbrauch der Flotte ausgehend von der simulierten Woche über das Jahr verteilt betrachtet nicht ändert. Dabei wird ein tendenziell zu hoher Energiebedarf der BEV angenommen, weil der Energiebedarf im Sommer typischerweise geringer als im Winter ist. Das gleiche gilt für die Ladeenergie.

Zwischenladeenergie: Als weiteres Bewertungsmaß wird die Energiemenge $E_{\text{i-ch, Fzg, w}}$ eines Flottenfahrprofils herangezogen, der pro Fahrzeug und Woche durch Zwischenladungen nachgeladen werden müsste, um den Energiebedarf vollständig zu decken:

$$E_{\text{i-ch, Fzg, w}} = \frac{(100 - A) \cdot E_{\text{tot, sum, a}}}{N_{\text{Fzg}} \cdot N_{\text{KW}}} \quad (5.27)$$

Dabei bezeichnet N_{KW} die Anzahl der Kalenderwochen im betrachteten Jahr und N_{Fzg} die jeweilige Flottengröße, d. h. Anzahl der Fahrzeuge.

5.3.2 Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit

Ziel dieses Unterkapitels ist es, die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf die Flottenwirtschaftlichkeit zu quantifizieren. Für solche Zwecke werden üblicherweise die TCO herangezogen, wie aus dem Stand der Technik hervorgeht (Unterkapitel 2.2.2). Diese ermöglichen eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, indem sie sowohl die Investitionskosten als auch die laufenden Betriebskosten berücksichtigen. Um die Auswirkungen der Flottenelektrifizierung zu quantifizieren, sind demnach die Investitions- und Betriebskosten zu betrachten, die sich infolge der Elektrifizierung ändern.

Investitionskosten: Die Investitionskosten ergeben sich zum Teil aus den neu anzuschaffenden BEV. Einen ersten Anhaltspunkt für die Anschaffungskosten geben die Listenpreise der Fahrzeuge, wie in der eigenen Veröffentlichung [152] gezeigt. Allerdings erfolgt die Fahrzeugbeschaffung im Gewerbe in der Regel über Ausschreibungen [197, S. 26f], wobei die Listenpreise in der Regel unterboten werden. Die Anschaffungskosten hängen außerdem maßgeblich von der Finanzierungsform, z. B. Kauf oder Leasing, ab [197, S. 12f], die es zu berücksichtigen gilt. Schließlich besteht im Gewerbe häufig eine gewisse Mehrpreisbereitschaft bei der Anschaffung von BEV, beispielsweise zugunsten eines grünen Images [47, S. 17]. Eine fundierte Erfassung der Investitionskosten für Flottenfahrzeuge, die pauschal gültig sind, ist daher nur bedingt möglich.

Der verbleibende Teil der Investitionskosten fällt für den Aufbau der eigenen LIS an. In diesem Zusammenhang wird auf die in [198] veröffentlichten Untersuchungen verwiesen. Daraus geht unter anderem hervor, dass die Installationskosten als wesentlicher Teil der Investitionskosten nur schwer zu ermitteln sind, weil sie von dem jeweiligen Installationsort sowie den dortigen Gegebenheiten stark abhängen. Darüber hinaus können individuelle Baukostenzuschüsse sowie weitere Netzbetreibergebühren zur Herstellung, Erweiterung oder Änderung des Netzanschlusses anfallen. Pauschale Aussagen zu den Investitionskosten einer eigenen LIS sind daher ebenfalls nur eingeschränkt möglich.

Aus den vorstehend genannten Gründen erfolgt die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf Grundlage der Betriebskosten.

Betriebskosten: Die Betriebskosten sind wie die Investitionskosten entweder auf die BEV oder auf die eigene LIS zurückzuführen. Kosten für den Betrieb einer eigenen LIS können beispielsweise für Wartungszwecke oder bestimmte Online-Funktionen anfallen und sind vernachlässigbar [198]. Die Kosten für den Betrieb von BEV hängen maßgeblich von den Energiekosten ab, die beim Aufladen der verbrauchten Energie anfallen [199, S. 1]. Weitere anfallende Betriebskosten, z. B. für Reparatur und Wartung, liegen im unteren dreistelligen Bereich pro Jahr [199, S. 6].

Die Energiekosten sind daher ein geeignetes Kriterium zur Bewertung der Flottenwirtschaftlichkeit. Darüber hinaus sind die Energiekosten besonders geeignet, um verschiedene BEV- und LIS-Konzepte untereinander zu vergleichen. Denn die restlichen Komponenten der Betriebskosten von BEV bzw. LIS sind nahezu unabhängig vom Fahrzeugmodell [199, S. 6] bzw. von LIS-Variante [198].

Im Folgenden werden verschiedene Bewertungsmaße aus den Energiekosten abgeleitet, die nach einem Umstieg auf BEV für das Laden an der eigenen sowie an fremder LIS aufwendet werden müssen.

Energiekosten für Laden an eigener LIS

Die im Folgenden vorgestellte Methodik zur Schätzung der Kosten, die durch das Laden an der eigenen LIS entstehen, basiert auf den eigenen Veröffentlichungen [198] und [200].

Energiekosten: Es wird die Annahme getroffen, dass der Stromverbrauch am Firmenstandort sowie an den Wohnorten infolge der Flottenelektrifizierung exakt um die am jeweiligen Ladestandort geladene Energiemenge ansteigt und sonst keinen Änderungen ausgesetzt ist. In diesem Fall entsprechen die Energiekosten für das Laden an eigener LIS der Änderung der Stromkosten, die insgesamt an den Ladestandorten anfallen.

Die jährlichen Energiekosten $K_{e-LIS,Fzg,a}$ einer Flotte, die durch das Laden an eigener LIS verursacht werden, sind wie folgt definiert:

$$K_{e-LIS,Fzg,a} = \frac{K_{Str,nach} - K_{Str,vor}}{N_{Fzg}} \quad (5.28)$$

Im Nenner steht die Änderung der Stromkosten, die sich aus der Differenz zwischen den Stromkosten vor der Flottenelektrifizierung $K_{Str,vor}$ und den Stromkosten nach der Flottenelektrifizierung $K_{Str,nach}$ ergibt. Diese Größe wird durch die Flottengröße N_{Fzg} geteilt, sodass die Energiekosten K_{Eig} auf eine Flottengröße $N_{Fzg} = 1$ bzw. auf ein Fahrzeug normiert sind.

Im Gegensatz zu den Stromkosten vor der Flottenelektrifizierung umfassen die Stromkosten nach der Flottenelektrifizierung die Stromkosten des Firmenstandortes sowie die Stromkosten der Wohnorte, falls an welchen geladen wird. Es wird also gemäß gängiger Praxis [201] davon ausgegangen, dass der Arbeitgeber die durch das Laden am Wohnort entstehenden Stromkostenanteile vollständig übernimmt.

Berechnung der Stromkosten: Die Berechnung der Stromkosten $K_{Str,vor}$ vor der Flottenelektrifizierung, d. h. ohne dem Laden der BEV, und der Stromkosten $K_{Str,nach}$ nach der Flottenelektrifizierung, also mit dem Laden der BEV, erfolgen analog. Daher wird im Folgenden die Notation $K_{Str,\#}$ mit $\# \in \{vor,nach\}$ verwendet, die stellvertretend sowohl die Variante vor als auch die Variante nach der Flottenelektrifizierung darstellt.

Laut dem Stand der Technik bestehen die jährlichen Stromkosten $K_{Str,\#}$ eines Standortes zum einen aus den Netzentgelten $K_{NEG,\#}$ (Unterkapitel 2.2.4). Zum anderen umfassen sie Steuern, Umlagen sowie einen vom Energielieferanten beeinflussbarer Preisbestandteil beinhaltet, der häufig individuell verhandelt wird [202]. Pauschale Aussagen zu diesem Preisbestandteil sind daher kaum möglich. Die Netzentgelte sind im Allgemeinen sowohl vom Energieverbrauch als auch von der aus dem Netz bezogenen Leistung P_{net} (Gleichung (5.19)) abhängig. Sie eignen sich daher gut, um den Einfluss verschiedener LIS-Varianten auf die Netzleistung P_{net} zu bewerten. Im Gegensatz dazu hängen die Steuern und Umlagen nur vom Energieverbrauch ab und sind daher für solche Zwecke nicht geeignet (Unterkapitel 2.2.4).

Im Jahr 2019 machten die Netzentgelte typischer Gewerbekunden (50 MWh/Jahr) 27 % der Stromkosten [203, S. 274] und typischer Industriekunden (24 GWh/Jahr) 15 % der Stromkosten [203, S. 271] aus. Die Untersuchungsobjekte dieser Arbeit sind eher der Kategorie der Gewerbekunden zuzuordnen. Basierend darauf wird angenommen, dass die Netzentgelte 25 % der Stromkosten ausmachen. Für die Stromkosten $K_{Str,\#}$ gilt somit in erster Näherung: $K_{Str,\#} = K_{NEG,\#} / 0,25$.

Die Höhe der Netzentgelte $K_{\text{NEG}, \#}$ hängt zwar von Netzbetreiber und Region ab [203, S. 164]. Deren Ermittlung erfolgt jedoch nach einer festen Berechnungsvorschrift:

$$K_{\text{NEG}, \#} = k_{\text{GPr}} + \underbrace{k_{\text{APr}} \cdot E_{\text{FS}, \text{a}, \#}}_{\text{energiebezogener Anteil}} + \underbrace{k_{\text{LPr}} \cdot P_{\text{LSp}, \#}}_{\text{leistungsbezogener Anteil}} \quad (5.29)$$

Die Netzentgelte bestehen aus einem Grundpreis k_{GPr} sowie einem energie- und leistungsbezogenen Anteil. Dabei stellt der energiebezogene Anteil eine Multiplikation des jährlichen Energieverbrauchs $E_{\text{FS}, \text{a}, \#}$ am Firmenstandort mit dem Arbeitspreis k_{APr} und der leistungsbezogenen Anteil eine Multiplikation der Lastspitze $P_{\text{LSp}, \#}$ mit dem Leistungspreis k_{LPr} dar.

Zur Ermittlung des Energieverbrauchs $E_{\text{FS}, \text{a}, \text{nach}}$ nach der Flottenelektrifizierung wird die Annahme getroffen, dass neben den simulierten Ladevorgängen keine weiteren Ladevorgänge an der eigenen LIS stattfinden und somit Zwischenladen gemäß Gleichungen (5.26) und (5.27) ausschließlich an fremder LIS erfolgt. Damit kann der Energieverbrauch $E_{\text{FS}, \text{a}, \text{nach}}$ am Firmenstandort nach der Flottenelektrifizierung durch Addition des Energieverbrauchs $E_{\text{FS}, \text{a}, \text{nach}}$ vor der Flottenelektrifizierung und dem pro Jahr geladenen Energiebetrag $E_{\text{ch}, \text{sum}, \text{a}}$ gemäß Gleichung (5.26) ermittelt werden.

Die Lastspitze $P_{\text{LSp}, \#}$ wird gemäß dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.4) auf Basis der Mittelwerte jedes 15-Minuten-Intervalls des Lastprofils eines gesamten Jahres ermittelt. Die restlichen, bis dahin unbekanntenen Größen aus Gleichung (5.29) sind abhängig vom Stromtarif. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Preismodell der SWM Infrastruktur GmbH aus dem Jahr 2020 verwendet (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Preismodell der SWM Infrastruktur GmbH aus dem Jahr 2020 [97, 204, 205]

Standortkategorie	Grundpreis k_{GPr} in €/Jahr	Arbeitspreis k_{APr} in Ct/kWh	Leistungspreis k_{LP} in €/kW/Jahr
$E_{\text{FS}, \text{a}, \#} \leq 100 \text{ MW h/Jahr}$	42,18	4,68	0,00
$E_{\text{FS}, \text{a}, \#} > 100 \text{ MW h/Jahr}, Q < 2500 \text{ h/Jahr}$	0,00	4,35	15,80
$E_{\text{FS}, \text{a}, \#} > 100 \text{ MW h/Jahr}, Q \geq 2500 \text{ h/Jahr}$	0,00	0,53	111,10

Das Preismodell unterscheidet zwischen Kunden mit einem Energieverbrauch $E_{\text{FS}, \text{a}, \#}$ von bis zu 100 MW h/Jahr und Kunden mit einem Energieverbrauch darüber. Für Standorte mit $E_{\text{FS}, \text{a}, \#} \leq 100 \text{ MW h/Jahr}$ entfällt der leistungsbezogene Anteil aus Gleichung (5.29). In diese Standortkategorie fallen auch die Wohnorte. Bei Standorten mit $E_{\text{FS}, \text{a}, \#} > 100 \text{ MW h/Jahr}$ entfällt der Grundpreis [97]. Darüber hinaus wird nach der sogenannten Jahresbenutzungsdauer $JBD_{\#}$ unterschieden:

$$JBD_{\#} = \frac{E_{\text{FS}, \text{a}, \#}}{P_{\text{LSp}, \#}} \quad (5.30)$$

Die Jahresbenutzungsdauer sagt aus, wie viele Stunden im Jahr man Strom beziehen müsste, wenn die Stromabnahme mit konstanter Maximalleistung, also der Lastspitze, erfolgen würde [96, S. 499]. Je höher die Jahresbenutzungsdauer, desto glatter ist also das Lastprofil. Eine hohe Benutzungsdauer, d. h. ein tendenziell glatteres Lastprofil, wird von Netzbetreibern bevorzugt (Anhang G), weil keine hohen Lastreserven vorgesehen werden müssen. Daher ist ab einer Jahresbenutzungsdauer von über 2500 h/Jahr der Arbeitspreis geringer und der Leistungspreis höher, als bei einer Jahresbenutzungsdauer bis 2500 h/Jahr (Tabelle 5.1).

Relative Stromkosten: Um den Einfluss der Flottenelektrifizierung auf die Energiekosten besser zu verstehen, werden die relativen Stromkosten $K_{kWh,\#}$ eines Flottenfahrprofils als weiteres Bewertungsmaß definiert:

$$K_{kWh,\#} = \frac{K_{Str,\#}}{E_{FS,a,\#}} \quad (5.31)$$

Die relativen Stromkosten repräsentieren somit die auf einen jährlichen Energieverbrauch von 1 kWh/Jahr normierten Energiekosten, die für das Laden an der eigenen LIS anfallen. Sie ermöglichen dadurch einen Vergleich von Energiekosten unabhängig von der verbrauchten Energiemenge.

Energiekosten für Laden an fremder LIS

Die Bestimmung der Energiekosten, die für das Laden an fremder LIS anfallen, erfolgt auf Basis der Zwischenladeenergie $E_{i-ch,Fzg,w}$ pro Fahrzeuge und Woche nach Gleichung (5.27). Es wird also die Annahme getroffen, dass Zwischenladen gemäß den Gleichungen (5.26) und (5.27) ausschließlich an fremder LIS erfolgt. Die Energiekosten $K_{f-LIS,Frd,a}$ eines Flottenfahrprofils, die pro Fahrzeug und Woche für das Laden an fremder LIS anfallen, werden somit wie folgt berechnet:

$$K_{f-LIS,Frd,a} = E_{i-ch,Fzg,w} \cdot k_{f-LIS} \cdot N_{KW} \quad (5.32)$$

Durch Multiplikation mit einem Strompreis k_{f-LIS} in €/kWh und der Anzahl der Kalenderwochen im betrachteten Jahr N_{KW} können die Energiekosten $K_{f-LIS,Frd,a}$ abgeschätzt werden. Typische Strompreise k_{f-LIS} für das Laden an öffentlichen Ladestationen liegen je nach Tarif, Anbieter und Ladeleistung zwischen 38 und 79 Ct/kWh [206]. Die Auswertung der Energiekosten für Laden an fremder LIS erfolgt daher sowohl für 38/kWh als auch für 79 Ct/kWh, d. h.:

$$k_{f-LIS} \in [38, 79] \text{ Ct/kWh} \quad (5.33)$$

Gesamtenergiekosten

Die normierten Gesamtenergiekosten $K_{LIS,Frd,a}$ eines Flottenfahrprofils, die für das gesamte Laden der Flotte anfallen, entsprechen der Summe aus den Energiekosten $K_{e-LIS,Frd,a}$ nach Gleichung (5.28) und den Energiekosten $K_{f-LIS,Frd,a}$ nach Gleichung (5.33):

$$K_{LIS,Frd,a} = K_{e-LIS,Frd,a} + K_{f-LIS,Frd,a} \quad (5.34)$$

6 Simulationsszenarien

Im Rahmen von zwei Simulationsstudien wird die Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten mit Hilfe des Simulationsmodells (Kapitel 5) simuliert und bewertet. Die Simulationsstudien bauen aufeinander auf, wobei der Umstieg auf BEV (erste Simulationsstudie) vom Aufbau einer eigenen LIS (zweite Simulationsstudie) getrennt ist. Die Definition der Simulationsszenarien dieser beiden Simulationsstudien ist Gegenstand dieses Kapitel 6.

6.1 Erste Simulationsstudie: Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge

Mit der ersten Simulationsstudie wird eine Entscheidungsgrundlage für den Umstieg auf BEV geschaffen. Dazu wird für jedes aufbereitete Fahrprofil der Einsatz verschiedener BEV anhand des Simulationsmodells simuliert und bewertet.

Zur Definition der Simulationsszenarien werden zunächst im Unterkapitel 6.1.1 die BEV definiert, die simuliert und bewertet werden sollen. Anschließend werden im Unterkapitel 6.1.2 die zu untersuchenden LIS-Varianten definiert. Abschließend werden im Unterkapitel 6.1.3 die Simulationsszenarien der ersten Simulationsstudie zusammengefasst.

6.1.1 Definition batterieelektrischer Fahrzeuge

Ziel dieses Unterkapitels ist es, für jedes Fahrprofil die BEV zu definieren, die in der Simulationsstudie simuliert und ausgewertet werden sollen. Dazu wird zunächst eine Fahrzeugdatenbank mit den für die Simulation relevanten Parametern aufgebaut. Anschließend werden im Rahmen einer Vorauswahl jedem Fahrprofil potentiell geeignete BEV aus der Fahrzeugdatenbank zugeordnet, die simuliert werden sollen.

Aufbau einer Fahrzeugdatenbank

Parameterrecherche: Einen ersten Hinweis darauf, welche BEV simuliert werden könnten, geben die zu ersetzenden Fahrzeuge der Fahrprofile. Dabei stellt Frenzel [38, S. 124f] fest, dass überwiegend ein BEV der gleichen Fahrzeugart und -klasse wie das zu ersetzende Fahrzeug gewählt wird. Die Fahrzeugart und -klasse der Fahrprofile kann der Tabelle C.1 im Anhang entnommen werden. Darüber hinaus wird bei der Auswahl darauf geachtet, dass jede relevante Kombination von Fahrzeugart und -klasse durch mehrere unterschiedliche BEV vertreten ist. Dadurch wird die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen verschiedenen BEV innerhalb einer Fahrzeugart und -klasse ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund werden insgesamt 23 BEV ausgewählt (Tabelle 6.1). In dieser Auswahl ist jede relevante Kombination aus Fahrzeugart und -klasse mit zumindest einem BEV vertreten. In den meisten Fällen sind drei BEV verfügbar, die sich in Reichweite und in Ladeleistung unterscheiden. Für weitere Informationen zu den ausgewählten BEV wird auf Tabelle B.2 verwiesen.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Fahrzeugdatenbank (rechnerische Reichweite: Quotient aus Nenn-Batteriekapazität und WLTP-Verbrauch)

Nr.	Bezeichnung	Art	Fahrzeugklasse	rechnerische Reichweite	maximale Ladeleistung
1	Renault Kangoo Rapid Z.E.	NFZ	Untere Mittelklasse	183 km	4,6 kW AC
2	ABT Volkswagen e-Caddy	NFZ	Untere Mittelklasse	137 km	50 kW DC
3	Nissan e-NV200	NFZ	Mittelklasse	154 km	46 kW DC
4	Mercedes-Benz eVito	NFZ	Obere Mittelklasse	154 km	7,2 kW AC
5	Opel Vivaro-e	NFZ	Obere Mittelklasse	307 km	100 kW DC
6	StreetScooter Work	NFZ	Obere Mittelklasse	172 km	11 kW AC
7	Fiat e-Ducato	NFZ	Oberklasse	238 km	50 kW DC
8	Volkswagen eCrafter	NFZ	Oberklasse	121 km	40 kW DC
9	Mercedes-Benz eSprinter	NFZ	Oberklasse	158 km	80 kW DC
10	Smart Forfour EQ	PKW	Kleinstwagen	98 km	22 kW AC
11	Citroen C-Zero	PKW	Kleinstwagen	94 km	50 kW DC
12	Volkswagen e-up!	PKW	Kleinstwagen	254 km	40 kW DC
13	BMW i3	PKW	Kleinwagen	276 km	50 kW DC
14	Hyundai Kona Elektro	PKW	Kleinwagen	456 km	77 kW DC
15	Renault Zoe	PKW	Kleinwagen	320 km	50 kW DC
16	Nissan Leaf	PKW	Untere Mittelklasse	335 km	100 kW DC
17	Kia e-Niro	PKW	Untere Mittelklasse	421 km	100 kW DC
18	Volkswagen id.3	PKW	Untere Mittelklasse	516 km	125 kW DC
19	Jaguar i-Pace	PKW	Mittelklasse	392 km	100 kW DC
20	Tesla Model 3	PKW	Mittelklasse	503 km	250 kW DC
21	Volkswagen id.4	PKW	Mittelklasse	477 km	125 kW DC
22	Audi e-tron	PKW	Obere Mittelklasse	424 km	150 kW DC
23	Tesla Model S	PKW	Obere Mittelklasse	526 km	250 kW DC

Um die ausgewählten BEV mit dem Simulationsmodell simulieren zu können, müssen die fahrzeugspezifischen Parameter aus den Gleichungen 5.3 bis 5.18 bestimmt werden. Mit Ausnahme des fahrzeugspezifischen Antriebsstrangwirkungsgrades η_{dr} sind alle Parameter in technischen Datenblättern der Fahrzeughersteller sowie der Online-Fahrzeugdatenbanken „ADAC Autokatalog“ [151] und „Electric Vehicle Database (EVDB)“ [207] zu finden. Die Tabellen B.3 und B.4 im Anhang zeigen diese Parameter.

Bestimmung des Antriebsstrangwirkungsgrades: Werte oder Angaben zu fahrzeugspezifischen Antriebsstrangwirkungsgraden η_{dr} der BEV sind nicht öffentlich verfügbar. Aus diesem Grund werden die Antriebsstrangwirkungsgrade, im Wesentlichen analog zum Optimierungsalgorithmus des Simulationsmodells (Unterkapitel 5.2.4), mittels einer binären Suche geschätzt. Als Zielgröße dient dabei der simulierte Energieverbrauch E_{tot} (Gleichung (5.2)), der nach der Optimierung möglichst nah am realen Verbrauch liegen sollte. Die hierzu verwendeten Real-

Verbräuche $b_{100\text{km, EVDB}}$ basieren auf Angaben der Online-Fahrzeugdatenbank EVDB und sind in Tabelle B.3 im Anhang zu finden. Die finalen Antriebsstrangwirkungsgrade η_{dr} sind ebenfalls der Tabelle B.3 im Anhang zu entnehmen. Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der Bestimmung des Antriebsstrangwirkungsgrades wird auf den Anhang D verwiesen.

Vorauswahl potentiell geeigneter BEV

Nicht jedes BEV aus Tabelle 6.1 ist potentiell für jedes Fahrprofil geeignet. So ist beispielsweise ein Pkw in der Regel nicht geeignet, ein Lieferfahrzeug zu ersetzen. Tatsächlich wird in der Praxis überwiegend auf BEV derselben Fahrzeugart und -klasse, wie das zu ersetzende Fahrzeug [38, S. 124f] umgestiegen. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass sich das BEV und das zu ersetzende Fahrzeug sowohl wirtschaftlich (z. B. Anschaffungspreis) als auch technisch (z. B. Ladevolumen) ähneln. Daher werden für jedes Fahrprofil die BEV ausgewählt, die hinsichtlich Fahrzeugart und -klasse mit dem ursprünglichen Fahrzeug des Fahrprofils übereinstimmen.

6.1.2 Definition der Ladeinfrastruktur

Im Unterkapitel 4.1.1 wurden bereits der Firmenstandort und der Wohnorte des Fahrers als Ladestandorte definiert. An jedem dieser Ladestandorte wird eine Ladestation vorgesehen. Die installierte Ladeleistung an den Wohnorten beträgt entsprechend dem Stand der Technik 11 kW AC (Unterkapitel 2.2.3). Beim Firmenstandort ist hingegen zu berücksichtigen, dass die installierte Ladeleistungen $P_{Lad, Ins}$ in der zweiten Simulationsstudie zwischen 11 kW AC und 50 kW DC variiert (Unterkapitel 6.2.2). Um den Einfluss der Ladeleistung auch bei der ersten Simulationsstudie zu berücksichtigen, wird die installierte Ladeleistung $P_{ch,inst}$ am Firmenstandort wie folgt definiert:

$$P_{ch,inst} \in \{11 \text{ kW AC}, 50 \text{ kW DC}\} \quad (6.1)$$

Falls ein BEV nicht DC-ladefähig ist, wird die fahrzeugseitige Maximalladeleistung $P_{ch, BEV, max}$ als installierte Ladeleistung $P_{ch,inst}$ angenommen. Dadurch ist sichergestellt, dass auch bei rein AC-ladefähigen BEV der Einfluss einer höheren, installierten Ladeleistung berücksichtigt wird.

6.1.3 Zusammenfassung der Simulationsszenarien

Tabelle 6.2 fasst die Simulationsszenarien der ersten Simulationsstudie zusammen. Die 399 aufbereiteten Fahrprofile aus Kapitel 4 (Tabelle 4.3) bilden die Grundlage. Für jedes dieser Fahrprofile wird der Einsatz der BEV aus Tabelle 6.1 simuliert, die dieselbe Fahrzeugart und -klasse wie das ursprüngliche Fahrzeug des Fahrprofils aufweisen (Unterkapitel 6.1.1). Dies entspricht der Simulation von ein bis drei verschiedenen BEV. Darüber hinaus werden für jede Kombination von Fahrprofil und BEV zwei unterschiedliche LIS-Varianten, nämlich 11 kW AC und 50 kW DC (Gleichung (6.1)), simuliert. In Summe entspricht das somit 1 856 Einzelsimulationen.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Simulationsszenarien der ersten Simulationsstudie

Anzahl	Bezeichnung
399	Aufbereitete Fahrprofile
× 1 bis 3	BEV-Varianten (abhängig von Fahrzeugart und -klasse des zu ersetzenden Fahrzeugs)
× 2	LIS-Varianten (installierte Ladeleistung am Firmenstandort: 11 kW und 50 kW)
= 1 856	Einzel Simulationen

6.2 Zweite Simulationsstudie: Aufbau einer eigenen Ladeinfrastruktur

Die zweite Simulationsstudie betrifft den Aufbau einer eigenen LIS. Dabei werden mit Hilfe des Simulationsmodells (Kapitel 5) modellierte Flotten in Kombination mit verschiedenen LIS-Varianten simuliert, um die LIS-Varianten im Kontext der jeweiligen Flotte zu bewerten.

Die Definition der Simulationsszenarien beginnt mit der Modellierung batterieelektrischer Flotten im Unterkapitel 6.2.1. Im darauffolgenden Unterkapitel 6.2.2 werden für jede modellierte Flotte die zu bewertenden LIS-Varianten definiert. Abschließend werden im Unterkapitel 6.2.3 die Simulationsszenarien der ersten Simulationsstudie zusammengefasst.

6.2.1 Modellierung batterieelektrischer Flotten

Ausgangspunkt der Flottenmodellierung sind die Ergebnisse aus der ersten Simulationsstudie. Basierend darauf wird für jedes Fahrprofil das am besten geeignete BEV ausgewählt (nächster Abschnitt). Der darauffolgende Abschnitt befasst sich mit der Bildung von Flottenfahrprofilen, die aus den einzelnen Fahrprofilen zusammengesetzt werden. Im letzten Abschnitt dieses Unterkapitels wird jedem Flottenfahrprofil ein fiktiver Firmenstandort mit einem charakteristischen Grundlastprofil zugewiesen.

Auswahl geeigneter BEV

Zunächst wird für jedes Fahrprofil das am besten geeignete BEV ausgewählt. Hierzu wird für jede simulierte Kombination aus Fahrprofil und BEV die Eignung des BEV für das Fahrprofil bewertet.

Berechnung der Eignung: Diese Eignung $S(z_k)$ einer bestimmten Kombination aus Fahrprofil und BEV ist wie folgt definiert:

$$S = 2 \cdot \frac{2}{4} \sum_{p_{ch,inst}} \underbrace{\frac{\zeta_{end,min} - \mu(\zeta_{end,min})}{\sigma(\zeta_{end,min})}}_{\text{Fahrzeugreichweite}} - \underbrace{\frac{VG_{min} - \mu(VG_{min})}{\sigma(VG_{min})}}_{\text{Fahrzeugantriebsleistung}} \quad (6.2)$$

Die Eignung S setzt sich aus einem Term für die Fahrzeugreichweite und einem Term für die Fahrzeugantriebsleistung zusammen. Der Term für die Fahrzeugreichweite basiert dem tiefsten ausreißerbereinigten Rest-SOC $\zeta_{end,min}$ eines Fahrprofils, der an einem Tourende auftritt. Dieser Rest-SOC $\zeta_{end,min}$ wird in Anlehnung an die Berechnung von Ausreißern in einem Box-62

Plot [208, S. 1226] wie folgt berechnet:

$$\zeta_{\text{end,min}} = Q_{0,25}(\zeta_{\text{end}}) - 1,5(Q_{0,75}(\zeta_{\text{end}}) - Q_{0,25}(\zeta_{\text{end}})) \quad (6.3)$$

Hierbei stellt ζ_{end} die Menge der einzelnen Rest-SOC ζ_{end} nach Gleichung 5.25 dar. $Q_{0,25}$ und $Q_{0,75}$ sind das untere bzw. erste und obere bzw. dritte Quartil dieser Menge ζ_{end} . Analog zur Fahrzeugreichweite ist der höchste ausreißerbereinigte Verzögerungsgrad VG_{max} eines Fahrprofils wie folgt definiert:

$$VG_{\text{max}} = Q_{0,75}(VG) + 1,5(Q_{0,75}(VG) - Q_{0,25}(VG)) \quad (6.4)$$

Dabei stellt VG dabei die Menge der Verzögerungsgrade VG nach Gleichung (5.23) eines Fahrprofils dar.

Die beiden Größen $\zeta_{\text{end,min}}$ und VG_{max} repräsentieren unterschiedliche physikalische Größen. Um dennoch einen Vergleich untereinander zu ermöglichen, werden sie standardisiert. Hierzu wird von der zu standardisierenden Größe der Erwartungswert μ der Größe abgezogen, und das Ergebnis davon durch die Standardabweichung σ der Größe geteilt [208, S. 1299f].

Je höher $\zeta_{\text{end,min}}$, also die Fahrzeugreichweite, ist, desto höher ist die Eignung S nach Gleichung (6.2). Die Größe VG_{max} , also die Fahrzeugantriebsleistung, weist ein zur Fahrzeugreichweite umgekehrtes Verhalten auf. Daher fließt die Fahrzeugreichweite mit einem positiven Vorzeichen und die Fahrzeugantriebsleistung mit einem negativen Vorzeichen in die Eignung S ein. Um für die beiden Ladeleistungen $P_{\text{ch,inst}}$ nach Gleichung (6.1) eine möglichst hohe Eignung S sicherzustellen, wird der arithmetische Mittelwert aus den beiden Ladeleistungen gebildet. Unter der Annahme, dass in gewerblichen Fahrzeugflotten das Liegenbleiben aufgrund leerer Batterie kritischer bewertet wird, als die verspätete Ankunft am Zielort, wird zudem die Fahrzeugreichweite gegenüber der Fahrzeugantriebsleistung doppelt gewichtet.

Auswahl des am besten geeigneten BEV: Das BEV mit der höchsten Eignung S wird schließlich ausgewählt und dem Fahrprofil für die nachfolgenden Schritte fest zugewiesen.

Bildung von Flottenfahrprofilen

Die Flottenfahrprofile werden durch Zusammensetzen der einzelnen Fahrprofile gebildet. Im Folgenden wird zunächst die Methodik erläutert. Anschließend wird die gewählte Methodik begründet und interpretiert.

Methodik: Abbildung 6.1 zeigt die Methodik zur Bildung der Flottenfahrprofile. Dabei ist die Methodik exemplarisch für einen der Einsatzzwecke E1 bis E7 aus Tabelle 4.2 dargestellt und wird auf alle anderen Einsatzzwecke analog angewendet.

Ausgangspunkt sind die Fahrprofile x mit $i = 1, 2, \dots, N_{\text{FP}}$ des betrachteten Einsatzzwecks, wobei N_{FP} die Anzahl der Fahrprofile des betrachteten Einsatzzwecks bezeichnet. Die Fahrprofile x_i werden zunächst nach dem Mittelwert \overline{MLG} der Mindestladegeschwindigkeiten MLG gemäß Gleichung (4.1) sortiert.

Anschließend werden die sortierten Fahrprofile $x_1, x_2, \dots, x_{N_{\text{FP}}}$ zu N_{FFP} gleich großen Flottenfahrprofilen gruppiert, wobei dieser Vorgang für unterschiedliche Flottengrößen N_{FZg} wiederholt wird. Die Flottengröße N_{FZg} entspricht somit der Anzahl der Fahrprofile eines Flottenfahrprofils. Auf diese Weise werden N_{FFP} Flottenfahrprofile pro Flottengröße N_{FZg} modelliert.

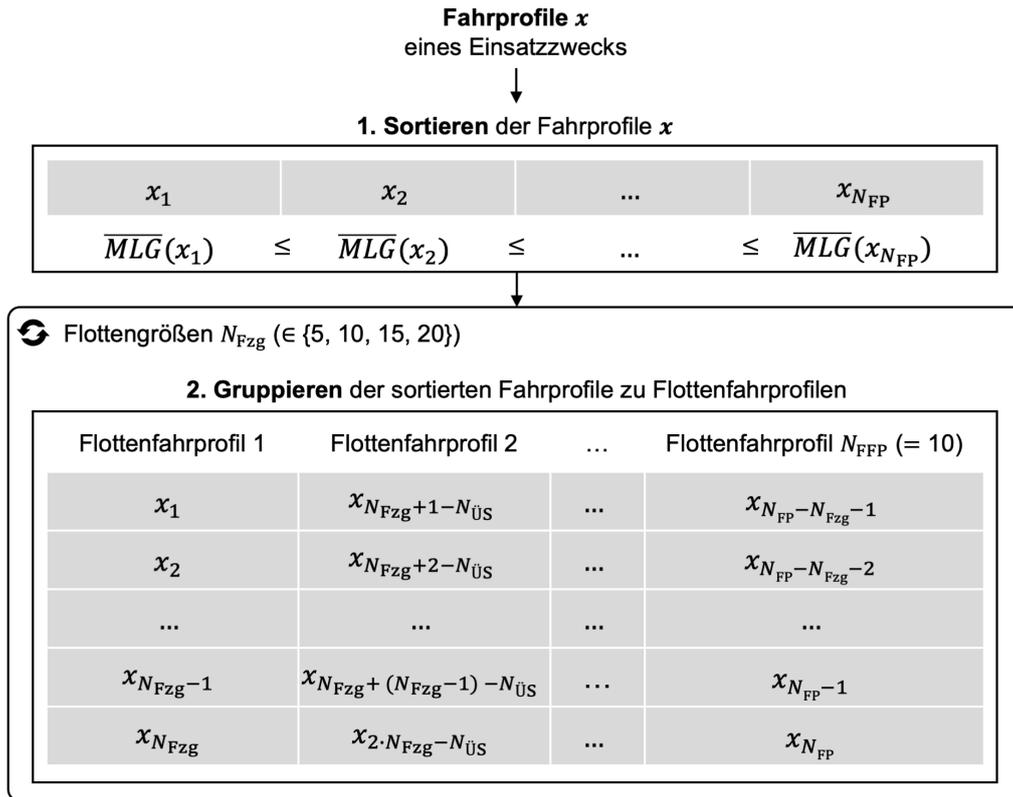


Abbildung 6.1: Bildung von Flottenfahrprofilen

Um eine Vergleichbarkeit der Flottenfahrprofile verschiedener Einsatzzwecke zu gewährleisten, werden die Parameter N_{FFP} und N_{Fzg} für alle Einsatzzwecke gleich parametrisiert. Dabei ist ein Kompromiss zwischen Flottengröße N_{Fzg} und Flottenanzahl N_{FFP} notwendig, weil die Anzahl der verfügbaren Fahrprofile eines Einsatzzwecks durch den Datensatz vorgegeben ist. Vor diesem Hintergrund werden die Flottengröße N_{Fzg} und Flottenanzahl N_{FFP} wie folgt parametrisiert:

$$N_{\text{Fzg}} \in \{5, 10, 15, 20\} \quad (6.5)$$

$$N_{\text{FFP}} = 10 \quad (6.6)$$

Da die Flottengröße N_{Fzg} und Flottenanzahl N_{FFP} für alle Einsatzzwecke gleich sind, die Einsatzzwecke aber unterschiedlich viele Fahrprofile umfassen (Tabelle 4.3), ist eine Überschneidung von zwei aufeinander folgenden Flottenfahrprofilen zulässig. Ein Fahrprofil kann somit Bestandteil mehrerer Flottenfahrprofile sein. Die Anzahl der Fahrprofile in einem Flottenfahrprofil, die Teil einer solchen Überschneidung sind, ist mit $N_{\text{ÜS}}$ angegeben. Die letzten $N_{\text{ÜS}}$ Fahrprofile eines Flottenfahrprofils stellen also gleichzeitig auch die ersten $N_{\text{ÜS}}$ Fahrprofile des nachfolgenden Flottenfahrprofils dar.

Begründung und Interpretation: Die Sortierreihenfolge der Fahrprofile, die nach der Mindestladegeschwindigkeit sortiert sind, bleibt beim Gruppieren (2. Schritt in Abbildung 6.1) erhalten. Die gebildeten Flottenfahrprofile sind also ebenfalls nach der Mindestladegeschwindigkeit sortiert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass sowohl ein Flottenfahrprofil mit der minimal möglichen als auch ein Flottenfahrprofil mit der maximal möglichen Mindestladegeschwindigkeit modelliert wird.

Die Mindestladegeschwindigkeit ist ein Maß dafür, wie kritisch ein Fahrprofil bzw. Flottenfahrprofil aus Sicht der Elektrifizierung einzustufen ist (Unterkapitel 4.2.3). Das Flottenfahrprofil

mit der minimalen Mindestladegeschwindigkeit bildet somit aus Sicht der Flottenelektrifizierung den Best-Case und das Flottenfahrprofil mit der maximalen Mindestladegeschwindigkeit den Worst-Case für den jeweiligen Einsatzzweck. Jede mögliche Kombination der Fahrprofile führt zu einem Flottenfahrprofil, dessen Mindestladegeschwindigkeit entweder einem der dem Worst- oder Best-Case entspricht oder dazwischen liegt. Somit sind also alle im vorliegenden Datensatz vertretenen Ausprägungen der Mindestladegeschwindigkeit auch in den gebildeten Flottenfahrprofilen vertreten.

Definition von Grundlastprofilen

Den Flottenfahrprofilen werden schließlich fiktive Firmenstandorte mit Grundlastprofilen zugeordnet. Die Definition dieser Grundlastprofile wird in diesem Unterkapitel behandelt.

Standardlastprofile: Da die Datenbasis keine Angaben zu den Grundlastprofilen der ursprünglichen Flotten liefert, wird auf Standardlastprofile nach Meier et al. [156] zurückgegriffen. Die Zuordnung der Standardlastprofile zu den Einsatzzwecken ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Eine visuelle Darstellung der Standardlastprofile findet sich in Abbildung E.1 im Anhang.

Tabelle 6.3: Zuordnung der Standardlastprofilen zu Einsatzzwecken

Einsatzzweck	Standardlastprofil
E1 - Geschäft	G1: Gewerbe werktags 8-18
E2 - Dienstleistung mit Privatnutzung	G1: Gewerbe werktags 8-18
E3 - Dienstleistung ohne Privatnutzung	G1: Gewerbe werktags 8-18
E4 - Gütertransport	G1: Gewerbe werktags 8-18
E5 - Bäckerei	G5: Bäckerei mit Backstube
E6 - Pflegedienst	G0: Gewerbe allgemein
E7 - Taxi	G3: Gewerbe durchlaufend

Die Zuordnung der Standardlastprofil erfolgt entsprechend den Ausführungen von Meier et al. [156]. Demnach zeichnet sich das Standardlastprofil „G1 - Gewerbe werktags 8-18“ durch einen geringen Verbrauch am Wochenende aus und ist typisch für Büros oder Werkstätten. Es wird daher für die Einsatzzwecke gewählt, bei denen die Fahrzeuge ausschließlich an Werktagen geschäftlich genutzt werden (Unterkapitel 3.1). Den Bäckerei-Flottenfahrprofilen wird das für Bäckereien typische Standardlastprofil „G5 - Bäckerei mit Backstube“ zugewiesen. Für Taxis wird dagegen angenommen, dass es sich bei dem Firmenstandort im Wesentlichen um ein Parkhaus handelt und das Standardlastprofil „G3 - Gewerbe durchlaufend“ gewählt. Pflege-dienst-Flottenfahrprofile wird schließlich per Ausschlussverfahren das generische Standardlastprofil „G0 - Gewerbe allgemein“ verwendet.

Grundlastverbrauch: Die Standardlastprofile sind auf einen Standortenergieverbrauch von 1 kWh/Jahr normiert. Für die Modellierung des Grundlastprofils müssen daher noch die Standortenergieverbräuche vor der Elektrifizierung, also ohne dem Laden der BEV, definiert werden. Diese Standortenergieverbräuche werden im Folgenden als Grundlastverbräuche bezeichnet.

Analog zu den Flottengrößen N_{Fzg} (Gleichung (6.5)) soll auch der Einfluss unterschiedlicher Grundlastverbräuche auf die Elektrifizierung untersucht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Standardlastprofile nur für Standorte mit einem Netzanschluss in der Niederspannungsebene repräsentativ sind [156]. Daraus kann eine obere Schranke für den Grundlastverbrauch abgeleitet werden. Denn nach Angaben des Verbandes der Bayerischen Elektrizi-

tätswirtschaft e. V. werden Standorte mit einer Netzanschlussleistung bis maximal 350 kVA in der Niederspannungsebene angeschlossen [209, S. 10]. Dies entspricht einem Jahresenergieverbrauch von weit über 500 MWh/Jahr für alle betrachteten Standardlastprofile. Eine untere Grenze gibt die Bundesnetzagentur [96, S. 10], die 50 MWh/Jahr als typisch für Kleingewerbe angibt. Vor diesem Hintergrund werden die zu untersuchenden Grundlastverbräuche $E_{FS,vor}$ wie folgt definiert:

$$E_{FS,vor} \in \{50 \text{ MWh}, 100 \text{ MWh}, 200 \text{ MWh}, 500 \text{ MWh}\} \quad (6.7)$$

Abschätzung der Standortgröße: Ein Firmenstandort mit 50 MWh/Jahr entspricht im Durchschnitt einem büroähnlichen Betrieb mit rund 23 Mitarbeitern (bei 2,2 MWh/Mitarbeiter nach [210, S. 42]). Alternativ entspricht dies auch einer Bäckerei mit rund acht Mitarbeitern (bei 6,2 MWh-Mitarbeiter nach [210, S. 42]). Auch ein Parkhaus mit 100 Stellplätzen weist einen ähnlich hohen Energieverbrauch auf (bei 0,5 MWh/Stellplatz nach [211]). Ein jährlicher Energieverbrauch von 500 MWh/Jahr entspricht hingegen einem durchschnittlichen büroähnlichen Betrieb mit rund 230 Mitarbeitern, einer Bäckerei mit rund 80 Mitarbeitern oder einem Parkhaus mit rund 1 000 Stellplätzen verbraucht. Die Grundlastverbräuche $E_{FS,vor}$ aus Gleichung (6.7) decken also typische Klein- und Mittelstandsunternehmen ab.

6.2.2 Definition der Ladeinfrastruktur

Tabelle 6.4 zeigt die LIS-Varianten, die für jede modellierte Flotte untersucht werden. Insgesamt werden 36 LIS-Varianten berücksichtigt, die sich durch Kombination von verschiedenen Ladestationen, Lastmanagement-Ansätzen sowie Lademanagement-Verfahren ergeben.

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der zu untersuchenden LIS-Varianten

Ladestationen an Wohnorten	Ein Ladepunkt je Wohnort mit ausschließlich 11 kW
Ladestationen am Firmenstandort	Anzahl Ladepunkte am Firmenstandort = Flottengröße N_{Fzg} mit 11 kW, 22 kW, 24 kW oder 50 kW
Lastmanagement-Ansatz am Firmenstandort	Kein Lastmanagement Statisches Lastmanagement Dynamisches Lastmanagement
Lademanagement-Verfahren am Hauptstandort	FCFS: Leistungsaufteilung priorisiert nach frühestem Ladebeginn EQUAL: Gleichmäßige Leistungsaufteilung LSOCF: Leistungsaufteilung priorisiert nach geringstem SOC

Ladestationen an Wohnorten: In Übereinstimmung mit dem Stand der Technik (Unterkapitel 2.2.3) wird an jedem Wohnort eine 11 kW AC Ladestation vorgesehen.

Ladestationen am Firmenstandort: Am Firmenstandort erhält jedes BEV eine eigene Ladestation, sodass alle BEV einer Flotte gleichzeitig laden können (Stand der Technik im Unterkapitel 2.2.3). Dabei weisen alle Ladestationen die gleiche installierte Ladeleistung $P_{ch,inst}$ auf. Um den Einfluss unterschiedlicher Ladeleistungen am Firmenstandort zu untersuchen, wird die am Firmenstandort installierte Ladeleistung $P_{ch,inst}$ variiert:

$$P_{ch,inst} \in \{11 \text{ kW}, 22 \text{ kW}, 24 \text{ kW}, 50 \text{ kW}\} \quad (6.8)$$

Dies entspricht den üblichen Ladeleistungen für firmeneigene LIS [198]. Der Einfachheit halber wird im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Hinweise zur Stromart, also AC oder DC, verzichtet.

Die Variation der am Firmenstandort installierten Ladeleistungen erfolgt nach einem bestimmten Schema. Und zwar erhält jedes BEV einer Flotte zunächst eine Ladestation mit 11 kW. Davon ausgehend wird die Ladeleistung in aufeinanderfolgenden Simulationsdurchläufen schrittweise bis auf 50 kW erhöht. Dabei wird bei Ladeleistungen über 11 kW vor einem Simulationsdurchlauf geprüft, ob die Erhöhung der Ladeleistung auf die nächst-höhere Ladeleistung auch vom BEV genutzt werden kann. Ist dies nicht der Fall, so wird die Ladeleistung für dieses BEV nicht erhöht. Eine installierte Ladeleistung von beispielsweise 50 kW bedeutet also, dass alle DC-ladefähigen BEV mit der fahrzeugseitig maximal möglichen DC-Ladeleistung bis maximal 50 kW geladen können. Zudem können in diesem Fall BEV, die nicht DC-ladefähig sind (Renault Kangoo oder Smart Forfour Tabelle 6.1) mit der fahrzeugseitig maximal möglichen AC-Ladeleistung bis maximal 22 kW geladen werden.

Lastmanagement-Ansatz: Die tatsächlichen Ladeleistungen am Firmenstandort werden durch ein Last- und Lademanagement-System gesteuert, wobei sowohl der statische als auch der dynamische Lastmanagement-Ansatz untersucht wird (Last- und Lademanagement-Modell im Unterkapitel 5.2.3). Zudem wird auch der Fall ohne Last- und Lademanagement-System berücksichtigt, um den Mehrwert eines Last- und Lademanagement-System abschätzen zu können.

Lademanagement-Verfahren: Wie bereits bei der Modellierung des Last- und Lademanagement-Modells (Unterkapitel 5.2.3) beschrieben, werden die drei Lademanagement-Verfahren FCFS, EQUAL und LSOFC betrachtet.

6.2.3 Zusammenfassung der Simulationsszenarien

In Tabelle 6.2 sind die Simulationsszenarien der zweiten Simulationsstudie zusammengefasst. Die modellierten Flotten setzen sich aus den sieben Einsatzzwecken E1 bis E7 (Tabelle 4.2) mit jeweils vier Grundlastverbräuchen (Gleichung (6.7)) und Flottengrößen (Gleichung (6.5)) zusammen. Pro Einsatzzweck, Flottengröße und Grundlastverbrauch werden jeweils zehn Flottenfahrprofile (Gleichung (6.6)) modelliert. Für jede dieser 1 120 modellierten Flotten werden 36 LIS-Varianten gemäß Tabelle 6.4 untersucht. Insgesamt umfasst die zweite Simulationsstudie somit 40 320 Einzelsimulationen.

Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Simulationsszenarien der zweiten Simulationsstudie

Anzahl	Bezeichnung
7	Einsatzzwecke
× 4	Grundlastverbräuche am Firmenstandort (50, 100, 200 und 500 MWh)
× 4	Flottengrößen (5, 10, 15 und 20 Fahrzeuge)
× 10	Flottenfahrprofile
= 1 120	Flotten
× 36	LIS-Varianten (Tabelle 6.4)
= 40 320	Einzelsimulationen

7 Ergebnisse

Grundlage dieses Kapitels sind die Ergebnisse der beiden Simulationsstudien (Kapitel 6). Die Simulationsergebnisse werden anhand der im Unterkapitel 5.3 beschriebenen Bewertungsmaße ausgewertet. Das erste Unterkapitel 7.1 befasst sich mit den Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb. Das zweite Unterkapitel 7.2 behandelt die Auswirkungen auf die Flottenwirtschaftlichkeit.

7.1 Auswirkungen auf Flottenbetrieb

Die Auswirkungen der Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb werden anhand der drei Bewertungskriterien des Unterkapitels 5.3.1 ausgewertet. Das erste Unterkapitel 7.1.1 bezieht sich demnach auf Einschränkungen im Flottenbetrieb aufgrund zu geringer Fahrzeugantriebsleistung. Anschließend werden im Unterkapitel 7.1.2 die Auswirkungen von zu geringer Fahrzeugreichweite beleuchtet. Das abschließende Unterkapitel 7.1.3 befasst sich mit dem Zwischenladebedarf als eine weitere Einschränkung im Flottenbetrieb.

7.1.1 Fahrzeugantriebsleistung

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der Frage, inwieweit die simulierten BEV in der Lage sind, die Anforderungen der untersuchten Fahrprofile an die Fahrzeugantriebsleistung zu erfüllen. Da der Fokus dabei auf dem Umstieg auf BEV, und nicht auf dem Aufbau einer eigenen LIS liegt, bilden die Simulationsergebnisse der ersten Simulationsstudie (Unterkapitel 6.1) die Grundlage für die folgenden Auswertungen.

Abbildung 7.1 zeigt (a) den Erfüllungsgrad (Gleichung (5.22)) und (b) den Verzögerungsgrad (Gleichung (5.23)) in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) aus Tabelle 4.2. Die wesentlichen Auswirkungen auf den Flottenbetrieb, die sich aus der Abbildung 7.1 ableiten lassen, sind Gegenstand der folgenden Abschnitte.

Erfüllungsgrad

Zunächst wird der Erfüllungsgrad aus Abbildung 7.1 (a) näher betrachtet. Die folgenden Auswertungen sind der Übersichtlichkeit halber nach Einsatzzwecken mit ähnlichem Median-Erfüllungsgrad gruppiert.

E1, E6, E7: Median-Erfüllungsgrad = 88 - 99 %; Die Einsatzzwecke E1, E6 und E7 umfassen die meisten erfolgreich abgeschlossenen Fahrten, d.h. Fahrten ohne Verzögerung. Die Median-Werte dieser Erfüllungsgrade liegen zwischen 88 % und 99 %. BEV-Taxis (E7) erfüllen die Geschwindigkeitsvorgaben ihrer verbrennungsmotorischen Pendanten am besten. Selbst im Worst-Case sind nur etwa 3 % der Fahrten nicht erfolgreich.

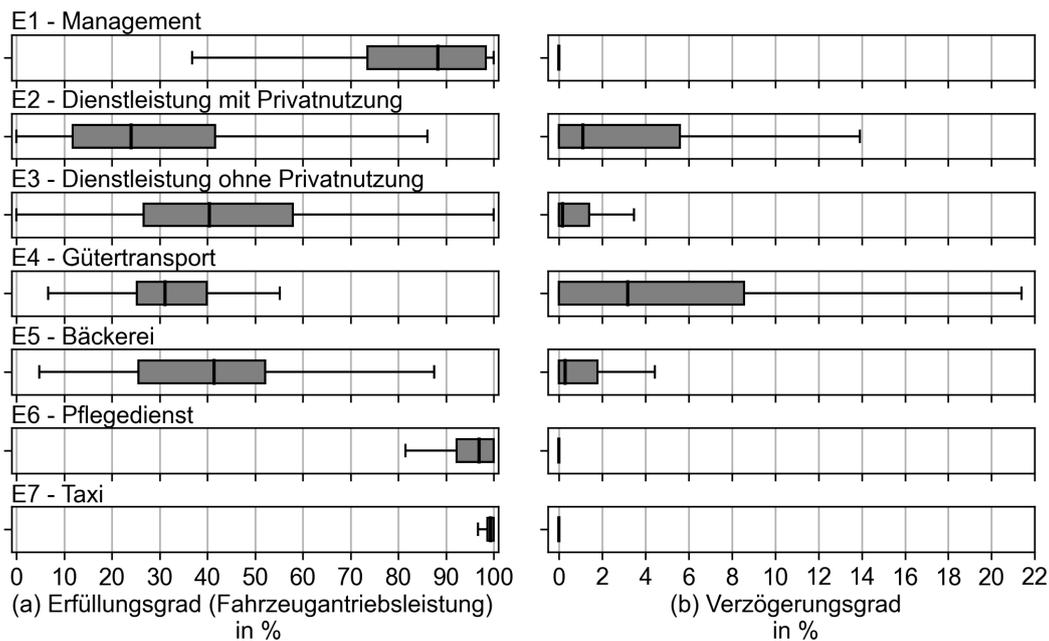


Abbildung 7.1: (a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugantriebsleistung) und (b) Verzögerungsgrad in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

E2 - E5: Median-Erfüllungsgrad = 24 - 41 %; Deutlich schlechter schneiden die Einsatzzwecke E2 bis E5 ab. Hier werden nur Erfüllungsgrade zwischen 24% (E2: Dienstleistung mit Privatnutzung) und 41 % (E5: Bäckerei) erreicht. Bei den Einsatzzwecke E2 - E5 ist also häufiger mit Fahrzeitverlängerungen der Fahrten durch die Flottenelektrifizierung zu rechnen.

Verzögerungsgrad

Um das Ausmaß der oben beschriebenen Verzögerungen besser zu verstehen, wird nachfolgend der Verzögerungsgrad aus Abbildung 7.1 (b) näher beleuchtet. Die Auswertungen sind wiederum nach Einsatzzwecken mit ähnlichem Median-Verzögerungsgrad gruppiert.

E1 - E3, E5 - E7: Median-Verzögerungsgrad = 0 - 1 %; Trotz der relativ geringen Erfüllungsgrade (Abbildung 7.1 (a)) sind die Verzögerungsgrade der Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E5 bis E7 überwiegend vernachlässigbar.

E2, E4: Median-Verzögerungsgrad = 1 - 3 %; Etwas stärkere Einschränkungen des Flottenbetriebs durch Verzögerungen sind bei Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung und Gütertransport-Fahrzeugen (E2 und E4) zu erwarten. Zwar liegen die Median-Verzögerungsgrade nur bei 1 - 3 %. Allerdings weisen diese Fahrzeuge einige Fahrten mit Verzögerungsgraden von über 10 % auf. So werden 18 % der Fahrten von Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung (E2) um 10 bis 14 % verzögert, was zu realistischen Einschränkungen im Flottenbetrieb führen kann. Bei Gütertransport-Fahrzeugen (E4) weisen sogar 21 % der Fahrten Verzögerungsgrade von 10 bis 21 % auf. Gerade im eng getakteten Gütertransportverkehr können sich solche Verzögerungsgrade negativ auf den Flottenbetrieb auswirken.

Einfluss der Fahrzeugwahl

Der Einfluss der Fahrzeugwahl auf die Erfüllung der Anforderungen an die Fahrzeugantriebsleistung wird anhand der jeweils besten und schlechtesten BEV untersucht. Abbildung 7.2 zeigt

dazu die Abweichung (a) des Erfüllungsgrades (Gleichung (5.22)) und (b) des Verzögerungsgrades (Gleichung (5.23)) vom fahrprofilspezifischen Median für die Fälle, in denen das jeweils beste bzw. schlechteste BEV eingesetzt wird. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) dargestellt.

Hierbei ist das beste BEV, dasjenige BEV, dessen ausreißerbereinigtes Maximum (rechte Antennen der Boxplots in Abbildung 7.2) des Verzögerungsgrades minimal ist. Das schlechteste BEV ist dementsprechend das BEV, dessen ausreißerbereinigtes Minimum des Rest-SOC maximal ist. Die prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV“ und „schlechtestes BEV“ der 23 untersuchten BEV ist in Abbildung F.2 im Anhang dargestellt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Auswirkungen eines Wechsels vom schlechtesten zum besten BEV aus Abbildung 7.2 zusammengefasst. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnliche Median-Werten gruppiert.

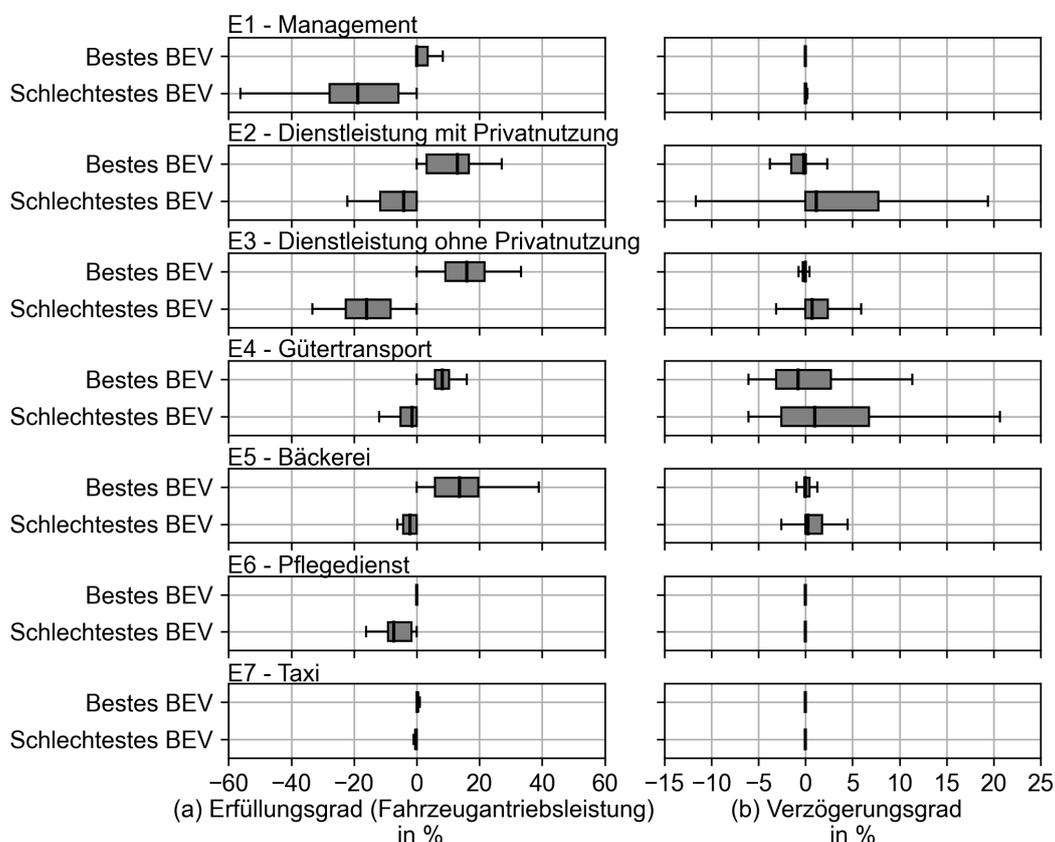


Abbildung 7.2: (a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugantriebsleistung) und (b) Verzögerungsgrad in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der Fahrzeugwahl (bestes oder schlechtestes BEV)

E1, E5 - E7: Median-Verzögerungsgrad ↓ 0 %; Bei den Einsatzzwecken E1 sowie E5 bis E7 spielt die Fahrzeugwahl hinsichtlich der Fahrzeugantriebsleistung kaum eine Rolle. Eine Verbesserung oder Verschlechterung des Verzögerungsgrades durch die Wahl des jeweils besten oder schlechtesten BEV ist nicht zu erkennen.

E2 - E4: Median-Verzögerungsgrad ↓ 1 - 2 %; Auch die Verzögerungsgrade der Einsatzzwecke E2 bis E4 werden größtenteils nur geringfügig durch die Fahrzeugwahl beeinflusst. So beträgt der Unterschied zwischen dem jeweils besten und schlechtesten BEV lediglich 1 % bis 2 % (Median). In Ausnahmefällen können die Verzögerungsgrade aber auch relativ stark vom

verwendeten BEV abhängen. Im Worst-Case liegt der Unterschied zwischen dem jeweils besten und schlechtesten BEV zwischen 6 % und 17 %.

7.1.2 Fahrzeugreichweite

In diesem Unterkapitel wird untersucht, in wie fern die simulierten BEV in der Lage sind, die Anforderungen der untersuchten Fahrprofile an die Fahrzeugreichweite zu erfüllen. Analog zur Fahrzeugantriebsleistung (Unterkapitel 7.1.1) basieren die folgenden Auswertungen zur Fahrzeugreichweite auf den Simulationsergebnissen der ersten Simulationsstudie (Unterkapitel 6.1).

Abbildung 7.3 zeigt (a) den daraus resultierenden Erfüllungsgrad (Gleichung (5.24)) und (b) den Rest-SOC (Gleichung (5.25)). Dabei wird zwischen den Einsatzzwecken E1 bis E7 sowie den beiden in der ersten Simulationsstudie untersuchten LIS-Varianten (Tabelle 6.2), d. h. 11 kW und 50 kW installierte Ladeleistung am Firmenstandort nach Gleichung (6.1), unterschieden. Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Auswirkungen auf den Flottenbetrieb zusammen, die sich aus Abbildung 7.3 ableiten lassen.

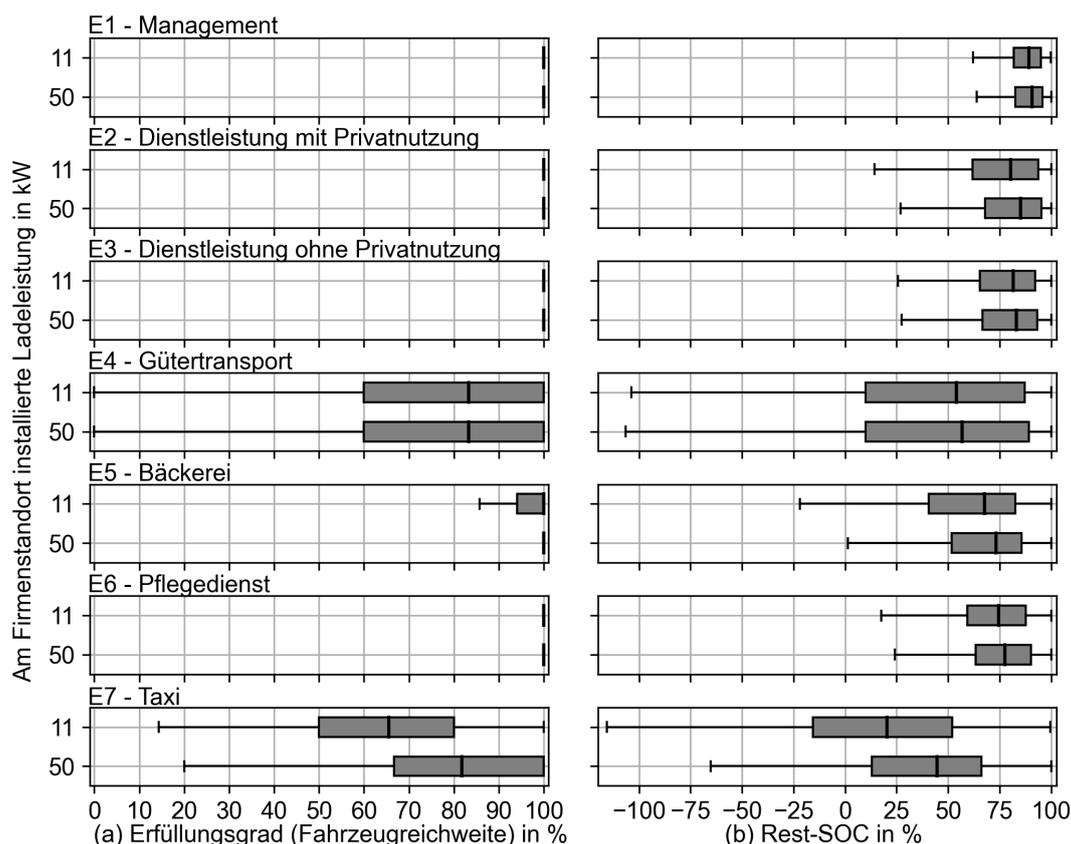


Abbildung 7.3: (a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugreichweite) und (b) Rest-SOC in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung

Erfüllungsgrad bei 11 kW installierter Ladeleistung

Als erstes wird der Erfüllungsgrad aus Abbildung 7.3 (a) für den Fall ausgewertet, dass eine am Firmenstandort installierte Ladeleistung von 11 kW zum Einsatz kommt. Die Auswertungen

sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Werten der Erfüllungsgrade (Mittelstriche der Box-Plots in Abbildung 7.3) gruppiert.

E1 - E3, E5, E6: Median-Erfüllungsgrad = 100 %; Fahrzeuge der Einsatzzwecken E1 bis E3 sowie E5 und E6 erreichen bereits mit einer installierten Ladeleistung von 11 kW einen Median-Erfüllungsgrad von 100 %. Darunter schneiden Bäckerei-Fahrzeugen (E5) am schlechtesten ab. Dennoch erreichen 72 % der Bäckerei-Fahrzeuge einen Erfüllungsgrad von 100 %, wobei nur ein Viertel einen Erfüllungsgrad von 94 % oder geringer aufweisen (unteres Quartil: linke Boxränder der Box-Plots aus Abbildung 7.3). Selbst im Worst-Case (ausreißerbereinigtes Minimum: linke Antennen der Box-Plots aus Abbildung 7.3) können noch 86 % der Touren erfolgreich abgeschlossen werden. Fahrzeuge der übrigen Einsatzzwecke können hingegen auch im Worst-Case alle Touren mit einem BEV erfolgreich abschließen.

E4: Median-Erfüllungsgrad = 83 %; Deutlich geringere Erfüllungsgrade weisen Gütertransport-Fahrzeuge (E4) auf. So erreichen nur 45 % der untersuchten Fahrprofile einen Erfüllungsgrad von 100 %. Bei rund einem Viertel der Fahrprofile (unteres Quartil) liegt der Erfüllungsgrad unter 60 % wobei im Worst-Case keine einzige Tour erfolgreich abgeschlossen werden kann.

E7: Median-Erfüllungsgrad = 65 %; Taxis weisen die geringsten Erfüllungsgrade auf. Mit einer installierten Ladeleistung von 11 kW erreicht gerade einmal die Hälfte der untersuchten Fahrprofile einen Erfüllungsgrad von 65 % (Median), wobei nur 6 % einen Erfüllungsgrade von 100 % aufweisen. Bei einem Viertel der untersuchten Fahrprofile können lediglich maximal 50 % der Touren erfolgreich abgeschlossen werden (unteres Quartil).

Rest-SOC bei 11 kW installierter Ladeleistung

Um das Ausmaß der nicht erfolgreich abschließbaren Touren besser zu begreifen, wird in diesem Abschnitt der Rest-SOC aus Abbildung 7.3 (b) ausgewertet, der sich bei einer am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW einstellt. Die Auswertungen sind der Übersichtlichkeit halber wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Werten der Rest-SOC gruppiert.

E1 - E3, E5, E6: Median-Rest-SOC = 68 - 89 %; Fahrzeuge der Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E5 und E6 kommen im Median mit einem Rest-SOC von 68 bis 89 % an einem Ladestandort an. Die geringsten Rest-SOC weisen dabei Bäckerei-Fahrzeuge (E5) auf. So enden 8 % der Touren mit einem leicht negativen Rest-SOC, wobei im Worst-Case der Rest-SOC -22 % beträgt. In der Praxis müsste somit diese Worst-Case-Tour für wenigstens eine Zwischenladung unterbrochen werden. Im Vergleich dazu schneiden die übrigen Einsatzzwecke besser ab. Selbst im jeweiligen Worst-Case beträgt der Rest-SOC mindestens 14 %.

E4: Median-Rest-SOC = 54 %; Die Hälfte der Touren aller Gütertransport-Fahrzeuge (Median) werden mit einem Rest-SOC von 54 % oder weniger beendet. Bei 21 % der Touren ist der Rest-SOC negativ, wobei im Worst-Case das Fahrzeug mit einem Rest-SOC von -109 % am Ladestandort ankommt. Diese Worst-Case-Tour müsste in der Praxis zumindest zweimal für einen Zwischenladevorgang unterbrochen werden, um die fehlenden 109 % unterwegs aufzuladen.

E7: Median-Rest-SOC = 20 %; Taxis kommen in 50 % der Fälle (Median) mit einem Rest-SOC von 20 % oder weniger am Ladestandort an. Bei 34 % der Touren ist der Rest-SOC negativ, wobei im Worst-Case der Rest-SOC bei -116 % liegt. Hier wären in der Praxis also auch wenigstens zwei Unterbrechungen dieser Worst-Case-Tour für Zwischenladungen notwendig.

Einfluss der installierten Ladeleistung

Im Folgenden wird untersucht, wie sich eine Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW auf den Rest-SOC und Erfüllungsgrad aus Abbildung 7.3 auswirkt. Die Auswertungen sind wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Media-Rest-SOC gruppiert.

E1 - E6: Median-Rest-SOC \uparrow 1 - 6 %; Fahrzeuge der Einsatzzwecke E1 bis E6 profitieren kaum von einer Erhöhung der installierten Ladeleistung von 11 auf 50 kW. Der Median-Rest-SOC steigt dadurch um lediglich 1 bis 6 %. Die Median-Erfüllungsgrade bleiben sogar unverändert.

E7: Median-Rest-SOC \uparrow 24 %; Bei Taxis steigt hingegen der Median-Rest-SOC um 24 % auf 44 %, wenn die installierte Ladeleistung am Firmenstandort von 11 kW auf 50 kW angehoben wird. Auch der Erfüllungsgrad kann dadurch von 65 % auf 82 % erhöht werden.

Einfluss der Fahrzeugwahl

Um den Einfluss der Fahrzeugwahl auf die Erfüllung von Anforderungen an die Fahrzeugreichweite zu untersuchen, werden analog zur Fahrzeugantriebsleistung (Unterkapitel 7.1.1) das je untersuchtem Fahrprofil beste und schlechteste BEV miteinander verglichen. Dazu zeigt Abbildung 7.4 die Abweichung (a) des Erfüllungsgrades (Gleichung (5.24)) und (b) des Rest-SOC (Gleichung (5.25)) vom fahrprofilspezifischen Median für die Fälle, in denen das jeweils beste bzw. schlechteste BEV eingesetzt wird. Die Ergebnisse sind zudem in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) dargestellt.

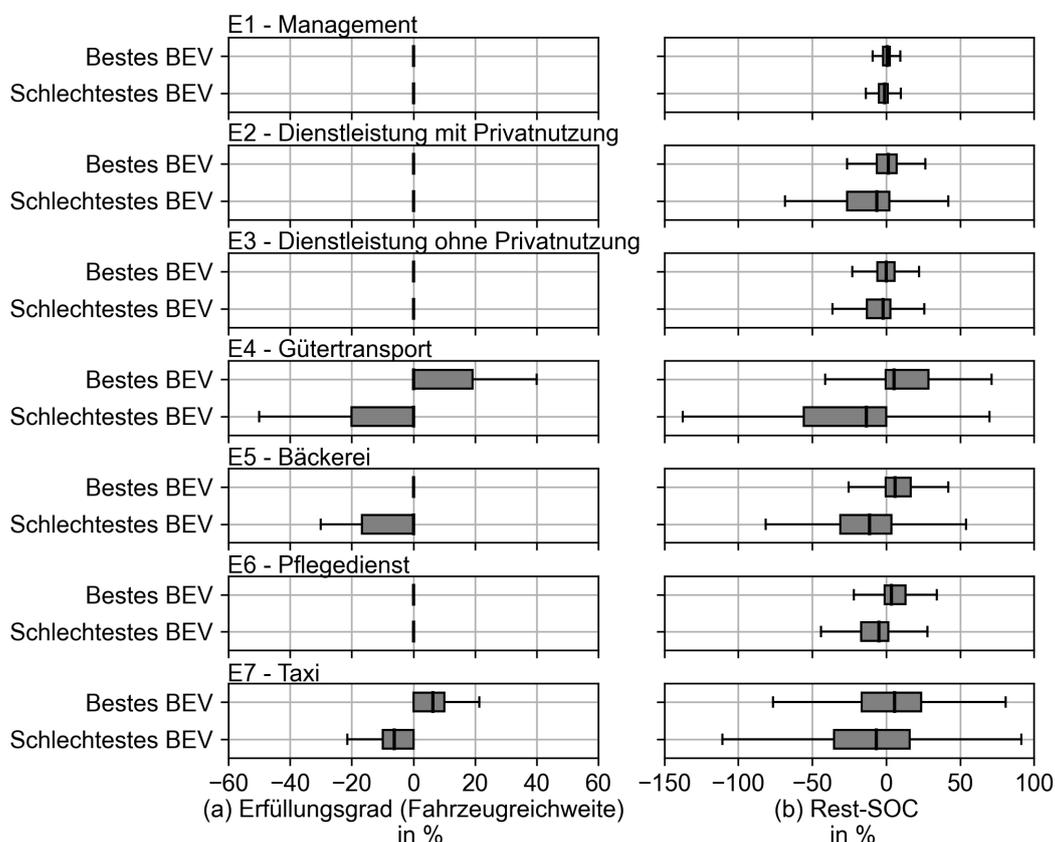


Abbildung 7.4: (a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugreichweite) und (b) Rest-SOC in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der Fahrzeugwahl (bestes oder schlechtestes BEV)

Analog zur Fahrzeugantriebsleistung (Abbildung 7.2) ist das beste BEV, das BEV, dessen ausreißerbereinigtes Minimum (linke Antennen der Boxplots in 7.4) des Rest-SOC maximal ist. Das schlechteste BEV ist demzufolge das BEV, dessen ausreißerbereinigtes Minimum des Rest-SOC minimal ist. Die prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV“ und „schlechtestes BEV“ der 23 untersuchten BEV ist in Abbildung F.1 im Anhang gezeigt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Auswirkungen eines Wechsels vom schlechtesten zum besten BEV vorgestellt, die sich aus Abbildung 7.4 ableiten lassen. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Median-Rest-SOC gruppiert.

E1, E3: Median-Rest-SOC ↑ 2 %; Die Fahrzeugwahl spielt bei Management- und Dienstleistungs-Fahrzeugen ohne Privatnutzung (E1 und E3) mit Blick die Fahrzeugreichweite nur eine geringfügige Rolle. So unterscheiden sich die Median-Rest-SOC der jeweils besten und schlechtesten BEV um lediglich rund 2 %. Ein Einfluss der Fahrzeugwahl auf den Erfüllungsgrad ist zudem nicht feststellbar.

E2, E6: Median-Rest-SOC ↑ 8 - 9 %; Mit Blick auf die Einsatzzwecke E2 und E6 hat die Fahrzeugwahl einen etwas größeren Einfluss auf den Rest-SOC. Durch Wahl des besten BEV anstatt des schlechtesten BEV kann der Median-Rest-SOC um 8 - 9 % erhöht werden. Auf den Erfüllungsgrad hat dies allerdings keinen Einfluss.

E4, E5, E7: Median-Rest-SOC ↑ 13 - 19 %; Den größten Einfluss hat die Fahrzeugwahl jedoch für die Einsatzzwecke E4, E5 und E7. Bei Gütertransport-Fahrprofilen (E4) ist mit einer Differenz von 19 % zwischen dem Median-Rest-SOC des besten BEV und dem Median-Rest-SOC des schlechtesten BEV zu rechnen. Bei Bäckerei-Fahrzeugen (E5) beträgt diese Differenz immerhin 17 %. Mit Blick auf den Erfüllungsgrad weisen Taxis (E7) mit 6 % die größte Differenz zwischen dem besten BEV und dem schlechtesten BEV auf.

7.1.3 Zwischenladebedarf

In diesem Unterkapitel wird der Bedarf an Zwischenladen, d. h. Laden während einer Tour, beispielsweise an öffentlicher LIS, ausgewertet. Im Gegensatz den beiden vorhergehenden Unterkapiteln 7.1.1 und 7.1.2 liegt der Fokus in diesem Unterkapitel auf der LIS und dem Einfluss verschiedener LIS-Varianten. Daher bilden die Simulationsergebnisse der zweiten Simulationsstudie die Grundlage für diese Auswertungen (Unterkapitel 6.2).

Abbildung 7.5 zeigt in diesem Zusammenhang (a) die Autarkierate (Gleichung (5.26)) und (b) die Zwischenladeenergie (Gleichung (5.27)). Dabei wird zwischen den Einsatzzwecken E1 bis E7 sowie den vier in der zweiten Simulationsstudie untersuchten LIS-Varianten (Tabelle 6.5), d. h. 11 kW, 22 kW, 24 kW und 50 kW installierte Ladeleistung am Firmenstandort nach Gleichung (6.1), unterschieden.

Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Auswirkungen auf den Flottenbetrieb zusammen, die sich aus Abbildung 7.5 ableiten lassen.

Autarkierate bei 11 kW installierter Ladeleistung

Zunächst wird in diesem Abschnitt die Autarkierate aus Abbildung 7.5 (a) für den Fall ausgewertet, dass eine am Firmenstandort installierte Ladeleistung von 11 kW zum Einsatz kommt. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Autarkieraten gruppiert.

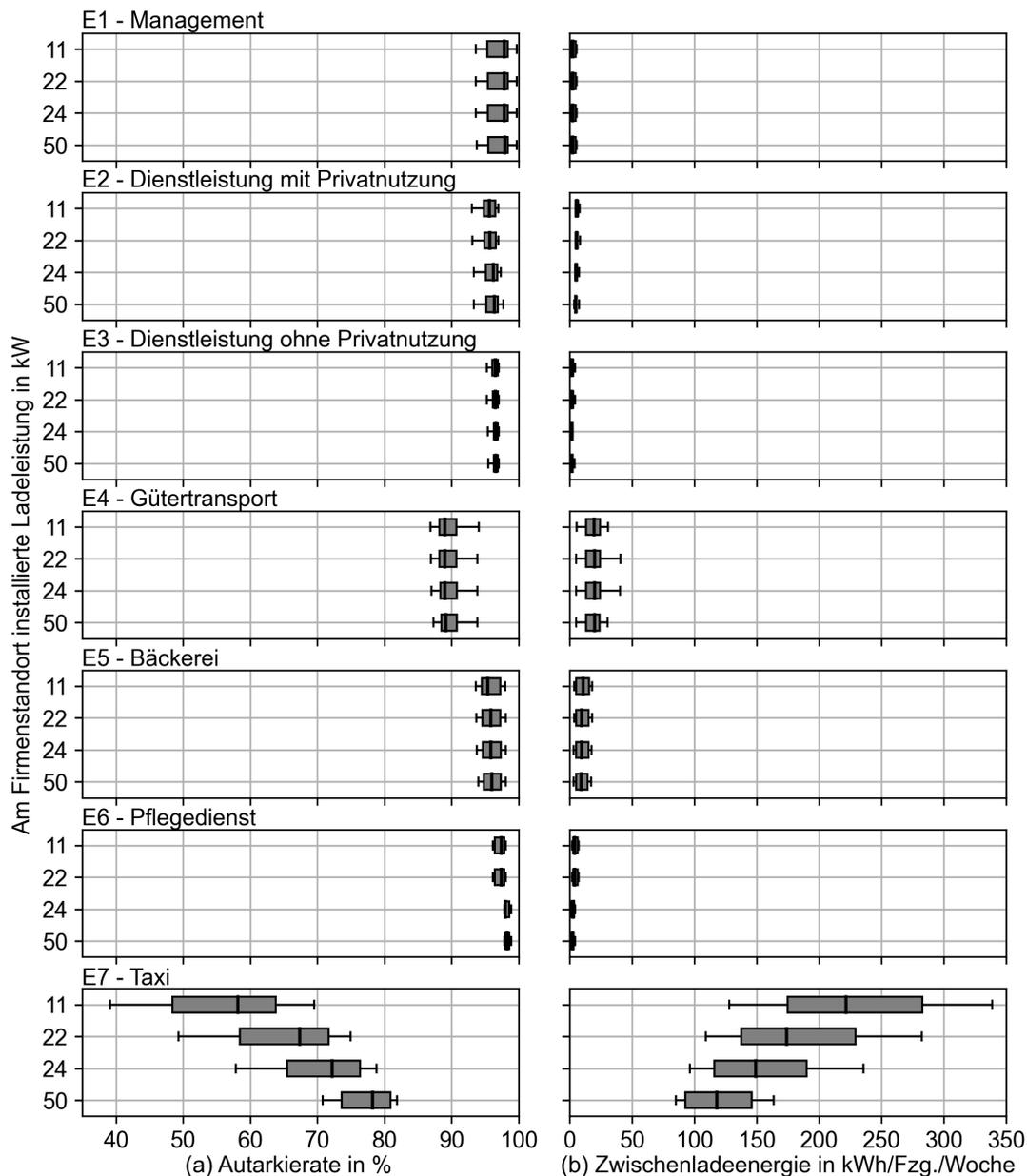


Abbildung 7.5: (a) Autarkierate und (b) Ladeenergie an fremder LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung

E1 - E3, E5, E6: Median-Autarkierate = 95 - 98 %; Flotten der Einsatzzwecken E1 bis E3 sowie E5 und E6 müssen kaum zwischenladen. Eine am Firmenstandort installierte Ladeleistung von 11 kW reicht aus, um 95 % bis 98 % (Median-Autarkierate) der verbrauchten Energie durch Ladevorgänge während Standphasen des Fahrprofils an der eigenen LIS aufzuladen.

E4: Median-Autarkierate = 89 %; Eine etwas geringere Autarkierate weisen Gütertransport-Flotten auf. Hier sind im Median immerhin noch 89 % des Energiebedarfs durch das Laden während Standphasen des Fahrprofils an der eigenen LIS gedeckt.

E7: Median-Autarkierate = 58 %; Taxi-Flotten müssen hingegen verstärkt auf Zwischenladen setzen, um ihren Energiebedarf zu decken. Bei einer am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW weisen Taxi-Flotte eine Median-Autarkierate von lediglich 58 % auf. 42 % der 76

verbrauchten Energie müssen somit durch Zwischenladen während Touren aufgeladen werden.

Zwischenladeenergie bei 11 kW installierter Ladeleistung

Um den Umfang des Zwischenladenbedarfs besser zu begreifen, wird in diesem Abschnitt die Zwischenladeenergie aus Abbildung 7.5 (b) bei einer am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW ausgewertet. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Zwischenladeenergiebeträgen gruppiert.

E1 - E3, E6: Zwischenladeenergie = 2-5 kWh/Fzg./Woche; Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E6 müssen lediglich 2 bis 5 kWh pro Fahrzeug und Woche zwischenladen. Hierfür reicht beispielsweise eine halbe Stunde Laden an einer öffentlichen 11 kW Ladestation.

E5: Zwischenladeenergie = 11 kWh/Fzg./Woche; Bäckerei-Flotten müssen zur Deckung ihres Energiebedarfs zusätzlich rund 11 kWh pro Fahrzeug und Woche zwischenladen. Dies entspricht einem Zwischenladevorgang von einer Stunde pro Woche an einer 11 kW Ladestation. Falls beispielsweise an Bäckerei-Filialen, an die ausgeliefert wird, solche Ladestationen zur Verfügung stehen, dann reicht dort eine 10 min-Ladung pro Tag aus.

E7: Zwischenladeenergie = 221 kWh/Fzg./Woche; Taxi-Flotten sind hingegen deutlich abhängiger vom Zwischenladen. So ist davon auszugehen, dass bei einer am Firmenstandort installierter Ladeleistung von 11 kW im Median 221 kWh pro Fahrzeug und Woche zwischenladen werden müssen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren Batteriekapazitäten (Tabelle B.3) ist somit bei über der Hälfte der Taxi-Flotten je nach Ladedauer von mindestens drei Zwischenladungen pro Fahrzeug und Woche auszugehen.

Einfluss der installierten Ladeleistung

Im Folgenden wird untersucht, wie sich eine schrittweise Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW auf die Autarkierate aus Abbildung 7.5 (b) auswirkt. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Median-Autarkieraten gruppiert.

E1 - E6: Median-Autarkierate ↑ 0-1 %; Für Flotten der Einsatzzwecken E1 bis E6 hat eine Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW kaum einen Einfluss auf die Autarkierate bzw. die Zwischenladeenergie. So lässt sich die Median-Autarkierate dadurch um maximal 1 % erhöhen.

E7: Median-Autarkierate ↑ 20 %; Bei Taxi-Flotten hängt hingegen der Energieanteil, der an der während Standphasen des Fahrprofils an der eigenen LIS am Firmenstandort aufgeladen werden kann, stark von der installierten Ladeleistung ab. Bereits eine Erhöhung von 11 kW auf 22 kW steigert die Median-Autarkierate um 9 %. Eine weitere Erhöhung von 22 kW auf 24 kW verschafft zusätzlich 5 % (Median) mehr Autarkie. Wird die installierte Ladeleistung weiter auf 50 kW angehoben, so kann die Median-Autarkierate um weitere 6 % gesteigert werden. Durch Verwendung von 50 kW anstelle von 11 kW kann also im Median 20 % mehr Energie während den Standphasen des Fahrprofils, d. h. wenn das Fahrzeug sowieso steht, an der eigenen LIS geladen werden. Die Autarkierate steigt dadurch von 58 % auf 78 %.

7.2 Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit

Die Auswirkungen der Elektrifizierung auf die Flottenwirtschaftlichkeit werden anhand der drei Bewertungskriterien aus Unterkapitel 5.3.2 ausgewertet. Im ersten Unterkapitel 7.2.1 werden die zu erwartenden Energiekosten für das Laden der BEV an der eigenen LIS beleuchtet. Im zweiten Unterkapitel 7.2.2 werden sowohl die Energiekosten für das Laden der BEV an fremder LIS als auch die Gesamtenergiekosten untersucht, die durch das Laden der BEV insgesamt entstehen.

Bei Betrachtung des Zwischenladebedarfs aus Abbildung 7.5 wird deutlich, dass eine Erhöhung der installierten Ladeleistung von 11 kW nur für Taxi-Flotten (E7) einen nennenswerten Vorteil bringt. Im Sinne der Übersichtlichkeit werden daher in diesem Unterkapitel die Einsatzzwecke E1 bis E6 nur für eine installierte Ladeleistung von 11 kW und der Einsatzzweck E7 nur für eine installierte Ladeleistung von 50 kW ausgewertet. Am Ende der beiden folgenden Unterkapitel 7.2.1 und 7.2.2 wird der Vollständigkeit halber jeweils der Einfluss der installierten Ladeleistungen auf die Energiekosten aufgezeigt.

7.2.1 Energiekosten für Laden an eigener Ladeinfrastruktur

In diesem Unterkapitel werden die Energiekosten für das Laden der BEV an der eigenen AC untersucht. Grundlage dafür bilden die Simulationsergebnisse der zweiten Simulationsstudie (Unterkapitel 6.2).

Abbildung 7.6 zeigt (a) die Energiekosten (Gleichung (5.28)) und (b) die relativen Stromkosten (Gleichung (5.31)) vor und nach der Elektrifizierung in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7). Die dargestellten Ergebnisse basieren auf allen Simulationsszenarien der zweiten Simulationsstudie (Tabelle 6.5) mit Ausnahme der LIS-Variante „kein Lastmanagement“ (Tabelle 6.4), die nicht berücksichtigt wurde. Die wesentlichen Auswirkungen auf die Flottenwirtschaftlichkeit, die sich aus Abbildung 7.6 ableiten lassen, sind Gegenstand der folgenden Abschnitte.

Energiekosten für Laden an eigener LIS

Zunächst werden die Energiekosten aus Abbildung 7.6 (a) näher betrachtet. Die folgenden Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Energiekosten gruppiert

E3, E5, E6: Median-Energiekosten = 267 - 494 €/Fzg./Jahr; Die niedrigsten Energiekosten für das Laden an der eigenen LIS haben Pflegedienst-Flotten (E6). Die Median-Energiekosten betragen nur 267 €/pro Jahr und Fahrzeug. Im Best-Case (ausreißerbereinigtes Minimum: linke Antennen der Box-Plots in Abbildung 7.6) werden sogar negative Energiekosten von -645 €/Fzg./Jahr erreicht. Dies bedeutet im Umkehrschluss nach Gleichung (5.28), dass die gesamten Stromkosten am Firmenstandort Summe sinken. Ähnlich niedrig sind die Energiekosten für das Laden von Bäckerei-Flotten (E5). Obwohl der Media mit 397 €/Fzg./Jahr etwas höher liegt als bei den Pflegedienst-Flotten, führt auch das Laden einiger Bäckerei-Flotten zu einer Reduzierung der gesamten Stromkosten am Firmenstandort. So sinken im Best-Case die Stromkosten durch das Laden um 495 €/pro Fahrzeug und Jahr. Dienstleistungs-Flotten ohne Privatnutzung (E3) weisen mit Median-Energiekosten von 494 €/Fzg./Jahr die drittniedrigsten Energiekosten auf. Negative Energiekosten, wie von Pflegedienst- und Bäckerei-Flotten (E5 und E6), werden von Dienstleistungs-Flotten ohne Privatnutzung (E3) jedoch nicht erreicht.

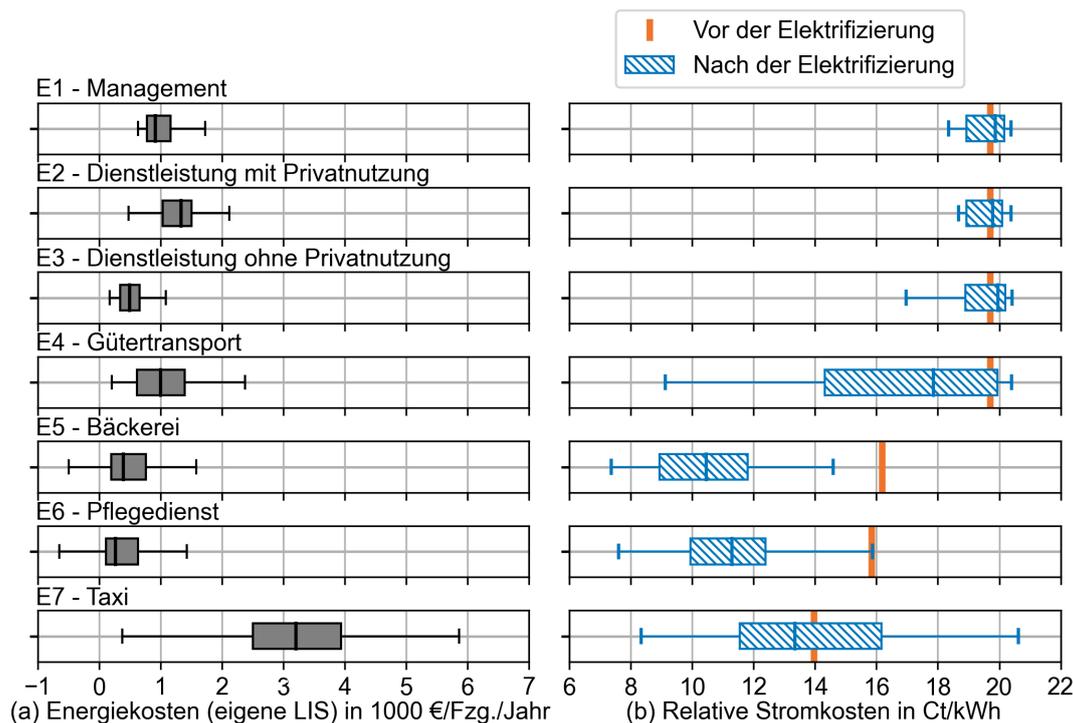


Abbildung 7.6: (a) Energiekosten und (b) relative Stromkosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

E1, E2, E4: Median-Energiekosten = 920 - 1.332 €/Fzg./Jahr; Deutlich höhere Energiekosten entstehen beim Laden der Management-Flotten, Dienstleistungs-Flotten mit Privatnutzung sowie Gütertransport-Flotten (E1, E2, E4). So verursachen Management-Flotten (E1) im Median 920 € pro Fahrzeug und Jahr. Mit 998 €/Fzg./Jahr liegen die Median-Energiekosten der Gütertransport-Flotten (E4) etwas höher als die der Management-Flotten (E1). Die Median-Energiekosten der Dienstleistungs-Flotten mit Privatnutzung (E2) liegen sogar bei 1.332 €/Fzg./Jahr.

E7: Median-Energiekosten = 3.207 €/Fzg./Jahr; Mit den höchsten Energiekosten für das Laden an der eigenen LIS müssen Taxi-Flotten rechnen. Hier verursacht das Laden am Firmenstandort Median-Energiekosten von 3.207 €/Fzg./Jahr. Im Worst-Case (ausreißerbereinigtes Maximum: rechte Antennen der Box-Plots in Abbildung 7.6) kann das Laden am Firmenstandort sogar bis zu 3.944 €/Fzg./Jahr kosten.

Relative Stromkosten

Um den Einfluss der Flottenelektrifizierung auf die Energiekosten besser zu verstehen, wird nachfolgend die Änderung der relativen Stromkosten aus Abbildung 7.6 (b) infolge der Elektrifizierung verglichen. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeiträgen zwischen den Median-Werten der relativen Stromkosten vor der Elektrifizierung und den relativen Stromkosten nach der Elektrifizierung gruppiert.

E5, E6: Median-Stromkosten ↓ 4,6 - 5,7 Ct/kWh; Die niedrigen und teilweise negativen Energiekosten der Bäckerei- und Pflegedienst-Flotten (Abbildung 7.6 (a)) sind vor allem auf den relativ starken Rückgang der relativen Stromkosten zurückzuführen. Die relativen Stromkosten der Bäckerei-Flotten (E5) sinken im Median um 5,7 Ct/kWh auf 10,5 Ct/kWh und im Best-Case sogar um 8,8 Ct/kWh, also um mehr als die Hälfte, auf 7,4 Ct/kWh. Ähnlich hoch ist die Reduzierung der relativen Stromkosten bei den Pflegedienst-Flotten (E6). Hier sinken die relativen

Stromkosten im Median um 4,6 Ct/kWh auf 11,3 Ct/kWh und im Best-Case um 8,2 Ct/kWh auf 7,6 Ct/kWh.

E4: Median-Stromkosten ↓ 1,8 Ct/kWh; Die relativen Stromkosten der Gütertransport-Flotten sinken durch das Laden am Firmenstandort im Median um 1,8 Ct/kWh auf 17,9 Ct/kWh. Im Best-Case sinken die Median-Stromkosten um mehr als die Hälfte auf 9,1 Ct/kWh

E1 - E3, E7: Median-Stromkosten ↑ 0,3 - 0,6 Ct/kWh; Die relativen Stromkosten der Flotten mit den Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E7 werden hingegen durch das Laden an der eigenen LIS kaum beeinflusst. So ist für E1 bis E3 ein leichter Anstieg der relativen Stromkosten um 0,1 bis 0,3 Ct/kWh (Median) zu verzeichnen. Die Median-Stromkosten der Taxi-Flotten (E7) sinken geringfügig um 0,6 Ct/kWh auf 13,3 Ct/kWh.

Einfluss des Grundlastverbrauchs

Im Folgenden wird untersucht, wie sich der Grundlastverbrauch am Firmenstandort auf die Energiekosten aus Abbildung 7.6 auswirkt. Dazu zeigt Abbildung 7.7 (a) die Abweichung der Energiekosten (Gleichung (5.28)) vom flottenfahrprofilsspezifischen Median für die untersuchten Grundlastverbräuche (Gleichung (6.7)) in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7).

Im Folgenden werden die wesentlichen Einflussfaktoren des Grundlastverbrauchs auf die Energiekosten dargestellt, die sich aus Abbildung 7.7 (a) ableiten lassen. Die Auswertungen sind wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Median-Energiekosten gruppiert.

E1 - E3: Median-Energiekosten ↑ 63 - 128€/Fzg./Jahr; Die Abhängigkeit der Energiekosten vom Grundlastverbrauch ist bei Management- und Dienstleistungs-Flotten (E1 bis E3) absolut gesehen als relativ einzustufen. Eine Variation des Grundlastverbrauchs zwischen 50 und 500 MWh/Jahr führt zu einer Veränderung der Median-Energiekosten zwischen 63 und 128€/Fzg./Jahr. Diese Werte liegen jeweils um den Faktor 8 bis 10 unter den absoluten Energiekosten aus Abbildung 7.6 (a).

E4 - E6: Median-Energiekosten ↑ 404 - 473€/Fzg./Jahr; Bei den Einsatzzwecken E4 bis E6 spielt der Grundlastverbrauch am Firmenstandort eine größere Rolle. Hier variieren die Median-Energiekosten zwischen 404 und 473€/Fzg./Jahr in Abhängigkeit vom Grundlastverbrauch des Firmenstandortes. Der Einfluss des Grundlastverbrauchs ist somit insbesondere bei Bäckerei- und Pflegedienst-Flotten (E5 und E6) als besonders groß einzustufen, weil deren absolute Median-Energiekosten nur zwischen 267 und 396€/Fzg./Jahr liegen.

E7: Median-Energiekosten ↑ 855€/Fzg./Jahr; Den größten Einfluss auf die Energiekosten hat der Grundlastverbrauch am Unternehmensstandort bei den "Taxi-Flotten. So beträgt der Unterschied zwischen den Median-Energiekosten einer Taxi-Flotte mit einem Grundlastverbrauch von 100 MWh/Jahr und einer Taxi-Flotte mit einem Grundlastverbrauch von 200 MWh/Jahr 855€/Fzg./Jahr.

Einfluss der Flottengröße

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Flottengröße auf die in Abbildung 7.6 dargestellten Energiekosten untersucht. Abbildung 7.7 (b) zeigt dazu die Abweichung der Energiekosten (Gleichung (5.28)) vom flottenfahrprofilsspezifischen Median für die untersuchten Flottengrößen (Gleichung (6.5)) in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7).

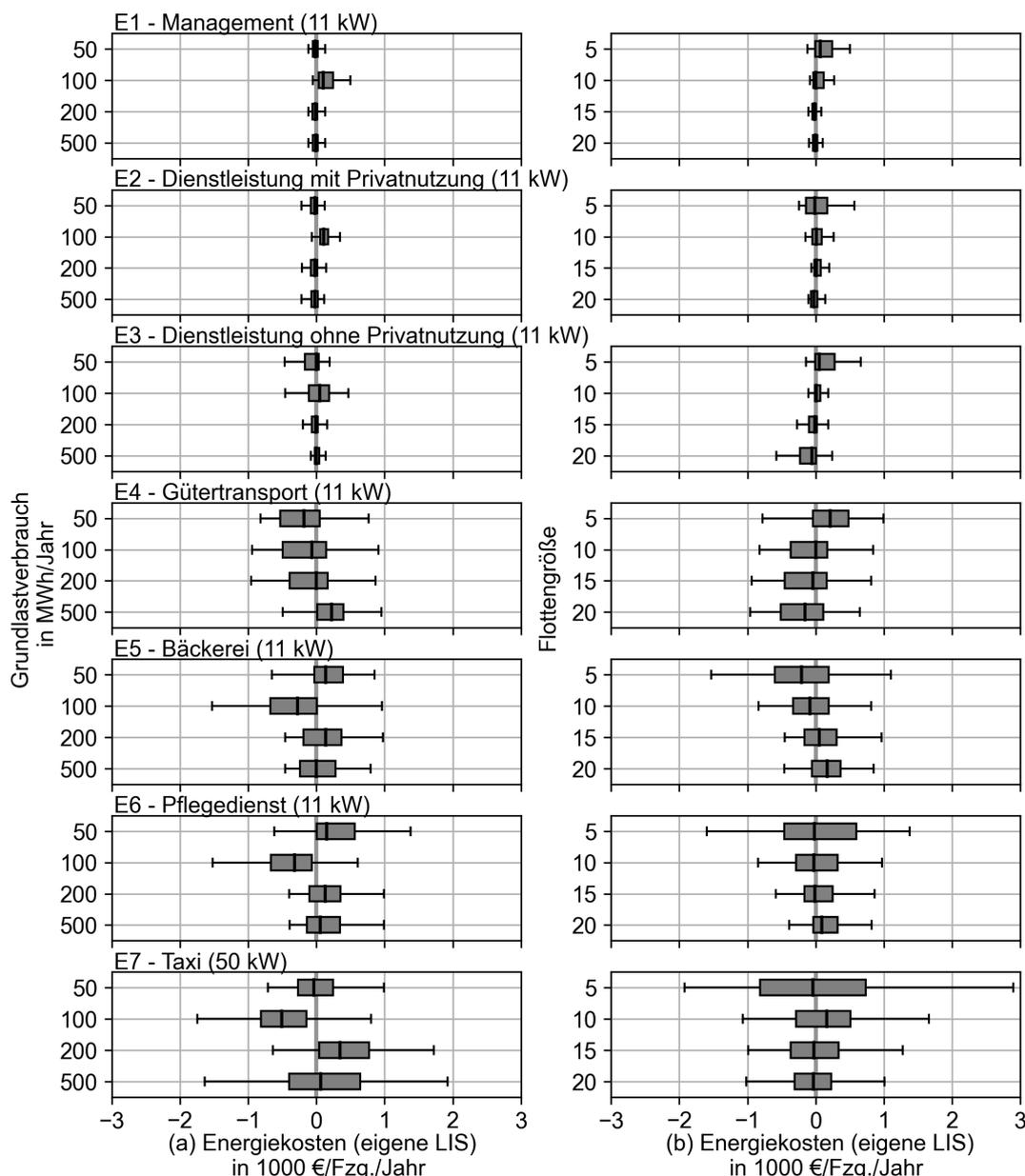


Abbildung 7.7: Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7), (a) vom Grundlastverbrauch und (b) von der Flottengröße

Im Folgenden werden die wesentlichen Einflussfaktoren der Flottengröße auf die Energiekosten ausgewertet, die sich aus Abbildung 7.7 ableiten lassen. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den "Median-Energiekosten gruppiert.

E1 - E3, E6, E7: Median-Energiekosten \downarrow 38 - 205€/Fzg./Jahr; Die Energiekosten von Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 sowie E6 und E7 schwanken zwischen 38 und 205€/Fzg./Jahr bei unterschiedlichen Flottengrößen zwischen 5 und 20 Fahrzeugen. Im Vergleich zu den absoluten Energiekosten (Abbildung 7.6 (a)) ist der Einfluss der Flottengröße also geringer. Bei diesen Flotten sind die relativen Werte um den Faktor 10 bis 35 kleiner als die absoluten Werte. Bei Dienstleistungs-Flotten ohne Privatnutzung (E3) sowie Pflegedienst-Flotten (E6) betragen die Unterschiede in den Median-Energiekosten dagegen 21 bis 42 % der absoluten Median-Energiekosten.

E4, E5: Median-Energiekosten \downarrow 369 - 376 €/Fzg./Jahr; Bei Gütertransport- und Bäckerei-Flotten spielt die Flottengröße eine entscheidende Rolle für die Energiekosten. Der Unterschied in den Energiekosten zwischen Flotten mit fünf Fahrzeugen und Flotten mit 20 Fahrzeugen beträgt 369 bis 376 €/Fzg./Jahr. Dies entspricht 37 % der Median-Energiekosten im Fall von Gütertransport-Flotten (E4) (Abbildung 7.6 (a)). Bei Bäckerei-Flotten macht die Differenz von 376 €/Fzg./Jahr sogar 95 % der Median-Energiekosten aus.

Einsparpotential durch ein Last- und Lademanagement-System

In diesem Abschnitt wird das Einsparpotential durch den Einsatz eines Last- und Lademanagement-System untersucht. Dazu ist in Abbildung 7.8 die Änderung (a) der Energiekosten (Gleichung (5.28)) und (b) der Lastspitze (Unterkapitel 5.3.2) durch den Einsatz eines Last- und Lademanagement-System gegenüber dem Fall ohne einem Last- und Lademanagement-System dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) angegeben.

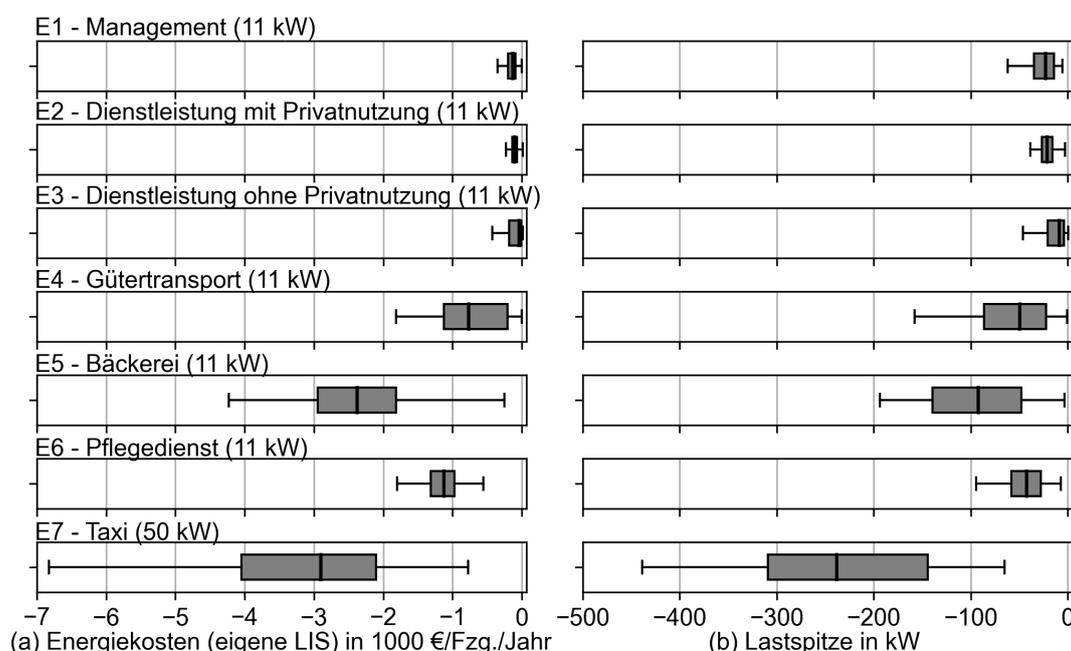


Abbildung 7.8: Änderung (a) der Energiekosten für Laden an eigener LIS und (b) der Lastspitze infolge der Verwendung eines Last- und Lademanagement-System in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

Im Folgenden wird das Einsparpotential eines Last- und Lademanagement-Systems aus Abbildung 7.8 für die Einsatzzwecke E1 bis E7 zusammengefasst. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Differenzbeträgen der Energiekosten gruppiert.

E1 - E3: Median-Energiekosten \downarrow 38 - 131 €/Fzg./Jahr; Setzen Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 ein Last- und Lademanagement-System ein, so ist mit einem Rückgang der Median-Energiekosten um 38 bis 131 €/Fzg./Jahr zu rechnen. Dies entspricht einer Reduzierung der Energiekosten um 7 bis 14 %. Dieses relativ geringe Einsparpotential ist hauptsächlich auf die relativ geringe Reduktion der Lastspitze um lediglich 9 bis 22 kW (Abbildung 7.8 (b)).

E4, E6: Median-Energiekosten \downarrow 768 - 1.123 €/Fzg./Jahr; Mit einem deutlich höheren Einsparpotential müssen Gütertransport- und Pflegedienst-Flotten rechnen. Bei Gütertransport-Flotten (E4) führt die Verwendung eines Last- und Lademanagement-System zu Einsparungen

von 768€/Fzg./Jahr im Median. Dies entspricht in etwa einer Halbierung der Energiekosten, wie ein Vergleich mit Abbildung 7.6 (a) verdeutlicht. Bei Pflegedienst-Flotten (E6) sinken die Median-Energiekosten um 1.123€/Fzg./Jahr auf rund ein Viertel der ursprünglichen Energiekosten. Grund für die hohen Einsparpotentiale sind die in erster Linie die Lastspitzen, die durch die Verwendung eines Last- und Lademanagement-Systems im Median um 42 bis 49 kW sinken.

E5, E7: Median-Energiekosten ↓ 2.375 - 2.900€/Fzg./Jahr; Die betragslich höchsten Einsparungen erreichen Bäckerei- und Taxi-Flotten. So spart ein Last- und Lademanagement-System Bäckerei-Flotten im Median 2.375€/Fzg./Jahr an Energiekosten. Die Energiekosten mit einem Last- und Lademanagement-System sind somit um den Faktor 6 kleiner, als ohne einem Last- und Lademanagement-System. Ein Großteil dieser Einsparungen ist auf die drastische Reduzierung der Median-Lastspitze um 92 kW zurückzuführen. Taxi-Flotten können sogar 2.900€/Fzg./Jahr (Median), d. h. 90 % der Energiekosten, durch ein Last- und Lademanagement-System einsparen. Das Last- und Lademanagement-System reduziert dabei die Lastspitze im Median um 238 kW.

Einfluss des Lastmanagement-Ansatzes

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Lastmanagement-Ansatzes auf die Energiekosten aufgezeigt. Abbildung 7.9 zeigt hierzu die Abweichung der Energiekosten (Gleichung (5.28)) vom flottenfahrprofilspezifischen Median für die Last- und Lademanagement-Varianten aus Tabelle (6.4) in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7).

Die folgenden Absätze zeigen anhand der Abbildung 7.9 die Auswirkungen eines Wechsels vom statischen zum dynamischen Lastmanagement-Ansatz auf. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Differenzbeträgen der Energiekosten gruppiert.

E1 - E3: Median-Energiekosten ↓ 0 - 29€/Fzg./Jahr; Der Unterschied zwischen statischen und dynamischen Lastmanagement gemessen am Median beträgt für Management- und Dienstleistungs-Flotten (E1 bis E3) nicht mehr als 29€/Fzg./Jahr. Für die meisten Flotten dieser Einsatzzwecke bringt ein dynamisches Lastmanagement gegenüber einem statischen Lastmanagement also nur einen geringen Vorteil bei den Energiekosten.

E7: Median-Energiekosten ↓ 300€/Fzg./Jahr; Setzen Taxi-Flotten hingegen ein dynamisches statt eines statischen Lastmanagements ein, so ist eine Reduktion der Median-Energiekosten um bis zu 300€/Fzg./Jahr zu erwarten.

E4 - E6: Median-Energiekosten ↓ 428 - 447€/Fzg./Jahr; Die höchsten Einsparungen durch den Einsatz eines dynamischen anstelle eines statischen Lastmanagements ergeben sich für Gütertransport-, Bäckerei-, Pflegedienst- Flotten (E4 bis E6). Hier sinken die Energiekosten um 428 bis 447€/Fzg./Jahr.

Einfluss des Lademanagement-Verfahrens

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Einfluss des Lademanagement-Verfahrens auf die Flottenwirtschaftlichkeit. Dazu sind in den folgenden Absätzen die Auswirkungen eines Wechsels vom Lademanagement-Verfahren EQUAL zum Lademanagement-Verfahren LSOFC zusammengefasst, die sich aus Abbildung 7.9 ableiten lässt. Die Auswertungen sind wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Differenzbeträgen der Energiekosten gruppiert.

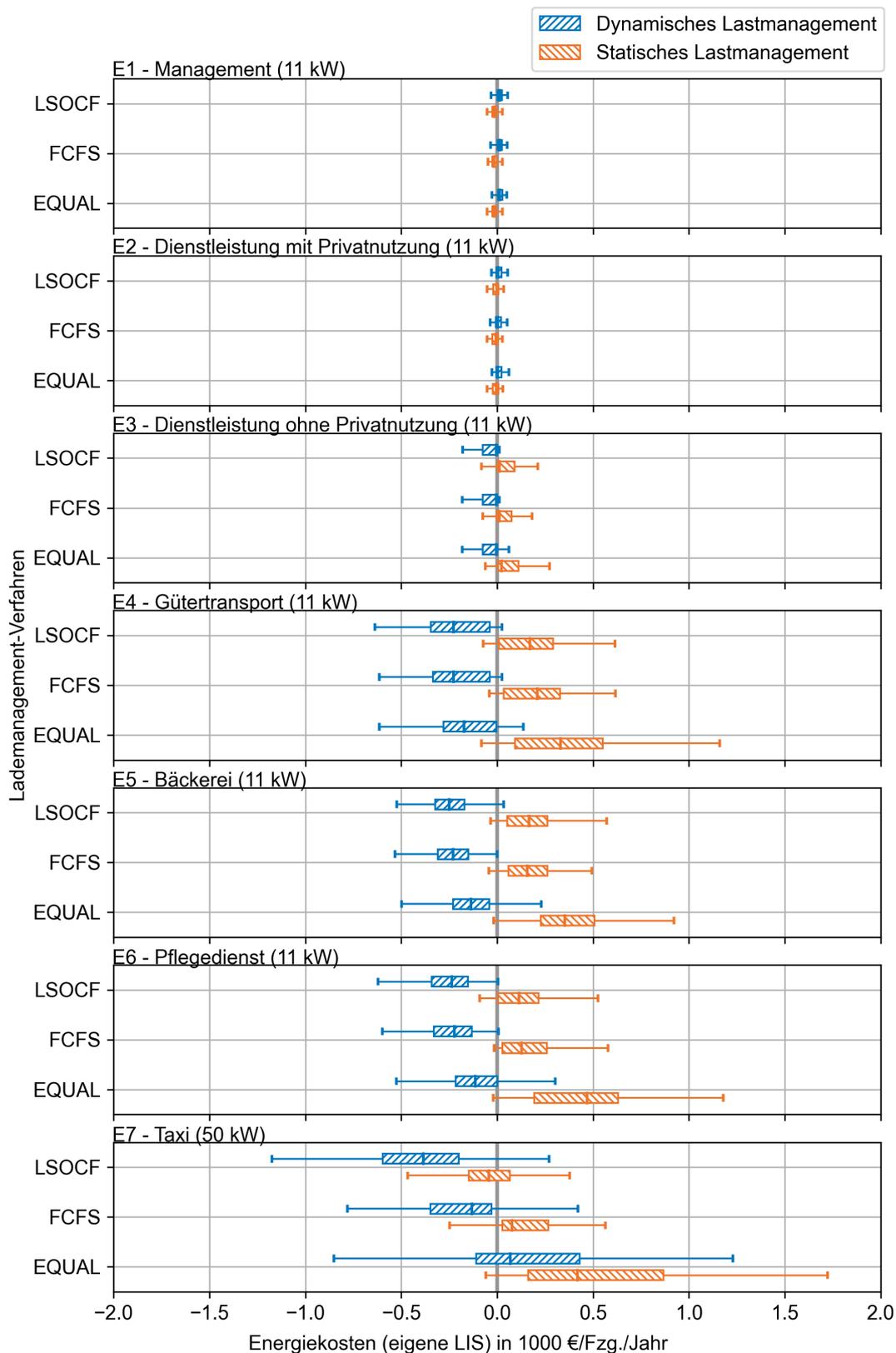


Abbildung 7.9: Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von den Last- und Lademanagement-Varianten

E1 - E3: Median-Energiekosten ↓ 1 - 5 €/Fzg./Jahr; Für Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 spielt es mit Blick auf die Energiekosten keine wesentliche Rolle, welches Lademanagement-

Verfahren verwendet wird. Die Unterschiede in den Energiekosten der untersuchten Verfahren schwanken lediglich zwischen 1 und 5€/Fzg./Jahr.

E4 - E6: Median-Energiekosten ↓ 108 - 240€/Fzg./Jahr; Bei Gütertransport-, Bäckerei- und Pflegedienst-Flotten (E4 bis E6) ist der Einfluss des Lademanagement-Verfahrens auf die Energiekosten hingegen deutlich. So führt das LSOCF-Verfahren zu den niedrigsten und das EQUAL zu höchsten Energiekosten, während das FCFS-Verfahren dazwischen liegt. Die Unterschiede in den Median-Energiekosten zwischen LSOCF und FCFS betragen 88 bis 225€/Fzg./Jahr und zwischen LSOCF und EQUAL 108 bis 240€/Fzg./Jahr.

E7: Median-Energiekosten ↓ 458€/Fzg./Jahr; Bei Taxi-Flotten ist das Einsparpotential durch die richtige Wahl des Lademanagement-Verfahrens am höchsten. Hier sinken die Median-Energiekosten um 271€/Fzg./Jahr, wenn das FCFS-Verfahren anstelle des EQUAL-Verfahrens verwendet wird. Bei Verwendung des LSOCF-Verfahrens anstelle des EQUAL-Verfahrens können sogar Median-Energiekosten von 458€/Fzg./Jahr eingespart werden.

Einfluss der installierten Ladeleistung

In diesem abschließenden Abschnitt wird der Einfluss der am Firmenstandort installierten Ladeleistung auf die Energiekosten für Laden an der eigenen LIS behandelt. Abbildung 7.10 zeigt dazu die Abweichung der Energiekosten (Gleichung (5.28)) vom flottenfahrprofilsspezifischen Median für die untersuchten Ladeleistungen in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7).

In den folgenden Absätzen wird untersucht, wie sich eine schrittweise Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW auf die Energiekosten aus Abbildung 7.10 auswirkt. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Median-Energiekosten gruppiert.

E1 - E6: Median-Energiekosten = ↓ 0 - 6€/Fzg./Jahr; Aus Abbildung 7.5(c) geht bereits hervor, dass die am Firmenstandort installierte Ladeleistung keinen Einfluss auf die Ladeenergie der Flotten mit den Einsatzzwecken E1 bis E6 hat. Dementsprechend gering ist auch der Einfluss der installierten Ladeleistung auf die Median-Energiekosten mit 0 bis 6€/Fzg./Jahr.

E7: Median-Energiekosten = ↑ 1.498€/Fzg./Jahr; Taxis laden 5,3 MWh/Fzg./Jahr mehr Energie am Firmenstandort infolge einer Erhöhung der installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW (Abbildung 7.5 (c)). Aufgrund dieser deutlichen Erhöhung der Ladeenergie steigen auch die Energiekosten, die durch Laden an eigener LIS entstehen, mit 1.498€/Fzg./Jahr deutlich an. Dieser Kostenanstieg geht jedoch mit einer nicht unerheblichen Kostenreduktion beim Laden an fremder LIS einher, wie das nächste Unterkapitel 7.2.2, und insbesondere Tabelle 7.2 verdeutlichen.

7.2.2 Energiekosten für Laden an fremder Ladeinfrastruktur und Gesamtenergiekosten

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Energiekosten, die gemäß Unterkapitel 5.3.2 durch Zwischenladen an fremder LIS entstehen, sowie mit den daraus resultierenden Gesamtenergiekosten. Analog zu den Energiekosten für Laden an eigener LIS (Unterkapitel 7.2.1) basieren auch die folgenden Auswertungen auf den Simulationsergebnissen der zweiten Simulationsstudie (Unterkapitel 6.2).

Tabelle 7.1 fasst die Energiekosten (Gleichung (5.32)) für Zwischenladen an fremder LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) zusammen. Zusätzlich sind die Energiekosten für

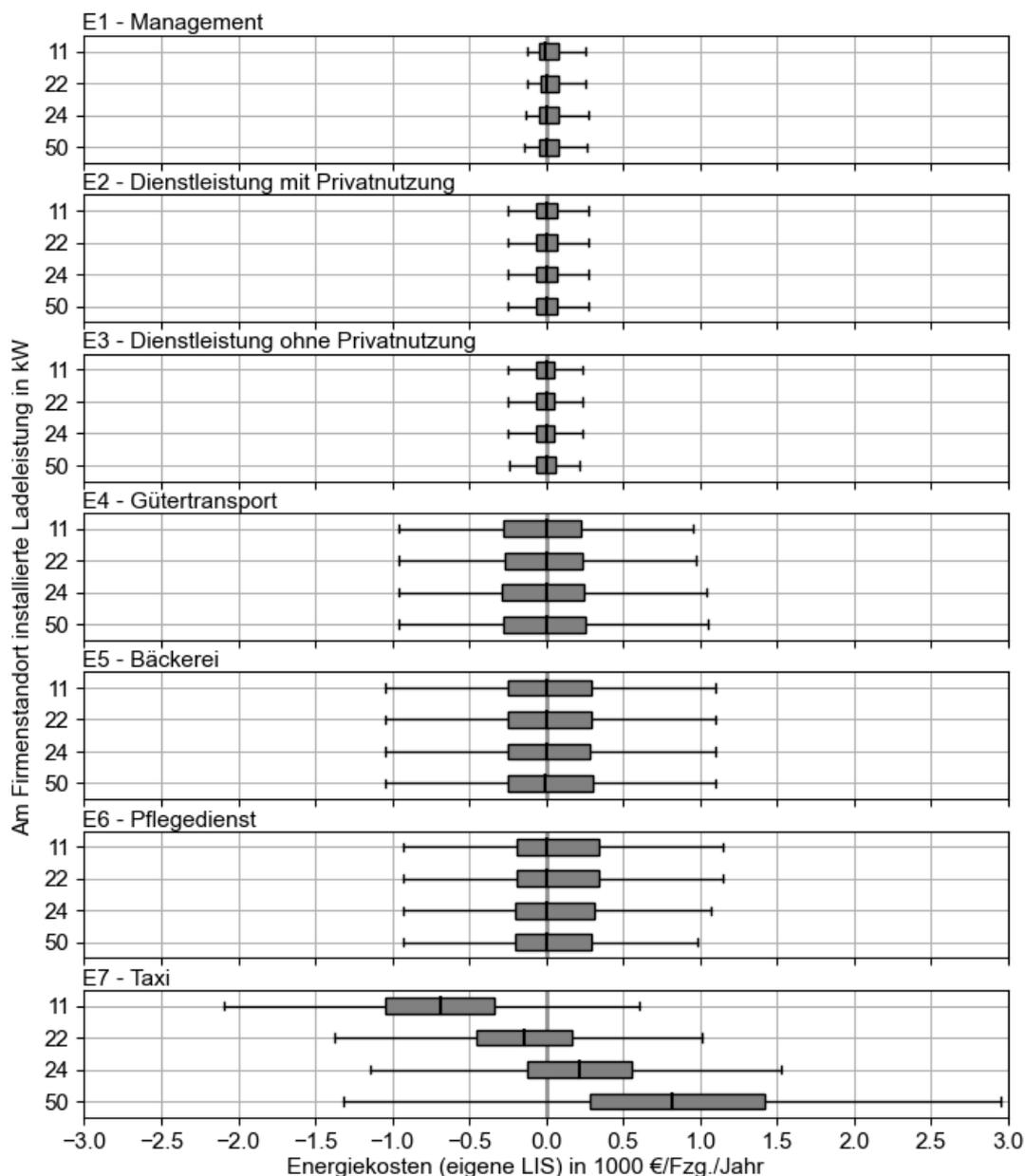


Abbildung 7.10: Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung

das Laden an eigener LIS (Unterkapitel 7.2.1) sowie die daraus resultierenden Gesamtenergiekosten (Gleichung (5.34)) dargestellt. Die Energiekosten für Laden an fremder LIS sowie die Gesamtenergiekosten sind jeweils als Bereiche zwischen zwei Werten angegeben, wobei die zwei Werte die beiden Varianten des Strompreises für Laden an fremder LIS (Gleichung (5.33)), d. h. 38 Ct/kWh und 79 Ct/kWh, repräsentieren. Die wesentlichen Auswirkungen auf die Flottenwirtschaftlichkeit, die sich aus Tabelle 7.1 ableiten lassen, sind Gegenstand der folgenden Abschnitte.

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Energiekosten in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

alle Werte in €/Fzg./Jahr	Energiekosten an eigener LIS	Energiekosten an fremder LIS	Gesamtenergiekosten
E1 - Management (11 kW)	920	47 - 97	966 - 1.017
E2 - Dienstl. mit Privatn. (11 kW)	1.332	110 - 229	1.442 - 1.561
E3 - Dienstl. ohne Privatn. (11 kW)	494	41 - 85	535 - 579
E4 - Gütertransport (11 kW)	998	391 - 812	1.389 - 1.811
E5 - Bäckerei (11 kW)	397	209 - 434	605 - 831
E6 - Pflegedienst (11 kW)	267	74 - 155	341 - 421
E7 - Taxi (50 kW)	3.207	2.342 - 4.870	5.549 - 8.076

Energiekosten an fremder LIS

Als erstes werden die Energiekosten an fremder LIS aus Tabelle 7.1 näher betrachtet. Die folgenden Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Energiekosten gruppiert

E1 - E3, E6: Median-Energiekosten = 41 - 229€/Fzg./Jahr; Mit den geringsten Energiekosten für das Zwischenladen an fremder LIS haben Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 und E6 zu rechnen. Die Median-Energiekosten betragen maximal 229€ pro Jahr und Fahrzeug. Dies ist ein Bruchteil der Energiekosten an der eigenen LIS.

E4, E5: Median-Energiekosten = 209 - 812€/Fzg./Jahr; Das Zwischenladen von Gütertransport-Flotten (E4) sowie Bäckerei-Flotten (E5) an fremder LIS ist mit deutlich höheren Energiekosten verbunden. So verursachen Bäckerei-Flotten (E4) Median-Energiekosten von 209 bis 434€ pro Fahrzeug und Jahr. Mit 391 bis 812€/Fzg./Jahr liegen die Median-Energiekosten von Gütertransport-Flotten (E4) sogar im Bereich der Median-Energiekosten, die durch das Zwischenladen an eigener LIS verursacht werden.

E7: Median-Energiekosten = 2.342 - 4.870€/Fzg./Jahr; Mit den höchsten Energiekosten für das Zwischenladen an fremder LIS müssen Taxi-Flotten rechnen. Hier verursacht das Zwischenladen Median-Energiekosten von 2.342 bis 4.870€/Fzg./Jahr. Damit liegen die Energiekosten für das Zwischenladen der BEV im Durchschnitt über den Energiekosten für das Laden an der eigenen LIS am Firmenstandort.

Gesamtenergiekosten

Als nächstes werden die Gesamtenergiekosten aus Tabelle 7.1 ausgewertet, wobei die Auswertungen wieder nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Median-Energiekosten gruppiert sind.

E3, E5, E6: Median-Gesamtenergiekosten = 341 - 831€/Fzg./Jahr; Bei Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E3 und E6 ist mit den geringsten Gesamtenergiekosten zu rechnen. So belaufen sich die Median-Energiekosten, die für das Laden der BEV anfallen, auf 341 bis 831€ pro Jahr und Fahrzeug.

E1, E2, E4: Median-Gesamtenergiekosten = 966 - 1.811€/Fzg./Jahr; Dienstleistungs-Flotten (E1 und E2) sowie Gütertransport-Flotten (E4) weisen mit 966 - 1.811€/Fzg./Jahr deutlich höhere Median-Energiekosten auf, die für das Laden der BEV anfallen.

E7: Median-Gesamtenergiekosten = 5.549 - 8.076€/Fzg./Jahr; Das Laden von Taxi-Flotten verursacht mit Abstand die höchsten Kosten. So liegen die Median-Energiekosten mit 5.549 - 8.076€/Fzg./Jahr um ein Vielfaches über den restlichen Einsatzzwecken (E1 bis E6).

Einfluss der installierten Ladeleistung

Abschließend wird der Einfluss der am Firmenstandort installierten Ladeleistung auf die Energiekosten an fremder LIS sowie auf die Gesamtenergiekosten untersucht. Zu diesem Zweck zeigt Tabelle 7.2 die Änderung der Energiekosten aus Tabelle 7.1 gegenüber dem fahrprofil-spezifischen Median infolge einer Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW.

Tabelle 7.2: Änderung der Energiekosten infolge einer Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW

alle Werte in €/Fzg./Jahr	Energiekosten an eigener LIS	Energiekosten an fremder LIS	Energiekosten gesamt
E1: Management	↑ 5	↓ 23 - 48	↓ 18 - 43
E2: Dienstl. mit Privatn.	↑ 1	↓ 40 - 83	↓ 39 - 82
E3: Dienstl. ohne Privatn.	↑ 0	↓ 7 - 15	↓ 7 - 15
E4: Gütertransport	↑ 3	↓ 44 - 91	↓ 41 - 88
E5: Bäckerei	↓ 6	↓ 16 - 33	↓ 22 - 39
E6: Pflegedienst	↓ 5	↓ 23 - 47	↓ 28 - 52
E7: Taxi	↑ 1.498	↓ 2.003 - 4.164	↓ 505 - 2.666

Die folgenden Absätze fassen die Auswirkungen einer Erhöhung der installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW zusammen, die sich aus Tabelle 7.2 ableiten lassen. Die Auswertungen sind nach Einsatzzwecken mit ähnlichen Differenzbeträgen zwischen den Median-Gesamtenergiekosten gruppiert.

E1 - E6: Median-Gesamtenergiekosten ↓ 7 - 88 €/Fzg./Jahr; Wird die am Firmenstandort installierte Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW, so bei Flotten der Einsatzzwecke E1 bis E6 mit einer Reduzierung der Gesamtenergiekosten um 7 - 88 €/Fzg./Jahr im Median zu rechnen. Dies liegt vordergründig an den sinkenden Energiekosten, die für das Laden an fremder LIS anfallen. Durch die erhöhte Ladeleistung kann bei gleicher Lastspitze und in gleicher Zeit mehr Energie an der eigenen LIS aufgeladen werden, sodass der Energiebedarf an fremder LIS sinkt.

E7: Median-Gesamtenergiekosten ↓ 505 - 2.666 €/Fzg./Jahr; Trotz steigender Energiekosten für Laden an eigener LIS sinken die Gesamtenergiekosten der Taxi-Flotten im Median um 505 - 2.666 €/Fzg./Jahr infolge einer Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW. Analog zu den Einsatzzwecken E1 bis E6 führt auch hier die erhöhte Ladeleistung am Firmenstandort zu einer Reduzierung des Zwischenladebedarfs. Dadurch sinken die Median-Energiekosten an fremder LIS um 2.003 - 4.164 €/Fzg./Jahr und kompensieren damit den Anstieg der Energiekosten an der eigenen LIS.

8 Diskussion

In diesem Kapitel werden das Gesamtkonzept und die Ergebnisse dieser Arbeit kritisch diskutiert. Hierzu werden zunächst die Forschungsfragen im Unterkapitel 8.1 beantwortet. Daran schließt sich eine allgemeine Bewertung des Vorgehens an (Unterkapitel 8.2). Im abschließenden Unterkapitel 8.4 wird auf die Relevanz der erzielten Ergebnisse für das Gewerbe und die Wissenschaft eingegangen.

8.1 Forschungsfragen

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit betrifft die Ableitung flottenübergreifender Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung. Zur Ableitung dieser Aussagen und Empfehlungen wurden Teilfragestellungen formuliert. Diese Teilfragestellungen werden im Folgenden aufgegriffen und anhand der Ergebnisse dieser Arbeit beantwortet.

8.1.1 Mobilitätsmerkmale typischer Einsatzzwecke

Durch welche Mobilitätsmerkmale zeichnen sich typische Einsatzzwecke gewerblicher Fahrzeugflotten aus?

Im Unterkapitel 4.2 wurden die Mobilitätsmerkmale der Einsatzzwecke im Rahmen einer Mobilitätsanalyse untersucht. Die wichtigsten Mobilitätsmerkmale sind in Abbildung 8.1 zusammengefasst.

Fahrzeugstatus: Privat genutzte Fahrzeuge (E1 und E2) unterscheiden sich von den nicht privat genutzten Fahrzeugen (E3 bis E7) dadurch, dass sie außerhalb der Arbeitszeit nicht am Firmenstandort, sondern überwiegend am Wohnort stehen. Zudem zeigt die Mobilitätsanalyse, dass Management-Fahrzeuge (E1) hauptsächlich für den Arbeitsweg genutzt werden und während der Arbeitszeit überwiegend am Firmenstandort stehen. Im Gegensatz dazu stehen die Fahrzeuge der anderen Einsatzzwecke (E2 bis E7) während der Arbeitszeit kaum am Firmenstandort, sondern sind unterwegs. Dabei zeichnen sich Dienstleistungs- und Pflegedienst-Fahrzeuge (E2, E3 und E6) dadurch aus, dass sie den überwiegenden Teil der Arbeitszeit an einem Ort stehen, der kein Ladestandort ist. Es ist davon auszugehen, dass sie sich zu diesen Zeiten beispielsweise beim Kunden oder auf der Baustelle befinden. Deutlich mehr bewegt werden im Vergleich dazu transportorientierte Fahrzeuge (E4, E5 und E7). Besonders hervorzuheben sind Taxis (E7), die sich im Unterschied zu den anderen durch einen Dauerbetrieb auszeichnen, der nur durch zwei Schichtwechsel pro Tag unterbrochen wird. Im Hinblick auf die Flottenelektrifizierung kommt als zusätzliche Herausforderung hinzu, dass die Schichtwechsel der Taxis (E7) nur teilweise am Firmenstandort stattfinden.

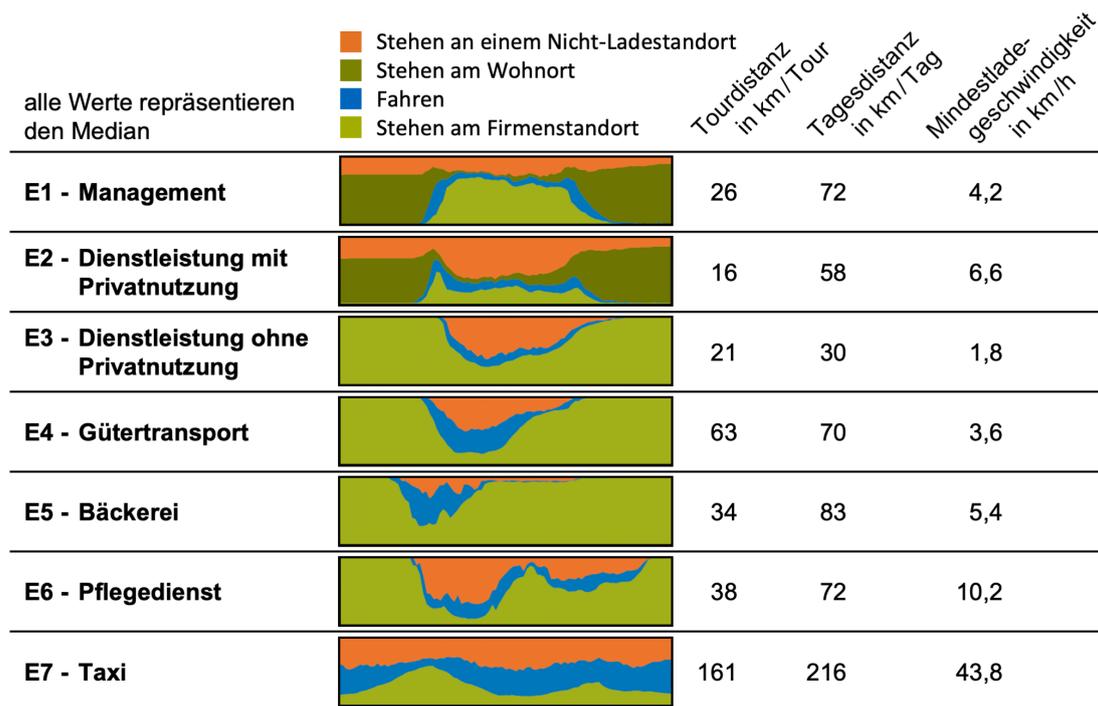


Abbildung 8.1: Wesentliche Mobilitätsmerkmale der untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7

Fahrdistanz und verfügbare Ladefenster: Darüber hinaus zeichnen sich die Einsatzzwecke E1 bis E6 durch relativ geringe Fahrdistanzen aus. So werden nur in Ausnahmefällen 100 km/Tag überschritten, wobei die Median-Tagesdistanz zwischen 30 km/Tag und 83 km/Tag liegt. Dies deckt sich weitgehend mit dem KID-Datensatz, wonach gewerbliche Pkw durchschnittlich 72 km/Tag zurücklegen. Hinzu kommen die langen Ladefenster, die nach den Touren zur Verfügung stehen. So betragen die Median-Mindestladegeschwindigkeiten lediglich 1,8 km/h bis 10,2 km/h. Taxis (E7) weisen dagegen an mehr als der Hälfte der Tage eine Tagesdistanz von über 200 km/Tag auf. Die Tourdistanz, also die Fahrdistanz zwischen zwei Ladestandorten, beträgt an drei Viertel der Tage über 100 km/Tag. Zudem sind die verfügbaren Ladefenster der Taxis (E7) relativ kurz. Entsprechend hoch ist die Median-Mindestladegeschwindigkeit mit 43,8 km/h.

8.1.2 Auswirkungen auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit

Welche Auswirkungen hat jeweils eine Flottenelektrifizierung auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit?

Im Kapitel 7 wurden die Auswirkungen auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit einer Flottenelektrifizierung in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) detailliert ausgewertet. Die wesentlichen Auswirkungen sind in Abbildung 8.2 zusammengefasst.

Auswirkungen auf Flottenbetrieb: Es hat sich gezeigt, dass beschränkte Antriebsleistungen von BEV nur geringe Auswirkungen auf den Flottenbetrieb haben. Lediglich bei Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung (E2) und Gütertransport-Fahrzeugen (E4) ist mit leichten Verspätungen zu rechnen. Obwohl sich die Fahrten im Median um nur 1 bis 3% verlängern, weisen 18 bis 21% der Fahrten Verzögerungsgrade von über 10% auf, was zu realistischen Einschränkungen im Flottenbetrieb führen kann.

alle Werte repräsentieren den Median	Verzögerungsgrad in %	Rest-SOC in %	Autarkierate in %	Gesamtennergiekosten in € /Fzg. /Jahr
E1: Management (11 kW)	0	89	98	966 - 1.017
E2: Dienstleistung mit Privatnutzung (11 kW)	1	80	96	1.442 - 1.561
E3: Dienstleistung ohne Privatnutzung (11 kW)	0	81	96	535 - 579
E4: Gütertransport (11 kW)	3	54	89	1.389 - 1.811
E5: Bäckerei (11 kW)	0	68	95	605 - 831
E6: Pflegedienst (11 kW)	0	74	97	341 - 421
E7: Taxi (50 kW)	0	20	58	5.549 - 8.076
	Auswirkungen auf Flottenbetrieb		Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit	

Abbildung 8.2: Wesentliche Auswirkungen auf Flottenbetrieb und Flottenwirtschaftlichkeit für die untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7

Die Reichweiten heutiger BEV reichen für den Einsatz als Management-, Dienstleistungs-, Bäckerei- und Pflegedienst-Fahrzeuge (E1, E2, E3, E5 und E6) aus, um mit 11 kW Ladeleistung am Firmenstandort und ohne Zwischenladen den wesentlichen Mobilitätsbedarf zu decken. Der Rest-SOC, den diese Fahrzeuge nach einer Tour bei Ankunft an einem Ladestandort aufweisen, liegt im Median zwischen 68 % und 89 %. Selbst bei Bäckerei-Fahrzeugen (E5), die in Ausnahmefällen (= 8 %) einen leicht negativen Rest-SOC (Worst-Case: -22 %) aufweisen, sind die Auswirkungen auf den Flottenbetrieb überschaubar. In der Praxis dürfte bereits eine geringfügig energieeffizientere Fahrweise ausreichen, um den Rest-SOC aus dem negativen in den positiven Bereich zu bringen, sodass nur im Extremfall eine Umverteilung auf andere Bäckerei-Fahrzeuge oder entsprechende Zwischenladungen eingeplant werden müssen. Entsprechend gering ist auch der Zwischenladebedarf dieser Einsatzzwecke. Bei Median-Autarkieraten zwischen 95 und 98 % müssen nur 2 bis 5 % des gesamten Flottenenergieverbrauchs durch Zwischenladungen unterwegs nachgeladen werden.

Dementsprechend sind auch die Autarkieraten mit 89 % niedriger und damit der Bedarf an Zwischenladungen höher. Das Einplanen zusätzlicher Zeit für Zwischenladungen oder die Umverteilung längerer Fahrten auf andere Fahrzeuge erscheint im Güterverkehr (E4) unumgänglich. Ähnliche Auswirkungen auf den Flottenbetrieb hat die Erhöhung der Ladeleistung auf dem Betriebsgelände.

Bei Gütertransport-Fahrzeugen (E4) sind die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb deutlicher. Bei 11 kW Ladeleistung am Firmenstandort erreichen die Fahrzeuge im Median mit 54 % Rest-SOC den Firmenstandort, 21 % der Touren enden mit einem negativen Rest-SOC (Worst-Case: -109 %). Dementsprechend sind auch die Autarkieraten mit 89 %

niedriger und damit der Bedarf an Zwischenladen höher. Das Einplanen zusätzlicher Zeit für Zwischenladen oder die Umverteilung längerer Fahrten auf andere Fahrzeuge erscheint im Gütertransport (E4) unumgänglich. Auch höhere Ladeleistungen am Firmenstandort führen hier zu keiner spürbaren Verbesserung.

Selbst bei 50 kW Ladeleistung am Firmenstandort endet die Hälfte der Touren mit einem Rest-SOC von nur maximal 20 %. In 34 % der Fälle ist der Rest-SOC negativ (Worst-Case: -116 %). Dies bedeutet, dass Taxi-Flotten im Median 42 % des gesamten Flottenenergieverbrauchs durch Zwischenladungen unterwegs nachladen müssen. Eine Umverteilung längerer Fahrten auf andere Fahrzeuge erscheint aufgrund der schwer prognostizierbaren Kundenaufträge kaum zielführend. Bei der Elektrifizierung von Taxiflotten ist daher mit einem erhöhten Zeitaufwand für Zwischenladungen zu rechnen.

Auswirkungen auf Flottenwirtschaftlichkeit: Mit den geringsten Energiekosten für das Laden der BEV haben Dienstleistungs-Flotten ohne Privatnutzung, Bäckerei-Flotten sowie Pflegedienst-Flotten (E3, E5 und E6) zu rechnen. Die Energiekosten für das Laden an der eigenen LIS liegen im Median zwischen 267 und 494 €/Fzg./Jahr. Insbesondere bei Bäckerei- und Pflegedienst-Flotten (E5 und E6) können der Grundlastverbrauch am Firmenstandort (um 404 bis 473 €/Fzg./Jahr) sowie die Flottengröße (um 114 bis 376 €/Fzg./Jahr) diese Energiekosten wesentlich beeinflussen. Hinzu kommen 41 €/Fzg./Jahr bis 434 €/Fzg./Jahr für Zwischenladungen an fremder LIS. Im Ergebnis liegen die Gesamtenergiekosten für Laden somit zwischen 341 und 831 €/Fzg./Jahr. Damit liegen die Energiekosten deutlich unter den geschätzten Kraftstoffkosten, die mit Verbrennungsfahrzeugen angefallen wären (Tabelle G.1).

Besonders positiv sind Bäckerei- und Pflegedienst-Flotten (E5 und E6) hervorzuheben, insbesondere im Hinblick auf die relativ hohen Fahrleistungen dieser Fahrzeuge (Abbildung 8.1). Die Energiekosten sind um ein Vielfaches geringer als die geschätzten Kraftstoffkosten (Anhang G.1). Bei Flotten mit einem Grundlastverbrauch von 100 MWh/Jahr sinken sogar die Stromkosten am Firmenstandort durch das Laden (negative Energiekosten in Abbildung 7.6 (a)). Ein wesentlicher Grund hierfür ist die steigende Jahresbenutzungsdauer (Anhang G.1), die die relativen Stromkosten senkt (Anhang G.2). So sinken die relativen Stromkosten teilweise um die Hälfte auf unter 8 Ct/kWh (Abbildung 7.6 (b)) und kompensieren damit den durch Laden erhöhten Energieverbrauch. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass Flotten mit einem Grundlastverbrauch von 100 MWh/Jahr durch das Laden der BEV am Firmenstandort in die nächsthöhere Standortkategorie des Strompreismodells (5.1) rutschen, was die relativen Stromkosten zusätzlich reduziert.

Etwas höhere Energiekosten haben Management-Flotten, Dienstleistungs-Flotten mit Privatnutzung sowie Gütertransport-Flotten (E1, E2 und E4) zu erwarten. Hier liegen die Gesamtenergiekosten für das Laden der Flotten zwischen 966 und 1.811 €/Fzg./Jahr und sind damit vergleichbar mit den geschätzten Kraftstoffkosten (Anhang G.1). Der größte Teil der Gesamtenergiekosten entfällt mit 920 bis 1.332 €/Fzg./Jahr auf das Laden an der eigenen LIS. Insbesondere bei Gütertransport-Flotten (E4) hängen diese Kosten (mit 404 €/Fzg./Jahr im Median) stark vom Grundlastverbrauch am Firmenstandort sowie (mit 369 €/Fzg./Jahr) von der Flottengröße ab. Gütertransport-Flotten (E4) weisen zudem mit 391 bis 812 €/Fzg./Jahr besonders hohe Energiekosten für Zwischenladen an fremder LIS auf.

Das Laden von Taxis (E7) verursacht mit 5.549 bis 8.076 €/Fzg./Jahr die mit Abstand höchsten Gesamtenergiekosten. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass auch die geschätzten Kraftstoffkosten in einem ähnlich hohen Bereich liegen (Anhang G.1). Die Gesamtenergiekosten setzen sich zusammen aus 3.207 €/Fzg./Jahr für das Laden an der eigenen LIS sowie

2.342 bis 4.870 €/Fzg./Jahr für Zwischenladen an fremder LIS. Dabei ist der Einfluss des Grundlastverbrauchs am Firmenstandort (mit 855 €/Fzg./Jahr im Median) relativ groß, während die Flottengröße (mit 205 €/Fzg./Jahr im Median) die Energiekosten weniger beeinflusst.

8.1.3 Einfluss von Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl

Welchen Einfluss hat jeweils die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit?

Im Kapitel 7 wurde auch der Einfluss der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit ausgewertet. Die wesentlichen Einflüsse sind in Abbildung 8.3 zusammengefasst.

alle Werte repräsentieren den Median	Verzögerungsgrad in %	Rest-SOC in %	Autarkierate in %	Gesamtenergiekosten in € /Fzg. /Jahr	Gesamtenergiekosten in € /Fzg. /Jahr
E1: Management (11 kW)	0	↑ 2	0	↓ 18 - 43	↓ 29 ↓ 1
E2: Dienstleistung mit Privatnutzung (11 kW)	↓ 1	↑ 8	↑ 1	↓ 39 - 82	↓ 8 ↓ 3
E3: Dienstleistung ohne Privatnutzung (11 kW)	↓ 1	↑ 2	0	↓ 7 - 15	↓ 21 ↓ 6
E4: Gütertransport (11 kW)	↓ 2	↑ 19	0	↓ 41 - 88	↓ 447 ↓ 108
E5: Bäckerei (11 kW)	0	↑ 17	↑ 1	↓ 22 - 39	↓ 431 ↓ 150
E6: Pflegedienst (11 kW)	0	↑ 9	↑ 1	↓ 28 - 52	↓ 428 ↓ 240
E7: Taxi (50 kW)	0	↑ 13	↑ 20	↓ 505 – 2.666	↓ 300 ↓ 458
	BEV: vom Schlechtesten zum Besten		Installierte Ladeleistung: von 11 kW auf 50 kW		Last- Lade-management: vom Schlechtesten zum Besten

Abbildung 8.3: Wesentliche Einflüsse der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf Flottenbetrieb und Flottenwirtschaftlichkeit für die untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7

Einfluss der Fahrzeugwahl: Aufgrund der geringen Auswirkungen beschränkter Fahrzeugantriebsleistungen auf den Flottenbetrieb (8.1.2) ist auch der Einfluss der Fahrzeugwahl darauf gering. Lediglich bei Dienstleistungs- und Gütertransport-Fahrzeugen (E2 bis E4) ist ein Unterschied im Verzögerungsgrad zwischen dem jeweils besten und schlechtesten BEV zu verzeichnen, der bei vereinzelt Touren auch über 5 % betragen kann.

Die realisierbaren Reichweiten von Management-, Dienstleistungs- und Pflegedienst-Fahrzeugen (E1, E2, E3 und E6) werden durch die Fahrzeugwahl nur gering beeinflusst. So steigt bei einem hypothetischen Wechsel vom jeweils schlechtesten zum besten BEV der Rest-SOC nach einer Tour um 2 bis 9 % (Median). Der Anteil der realisierbaren Fahrten, d. h. der Erfüllungsgrad, bleibt dabei allerdings unverändert. Eine deutlich größere Abhängigkeit von der Fahrzeugwahl

weisen die transportorientierten Einsatzzwecke E4, E5 und E7 auf. Durch die Fahrzeugwahl kann hier der Median-Rest-SOC um 13 bis 19 % erhöht und damit die Abhängigkeit vom Zwischenladen deutlich reduziert werden.

Einfluss der LIS-Wahl: Die Untersuchungen zeigen, dass die im Firmenstandort installierte Ladeleistung keinen Einfluss auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit der Einsatzzwecke E1 bis E6 hat. Eine Erhöhung der Ladeleistung zeigt lediglich bei Taxi-Flotten (E7) positive Effekte. So steigt die Median-Autarkierate um 20 % durch eine Erhöhung der Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW. Die damit verbundene Reduzierung des Zwischenladebedarfs um 20 % reduziert vorteilhaft sowohl den Zeitaufwand für Laden als auch die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit einer, beispielsweise öffentlichen, LIS zum Zwischenladen. Darüber hinaus sinken dadurch auch die Median-Gesamtenergiekosten um 505 - 2.666 €/Fzg./Jahr, also um 9 bis 33 %.

Bei Gütertransport-, Bäckerei-, Pflegedienst- und Taxi-Flotten (E4 bis E7) hat darüber hinaus das Last- und Lademanagement-System einen signifikanten Einfluss auf die Flottenwirtschaftlichkeit. Die Kostendifferenz zwischen dem jeweils besten und schlechtesten Last- und Lademanagement-System beträgt 555 bis 758 €/Fzg./Jahr (Median). Dabei ist der Einfluss des Lastmanagement-Ansatzes (statisch oder dynamisch) bei Gütertransport-, Bäckerei-, Pflegedienst-Flotten (E4 bis E6) mit 428 bis 447 €/Fzg./Jahr um ein Vielfaches höher als der Einfluss des Lademanagement-Verfahrens (LSOCF, FCFS oder EQUAL) der bei 108 bis 204 €/Fzg./Jahr liegt. Bei Taxi-Flotten (E7) hingegen spielt das Lademanagement-Verfahren eine größere Rolle als das Lastmanagement. Hier kann die Wahl des Lademanagement-Verfahrens über 458 €/Fzg./Jahr (Median) entscheiden, während das Einsparpotential durch den Einsatz des richtigen Lastmanagement-Ansatzes bei 300 €/Fzg./Jahr (Median) liegt.

8.1.4 Am besten geeignete Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur

Welche BEV und LIS sind zur Flottenelektrifizierung jeweils am besten geeignet?

In den Unterkapiteln 7.1 und 7.2 wurden die Auswirkungen auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit sowohl für verschiedene BEV als auch für verschiedene LIS ausgewertet. Diese Auswertungen zeigen unter anderem, welche Kombination von BEV und LIS für die untersuchten Einsatzzwecke jeweils am besten geeignet ist.

Am besten geeignete BEV: Bei der Elektrifizierung von Dienstleistungs-Fahrzeugen mit Privatnutzung und Gütertransport-Fahrzeugen (E2 und E4) ist darauf zu achten, dass die Fahrzeugantriebsleistung ausreichend hoch ist, um die Touren in der gleichen Zeit wie vor der Elektrifizierung zurücklegen zu können. Wie aus der Tabelle C.1 hervorgeht, betrifft dies vor allem die Elektrifizierung von Nfz, d. h. Hochdachkombis, Kastenwagen oder Kleintransporter bis 3,5 Tonnen, deren BEV-Pendants nur Antriebsleistungen bis 100 kW aufweisen (Tabelle B.3), also zu langsam sind. Für Flotten der übrigen Einsatzzwecke (E1, E3 und E5 bis E7) spielen zu geringe Fahrzeugantriebsleistungen hingegen keine Rolle bei der Fahrzeugwahl.

Für die transportorientierten Einsatzzwecke Gütertransport, Bäckerei und Taxi (E4, E5 und E7) sind BEV mit möglichst hohen Fahrzeugreichweiten zu bevorzugen. Denn durch höhere Reichweiten kann der Bedarf an Zwischenladen entscheidend reduziert werden. Für Management-, Dienstleistungs- und Pflegedienst-Fahrzeuge (E1, E2, E3 und E6) spielt hingegen die Fahrzeugreichweite eine untergeordnete Rolle, weil die Reichweitenanforderungen der jeweiligen Fahrprofile in den meisten Fällen deutlich unter den Reichweiten heutiger BEV liegen.

Am besten geeignete LIS: Für die Einsatzzwecke E1 bis E6 ist eine am Firmenstandort installierte Ladeleistung von 11 kW zu empfehlen. Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass höhere Ladeleistungen keinen nennenswerten Einfluss auf den Flottenbetrieb oder die Flottenwirtschaftlichkeit haben (Unterkapitel 8.1.3). Taxi-Flotten (E7) sollten hingegen auf 50 kW-Ladestationen am Firmenstandort setzen.

Für Gütertransport- und Taxi-Flotten sollte zusätzlich eine ausreichend hohe Verfügbarkeit von LIS zum Zwischenladen im jeweiligen Einsatzgebiet sichergestellt werden, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, dass für alle untersuchten Einsatzzwecke (E1 bis E7) der Einsatz eines Last- und Lademanagement-Systems am Firmenstandort zu empfehlen ist. Denn neben den geringeren Energiekosten werden durch ein Last- und Lademanagement-System auch die Lastspitzen deutlich reduziert, die ansonsten zu kostenintensiven Um- oder Ausbauten bestehender Anschlüsse führen können.

Dabei sollten Betreiber von Gütertransport-, Bäckerei-, Pflegedienst- und Taxi-Flotten (E4 bis E7) einen dynamischen gegenüber einem statischen Lastmanagement-Ansatz vorziehen, um Energiekosten zu sparen. Bei Management- und Dienstleistungs-Flotten (E1 bis E3) ist der Vorteil eines dynamischen Lastmanagement-Ansatzes gegenüber einem statischen Lastmanagement-Ansatz relativ gering. Betreiber von Flotten dieser Einsatzzwecke (E1 bis E3) sollten somit genau prüfen, ob sich die Investition in ein dynamischen Lastmanagement lohnt.

In Bezug auf das Lademanagement-Verfahren scheint das LSOCF-Verfahren am besten geeigneten zu sein, um bei Gütertransport-, Bäckerei-, Pflegedienst- und Taxi-Flotten (E4 bis E7) erhebliche Kosten einzusparen. Das zweithöchste Kosteneinsparpotential weist das FCFS-Verfahren auf, das damit aus Energiekostensicht dem EQUAL-Verfahren vorzuziehen ist. Für Management- und Dienstleistungs-Flotten (E1 bis E3) sind ähnlich wie beim Lastmanagement-Ansatz kaum Unterschiede zwischen den Lademanagement-Verfahren zu erkennen.

8.2 Allgemeine Bewertung

Der gewählte Lösungsansatz, aus dem beschränkten Ausgangsdatensatz eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugflotten zu modellieren, ist insgesamt positiv zu bewerten. So konnten pro Einsatzzwecke mehrere Fahrzeugflotten modelliert werden, die sich sowohl im Mobilitätsverhalten als auch in der Fahrzeuganzahl und dem Energieverbrauch am Firmenstandort unterscheiden. Dabei konnte mit Blick auf das Mobilitätsverhalten sichergestellt werden, dass vom Worst-Case bis zum Best-Case die gesamte Bandbreite an im Rahmen des Ausgangsdatensatzes möglichen Ausprägungen der Mobilitätsmerkmale repräsentiert sind. Der Umfang der modellierten Flotten bekräftigt dies. So konnten aus den ursprünglichen 26 Fahrzeugflotten des Ausgangsdatensatzes insgesamt 1 200 unterschiedliche Fahrzeugflotten modelliert werden.

Auch die Trennung der Fahrzeugsimulation von der Flottensimulation ist positiv zu werten. Dadurch konnten mit relativ geringem Rechenaufwand sowohl der Einsatz verschiedener BEV für jedes der 399 Fahrprofile als auch der Einsatz verschiedener LIS-Varianten für jedes der 1 200 Fahrzeugflotten simuliert und ausgewertet werden. Hierzu wurden 23 unterschiedliche BEV sowie 36 unterschiedliche LIS-Varianten herangezogen. Die Ergebnisse der Fahrzeugsimulation basieren somit auf insgesamt 2 695 Einzelsimulation und die Ergebnisse der Flottensimulation auf insgesamt 40 320 Einzelsimulation.

Vor diesem Hintergrund können auch die daraus abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen positiv bewertet werden. Durch die Verwendung statistischer Lagemaße, wie Median oder Quartile, konnten aus dem relativ umfangreichen Ergebnisdatensatz die wesentlichen, flottenübergreifenden Trends extrahiert werden. Damit treffen die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen zwar nicht für alle, jedoch zumindest für einen Großteil der untersuchten Fahrzeugflotten zu und sind damit innerhalb eines Einsatzzwecks flottenübergreifend gültig.

8.3 Einschränkungen

Die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen sind nur für Fahrzeugflotten zutreffend, deren Eigenschaften und Merkmale vergleichbar mit den untersuchten Fahrzeugflotten sind. Hierbei ist insbesondere darauf zu achten, dass das Mobilitätsverhalten, die Flottengröße und das Lastprofil am Firmenstandort vergleichbar sind.

Eine weitere Einschränkung stellt die untersuchte Region dar. So basiert der Ausgangsdatensatz auf Bewegungsdaten, die im Großraum München aufgezeichnet wurden. Ebenso beziehen sich die zur Berechnung der Netzentgelte verwendeten Preisdaten auf den Großraum München. Die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen sind daher nicht ohne weiteres direkt auf Fahrzeugflotten aus anderen Regionen übertragbar.

Darüber hinaus wurden an einigen Stellen in der Arbeit Vereinfachungen getroffen. So bilden die verwendeten Standardlastprofile nur Mittelwerte und keine realen Leistungswerte ab. Auch sämtliche Annahmen im Simulationsmodell, wie beispielsweise die Bereitschaft der Fahrer, bis zu 500 m vom Ziel zu parken, um Laden zu können, oder die fehlende Bereitschaft der Fahrer, die Fahrzeugreichweite voll auszuschöpfen (Reichweitenangst), stellen Vereinfachung dar. Weitere erwähnenswerte Vereinfachungen wurden bei der Berechnung der Energiekosten, die durch Laden an eigener LIS verursacht werden, getroffen.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte größtenteils durch statistische Lagemaße, wie Median oder Quartile. Zu diesen statistischen Lagemaßen wurden zwar stets auch statistische Streumaße durch die Verwendung von Box-Plots angegeben. Allerdings wurden diese bei der Ableitung der Aussagen und Empfehlungen nur in besonderen Fällen betrachtet. Insbesondere bei Ergebnissen mit hoher Streuung, beispielsweise Rest-SOC von Gütertransport-Flotten (E4) oder Energiekosten von Taxi-Flotten (E7), ist daher zu berücksichtigen, dass in manchen Fällen stärkere Abweichungen von den Lagemaßen möglich sind.

8.4 Relevanz

Abschließend werden die in dieser Dissertation vorgestellten Daten, Methoden, Modelle und Ergebnisse hinsichtlich ihrer wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Relevanz eingeordnet.

Gewerbe: Die vorliegende Arbeit liefert Flottenbetreibern praxisnahe Aussagen und Empfehlungen zur Elektrifizierung ihrer Flotten. Durch die Fokussierung auf marktreife Technologien bzw. Produkte können die untersuchten Lösungen und erzielten Ergebnisse in der Praxis direkt angewendet werden. Dabei wurden stets Optimierungspotentiale hinsichtlich des Flottenbetriebs und Flottenwirtschaftlichkeit aufgezeigt, die eine zielgerichtete Umsetzung der untersuchten Technologien bzw. Produkte ermöglichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen darüber hinaus dazu bei, dass auch kleinere Unternehmen ohne die Unterstützung teurer Dienstleister den Wandel hin zur Elektromobilität erfolgreich meistern können.

Wissenschaft: Die vorliegende Arbeit umfasst eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Technik im Bereich der Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten. Dabei wurden die recherchierten Vorarbeiten in den Prozess der Flottenelektrifizierung eingeordnet und dahingehend kritisch diskutiert und bewertet. Die Literaturrecherche bildet somit einen idealen Ausgangspunkt für wissenschaftliche Folgearbeiten.

Als Grundlage dieser Arbeit dient ein Bewegungsdatensatz gewerblicher Fahrzeugflotten mit insgesamt 399 aufgezeichneten Wochen und 263 600 erfassten Kilometern. Daraus wurden mittels einer umfangreichen Mobilitätsanalyse die wesentlichen Mobilitätsmerkmale von sieben typischen Einsatzzwecken gewerblicher Fahrzeugflotten ermittelt, die zukünftige wissenschaftliche Fragestellungen unterstützen können.

Das entwickelte Simulationsmodell ermöglicht die energetische Simulation unterschiedlichster Elektrifizierungsszenarien auf Basis entsprechender Bewegungsdaten. Durch die OpenSource-Veröffentlichung des Simulationsmodells kann es zukünftige Forschungsvorhaben unterstützen.

Schließlich sind auch die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung wissenschaftlich relevant und als zukünftige Literaturwerte für die Forschung im Bereich der Elektromobilität bereichernd.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Elektromobilität gilt seit Jahren als Schlüsseltechnologie zu einem nachhaltigen und ressourcenschonenden Mobilitätssystem. Der enorme Fortschritt in der Energiespeicherentwicklung macht einen Umstieg von verbrennungsmotorisch zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sowohl für Privatpersonen als auch für Unternehmen immer interessanter. Insbesondere für Betreiber von gewerblichen Fahrzeugflotten ist der Umstieg allerdings auch mit großen Herausforderungen verbunden. Begrenzte Reichweiten, lange Ladezeiten und fehlende Ladeinfrastrukturen können wesentliche Auswirkungen auf den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit gewerblicher Flotten haben. Diese Auswirkungen sollten den Verantwortlichen im Vorfeld einer Flottenelektrifizierung bekannt sein, um richtige Entscheidungen treffen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurde zu Beginn dieser Arbeit der Stand der Forschung und Technik zur Elektrifizierung gewerblicher Fahrzeugflotten untersucht (Kapitel 2). Hierzu wurden die wichtigsten Grundlagen und Forschungsergebnisse zu den wesentlichen Aspekten der Flottenelektrifizierung im Rahmen einer umfangreichen Literaturliteraturanalyse herausgearbeitet. Dabei hat sich als ungeklärt erwiesen, wie eine erfolgreiche Elektrifizierung im Konkreten aussehen könnte und mit welchen Auswirkungen auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit Flottenbetreiber zu rechnen haben.

Ziel dieser Arbeit war es daher, flottenübergreifende Aussagen und Empfehlungen zur Flottenelektrifizierung für typische Einsatzzwecke gewerblicher Fahrzeugflotten abzuleiten.

Grundlage dafür bildete ein Bewegungsdatensatz verschiedener gewerblicher Fahrzeugflotten aus dem Großraum München (Kapitel 3). Dabei erwies sich die Anzahl der darin abgebildeten Fahrzeugflotten als zu gering, um basierend darauf flottenübergreifende Aussagen zur Flottenelektrifizierung für typische Einsatzzwecke ableiten zu können. Daher wurde ein Lösungsansatz gewählt, der es ermöglicht, aus dem beschränkten Ausgangsdatensatz eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugflotten zu modellieren. Dieser sieht vor, die Fahrprofile des Bewegungsdatensatz in ihre einzelnen Wochen zu zerlegen und im Nachhinein zu zusammenhängenden Flottenfahrprofilen zusammenzusetzen. Dadurch wurde die Möglichkeit geschaffen, aus dem beschränkten Datensatz viele unterschiedliche Flotten je Einsatzzweck zu modellieren.

Gemäß diesem Lösungsansatz wurden die Fahrprofile des Bewegungsdatensatz im Rahmen einer Datenaufbereitung (Kapitel 4) in ihre einzelnen Wochen zerlegt und nach typischen Einsatzzwecken klassifiziert. Anschließend wurden die Einsatzzwecke anhand ihrer wesentlichen Mobilitätsmerkmale beschrieben und analysiert.

Zur Untersuchung der Flottenelektrifizierung wurde ein Simulationsmodell zur Bewertung der Elektrifizierung einer Flotte entwickelt (Kapitel 5). Das Simulationsmodell bildet den Leistungsfluss zwischen den BEV einer Flotte, einer entsprechenden Ladeinfrastruktur und dem Firmenstandort ab. Zur Auswertung der Simulationsergebnisse wurden Bewertungsmaße definiert, die Auswirkungen einer Elektrifizierung auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit aufzeigen.

Um das entwickelte Simulationsmodell zielgerecht auf den Datensatz anzuwenden, wurden entsprechende Simulationsszenarien definiert (Kapitel 6). Die Definition der Simulationsszenarien umfasst dabei die Auswahl der zu simulierenden Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastrukturen. Darüber hinaus wurden gemäß dem Lösungsansatz die zu simulierenden Flotten aus den aufbereiteten Fahrprofilen modelliert.

Anschließend wurden die Ergebnisse der Simulationsstudien ausgewertet (Kapitel 7). Die Ergebnisse zeigen die Auswirkungen einer Flottenelektrifizierung auf den Flottenbetrieb und die Flottenwirtschaftlichkeit im Detail auf. Dabei wurde auch der Einfluss verschiedener Elektrofahrzeug- und Ladeinfrastruktur-Varianten auf die untersuchten Auswirkungen untersucht.

Abschließend wurden die Ergebnisse und das Vorgehen der Arbeit diskutiert (Kapitel 8). So konnten die wesentlichen Mobilitätsmerkmale der untersuchten Einsatzwecke aufgezeigt, die jeweiligen Auswirkungen einer Elektrifizierung auf Flottenbetrieb und -wirtschaftlichkeit quantifiziert und der Einfluss der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf diese Auswirkungen erfasst werden. Daraus konnten schließlich die zur Flottenelektrifizierung jeweils am besten geeigneten Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastrukturen identifiziert werden. Abschließend wurde das Vorgehen allgemein bewertet und die Relevanz der Arbeit diskutiert.

Die vorliegende Arbeit bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen im Bereich der Flottenelektrifizierung. Größtes Potential hierbei wird in der Erweiterung des Simulationsmodells um weitere Teilmodelle, beispielsweise um Fahrzeuge mit anderen Antriebstechnologien, Photovoltaik-Anlagen oder stationäre Energiespeicher, gesehen. Dies würde eine ganzheitlichere Betrachtung des Systems Elektromobilität erlauben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Vorgehen bei der Flottenelektrifizierung in Anlehnung an [5, S. 34]	7
Abbildung 2.2:	Vergleich von statischen und dynamischen Lastmanagement	18
Abbildung 3.1:	Zusammenfassung der Flottenversuche (Heatmap übernommen von [147])	24
Abbildung 3.2:	Datenstruktur des Datensatzes	25
Abbildung 3.3:	Umfang des Datensatzes in Abhängigkeit vom Betriebszweck.....	26
Abbildung 3.4:	Lösungsansatz	27
Abbildung 3.5:	Aufbau der Arbeit.....	30
Abbildung 4.1:	Fahrzeugstatus in Abhängigkeit vom Einsatzzweck	36
Abbildung 4.2:	Tourdistanz und Tagesdistanz in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	38
Abbildung 4.3:	Mindestladegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	40
Abbildung 5.1:	Architektur des Simulationsmodells.....	41
Abbildung 5.2:	Energiefluss in einem BEV in Anlehnung an [158, S. 5]).....	43
Abbildung 5.3:	Drei Phasen der Innenraumklimatisierung	46
Abbildung 5.4:	Leistungs- und Informationsfluss des Last- und Lademanagement-Modells	49
Abbildung 5.5:	Optimierungsalgorithmus	52
Abbildung 6.1:	Bildung von Flottenfahrprofilen	64
Abbildung 7.1:	(a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugantriebsleistung) und (b) Verzögerungsgrad in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	70
Abbildung 7.2:	(a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugantriebsleistung) und (b) Verzögerungsgrad in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der Fahrzeugwahl (bestes oder schlechtestes BEV)	71
Abbildung 7.3:	(a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugreichweite) und (b) Rest-SOC in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung.....	72
Abbildung 7.4:	(a) Erfüllungsgrad (Fahrzeugreichweite) und (b) Rest-SOC in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der Fahrzeugwahl (bestes oder schlechtestes BEV)	74
Abbildung 7.5:	(a) Autarkierate und (b) Ladeenergie an fremder LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung	76
Abbildung 7.6:	(a) Energiekosten und (b) relative Stromkosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	79
Abbildung 7.7:	Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7), (a) vom Grundlastverbrauch und (b) von der Flottengröße	81

Abbildung 7.8:	Änderung (a) der Energiekosten für Laden an eigener LIS und (b) der Lastspitze infolge der Verwendung eines Last- und Lademanagement-System in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	82
Abbildung 7.9:	Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von den Last- und Lademanagement-Varianten ...	84
Abbildung 7.10:	Energiekosten für Laden an eigener LIS in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) und von der am Firmenstandort installierten Ladeleistung	86
Abbildung 8.1:	Wesentliche Mobilitätsmerkmale der untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7	90
Abbildung 8.2:	Wesentliche Auswirkungen auf Flottenbetrieb und Flottenwirtschaftlichkeit für die untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7	91
Abbildung 8.3:	Wesentliche Einflüsse der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturwahl auf Flottenbetrieb und Flottenwirtschaftlichkeit für die untersuchten Einsatzzwecke E1 bis E7	93
Abbildung D.1:	Optimierungsalgorithmus zur Bestimmung des Antriebsstrangwirkungsgrades	xxxv
Abbildung D.2:	Simulierte Energieverbräuche der 23 untersuchten BEV	xxxvii
Abbildung E.1:	Eigene Darstellung der für diese Arbeit relevanten Standardlastprofile nach [156] (Leistungswerte sind auf einen Grundlastverbrauch von 1 MWh/Jahr normiert)	xxxix
Abbildung F.1:	Prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV“ und „schlechtestes BEV“ Hinblick auf die Fahrzeugreichweite der 23 untersuchten BEV.....	xli
Abbildung F.2:	Prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV» und „schlechtestes BEV“ im Hinblick auf die Fahrzeugleistung der 23 untersuchten BEV.....	xlii
Abbildung G.1:	Jahresbenutzungsdauer in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7) ..	xliii
Abbildung G.2:	Relative Stromkosten und Lastspitze in Abhängigkeit von der Jahresbenutzungsdauer für einen exemplarischen Jahresenergieverbrauchs von 500 MW h/Jahr.....	xliv

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Wesentliche Mobilitätsmerkmale gewerblicher Pkw und Lkw bis einschließlich 3,5 Tonnen Nutzlast nach der Mobilitätsstudie KID [55]	10
Tabelle 2.2:	Technisches Elektrifizierungspotential für verschiedene Wirtschaftszweige nach [11, S. 179f]	12
Tabelle 2.3:	Standortkategorien von Ladestationen in Anlehnung an [29, S. 49], [19, S. 7], [77]	13
Tabelle 2.4:	Regelbasierte Strategien für Last- und Lademanagement-Systeme	20
Tabelle 3.1:	Umfang des Datensatzes in Abhängigkeit vom Einsatzzweck.....	25
Tabelle 4.1:	Ergebnis der Selektion in der Datenvorverarbeitung	33
Tabelle 4.2:	Definition der Einsatzzwecke E1 bis E7	34
Tabelle 4.3:	Zusammenfassung der aufbereiteten Fahrprofile	35
Tabelle 5.1:	Preismodell der SWM Infrastruktur GmbH aus dem Jahr 2020 [97, 204, 205]	57
Tabelle 6.1:	Zusammenfassung der Fahrzeugdatenbank (rechnerische Reichweite: Quotient aus Nenn-Batteriekapazität und WLTP-Verbrauch)	60
Tabelle 6.2:	Zusammenfassung der Simulationsszenarien der ersten Simulationsstudie.	62
Tabelle 6.3:	Zuordnung der Standortlastprofilen zu Einsatzzwecken	65
Tabelle 6.4:	Zusammenfassung der zu untersuchenden LIS-Varianten	66
Tabelle 6.5:	Zusammenfassung der Simulationsszenarien der zweiten Simulationsstudie	67
Tabelle 7.1:	Zusammenfassung der Energiekosten in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)	87
Tabelle 7.2:	Änderung der Energiekosten infolge einer Erhöhung der am Firmenstandort installierten Ladeleistung von 11 kW auf 50 kW	88
Tabelle A.1:	Fahrzeugklassen nach [151].....	xxvii
Tabelle B.1:	Fahrzeugunabhängige Parameter des Längsdynamikmodells	xxix
Tabelle B.2:	Weiterführende Informationen zu den BEV der Fahrzeugdatenbank.....	xxx
Tabelle B.3:	Fahrzeugspezifische Parameter der BEV (mit * gekennzeichnete Werte sind gemäß Anhang D berechnet)	xxxi
Tabelle B.4:	Fahrzeugspezifische Maximalladeleistungen der BEV	xxxii
Tabelle C.1:	Anzahl der Fahrprofile in Abhängigkeit von Einsatzzweck, Fahrzeugart und Fahrzeugklasse.....	xxxiii
Tabelle G.1:	Geschätzte Kraftstoffkosten der Einsatzzwecke E1 bis E7 (Annahmen: Kraftstoffverbrauch = 7,3 L/100km; Kraftstoffpreis 1,3€/L)	xliii

Literaturverzeichnis

- [1] SPD, Bündnis 90/ Die Grünen und FDP, „Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit,“ *Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP*, 2021. Verfügbar: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalition_svertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [2] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2023,“ 2023. Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2022/pm10_fz_bestand_pm_komplett.html?snn=3662144 [aufgerufen am 19. 03. 2022].
- [3] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen im Dezember 2021 - Jahresbilanz,“ 2022. Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugzulassungen/2022/pm01_2022_n_12_21_pm_komplett.html?snn=3662144 [aufgerufen am 19. 03. 2022].
- [4] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Monatsergebnisse Dezember 2022 (FZ 8),“ 2023. Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz8/fz8_gentab.html?nn=1146130 [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [5] M. Grausam, G. Parzinger und U. Müller, „Elektromobilität in Flotten. Handlungsempfehlungen zur Integration von Elektromobilität in Flotten für Fuhrparkbetreiber. Handlungsleitfaden,“ 2015.
- [6] E. Plota, „Gewerbliche Elektrofahrzeuge - Integration in das Energiesystem und wirtschaftliche Ladestrategien für Flotten,“ Diss., 2019, DOI: 10.17877/DE290R-20078.
- [7] Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, „Starterset Elektromobilität - Gewerbeverkehr,“ 2013. Verfügbar: <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/Gewerbeverkehr/> [aufgerufen am 25. 08. 2021].
- [8] T. Ketelaer, T. Kaschub, P. Jochem und W. Fichtner, „The potential of carbon dioxide emission reductions in German commercial transport by electric vehicles,“ *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, DOI: 10.1007/s13762-014-0631-y.
- [9] S. C. Trümper, „Commercial fleets as early markets for electric vehicles,“ *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2013, DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728513.
- [10] A. Schulz, V. Schindler und S. Marker, „Elektrifizierung von Fahrzeugflotten,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2012, DOI: 10.1365/s35148-012-0255-9.
- [11] T. Gnann, P. Plötz, S. Funke und M. Wietschel, „What is the market potential of plug-in electric vehicles as commercial passenger cars? A case study from Germany,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.015.

- [12] T. Gnann, P. Plötz, F. Zischler und M. Wietschel, „Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potenzialanalyse,“ *Working Paper Sustainability and Innovation No. S 7/2012*, 2012.
- [13] P. Plötz, S. Funke und P. Jochem, „Real-world fuel economy and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles,“ *Working Paper Sustainability and Innovation No. S 1/2015*, 2015.
- [14] W. Sierzchula, „Factors influencing fleet manager adoption of electric vehicles,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, ISBN: 1361-9209. DOI: 10.1016/j.trd.2014.05.022.
- [15] Arval Mobility Observatory, „Mobilitäts- und Fuhrparkbarometer Deutschland,“ 2021. Verfügbar: https://www.arval.de/sites/default/files/177/2021/04/FINAL_Arval%20Mobility%20Observatory%20Barometer%202021%20Presseversion.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [16] A. Schlosser, F. Saefel und L. Steinhardt, „The German market for commercial vehicles The challenge of electrifying urban transport,“ 2019. Verfügbar: https://www.adlittle.de/sites/default/files/reports/adl_the_german_market_for_battery_report-compresse_0.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [17] I. Frenzel, J. Jarass, S. Trommer und B. Lenz, „Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015. Verfügbar: http://elib.dlr.de/96491/1/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [18] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieb im Dezember 2022 (FZ 28),“ 2023. Verfügbar: https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ28/fz28_2022_12.xlsx?__blob=publicationFile&v=6 [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [19] C. von Radowitz, „Nachhaltige Mobilität für Unternehmen. Empfehlungen zum Einsatz von Elektromobilität,“ 2020. Verfügbar: https://www.thega.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/thega_nachhaltige_mobilitaet_unternehmen_2020.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [20] J. Hildebrandt, „Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe,“ Diss., 2016. Verfügbar: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/5466/2/hildebrandt_jonas.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [21] Die Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung,“ 2009. Verfügbar: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [22] L. Minnich, M. Mottschall, P. Dolega und M. Buchert, „Klimafreundlich, effizient, smart? Antworten zur Elektromobilität,“ LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH, 2021. Verfügbar: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fragen-zur-Elektromobilitaet.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [23] L. Guzzella und A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems*, 2013, ISBN: 9783642359125. DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2.
- [24] M. Lienkamp, *Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird*, 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.4897.2403.

- [25] R. Madlener, V. Marano und O. Veneri, „Vehicle Electrification: Main Concepts, Energy Management, and Impact of Charging Strategies,“ in *Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles*, O. Veneri, Hrsg. Springer International Publishing, 2017, ISBN: 978-3-319-43649-4. DOI: 10.1007/978-3-319-43651-7.
- [26] A. Braun, „Effiziente Elektrofahrzeuge,“ Diss., Universität Stuttgart, 2019, DOI: 10.1007/978-3-658-26881-7.
- [27] A. Karle, *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*, 2. Aufl., Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015, ISBN: 9783446444171.
- [28] H.-H. Braess und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 7. Aufl., Springer Vieweg, 2012, ISBN: 9783658016906. DOI: 10.1007/978-3-8348-8298-1.
- [29] Arbeitsgruppe 4 „Normung Standardisierung und Zertifizierung“ der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), „Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur,“ 2013. Verfügbar: <https://www.vorarlbergnetz.at/media/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-data.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [30] IEC 61851-1:2010, „Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements,“ 2019. Verfügbar: <https://www.vde-verlag.de/normen/0100544/din-en-iec-61851-1-vde-0122-1-2019-12.html> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [31] Tesla Germany GmbH, „Tesla Supercharger,“ 2021. Verfügbar: https://www.tesla.com/de_DE/supercharger [aufgerufen am 17. 08. 2021].
- [32] DKE/AK EMOBILITY.60, „Der Technische Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Version 2,“ 2015. Verfügbar: <https://www.dke.de/resource/blob/988408/750e290498bf9f75f50bb86d520caba7/leitfaden-elektromobilitaet-2016--data.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [33] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, 1. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020, ISBN: 978-3-658-29729-9. DOI: 10.1007/978-3-658-29730-5.
- [34] V. Gillessen, „Neue Mobilität für Unternehmen. Empfehlungen zum Einsatz von Elektrofahrzeugen,“ 2015. Verfügbar: https://www.thega.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Elektromobilität/neue_mobilitaet_fuer_unternehmen_thega_final.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [35] D. K. Müller, N. O. Ommen und D. M. Woisetschläger. „Ein Segmentierungsansatz für die Adoption von Elektrofahrzeugen in Unternehmen“, in: *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-09577-2. DOI: 10.1007/978-3-658-09577-2_1.
- [36] K. Siefen. „Simulation und Optimierung der Standort- und Kapazitätsauswahl in der Planung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten,“ Paderborn, 2012. Verfügbar: <https://core.ac.uk/download/pdf/50519559.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [37] K. Nesbitt und D. Sperling, „Fleet purchase behavior: Decision processes and implications for new vehicle technologies and fuels,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2001, DOI: 10.1016/S0968-090X(00)00035-8.

- [38] I. Frenzel, „Who Are the Early Adopters of Electric Vehicles in Commercial Transport - A Description of Their Trip Patterns,“ in *Commercial Transport (Lecture Notes in Logistics)*, U. Clausen, H. Friedrich, C. Thaller und C. Geiger, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2016, ISBN: 978-3-319-21265-4. DOI: 10.1007/978-3-319-21266-1_7.
- [39] J. Betz, „Evaluation einer intelligenten Flottendisposition für gemischte Fahrzeugflotten,“ Diss., Technische Universität München, 2019.
- [40] V. Gillessen und M. Schramek, „Einführung von Elektromobilität in Unternehmen,“ 2017. Verfügbar: <https://www.energieberatung-abdinghoff.de/wp-content/uploads/2018/10/E-Mobilitaet-Strom-bewegt-Studie-Hessen-1.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [41] J. Betz, D. Werner und M. Lienkamp, „Fleet Disposition Modeling to Maximize Utilization of Battery Electric Vehicles in Companies with On-Site Energy Generation,“ *Transportation Research Procedia*, 2016, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.084.
- [42] T. T. Taefi, J. Kreuzfeldt, T. Held und A. Fink. „Strategies to Increase the Profitability of Electric Vehicles in Urban Freight Transport“,“ in: *E-Mobility in Europe: Trends and Good Practice*. Hrsg. von W. Leal Filho und R. Kotter. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN: 978-3-319-13194-8. DOI: 10.1007/978-3-319-13194-8_20.
- [43] T. Held und A. Fink, „A framework to enhance the productivity of electric commercial vehicles in urban freight transport,“ in *2nd Biennial CARPE conference*, 2013. Verfügbar: <https://www.mmu.ac.uk/media/mmuacuk/content/documents/carpe/2013-conference/papers/creative-engineering/Tessa-T.-Taefi.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [44] BMW AG, Universität Duisburg-Essen, Alphabet, Universität Passau und Universität der Bundeswehr, „Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitäts-umständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz. Schlussbericht,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), München, 2017, DOI: 10.2314/GBV:1011140942.
- [45] Hansestadt Hamburg, „Allgemeine Kraftfahrzeugbestimmungen der Freien und Hansestadt Hamburg vom 1.8.2014 (zuletzt geändert am 1.08.2020),“ 2020. Verfügbar: http://daten.transparenz.hamburg.de/Dataport.HmbTG.ZS.Webservice.GetRessource100/GetRessource100.svc/931600d2-36aa-422c-a24d-f0af27bdcf42/Upload__C_50 [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [46] H. Flämig und K. Rosenberger, „Enhancing the potential for battery electric vehicle by identifying behaviorally homogenous groups in commercial traffic,“ *Urban Freight Transportation Systems*, 2019, ISBN: 9780128173626. DOI: 10.1016/B978-0-12-817362-6.00014-8.
- [47] M. Vogel, „Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Online-Befragung unter Expertinnen und Experten, (zukünftigen) Anwenderinnen und Anwendern sowie Dienstleistungsunternehmen im Kontext gewerblich zugelassener Elektrofahrzeuge in allen Branchen,“ 2015.
- [48] J. Betz, M. Hann, B. Jäger und M. Lienkamp, „Evaluation of the Potential of Integrating Battery Electric Vehicles into Commercial Companies on the Basis of Fleet Test Data,“ in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, ISBN: 978-1-5090-5933-1. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108289.
- [49] T. Gnann, M. Haag, P. Plötz und M. Wietschel, „Market potential for electric vehicles in the German commercial passenger transport sector,“ *World Electric Vehicle Journal*, 2013, DOI: 10.3390/wevj6040976.

- [50] M. A. Delucchi und T. E. Lipman, „An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2001, DOI: 10.1016/S1361-9209(00)00031-6.
- [51] A. Chakraborty, D. Buch und K. Tal, *UC Davis Research Reports Title Cost of Plug-in Electric Vehicle Ownership: The Cost of Transitioning to Five Million Plug-In Vehicles in California Publication Date Data Availability*, 2021, ISBN: 0000000178433. DOI: 10.7922/G257199D.
- [52] G. Wu, A. Inderbitzin und C. Bening, „Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments,“ *Energy Policy*, 2015, ISBN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.02.004.
- [53] F. Hacker, R. von Waldenfels und M. Mottschall, „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen,“ öko-Institut e. V., Berlin, 2015. Verfügbar: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [54] P. Plötz, T. Gnann, S. Ullrich, M. Haendel, J. Globisch, E. Dütschke, M. Wietschel und M. Held, „Elektromobilität in gewerblichen Flotten,“ 2014. Verfügbar: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2014/Get_eReady.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [55] M. Wermuth, C. Neef, R. Wirth, I. Hanitz und H. Löhner, „Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010) – Ergebnisse im Überblick,“ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2012.
- [56] The Mobility House GmbH, „Welche Reichweite hat mein E-Auto und wie lange dauert das Aufladen?,“ 2021. Verfügbar: https://www.mobilityhouse.com/de_de/ratgeber/ladezeitenuebersicht-fuer-elektroautos [aufgerufen am 25. 08. 2021].
- [57] T. Knahl und C. Sommer, „Einsatzpotenziale für Elektrofahrzeuge in der Hamburger Wirtschaft: Ergebnisse einer Unternehmensbefragung und Handlungsempfehlungen,“ Handelskammer Hamburg, 2013.
- [58] M. Wietschel, „REM 2030 Fahrprofile,“ 2021. Verfügbar: <https://www.rem2030.de/rem2030-de/REM-2030-Fahrprofile.php> [aufgerufen am 25. 08. 2021].
- [59] A. Schulz, „Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb,“ Diss., Technische Universität Berlin, 2015, DOI: 10.14279/depositonce-4515.
- [60] W. Feng und M. A. Figliozzi, „Conventional vs Electric Commercial Vehicle Fleets: A Case Study of Economic and Technological Factors Affecting the Competitiveness of Electric Commercial Vehicles in the USA,“ *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.141.
- [61] BloombergNEF, „Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh,“ 2020. Verfügbar: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/> [aufgerufen am 25. 08. 2021].
- [62] A. Desreuveaux, E. Hittinger, A. Bouscayrol, E. Castex und G. M. Sirbu, „Techno-economic comparison of total cost of ownership of electric and diesel vehicles,“ *IEEE Access*, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033500.

- [63] avicenne ENERGY, „European Union and UK Automotive ICE vs EV Total Cost of Ownership,“ Nickel INSTITUTE, 2021. Verfügbar: <https://nickelinstitute.org/media/8d9058c08d2bcf2/avicenne-study-tco-eu-and-uk-automotive.pdf> [aufgerufen am 26.07.2023].
- [64] Element Energy Limited, „Electric Cars in Germany: Calculating the Total Cost of Ownership for Consumers,“ 2021. Verfügbar: https://www.vzbv.de/sites/default/files/2021-08/Germany%20TCO%20Report_Final%20Report.pdf [aufgerufen am 26.07.2023].
- [65] P. Suttakul, W. Wongsapai, T. Fongsamootr, Y. Mona und K. Poolsawat, „Total cost of ownership of internal combustion engine and electric vehicles: A real-world comparison for the case of Thailand,“ *Energy Reports*, 2022, DOI: 10.1016/j.egy.2022.05.213.
- [66] J. Wetterhahn, „Total cost of ownership: How electric vehicles and ICE vehicles compare,“ LeasePlan Corporation N.V., 2022. Verfügbar: <https://www.leaseplan.com/en-ix/blog/tco/ownership-cost-ev-ice/> [aufgerufen am 26.07.2023].
- [67] F Klausmann, F Kötter und F Rothfuss. „Softwaregestützte Potentialanalyse für die Integration von Elektrofahrzeugen im Fuhrpark der Stadtverwaltung Ludwigsburg,“ in: *Schritte in die künftige Mobilität: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Hrsg. von H. Proff, W. Pascha, J. Schönharting und D. Schramm. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-8349-4308-8. DOI: 10.1007/978-3-8349-4308-8_23.
- [68] Statistisches Bundesamt, „Klassifikation der Wirtschaftszweige - Mit Erleuterungen,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2008. Verfügbar: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/Downloads/klassifikation-wz-2008-3100100089004-aktuell.pdf?__blob=publicationFile [aufgerufen am 26.07.2023].
- [69] J. Bischoff und M. Maciejewski, „Agent-based simulation of electric taxicab fleets,“ *Transportation Research Procedia*, 2014, DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.015.
- [70] M. Hann, J. Betz und C. Frank, „VEM - Virtuelle Elektromobilität im Taxi- und Gewerbe: Abschlussbericht,“ 2016, DOI: 10.2314/GBV:871992922.
- [71] S. A. Funke und T. J. Burgert, „Electrification potential of a taxicab fleet,“ 2017, ISBN: 9781538613177. DOI: 10.1109/VPPC.2017.8331044.
- [72] C. Tenkhoff, Braune Oliver und Wilhelm Silke, „Ergebnisbericht der Modellregionen Elektromobilität 2009 - 2011,“ 2012. Verfügbar: <https://digital.zlb.de/viewer/fulltext/15850202/1/> [aufgerufen am 26.07.2023].
- [73] H. Hempel, K. Kölling, T. Haußen, M. Mauch, U. Adler, D. Kegler, M. Krause und C. Sarembe, „Smart Distribution Logistik: Abschlussbericht,“ 2021.
- [74] M. Wietschel, E. Dütschke, S. Funke, A. Peters, P. Plötz, U. Schneider, F. Isi, A. Roser und J. Globisch, „Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten Early Adoptern Endbericht,“ 2012, ISBN: 7216809254.
- [75] W. Aichinger, „Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr,“ 2014.
- [76] Volkswagen AG, „E-Laden von Flotten. Ein Kompendium für den Aufbau einer E-Ladeinfrastruktur in Unternehmen,“ 2018.
- [77] C. Jeß, „Ladesäulen vor Restaurants und Supermärkten: Aldi, Lidl, Kaufland, Ikea, McDonald's: Hier können Sie beim Einkaufen oder Essen Ihr E-Auto aufladen,“ 2021. Verfügbar: <https://www.autobild.de/artikel/ladesaeulen-vor-restaurants-und-supermaerkten-aldi-lidl-kaufland-ikea-mcdonald-s-930292.html> [aufgerufen am 15.09.2021].

- [78] Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz, „Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung (Niederspannungsanschlussverordnung - NAV),“ 2019.
- [79] T. Krallmann, M. Doering, M. Stess, T. Graen und M. Nolting, „Multi-objective optimization of charging infrastructure to improve suitability of commercial drivers for electric vehicles using real travel data,“ *2018 IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems, EAIS 2018*, 2018, ISBN: 9781538613764. DOI: 10.1109/EAIS.2018.8397185.
- [80] K. Nesbitt und D. Sperling, „Myths regarding alternative fuel vehicle demand by light-duty vehicle fleets,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 3.4, 1998, DOI: 10.1016/S1361-9209(98)00006-6.
- [81] J. Betz, L. Walther und M. Lienkamp, „Analysis of the charging infrastructure for battery electric vehicles in commercial companies,“ in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2017, ISBN: 9781509048045. DOI: 10.1109/IVS.2017.7995945.
- [82] L. Minnich, J. Wiepking und F. Hacker, „Gewerbliche Elektromobilität für alle: Zwischenergebnisse und Handlungsempfehlungen aus dem Projekt ePowered Fleets Hamburg,“ 2016.
- [83] J. Yang, J. Dong, Z. Lin und L. Hu, „Predicting market potential and environmental benefits of deploying electric taxis in Nanjing, China,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.037.
- [84] S. A. Funke und T. Burgert, „Can charging infrastructure used only by electric taxis be profitable? A case study from Karlsruhe, Germany,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, DOI: 10.1109/TVT.2020.2973597.
- [85] L. Adenaw und M. Lienkamp, „A Model for the Data-based Analysis and Design of Urban Public Charging Infrastructure,“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020, DOI: 10.1109/EVER48776.2020.9243147.
- [86] R. Pagany, L. Ramirez Camargo und W. Dorner, „A review of spatial localization methodologies for the electric vehicle charging infrastructure,“ *International Journal of Sustainable Transportation*, 2019, DOI: 10.1080/15568318.2018.1481243.
- [87] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita und P. Mahanta, „Review of recent trends in charging infrastructure planning for electric vehicles,“ *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2018, DOI: 10.1002/wene.306.
- [88] Y. Dashora, J. W. Barnes, R. S. Pillai, T. E. Combs, M. Hilliard und M. S. Chinthavali, „The PHEV charging infrastructure planning (PCIP) problem,“ *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2010, DOI: 10.2202/1553-779X.2482.
- [89] W. Tu, Q. Li, Z. Fang, S. lung Shaw, B. Zhou und X. Chang, „Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial-temporal demand coverage approach,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, DOI: 10.1016/j.trc.2015.10.004.
- [90] L. Zeng, T. Krallmann, A. Fiege, M. Stess, T. Graen und M. Nolting, „Optimization of future charging infrastructure for commercial electric vehicles using a multi-objective genetic algorithm and real travel data,“ 2020, ISBN: 0123456789. DOI: 10.1007/s12530-019-09295-4.

- [91] H. Büchter und S. Naumann, „A Hybrid Planning Method for Charging Infrastructure for Electrically Driven Buses in Public Transportation,“ in *Intelligent Transport Systems and Travel Behaviour*, 2017, ISBN: 978-3-319-43991-4. DOI: 10.1007/978-3-319-43991-4_15.
- [92] SWM Infrastruktur GmbH, „Preisblatt Netzanschlüsse,“ SWM Infrastruktur GmbH & Co. KG, 2019. Verfügbar: <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzanschluss/preise> [aufgerufen am 21.02.2020].
- [93] DIN VDE 0100-722:2019-06, „Errichten von Niederspannungsanlagen,“ 2019.
- [94] F. Greis, „So wenig Strom brauchen Elektroautos,“ 2021. Verfügbar: <https://www.golem.de/news/testprojekt-in-tiefgarage-so-wenig-strom-brauchen-elektroautos-2104-155934.html> [aufgerufen am 18.08.2021].
- [95] V. Chocteau, D. Drake, P. R. Kleindorfer, R. J. Orsato und A. Roset, „Sustainable fleet operations: The collaborative adoption of electric vehicles,“ INSEAD Faculty Research Working Paper, 2011.
- [96] Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2020,“ 2021. Verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf?__blob=publicationFile{\&}v=8.
- [97] SWM Infrastruktur GmbH, „Preisblatt 1 - Stromnetzentgelte für die Entnahme bei konventionellen Messeinrichtungen mit Lastgangmessung oder bei intelligenten Messsystemen mit einem Jahresverbrauch von > 100.000 kWh im Jahresleistungspreissystem,“ 2020. Verfügbar: <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzzugang/netznutzungsentgelte.html>.
- [98] Ernst & Young GmbH, „Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler,“ 2013. Verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler.pdf?__blob=publicationFile{\&}v=5 [aufgerufen am 26.07.2023].
- [99] Bundesministerium für Justiz, „§12 Standardisierte Lastprofile; Zählerstandsgangmessung,“ *Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung - StromNZV)*, 2005.
- [100] Bundesministerium für Justiz, „§ 2 Begriffsbestimmungen,“ *Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung - StromNZV)*, 2005.
- [101] Europäische Kommission, „EMPFEHLUNG DER KOMMISSION vom 9. März 2012 zu Vorbereitungen für die Einführung intelligenter Messsysteme (2012/148/EU),“ *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2012. Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:073:0009:0022:DE:PDF> [aufgerufen am 26.07.2023].
- [102] Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, „Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen (Messstellenbetriebsgesetz - MsbG),“ 2016.
- [103] Detzler und Sarah, „Lademanagement für Elektrofahrzeuge,“ Diss., 2016, DOI: 10.5445/KSP/1000057827.
- [104] MVV Energie AG, „Intelligentes Lademanagement: Lastspitzen vermeiden, bedarfsgerecht laden,“ 2021. Verfügbar: <https://partner.mvv.de/blog/intelligentes-lademanagement-lastspitzen-vermeiden-bedarfsgerecht-laden> [aufgerufen am 27.02.2021].

- [105] C. S. Ioakimidis, D. Thomas, P. Rycerski und K. N. Genikomsakis, „Peak shaving and valley filling of power consumption profile in non-residential buildings using an electric vehicle parking lot,“ *Energy*, 2018, DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.128.
- [106] H. J. Kim, J. Lee und G. L. Park, „Constraint-based charging scheduler design for electric vehicles,“ *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2012, ISBN: 9783642284922. DOI: 10.1007/978-3-642-28493-9_29.
- [107] D. Johnsen, D. Strommenger, H. Schuster, M. Lehmann, P. Laschet, A. Weber, S. Runge, T. Zierul, J. Stute, M. Kühnbach, S. Preuß, A. Scherrer, J. Ostermann, D. Stetter, T. Kern, M. Dreibusch und F. Kellerer, „Gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen über Preisanzreize: Anwendungsbeispiele und Handlungsbedarf. Kurzstudie,“ 2020.
- [108] M. Schücking, P. Jochem, W. Fichtner, O. Wollersheim und K. Stella, „Charging strategies for economic operations of electric vehicles in commercial applications,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.032.
- [109] B. Lunz, Z. Yan, J. B. Gerschler und D. U. Sauer, „Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs,“ *Energy Policy*, 2012, DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.017.
- [110] T. Erdelic, T. Carić und E. Lalla-Ruiz, „A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches,“ *Journal of Advanced Transportation*, 2019, DOI: 10.1155/2019/5075671.
- [111] B. Brendle, „Eine Bewertung des CO₂-Einsparpotentials durch Synergien zwischen Elektromobilität und Gebäudeenergiesystemen,“ Diss., Technische Universität München, 2016.
- [112] J. Maasmann, S. Bocker, F. Rettberg, C. Wietfeld und C. Rehtanz, „Renewable energies in smart factories with electric vehicle fleets,“ *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2014, ISBN: 9781479965571. DOI: 10.1109/UPEC.2014.6934778.
- [113] K. Mets, R. D’Hulst und C. Devellder, „Comparison of Intelligent charging algorithms for electric vehicles to reduce peak load and demand variability in a distribution grid,“ *Journal of Communications and Networks*, 2012, DOI: 10.1109/JCN.2012.00033.
- [114] Q. Dang, „Electric Vehicle (EV) Charging Management and Relieve Impacts in Grids,“ in *2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2018*, 2018, ISBN: 9781538667057. DOI: 10.1109/PEDG.2018.8447802.
- [115] A. Henning, „INTELLAN – intelligente Ladeinfrastruktur mit Netzintegration: Schlussbericht,“ 2016. Verfügbar: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/2016-01-14%20Schlussbericht_INTELLAN.pdf [aufgerufen am 26.07.2023].
- [116] H. Vennegeerts, J. Tran, F. Rudolph und P. Pfeifer, „Metastudie Forschungsüberblick Netzintegration Elektromobilität Dezember 2018,“ 2018.
- [117] J. Linssen, A. Schulz, S. Mischinger, H. Maas, C. Günther, O. Weinmann, E. Abbasi, S. Bickert, M. Danzer, W. Hennings, W. Lindwedel, S. Marker, V. Schindler, A. Schmidt, P. Schmitz, B. Schott, K. Strunz und P. Waldowski, „NET-ELAN - Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen: Endbericht,“ 2012, ISBN: 9783893368112.

- [118] B. C. Liu, M. Ieee, K. T. Chau, F. Ieee, D. Wu und S. M. Ieee, „Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Technologies,“ 2013, DOI: 10.1109/JPROC.2013.2271951.
- [119] M. Brylawski, C. Burns, K. Chan-Lizardo, B. Cohen, A. Demaria, M. Gately, L. Hansen, N. Harvey, S. Johns, A. B. Lovins, C. Low, J. Ponce, C. Riley, L. Schewel, M. Simpson, K. Wang, L. Wells und J. Wilson, „Smart Garage Charrette Report,“ *October*, 2008. Verfügbar: <https://rmi.org/insight/smart-garage-charrette-report/> [aufgerufen am 26.07.2023].
- [120] ISO 15118, „Road vehicles — Vehicle-to-Grid Communication Interface,“ 2014.
- [121] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, „ROADMAP ZUR IMPLEMENTIERUNG DER ISO 15118 - STANDARDISIERTE KOMMUNIKATION ZWISCHEN FAHRZEUG UND LADEPUNKT,“ 2020.
- [122] Open Charge Alliance, „Open Charge Point Protocol 2.0,“ 2018. Verfügbar: <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-201/> [aufgerufen am 20.08.2021].
- [123] G. Arnold, R. Brandl, T. Degner, N. Gerhardt, M. Landau, D. Nestle, M. Portula, A. Scheidler, R. Schwinn, K. Baumbusch, A. Dörschlag, T. Eberhardt, V. Wacker, A. Weseemann, O. Führer, T. Leifert, G. Bärwaldt, H. Haupt, M. Kammerlocher und H. Nannen, „Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen - INEES: Abschlussbericht,“ 2015. Verfügbar: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/INEES_Abschlussbericht.pdf [aufgerufen am 26.07.2023].
- [124] J. García-Villalobos, I. Zamora, J. I. San Martín, F. J. Asensio und V. Aperribay, „Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.040.
- [125] The Mobility House GmbH, „ChargePilot im Detail,“ 2019.
- [126] O. Pronobis, M. Sc, D. Cao, M. Sc, P. M. Kurrat und T. U. Braunschweig, „Assessment of Static Charging Management Methods,“ in *International ETG-Congress 2019; ETG Symposium*, 2019, ISBN: 9783800749546.
- [127] K. Kraatz und A. Zahedi, „Energy management and control strategies of electric vehicle integrated into the smart grid,“ *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference: Challenges for Future Grids, AUPEC 2015*, 2015, ISBN: 9781479987252. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324792.
- [128] A. Schuller, J. Ilg und C. Van Dinther, „Benchmarking electric vehicle charging control strategies,“ *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012*, 2012, ISBN: 9781457721588. DOI: 10.1109/ISGT.2012.6175732.
- [129] A. S. Al-Ogaili, T. J. Tengku Hashim, N. A. Rahmat, A. K. Ramasamy, M. B. Marsadek, M. Faisal und M. A. Hannan, „Review on scheduling, clustering, and forecasting strategies for controlling electric vehicle charging: Challenges and recommendations,“ *IEEE Access*, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939595.
- [130] M. Amjad, A. Ahmad, M. H. Rehmani und T. Umer, „A review of EVs charging: From the perspective of energy optimization, optimization approaches, and charging techniques,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, DOI: 10.1016/j.trd.2018.03.006.

- [131] A. Amin, W. U. K. Tareen, M. Usman, H. Ali, I. Bari, B. Horan, S. Mekhilef, M. Asif, S. Ahmed und A. Mahmood, „A review of optimal charging strategy for electric vehicles under dynamic pricing schemes in the distribution charging network,“ *Sustainability (Switzerland)*, 2020, DOI: 10.3390/su122310160.
- [132] J. Hu, H. Morais, T. Sousa und M. Lind, „Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.014.
- [133] N. Bodenschatz und A. Berl, „Viability and Optimality of Electric Vehicle Fleet Schedules,“ in *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 - Proceedings*, 2019, ISBN: 9781728104492. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8779983.
- [134] O. Sassi und A. Oulamara, „Electric vehicle scheduling and optimal charging problem: complexity, exact and heuristic approaches,“ *International Journal of Production Research*, 2017, DOI: 10.1080/00207543.2016.1192695.
- [135] N. Bodenschatz, M. Eider und A. Berl, „Mixed-Integer-Linear-Programming Model for the Charging Scheduling of Electric Vehicle Fleets,“ *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2020 - Proceedings*, 2020, ISBN: 9781728167602. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208875.
- [136] M. S. Mahmoud und F. M. AL-Sunni, *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*, 2015, ISBN: 978-3-319-16909-5.
- [137] J. Mummel, S. Diekmann, M. Kurrat und B. Engel, „IKT-Anbindung für gesteuertes Laden unter Berücksichtigung von Last- und Erzeugungskapazitäten,“ in *VDE Kongress*, 2014, ISBN: 978-3-8007-3641-6.
- [138] J. M. Framinan, R. Leisten und R. Ruiz García, *Manufacturing Scheduling Systems*, 2014, ISBN: 9781447162711. DOI: 10.1007/978-1-4471-6272-8.
- [139] P. Mandl, *Grundkurs Betriebssysteme. Architekturen, Betriebsmittelverwaltung, Synchronisation, Prozesskommunikation, Virtualisierung*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-658-06218-7. DOI: 10.1007/978-3-658-06218-7.
- [140] O. Pronobis und M. Kurrat, „Grid Supported Charging Management with Uncertainty Analysis,“ *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, 2018.
- [141] L. Zhao, S. Prousch, M. Hübner und A. Moser, „Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids,“ *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*, 2010, ISBN: 9781424465477. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484386.
- [142] S. M. Mousavi Agah und A. Abbasi, „The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on residential distribution transformers,“ *2012 2nd Iranian Conference on Smart Grids, ICSG 2012*, 2012, ISBN: 9781467313995.
- [143] S. W. Hadley und A. Tsvetkova, „Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation,“ *Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Energy Use*, 2011, ISBN: 9781614706335.
- [144] A. Ottensmann, J. Haubrock und D. Westermann, „Forecast of the aggregated charging power of electric vehicles in commercial fleets,“ *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2014*, 2015, ISBN: 9781479960750. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056141.

- [145] J. Betz, T. Scholz und M. Lienkamp, „Evaluation of the potential of integrating battery electric vehicles into the energy structure of a commercial company,“ in *2016 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2016*, 2016, ISBN: 9781509051113. DOI: 10.1109/SEGE.2016.7589541.
- [146] J. Betz und M. Lienkamp, „Approach for the development of a method for the integration of battery electric vehicles in commercial companies, including intelligent management systems,“ *Automotive and Engine Technology*, 2016, DOI: 10.1007/s41104-016-0008-y.
- [147] M. Wittmann, J. Lohrer, J. Betz, B. Jager, M. Kugler, M. Kloppel, A. Waclaw, M. Hann und M. Lienkamp, „A holistic framework for acquisition, processing and evaluation of vehicle fleet test data,“ in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, ISBN: 978-1-5386-1526-3. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317637.
- [148] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, „WATE - Webba-siertes Analyse-Tool Elektromobilität,“ 2017. [Aufgerufen am 18. 10. 2021].
- [149] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, „M^e - München elektrisiert,“ 2018. Verfügbar: <https://www.mos.ed.tum.de/ftm/forschungsfelder/smartermobilitaet/muenchen-elektrisiert/> [aufgerufen am 18. 10. 2021].
- [150] L. Adenaw, J. Kreibich, M. Wittmann, L. Merkle, A. Waclaw und M. Lienkamp, „MAGIS - A Geographic Information System for Mobility Data Analysis,“ in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, 2019, ISBN: 9781538670248. DOI: 10.1109/ITSC.2019.8917054.
- [151] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., „ADAC Autokatalog,“ 2021. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/> [aufgerufen am 18. 10. 2021].
- [152] A. Waclaw, J. Betz und M. Lienkamp, „Techno-Economical Implementation of Holistic Electromobility Solutions in Commercial Companies,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2019, ISBN: 978-1-7281-3704-9. DOI: 10.1109/EVER.2019.8813533.
- [153] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An overview of parameter and cost for battery electric vehicles,“ *World Electric Vehicle Journal*, 2021, DOI: 10.3390/wevj12010021.
- [154] J. Ritzer, „Methoden zur Messung der Bewegungszustände von Fahrzeugen mit mobi-len Endgeräten,“ Diss., Technische Universität München, 2015.
- [155] J. M. Lohrer, „Datenbasierte Methoden zur Prädiktion des Trips und des Fahrprofils,“ Diss., Technische Universität München, 2018.
- [156] H. Meier, C. Fünfgeld, T. Adam und B. Schieferdecker, „Repräsentative VDEW-Lastpro-file,“ Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus, 1999, DOI: 10.1109/CSE.2010.49.
- [157] J. Globisch und E. Dütschke, „Anwendersicht auf Elektromobilität in gewerblichen Flot-ten,“ 2013. Verfügbar: http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE_Publikationen_NEU_2013/Publikationen_Begleitforschung/Anwendersicht_auf_Elektromobilitaet_in_Gewerblichen_Flot.pdf [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [158] S. Grubwinkler, „Fahrprofilbasierte Energieverbrauchsprädiktion für vernetzte Elektro-fahrzeuge,“ Diss., Technische Universität München, 2016.
- [159] D. W. Gao, C. Mi und A. Emadi, „Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehic-les,“ *Proceedings of the IEEE*, 2007, DOI: 10.1109/JPROC.2006.890127.

- [160] M. K. Tschochner, „Comparative Assessment of Vehicle Powertrain Concepts in the Early Development Phase,“ Diss., 2018, ISBN: 9781538605141.
- [161] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik und K. Wipke, „ADVISOR: A systems analysis tool for advanced vehicle modeling,“ *Journal of Power Sources*, 2002, DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00189-1.
- [162] K.-L. Haken, *GRUNDLAGEN DER KRAFTFAHRZEUGTECHNIK*, 4., aktual, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015, ISBN: 978-3-446-44216-0. DOI: 10.3139/9783446441057.
- [163] V. Klassen, M. Leder und J. Hossfeld, „Klimatisierung im Elektrofahrzeug,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2011, DOI: 10.1365/s35148-011-0029-9.
- [164] T. Tanizawa, T. Suzumiya und K. Ikeda, „Cloud-connected battery management system supporting e-mobility,“ *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, 2015.
- [165] B. Jäger und M. Lienkamp, „Smartphone-based Energy Consumption Simulation for Electric Vehicles,“ *COFAT 2014*, 2014.
- [166] B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies, *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2011, ISBN: 978-3834808219.
- [167] B. Breuer und K. H. Bill, *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*, 4., überar, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, ISBN: 978-3-8348-1796-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-2225-3.
- [168] W. Liu, H. Qi, X. Liu und Y. Wang, „Evaluation of regenerative braking based on single-pedal control for electric vehicles,“ *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, DOI: 10.1007/s11465-019-0546-x.
- [169] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*, 2010, ISBN: 9783211891902. DOI: 10.1007/978-3-211-89191-9.
- [170] B. J. Varocky, „Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car,“ 2011. Verfügbar: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12673.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [171] S. Van Sterkenburg, E. Rietveld, F. Rieck, B. Veenhuizen und H. Bosma, „Analysis of regenerative braking efficiency — A case study of two electric vehicles operating in the Rotterdam area,“ 2011, ISBN: 1938-8756. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043109.
- [172] V. Totev und V. Gueorgiev, „Efficiency of Regenerative Braking in Electric Vehicles,“ *2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA)*, 2020.
- [173] R. Abousleiman und O. Rawashdeh, „Tabu search based solution to the electric vehicle energy efficient routing problem,“ *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics - From Technology to Business and Public Policy, ITEC 2014*, 2014, ISBN: 9781479922628. DOI: 10.1109/ITEC.2014.6861787.
- [174] T. Jurik, A. Cela, R. Hamouche, R. Natowicz, A. Reama, S. I. Niculescu und J. Julien, „Energy optimal real-time navigation system,“ *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2014, DOI: 10.1109/MITS.2014.2324000.
- [175] D. Allendorf, N. Jenter, N. Nett und L. Eckstein, „Wirkungsgradbasierte Konzeptauslegung elektrifizierter Antriebsstränge,“ *ATZextra*, 2015, DOI: 10.1007/s35778-015-0037-6.

- [176] O. Sundström, „Optimal control and design of hybrid-electric vehicles,“ 2009.
- [177] T. Pesce, „Ein Werkzeug zur Spezifikation von effizienten Antriebstopologien für Elektrofahrzeuge,“ Diss., Technische Universität München, 2014.
- [178] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven, *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 2011, ISBN: 978-3-8348-1412-8. DOI: 10.1007/978-3-8348-9910-1.
- [179] F. Qi, A. Stippich, S. Koschik und R. W. De Doncker, „Model predictive overload control of induction motors,“ in *Proceedings - 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2015*, 2016, ISBN: 9781479979417. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409183.
- [180] P. Guttenberg, „Der Autarke Hybrid am Prüfstand – Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse,“ Dissertation, Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik – Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München, München, 2004.
- [181] R. Farrington und J. Rugh, „Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range: Preprint,“ *Conference: Earth Technologies Forum, Washington, DC (US), 10/31/2000; Other Information: PBD: 22 Sep 2000*, 2000. Verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28960.pdf> [aufgerufen am 26. 07. 2023].
- [182] F. Schüppel, „Optimierung des Heiz- und Klimakonzepts zur Reduktion der Wärme- und Kälteleistung im Fahrzeug,“ Diss., Technischen Universität Berlin, 2015, ISBN: 9780415475976.
- [183] The International Independent Aftermarket Association, „Hochvolt-PTC-Heizer,“ 2021. Verfügbar: <https://www.mein-autolexikon.de/e-mobilitaet/hochvolt-ptc-heizer.pdf> [aufgerufen am 29. 10. 2021].
- [184] M. Herrnberger, „Kartengestützte Flottensimulation einer elektrifizierten Fahrzeugflotte,“ Diss., Technische Universität München, 2016.
- [185] H. Großmann, *Pkw-Klimatisierung: Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*, 1. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-642-05494-5. DOI: 10.1007/978-3-642-05495-2.
- [186] M. Lienkamp, *Elektromobilität: Hype oder Revolution?*, 1. Aufl., München, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-28548-6. DOI: 10.1007/978-3-642-28549-3.
- [187] D. Pevec, J. Babic, A. Carvalho, Y. Ghiassi-Farrokhfal, W. Ketter und V. Podobnik, „A survey-based assessment of how existing and potential electric vehicle owners perceive range anxiety,“ *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122779.
- [188] Q. Yuan, W. Hao, H. Su, G. Bing, X. Gui und A. Safikhani, „Investigation on Range Anxiety and Safety Buffer of Battery Electric Vehicle Drivers,“ *Journal of Advanced Transportation*, 2018, DOI: 10.1155/2018/8301209.
- [189] P. Fieltsch, H. Flämig und K. Rosenberger, „Analysis of charging behavior when using battery electric vehicles in commercial transport,“ in *Transportation Research Procedia*, 2020, DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.179.
- [190] C. Corchero, S. González-Villafranca und M. Sanmartí, „European electric vehicle fleet: Driving and charging data analysis,“ in *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2014*, 2015, ISBN: 9781479960750. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056144.

- [191] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013, ISBN: 9783642306525. DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2.
- [192] B. Tar und A. Fayed, „An overview of the fundamentals of battery chargers,“ *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2016, ISBN: 9781509009169. DOI: 10.1109/MWSCAS.2016.7870048.
- [193] A. Schuster, „Batterie-bzw. Wasserstospeicher bei elektrischen Fahrzeugen,“ Diss., Technische Universität Wien, Wien, 2008.
- [194] M. T. G. Hughes, „Parameter estimation,“ in *Godfrey K., Jones P. (eds) Signal Processing for Control. Lecture Notes in Control and Information Sciences* Springer, Berlin, Heidelberg, 1986, ISBN: 978-3-540-16511-8. DOI: 10.1007/BFb0008191.
- [195] J. Kallrath, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*, 2013, ISBN: 978-3-658-00689-1.
- [196] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest und C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3. Aufl., The MIT Press, 2009, ISBN: 9780262033848.
- [197] D. Albrecht, R. Diederichs, C. Hentscher, R. Meurer, A. Pilz, C.-U. Pohlmann, S. Reinke, P. Riegel, P. Stamm, J. Unverfehrt, D. Wahler und N. Wikowsky, „Leitfaden und Best Practice aus der BME-Fachgruppe - Fuhrparkmanagement,“ Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V, 2011.
- [198] A. Waclaw, T. Aloise und M. Lienkamp, „Charging Infrastructure Design for Commercial Company Sites with Battery Electric Vehicles: A Case Study of a Bavarian Bakery,“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020, ISBN: 978-1-7281-5642-2. DOI: 10.1109/EVER48776.2020.9242989.
- [199] Z. Liu, J. Song, J. Kubal, N. Susarla, K. W. Knehr, E. Islam, P. Nelson und S. Ahmed, „Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles,“ *Energy Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112564.
- [200] A. Waclaw, F. Gotzler, J. Betz und M. Lienkamp, „Techno-Economic Analysis of State-of-the-Art Charging Infrastructure Concepts for Typical Commercial Battery Electric Vehicle Fleets,“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, ISBN: 978-1-7281-4150-3. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294197.
- [201] Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, „Elektro-Dienstwagen: Aufladen im Betrieb und zuhause,“ 2021. Verfügbar: https://www.haufe.de/personal/entgelt/elektro-dienstwagen-privates-aufladen_78_426076.html [aufgerufen am 06. 10. 2021].
- [202] SWM Versorgungs GmbH, „M/Strom für Großkunden,“ 2021. Verfügbar: <https://www.swm.de/geschaeftskunden/strom-grosskunden> [aufgerufen am 22. 01. 2021].
- [203] Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2019,“ Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2019.
- [204] SWM Infrastruktur GmbH, „Preisblatt 2 - Stromnetzentgelte für die Entnahme bei konventionellen Messeinrichtungen ohne Lastgangmessung oder bei modernen Messeinrichtungen oder mit einem Jahresverbrauch von maximal 100.000 kWh bei intelligenten Messsystemen,“ 2020. Verfügbar: <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzzugang/netznutzungsentgelte.html> [aufgerufen am 22. 01. 2021].

- [205] SWM Infrastruktur GmbH, „Preisblatt 3 Stromnetzentgelte für die Entnahme bei konventionellen Messeinrichtungen mit Lastgangmessung oder bei intelligenten Messsystemen mit einem Jahresverbrauch > 100.000 kWh im Monatsleistungspreissystem,“ 2020. Verfügbar: <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzzugang/netznutzungsentgelte.html> [aufgerufen am 22.01.2021].
- [206] S. Vitale, „Wo Schnellladen wie viel kostet und warum,“ 2022. Verfügbar: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/ladestrom-preise-steigen-elektroauto-fahren-teurer/> [aufgerufen am 15.08.2022].
- [207] EV Database, „EV Database,“ 2021. Verfügbar: <https://ev-database.de> [aufgerufen am 28.12.2020].
- [208] T. Arens, F. Hettlich, C. Karpfinger, U. Kockelkorn, K. Lichtenegger und H. Stachel, *Mathematik*, 2. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-8274-1758-9.
- [209] VBEW - Verband der Bayerischen Elektrizitätswirtschaft e. V., „Ausarbeitung zum Netzanschluss für Neu- und Bestandsanschlüsse (Ausgabe 05.2004),“ 2004. Verfügbar: https://www.n-ergie-netz.de/public/remotemedien/media/mdn/produkte_und_dienstleistungen/netzanschluss/gesetze/Netzanschluss_Neu_und_Bestand.pdf [aufgerufen am 26.07.2023].
- [210] B. Schlomann und H. Kleeberger, „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013,“ 2015, ISBN: 978-3-8396-0691-9.
- [211] Q-Park Operations Germany GmbH & Co. KG, „Energie-Management: Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit im Einklang,“ 2020. Verfügbar: <https://parkexperten.de/2020/04/23/energie-management-umweltschutz-und-wirtschaftlichkeit-im-einklang/> [aufgerufen am 17.11.2021].

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [153] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An overview of parameter and cost for battery electric vehicles,“ *World Electric Vehicle Journal*, 2021, DOI: 10.3390/wevj12010021.

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [147] M. Wittmann, J. Lohrer, J. Betz, B. Jager, M. Kugler, M. Kloppel, A. Waclaw, M. Hann und M. Lienkamp, „A holistic framework for acquisition, processing and evaluation of vehicle fleet test data,“ in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, ISBN: 978-1-5386-1526-3. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317637.
- [150] L. Adenaw, J. Kreibich, M. Wittmann, L. Merkle, A. Waclaw und M. Lienkamp, „MAGIS - A Geographic Information System for Mobility Data Analysis,“ in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, 2019, ISBN: 9781538670248. DOI: 10.1109/ITSC.2019.8917054.
- [152] A. Waclaw, J. Betz und M. Lienkamp, „Techno-Economical Implementation of Holistic Electromobility Solutions in Commercial Companies,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2019, ISBN: 978-1-7281-3704-9. DOI: 10.1109/EVER.2019.8813533.
- [198] A. Waclaw, T. Aloise und M. Lienkamp, „Charging Infrastructure Design for Commercial Company Sites with Battery Electric Vehicles: A Case Study of a Bavarian Bakery,“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020, ISBN: 978-1-7281-5642-2. DOI: 10.1109/EVER48776.2020.9242989.
- [200] A. Waclaw, F. Gotzler, J. Betz und M. Lienkamp, „Techno-Economic Analysis of State-of-the-Art Charging Infrastructure Concepts for Typical Commercial Battery Electric Vehicle Fleets,“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, ISBN: 978-1-7281-4150-3. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294197.

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Konferenzvorträge und -poster, Berichte, etc.; nicht Scopus/Web of Science gelistet

-

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/Web of Science gelistet (peer-reviewed)

-

Dissertationsrelevante Open-Source Software

A. Waclaw. „*Standard Load Profile Generator*,“ 2020. Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/1.-Standard-Load-Profile-Generator>.

A. Waclaw. „*Object Oriented Pandas*,“ 2020. Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/2.-Object-Oriented-Pandas>.

Betreute Studienarbeiten

Folgende studentische Arbeiten entstanden im Rahmen der Dissertation unter der inhaltlichen, fachlichen und wissenschaftlichen Betreuung sowie unter maßgeblicher Anleitung des Autors. Im Folgenden sind die für diese Dissertation relevanten und in Bezug stehenden Bachelor-, Semester- und Masterarbeiten aufgeführt. Vielen Dank geht hier an die Bearbeiter für die umfangreiche Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojekt.

F. Gotzler, „Analyse von Ladeinfrastrukturkonzepten für Gewerbestandorte mit Elektrofahrzeugflotten,“ Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.

F. Forster, „Methode zur Auswahl eines optimierten Batteriespeichers mit PV-Anlage und BEV Batteriespeicher,“ Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.

T. Aloise, „Economic Analysis of the Charging Infrastructure for Battery Electric Vehicles in Commercial Fleets,“ Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2020.

M. Bornschein, „Parametrisierung eines Verbrauchsmodells für Elektrofahrzeuge anhand öffentlicher Verbrauchsdaten,“ Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2019.

G. Ottrubay, „Eine Methode zur Energieverbrauchsberechnung gängiger Elektrofahrzeuge,“ Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.

T. Schreck, „Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials bei einem Umstieg auf ein Elektrofahrzeug,“ Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.

Anhang

- A Fahrzeugklassenxxvii
- B Fahrzeugparameter.....xxix
- C Fahrprofilexxxiii
- D Antriebsstrangwirkungsgradxxxv
- E Standardlastprofilexxxix
- F Ergebnisse..... xli
- G Diskussion.....xliii

A Fahrzeugklassen

Tabelle A.1: Fahrzeugklassen nach [151]

Fahrzeugklasse	Beispiel-Pkw	Beispiel-Nfz
Microwagen	Smart ForTwo	-
Kleinstwagen	Renault Twingo	-
Kleinwagen	Volkswagen Polo	Fiat Qubo Kastenwagen
Untere Mittelklasse	Volkswagen Golf	Volkswagen Caddy Kastenwagen
Mittelklasse	BMW 3er-Reihe	Nissan NV200 Kastenwagen
Obere Mittelklasse	BMW 5er-Reihe	Volkswagen Transporter Kastenwagen
Oberklasse	BMW 7er-Reihe	Volkswagen Crafter Kastenwagen

B Fahrzeugparameter

Tabelle B.1: Fahrzeugunabhängige Parameter des Längsdynamikmodells

Parameter	Wert	Quelle
12-Volt-Bordnetz-Leistung P_{12V}	500 W	[180, S. 26], [48], [181]
Batterie-Ladeabschaltstrom I_{LA}	0,03 C-Rate	[193, S. 84]
Batterie-Ladeschlussspannung U_{LS}	4,2 V	[33, S. 160ff]
Batterie-Nennspannung U_{nom}	3,6 V	[193, S. 84]
Batterie-Ladeumschaltpunkt ζ_{LUP}	80 %	[193, S. 84]
Drehmassenzuschlagsfaktor ϵ_m	1,1	[165]
Erdbeschleunigung g	9,81 $\frac{m}{s^2}$	-
Gewicht des Fahrers m_{per}	80 kg	-
Umrechnungsfaktor λ	50 $\frac{W}{^\circ C}$	[185, S. 79]
Umrechnungsfaktor r_{act}	0,03 $\frac{^\circ C}{s}$	[184, S. 30]
Umrechnungsfaktor r_{inact}	0,01 $\frac{^\circ C}{s}$	[184, S. 30]
Ladewirkungsgrad η_{ch}	90 %	[33, S. 338][S. 38], [186]
Luftdichte ρ_a	1,2 $\frac{kg}{m^3}$	-
Maximale Klimatisierungsleistung $P_{cli,max}$	5 kW	[181][S. 106], [33][S. 35f], [182], [165], [183][S. 44], [117]
Rekuperationswirkungsgrad η_{rec}	80 %	[170, S. 29], [165], [168], [171], [172]
Rollwiderstandsbeiwert f_r	0,01	[165]
Soll-Innenraumtemperatur $T_{int,target}$	20 $^\circ C$	-
Überlastbereich Δt_{olr}	5 min	[179]
Untere Grenze des SOC ζ_{min}	20 %	[189], [190][S. 122], [38]

Tabelle B.2: Weiterführende Informationen zu den BEV der Fahrzeugdatenbank

Nr.	Hersteller	Modellbezeichnung	Baureihe
1	Renault	Kangoo Rapid Z.E. 2-Sitzer	ab 2017
2	ABT	VW e-Caddy Kastenwagen	ab 2019
3	Nissan	e-NV200 Kastenwagen	ab 2018
4	Mercedes-Benz	eVito Kastenwagen lang	ab 2019
5	Opel	Vivaro-e Cargo M Selection 75 kWh	ab 2020
6	StreetScooter	Work Performance	ab 2018
7	Fiat	e-Ducato Kastenwagen L2H2 35 79kWh	ab 2021
8	Volkswagen	eCrafter Kastenwagen Hochdach mittellang	ab 2018
9	Mercedes-Benz	eSprinter Kastenwagen Hochdach 47kWh	ab 2020
10	Smart	Forfour EQ	ab 2020
11	Citroen	C-Zero	ab 2016
12	Volkswagen	e-up!	ab 2020
13	BMW	i3 120 Ah	ab 2018
14	Hyundai	Kona Elektro 64kWh	ab 2018
15	Renault	Zoe Z.E. 50 R110	ab 2020
16	Nissan	Leaf e+ 62kWh	ab 2020
17	Kia	e-Niro 64kWh Edition 7	ab 2020
18	Volkswagen	id.3 Pro S 77kWh	ab 2020
19	Jaguar	i-Pace EV400 S AWD	ab 2020
20	Tesla	Model 3 AWD Long Range	ab 2020
21	Volkswagen	id.4 Pro Performance	ab 2020
22	Audi	e-tron 55 quattro	ab 2019
23	Tesla	Model S Max. Reichweite	ab 2019

Tabelle B.3: Fahrzeugspezifische Parameter der BEV (mit * gekennzeichnete Werte sind gemäß Anhang D berechnet)

Nr.	c_d in -	m_{veh} in kg	A in m^2	C_{batt} in MWh	$P_{em,max}$ in kW	$P_{em,nom}$ in kW	$b_{100km,WLTP}$ in kWh/100km	$b_{100km,EVDB}$ in kWh/100km	η_{dr} in %
1	0,35	1512	2,68	31,0	44	44	18,0	26,6*	72
2	0,35	1711	2,83	34,0	83	83	27,3	32,7*	56
3	0,31	1573	2,74	38,0	80	80	25,9	23,8	70
4	0,32	2184	3,70	35,0	85	70	26,6	32,4*	70
5	0,32	2088	3,70	69,3	100	57	24,4	29,7*	75
6	0,35	1460	4,50	40,0	51	51	25,2	30,7*	63
7	0,31	2680	4,80	73,0	90	90	33,2	40,4*	65
8	0,33	2502	4,88	32,0	100	100	29,6	36,1*	73
9	0,36	2609	4,20	47,0	85	70	34,8	42,4*	61
10	0,35	1200	2,22	16,7	60	41	17,9	20,9	60
11	0,35	1140	2,13	14,5	49	35	17,0	19,3	62
12	0,32	1235	2,07	32,3	61	61	14,5	19,6	63
13	0,29	1345	2,38	37,9	125	75	15,3	19,0	64
14	0,33	1760	2,37	64,0	150	28	14,7	19,1	74
15	0,33	1577	2,27	52,2	80	51	17,2	19,6	68
16	0,29	1705	2,30	56,0	160	90	18,5	20,4	77
17	0,29	1812	2,35	64,0	150	29	15,9	20,3	80
18	0,26	1934	2,36	77,0	150	70	15,9	20,3	80
19	0,29	2208	2,60	84,7	294	172	23,0	26,9	70
20	0,23	1801	2,28	75,0	330	153	16,0	19,3	76
21	0,25	2124	2,50	77,0	150	70	17,2	22,6	75
22	0,27	2555	2,65	86,0	300	158	22,4	27,5	76
23	0,24	2255	2,34	98,4	415	180	19,0	21,8	82

Tabelle B.4: Fahrzeugspezifische Maximalladeleistungen der BEV

Nr.	$P_{ch, BEV, max}$:	Typ 1 in kW	Typ 2 in kW	CHAdeMO in kW	CCS in kW	Supercharger in kW
1		0	4,6	0	0	0
2		0	7,2	0	50	0
3		6,6	0	46	0	0
4		0	7,2	0	0	0
5		0	11	0	100	0
6		0	11	0	0	0
7		0	22	0	50	0
8		0	7,2	0	40	0
9		0	7,2	0	80	0
10		0	22	0	0	0
11		3,6	0	50	0	0
12		0	7,2	0	40	0
13		0	11	0	50	0
14		0	11	0	77	0
15		0	22	0	50	0
16		0	6,6	100	0	0
17		0	10,5	0	100	0
18		0	11	0	125	0
19		0	11	0	100	0
20		0	11	0	250	250
21		0	11	0	125	0
22		0	22	0	150	0
23		0	16,5	0	250	250

C Fahrprofile

Tabelle C.1: Anzahl der Fahrprofile in Abhängigkeit von Einsatzzweck, Fahrzeugart und Fahrzeugklasse

	Kleinswagen	Kleinwagen	Untere Mittelklasse	Mittelklasse	Obere Mittelklasse	Oberklasse	Summe
Fahrzeugart: Nfz							
E1 - Management	0	0	1	0	0	0	1
E2 - Dienstleistung mit Privatnutzung	0	0	13	1	15	17	46
E3 - Dienstleistung ohne Privatnutzung	0	0	33	8	22	6	69
E4 - Gütertransport	0	0	3	0	12	34	49
E5 - Bäckerei	0	0	0	10	5	41	56
E6 - Pflegedienst	0	0	0	0	0	0	0
E7 - Taxi	0	0	0	0	0	0	0
Summe	0	0	50	19	54	98	221
Fahrzeugart: Pkw							
E1 - Management	0	22	3	19	10	0	54
E2 - Dienstleistung mit Privatnutzung	0	0	5	0	0	0	5
E3 - Dienstleistung ohne Privatnutzung	0	0	0	0	0	0	0
E4 - Gütertransport	0	0	0	0	0	0	0
E5 - Bäckerei	0	0	0	0	0	0	0
E6 - Pflegedienst	20	9	8	0	0	0	37
E7 - Taxi	0	0	0	11	71	0	82
Summe	20	31	16	30	81	0	178

D Antriebsstrangwirkungsgrad

Die fahrzeugspezifischen Antriebsstrangwirkungsgrade η_{dr} der BEV aus Tabelle 6.1 werden mittels Methoden der Parameterschätzung geschätzt. Ziel dabei ist es, je BEV einen fahrzeugspezifischen Antriebsstrangwirkungsgrad $\eta_{dr} \in]0, 100\%[$ zu ermitteln, der zu einem simulierten Energieverbrauch E_{tot} (Gleichung (5.2)) führt, der möglichst nah am realen Verbrauch liegt.

Reale Verbrauchsdaten: Reale Verbrauchsdaten sind öffentlich verfügbar. So sind in der EVDB-Fahrzeugdatenbank [207] Durchschnittswerte realer Energieverbräuche verschiedener BEV im Winter veröffentlicht ($b_{100km,EVDB}$ in Tabelle B.3). Jedoch sind dort nicht alle ausgewählten BEV aus Tabelle 6.1 vertreten.

Die fehlenden EVDB-Verbräuche werden durch die von den Fahrzeugherstellern veröffentlichten Energieverbräuche ersetzt. Dabei handelt es sich um Energieverbräuche, die nach dem standardisierten Verfahren „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)“ ermittelt werden ($b_{100km,WLTP}$ in Tabelle B.3 im Anhang). WLTP-Verbräuche entsprechen weichen allerdings vom Energieverbrauch im realen Betrieb ab. Daher werden sie um die durchschnittliche Abweichung (19 %) der verfügbaren EVDB-Verbräuche von den WLTP-Verbräuchen korrigiert (mit *gekennzeichnete $b_{100km,EVDB}$ in Tabelle B.3 im Anhang).

Binäre Suche: Die Bestimmung der fahrzeugspezifischen Antriebsstrangwirkungsgrade η_{dr} erfolgt, im Wesentlichen analog zum Optimierungsalgorithmus aus Unterkapitel 5.2.4, mittels der binären Suche. Abbildung D.1 visualisiert den Algorithmus, mit dessen Hilfe der Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} eines bestimmten BEV geschätzt wird.

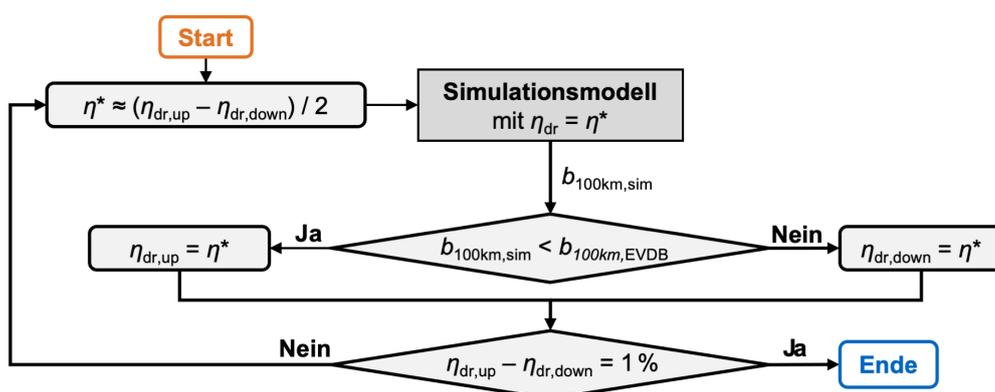


Abbildung D.1: Optimierungsalgorithmus zur Bestimmung des Antriebsstrangwirkungsgrades

Der Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} des BEV kann im Allgemeinen Werte zwischen $\eta_{dr,down} = 0\%$ und $\eta_{dr,up} = 100\%$ annehmen. $\eta_{dr,down}$ und $\eta_{dr,up}$ definieren also ein Lösungsliste bestehend aus Werten, die im Abstand $\Delta\eta_{dr} = 1\%$ zueinander sortiert angeordnet sind. Gesucht ist ein Wert aus dieser Lösungsliste, der als Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} zu einem simulierten Durchschnittsverbrauch $b_{100km,sim}$ führt, der möglichst wenig vom Realverbrauch $b_{100km,EVDB}$ des BEV abweicht. Der Durchschnittsverbrauch $b_{100km,sim}$ wird mit Hilfe des Simulationsmo-

dells (Unterkapitel 5) ermittelt. Dabei werden die Fahrprofile ausgewertet, dessen ursprüngliche Fahrzeuge in Fahrzeugart und -klasse mit dem BEV übereinstimmen, dessen Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} gesucht ist.

Analog zum Optimierungsalgorithmus aus Unterkapitel 5.2.4 ermittelt die binäre Suche zunächst den Wert η^* , der die Mitte zwischen der unteren Schranke $\eta_{dr,down}$ und der oberen Schranke $\eta_{dr,up}$ bildet. Anschließend wird der Energieverbrauch für $\eta_{dr} = \eta^*$ simuliert und der Durchschnittsverbrauch $b_{100km,sim}$ ermittelt. Ist der Durchschnittsverbrauch $b_{100km,sim}$ kleiner als der Zielwert $b_{100km,EVDB}$, so kann ausgeschlossen werden, dass der gesuchte Wirkungsgrad über η^* liegt. Alle Werte, die über η^* liegen, werden folglich aus der Lösungsliste gestrichen, indem als neue oberer Schranke $\eta_{dr,up} = \eta^*$ gewählt und ein neuer Rechendurchlauf mit einem neuen η^* gestartet wird. Ist der durchschnittliche Verbrauch $b_{100km,sim}$ größer als der Zielwert $b_{100km,EVDB}$, so wird die untere Schranke $\eta_{dr,down}$ der Lösungsliste durch $\eta_{dr,down} = \eta^*$ nach oben verschoben. Entspricht der Abstand zwischen oberer Schranke $\eta_{dr,up}$ und unterer Schranke $\eta_{dr,down}$ der Schrittweite 1 %, so ist der gesuchte Antriebsstrangwirkungsgrad η_{dr} gefunden. Die Lösung ist dann entweder $\eta_{dr,down}$ oder $\eta_{dr,up}$, je nach dem welcher Wirkungsgrad zu einer

Ergebnisse: Die auf diese Weise geschätzten Antriebsstrangwirkungsgrade η_{dr} sind in Tabelle B.3 im Anhang zu finden. Die simulierten Durchschnittsverbräuche $b_{100km,sim}$, die sich jeweils im letzten Schritt der binären Suche, also unter Verwendung der geschätzten Antriebsstrangwirkungsgrade η_{dr} , einstellen, sind in der Abbildung D.2 (c) dargestellt. Zudem sind jeweils die Abweichungen der simulierten Durchschnittsverbräuche $b_{100km,sim}$ von den jeweiligen vom WLTP-Verbrauch $b_{100km,WLTP}$ sowie Real-Verbrauch $b_{100km,EVDB}$ gezeigt.

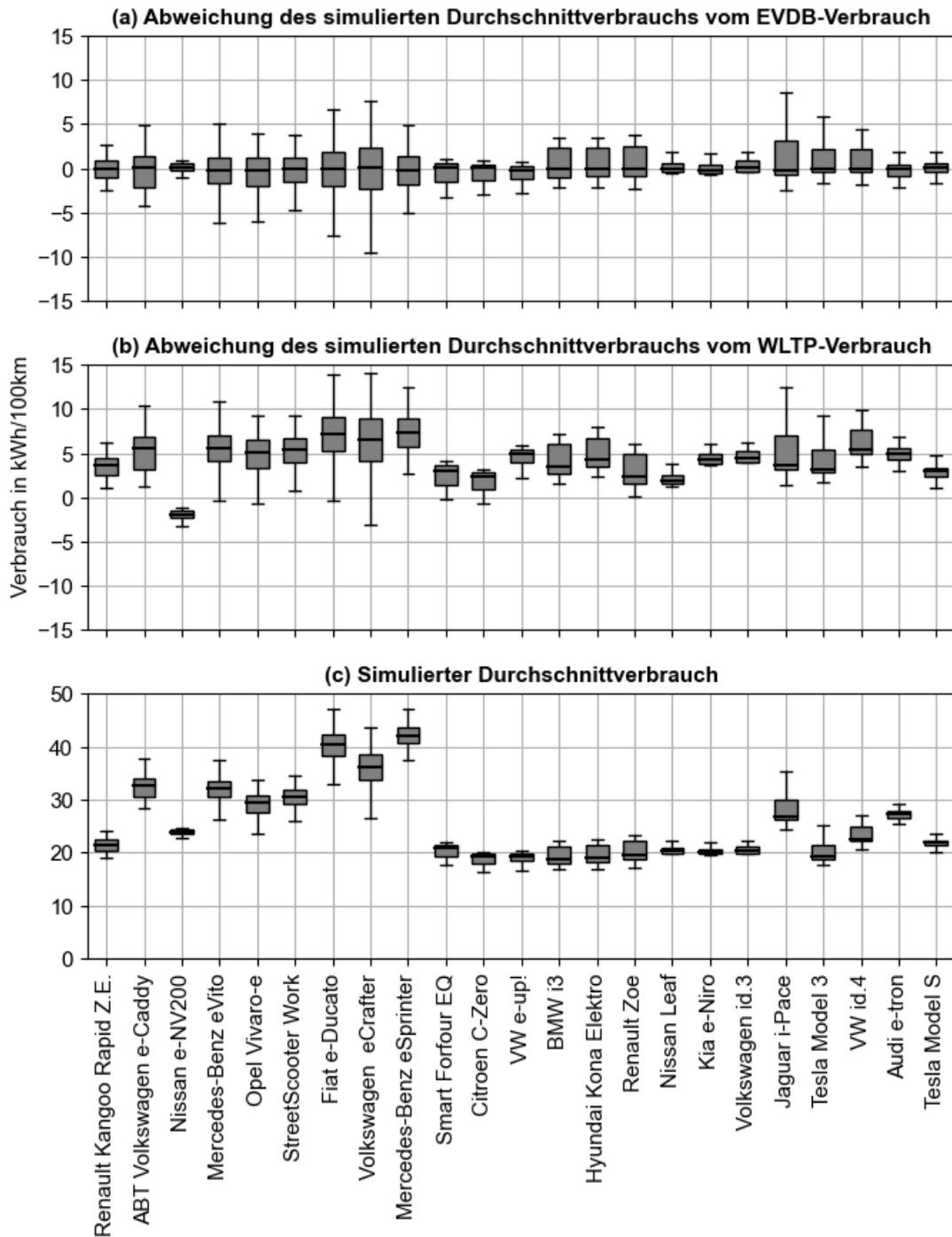


Abbildung D.2: Simulierte Energieverbräuche der 23 untersuchten BEV

E Standardlastprofile

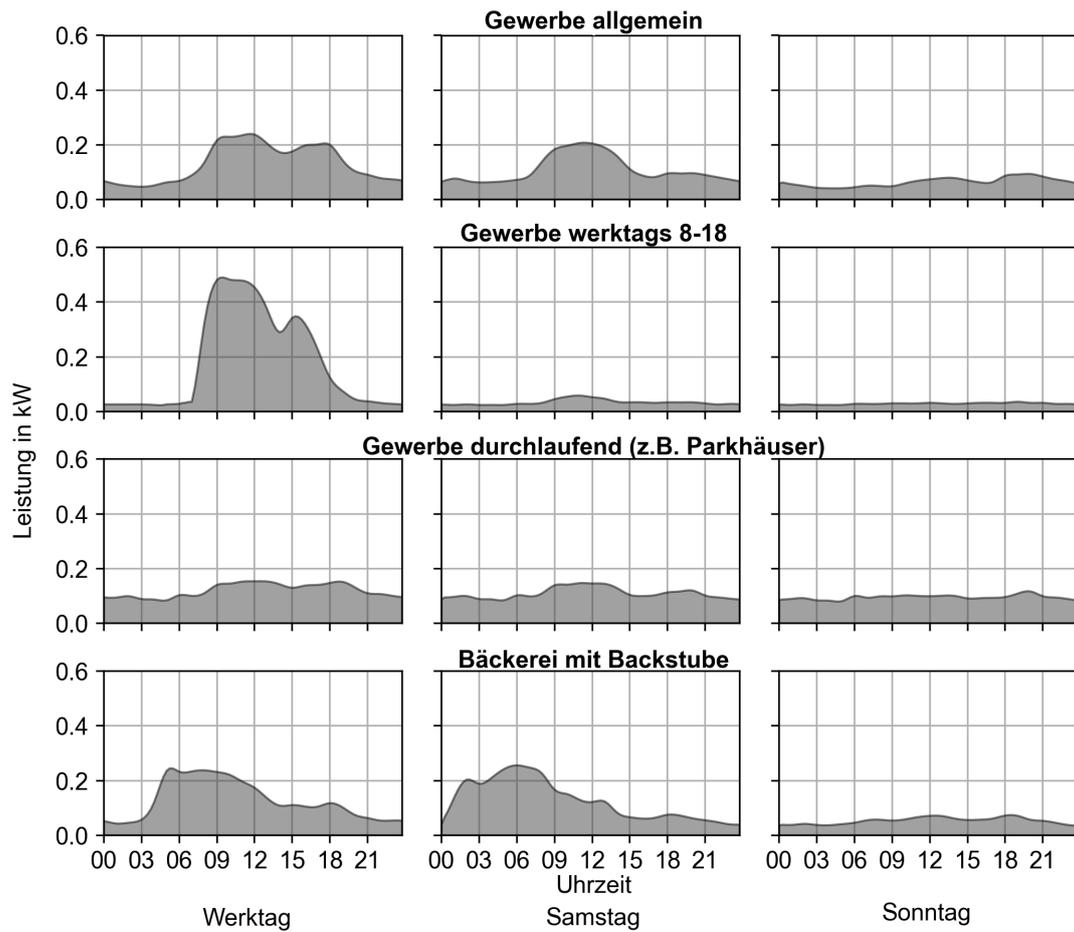


Abbildung E.1: Eigene Darstellung der für diese Arbeit relevanten Standardlastprofile nach [156] (Leistungswerte sind auf einen Grundlastverbrauch von 1 MWh/Jahr normiert)

F Ergebnisse

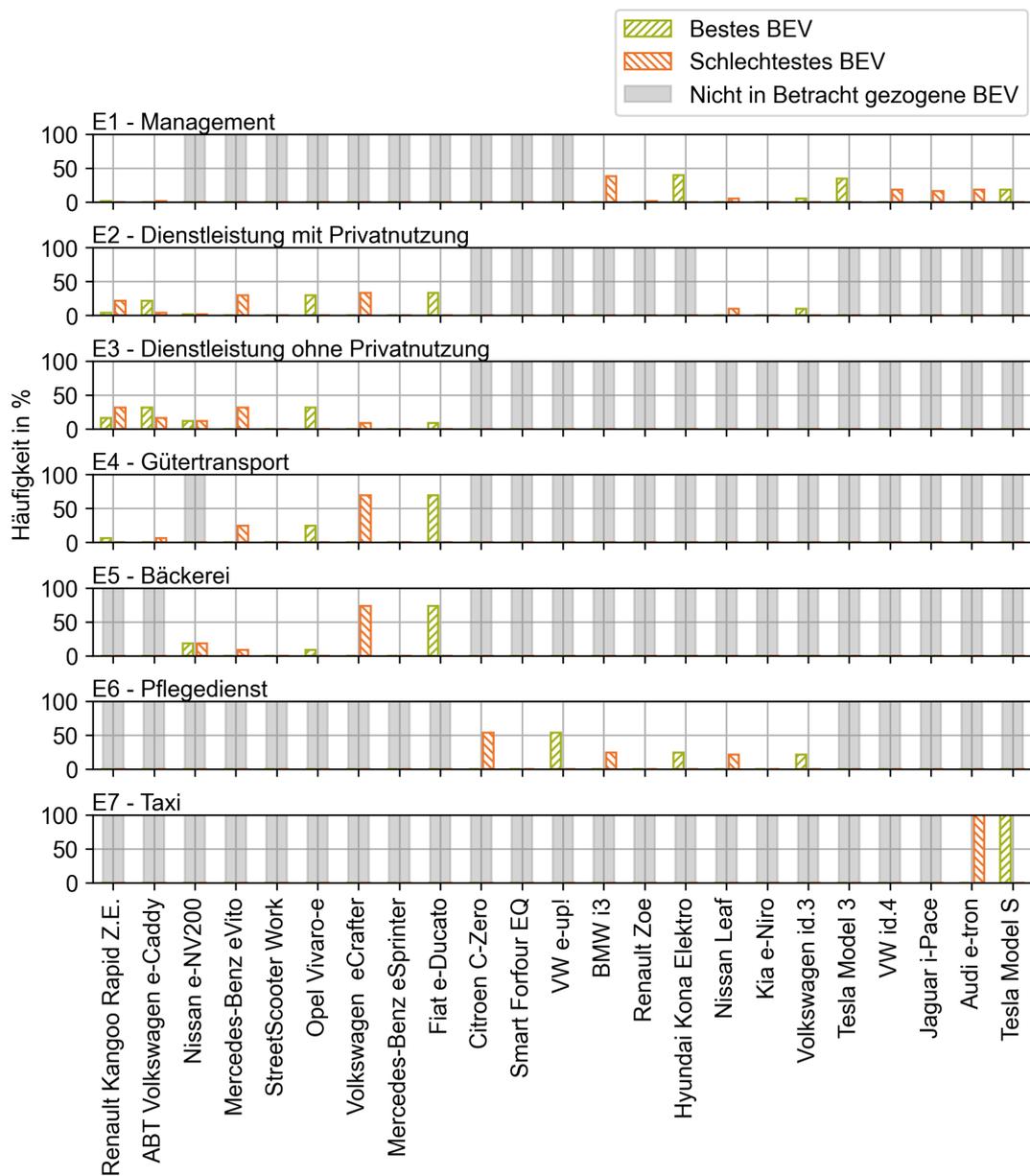


Abbildung F.1: Prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV“ und „schlechtes BEV“ Hinblick auf die Fahrzeugreichweite der 23 untersuchten BEV

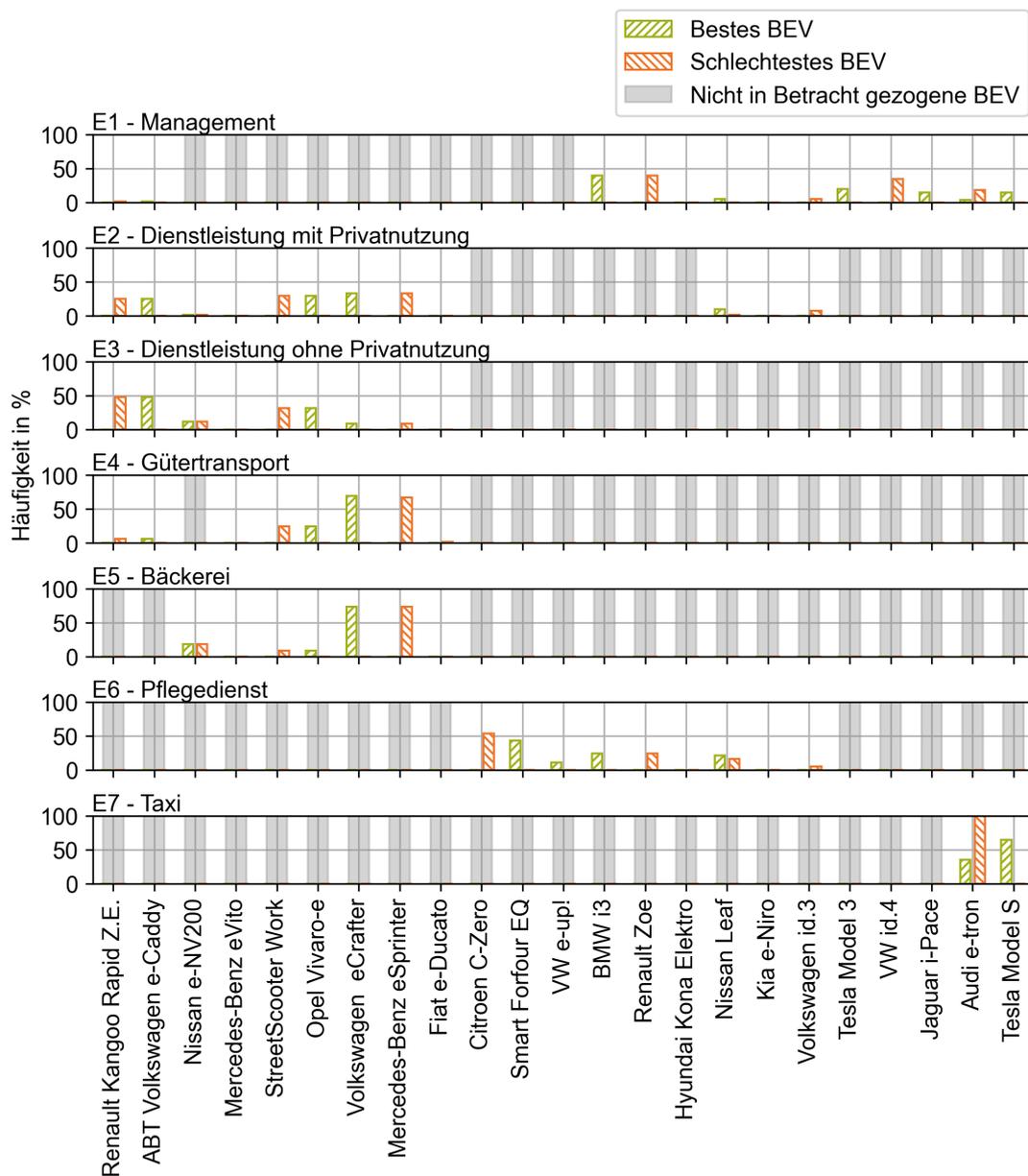


Abbildung F.2: Prozentuale Verteilung der Attribute „bestes BEV« und „schlechtestes BEV“ im Hinblick auf die Fahrzeugleistung der 23 untersuchten BEV

G Diskussion

Tabelle G.1: Geschätzte Kraftstoffkosten der Einsatzzwecke E1 bis E7 (Annahmen: Kraftstoffverbrauch = 7,3 L/100km; Kraftstoffpreis 1,3€/L)

	Tagesdistanz in km/Tag	Arbeitstage pro Jahr	Laufleistung pro Jahr in km/Jahr	Kosten pro Jahr €/Jahr
E1	72	250	18 099	2 378
E2	58	250	14 573	1 915
E3	30	250	7 464	981
E4	70	250	17 616	2 315
E5	83	300	25 111	3 300
E6	72	300	21 569	2 834
E7	216	300	64 741	8 507

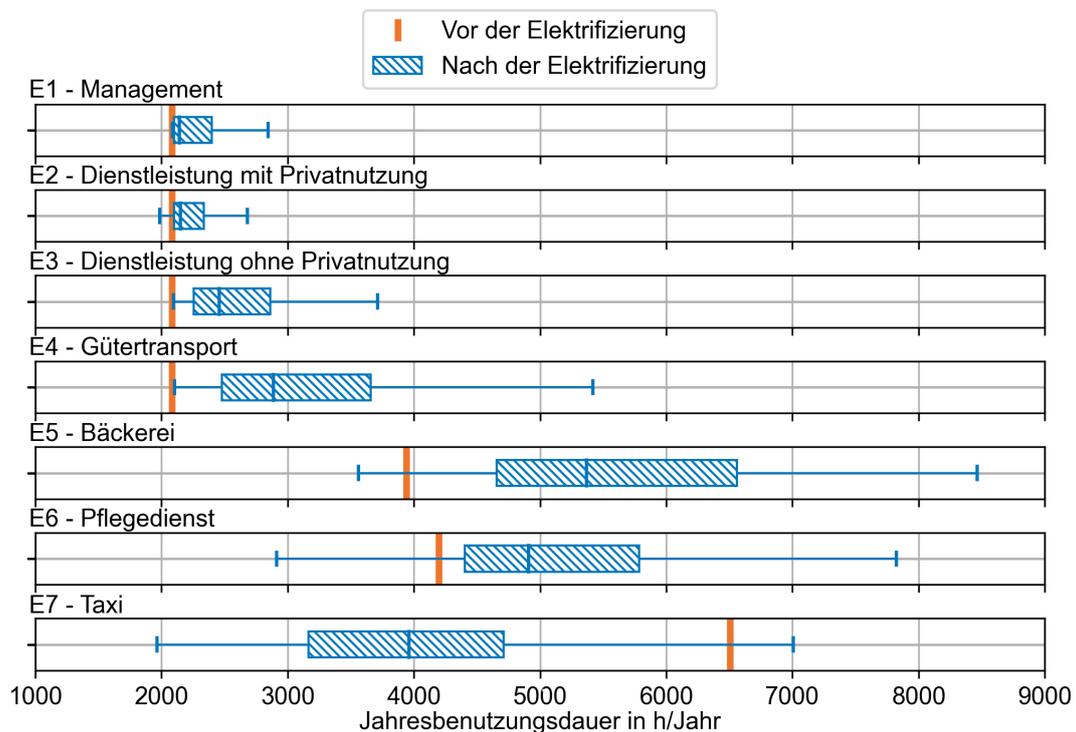


Abbildung G.1: Jahresbenutzungsdauer in Abhängigkeit vom Einsatzzweck (E1 bis E7)

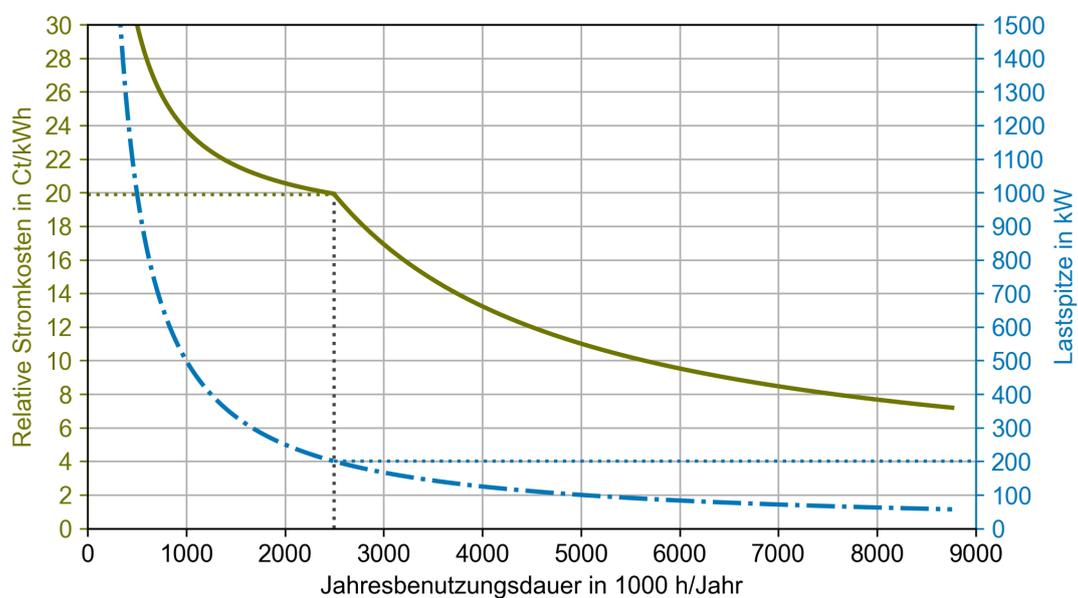


Abbildung G.2: Relative Stromkosten und Lastspitze in Abhängigkeit von der Jahresbenutzungsdauer für einen exemplarischen Jahresenergieverbrauchs von 500 MWh/Jahr