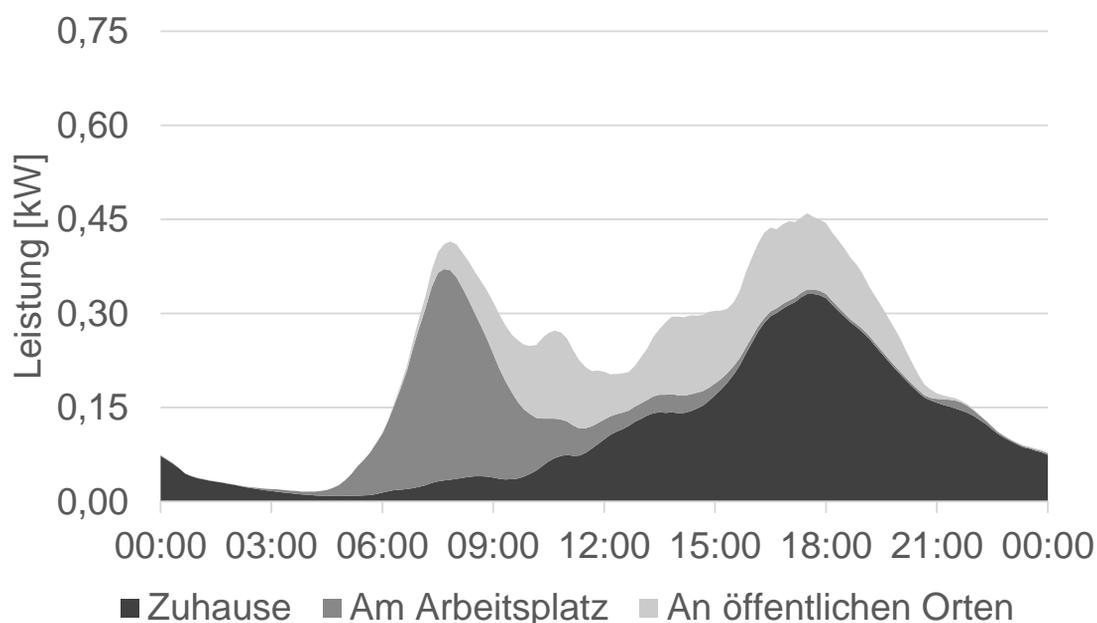


# Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland

Daniel Heinz

No. 30 | OKTOBER 2018

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



# Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland

Daniel Heinz

mail@daniel-heinz.de

In Kombination mit einem weiterhin steigenden Anteil regenerativ erzeugten Stroms am Strom-Mix in Deutschland kann der vermehrte Einsatz von Elektrofahrzeugen in Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors leisten. Mit gesteuerten Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge können durch die Nutzung von Lastverschiebepotentialen zum einen Spitzenlasten verringert und damit das Stromnetz entlastet werden, zum anderen kann durch die flexiblen Ladevorgänge auf das schwankende Stromangebot durch regenerative Energiequellen schnell reagiert werden.

In dieser Arbeit wurde ein Algorithmus zur Erstellung von Fahrzeugprofilen auf Basis der Daten des Deutschen Mobilitätspanels entwickelt. Diese Profile enthalten repräsentative Informationen zum Mobilitätsverhalten in Deutschland, zudem kann durch die Eingabe aktueller Elektrofahrzeuge und Angaben zur Ladeinfrastruktur das Ladeverhalten der Fahrzeuge simuliert werden. Der detailliert erklärte Algorithmus kann auch für zukünftige Forschungszwecke individuell angepasste Fahrzeugprofile liefern. Darüber hinaus wurden in dieser Arbeit Fahrzeugprofile für verschiedene Haushaltstypen und Ladeszenarien ausgewertet und dabei unter anderem Standardlastprofile erstellt und das Lastverschiebepotential näher untersucht.

Die erzeugten Elektrofahrzeug-Standardlastprofile für verschiedene Haushaltstypen aus Anhang E sind online verfügbar und können somit beispielsweise für zukünftige Modelle als Eingangsdaten verwendet werden. <https://www.iip.kit.edu/3559.php>.



Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)

Lehrstuhl für Energiewirtschaft

Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner



## **Bachelorarbeit**

# **Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland**

Vorgelegt von:

Daniel Heinz

Karlsruhe, 16. April 2018

Erstgutachter: PD Dr. Patrick Jochem

Zweitgutachter: Prof. Dr. Wolf Fichtner

Betreut von: Dipl.-Wi.-Ing. Sabrina Ried



# Kurzfassung / Abstract

Daniel Heinz

## **Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland**

In Kombination mit einem weiterhin steigenden Anteil regenerativ erzeugten Stroms am Strom-Mix in Deutschland kann der vermehrte Einsatz von Elektrofahrzeugen in Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors leisten. Mit gesteuerten Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge können durch die Nutzung von Lastverschiebepotentialen zum einen Spitzenlasten verringert und damit das Stromnetz entlastet werden, zum anderen kann durch die flexiblen Ladevorgänge auf das schwankende Stromangebot durch regenerative Energiequellen schnell reagiert werden.

In dieser Arbeit wurde ein Algorithmus zur Erstellung von Fahrzeugprofilen auf Basis der Daten des Deutschen Mobilitätspanels entwickelt. Diese Profile enthalten repräsentative Informationen zum Mobilitätsverhalten in Deutschland, zudem kann durch die Eingabe aktueller Elektrofahrzeuge und Angaben zur Ladeinfrastruktur das Ladeverhalten der Fahrzeuge simuliert werden. Der detailliert erklärte Algorithmus kann auch für zukünftige Forschungszwecke individuell angepasste Fahrzeugprofile liefern. Darüber hinaus wurden in dieser Arbeit Fahrzeugprofile für verschiedene Haushaltstypen und Ladeszenarien ausgewertet und dabei unter anderem Standardlastprofile erstellt und das Lastverschiebepotential näher untersucht.

## **Creating and Evaluating Representative Mobility and Load Profiles for Electric Vehicles in Germany**

Combined with an ongoing increase of regenerative energy sources in the power mix in Germany, an increased use of electric vehicles makes a significant contribution to decarbonizing the mobility sector. By controlling the charging process of the cars and thus using load shift potentials, peak loads could be reduced and so the pressure on the local power grid could be decreased. Additionally, those flexible charging processes could react rapidly to the fluctuating power supply of regenerative energy sources.

In this thesis an algorithm which creates representative car profiles using the mobility data of the “Deutsches Mobilitätspanel” was developed. Moreover, the algorithm simulates the charging behavior of the car considering user inputs on current electric vehicle models and the charging infrastructure. The developed algorithm is explained in detail and can provide individualized car profiles for future research. In this thesis several sets of car profiles for various types of households and charging scenarios are generated and analyzed. The results provide, inter alia, standard load profiles and evaluations of the load shift potentials, which can be basis for future research on loading optimization.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Modellnomenklatur</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1. MOP - Das Deutsche Mobilitätspanel .....	4
2.2. Elektromobilität.....	7
2.2.1. (Teil-)elektrische Antriebskonzepte.....	8
2.2.2. Aktuelle Beispielfahrzeuge und kurzfristige Marktentwicklung .....	10
2.2.3. Langfristige Potentiale durch Elektrofahrzeuge.....	11
2.3. Der Ladevorgang von Elektrofahrzeugen .....	13
2.3.1. Ladesystemvarianten.....	13
2.3.2. Elektrofahrzeuge als Teil des Smart Grid .....	16
2.3.3. Ladestand, nutzbare Ladeleistung und aufgeladene Energie.....	18
2.3.4. Ladestrategien und Lastverschiebepotentiale .....	23
2.3.5. Optimierung des Ladeverhaltens.....	26
<b>3 Generierung der Fahrzeugprofile</b>	<b>28</b>
3.1. Zielsetzung und Anforderungsanalyse .....	29
3.1.1. Funktionale Anforderungen.....	29
3.1.2. Technische Anforderungen .....	31
3.2. MATLAB-Algorithmus zur Erzeugung der Mobilitäts- und Ladeprofile.....	32
3.2.1. Auswahl der Haushalte und Datenbankabfrage .....	34
3.2.2. Anpassung der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten.....	36
3.2.3. Fahrzeugsubstitution .....	41
3.2.4. Berechnung der Ladeprofile.....	43
3.2.5. Fahrzeugaggregation und Auswertungen .....	49

3.3. Kritische Betrachtung.....	52
3.3.1. Verwendete Daten.....	52
3.3.2. Getroffene Annahmen.....	55
<b>4 Auswertungen und Ergebnisse</b>	<b>57</b>
4.1. Methodik.....	57
4.1.1. Basismodell.....	58
4.1.2. Haushaltstypen.....	59
4.1.3. Ladeszenarien.....	60
4.1.4. Vorgehensweise.....	61
4.2. Ergebnisse.....	61
4.2.1. Auswertung des Mobilitätsverhaltens.....	62
4.2.2. Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden.....	68
4.2.3. Lastverschiebepotentiale.....	72
4.3. Interpretation der Ergebnisse.....	75
4.3.1. Mobilitätsverhalten.....	75
4.3.2. Ladeverhalten und Einfluss der Ladeinfrastruktur.....	76
<b>5 Schlussbetrachtung</b>	<b>78</b>
5.1. Zusammenfassung.....	78
5.2. Ausblick.....	79
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>81</b>
<b>Anhang A: Verwendete Elektrofahrzeuge</b>	<b>86</b>
<b>Anhang B: Erhobene Haushaltsinformationen</b>	<b>87</b>
<b>Anhang C: Aufenthaltsorte der Fahrzeuge</b>	<b>91</b>
<b>Anhang D: Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge</b>	<b>94</b>
<b>Anhang E: Standardlastprofile</b>	<b>95</b>
<b>Anhang F: Lastverschiebepotentiale</b>	<b>101</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>104</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: $PSOC, t$ und $P_{max, t}$ in Abhängigkeit von $SOC_{prozt} - 1$ mit $EBat = 22 kWh$ .....	22
Abbildung 2: $P_{max, t}$ und $SOC_{prozt}$ mit $EBat = 22 kWh$ und verschiedene Ladestationen. ....	23
Abbildung 3: (Extrem-)Ladestrategien und Lastverschiebepotentiale.....	26
Abbildung 4: Flow Chart zur Erzeugung der Fahrzeugprofile und der Ladelastkurve.....	33
Abbildung 5: Flow Chart – Modul 1: DB-Abfrage.....	34
Abbildung 6: Flow Chart – Modul 2.1: Anpassung der Fahrzeugdaten. ....	36
Abbildung 7: Flow Chart – Modul 2.2: Anpassung der Mobilitätsdaten.....	38
Abbildung 8: Flow Chart – Modul 3: Fahrzeugsubstitution. ....	41
Abbildung 9: Flow Chart – Modul 4: Erzeugung der Ladeprofile.....	43
Abbildung 10: Flow Chart – Modul 5: Fahrzeugaggregation. ....	49
Abbildung 11: Durchschnittliche Personen- und Pkw-Anzahl je Haushaltstyp.....	59
Abbildung 12: Auswertung des durchschnittlichen Verkehrsaufkommens. ....	63
Abbildung 13: Aufenthaltsorte der Fahrzeuge in der gesamten Woche.....	64
Abbildung 14: Durchschnittlich verbrauchte Energie pro Stunde.....	66
Abbildung 15: Vergleich der durchschnittlich verbrauchten Energie (kWh/h) je Haushaltstyp..	67
Abbildung 16: Standardlastprofile je Ladeszenario für Werktag und Wochenende.....	70
Abbildung 17: Anteil der verschiedenen Lademöglichkeiten im Standardlastprofil. ....	71
Abbildung 18: Anteil der Ladedauer an der Aufenthaltsdauer bei ungesteuertem Laden. ....	72
Abbildung 19: Verlauf der verfügbaren und geladenen Energie bei Max-/Min-Strategie. ....	74
Abbildung 20: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 1 & 2). ...	91
Abbildung 21: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 3 & 4). ...	92
Abbildung 22: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 5 & 6). ...	93
Abbildung 23: Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge nach Aufenthaltsort und Haushaltstyp. ....	94
Abbildung 24: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 1). ....	95
Abbildung 25: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 2). ....	96
Abbildung 26: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 3). ....	97
Abbildung 27: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 4). ....	98
Abbildung 28: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 5). ....	99
Abbildung 29: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 6). ....	100
Abbildung 30: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario A). ....	101
Abbildung 31: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario B). ....	102
Abbildung 32: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario C). ....	103

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Möglichkeiten zur AC-Ladung.....	15
Tabelle 2: Verschiedene Möglichkeiten zur DC-Ladung.....	15
Tabelle 3: Beschreibung der in Modul 1 abgefragten Fahrzeugdaten.....	35
Tabelle 4: Beschreibung der in Modul 1 abgefragten Mobilitätsdaten.....	36
Tabelle 5: Leistungsgrenzen zur Zuordnung der KBA-Segmente.....	37
Tabelle 6: Häufigkeit der angegebenen KBA-Segmente in den MOP-Daten 2015/2016.....	42
Tabelle 7: Gespeicherte Informationen in den erstellten Ladeprofilen.....	44
Tabelle 8: Verteilung der Aufenthaltsorte der Fahrzeuge.....	45
Tabelle 9: Enthaltene Informationen der aggregierten Fahrzeugflotte.....	50
Tabelle 10: Anzahl der Veränderungen der MOP-Daten.....	53
Tabelle 11: Beschreibung der 3 Ladeszenarien: Ladeleistungen je Aufenthaltsort.....	60
Tabelle 12: Betrachtete Fahrzeugflotte nach Haushaltstypen.....	62
Tabelle 13: Durchschnittliche Aufenthaltsdauer der bewegten Fahrzeuge je Aufenthaltsort.....	65
Tabelle 14: Anteil der mit dem substituierten BEV abbildbaren Mobilitätsprofile.....	68
Tabelle 15: Anteil der mit elektrischer Energie zurückgelegten Strecke.....	69
Tabelle 16: Für die Fahrzeugsubstitution verwendete Elektrofahrzeuge.....	86
Tabelle 17: In den MOP-Befragungen erhobene Haushaltsinformationen.....	87

# Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current, <i>engl. für Wechselstrom</i>
BEV	Battery Electric Vehicle, <i>engl. für batterieelektrisches Fahrzeug</i>
BMS	Batteriemanagementsystem
CCS	Combined Charging System
CEE	Commission internationale de réglementation en vue de l'approbation de l'équipement électrique
DC	Direct Current, <i>engl. für Gleichstrom</i>
DSM	Demand Side Management, <i>engl. für Laststeuerung</i>
FCEV	Fuel-Cell Electric Vehicle, <i>engl. für Brennstoffzellenfahrzeug</i>
HEV	Hybrid Electric Vehicle, <i>engl. für Hybridfahrzeug</i>
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle, <i>engl. für Fahrzeug mit reinem Verbrennungsmotor</i>
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion
KBA	Kraftfahr-Bundesamt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LVP	Lastverschiebepotential
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, <i>engl. für Plug-In-Hybridfahrzeug</i>
Pkw	Personenkraftwagen
PVA	Photovoltaikanlagen
REEV	Range-Extended Electric Vehicle, <i>engl. für Fahrzeug mit Reichweitenverlängerung</i>
SLP	Standardlastprofil
SOC	State of Charge, <i>engl. für Ladestand</i>
SUV	Sport Utility Vehicle, <i>engl. für Geländelimousine</i>
TCO	Total Cost of Ownership, <i>engl. Für Gesamtbetriebskosten</i>
V2G	Vehicle-to-Grid, <i>engl. für Fahrzeug ans Netz</i>
V2H	Vehicle-to-Home, <i>engl. für Fahrzeug ans Heimnetz</i>

# Modellnomenklatur

$C_{rate,max}$	A/Ah	Maximal zulässige C-Rate zur Aufladung eines Fahrzeugs
$C_{rate}$	A/Ah	C-Rate eines Ladevorgangs
$c_{Verbr}$	(0,∞)	Konstante zur Anpassung des angegebenen elektrischen Verbrauchs
$c_{SOCmax}$	(0,1]	Konstante zur Angabe des maximalen prozentualen Ladestands
$c_{SOCmin}$	[0,1)	Konstante zur Angabe des minimalen prozentualen Ladestands
$E_{Fahrt,t}$	kWh	Verbrauchte Energie im Zeitintervall t
$E_{Lade,t}$	kWh	Aufgeladene Energie im Intervall t
$E_{Bat}$	kWh	Batteriekapazität
$I$	A	Stromstärke
$Ort_t$	{0,1,...,10}	Aufenthaltsort am Ende des Intervalls t
$P_{Lade,t}$	kW	Genutzte Ladeleistung im Intervall t
$P_{Ladestation,t}$	kW	Verfügbare Ladeleistung der Ladestation im Intervall t
$P_{Verbindung,t}$	kW	Begrenzung der maximal nutzbaren Ladeleistung im Intervall t durch die Ladeverbindung
$P_{max,t}$	kW	Maximal nutzbare Ladeleistung im Intervall t
$P_{SOC,t}$	kW	Begrenzung der maximal nutzbaren Ladeleistung im Intervall t durch den Ladestand im vorherigen Intervall
$P_{CRate}$	kW	Begrenzung der max. nutzbaren Ladeleistung durch die max. C-Rate
$Q$	As	Elektrische Ladung
$S_{Fahrt,t}$	km	Gefahrene Strecke im Intervall t
$SOC_{max}$	kWh	Maximaler Ladestand
$SOC_{min}$	kWh	Minimaler Ladestand
$SOC_{proz_t}$	%	Relativer Ladestand zum Zeitpunkt t
$SOC_t$	kWh	Ladestand zum Zeitpunkt t
$t$	min	Zeitpunkt am Ende des Intervalls (vergangene Zeit seit Berichtsbeginn)
$t_0$	min	Zeitpunkt am Ende des ersten Intervalls
$T_{Lade,t}$	min	Genutzte Ladedauer im Intervall t
$U_{Nenn}$	V	Nennspannung
$Verbr_{el}$	$\frac{kWh}{100km}$	elektrischer Verbrauch (basierend auf Herstellerangaben)
$\Delta SOC_t$	kWh	Änderung des Ladestands im Zeitintervall t

*(Max) und (Min) kennzeichnen die Werte bei Maximal-/Minimal-Ladestrategie.*

# 1 Einleitung

Mobilität befindet sich im Wandel – nicht nur in Deutschland, sondern auch in der restlichen Welt. In vielschichtigen Spannungsfeldern wie Digitalisierung, Urbanisierung, Energiewende und demographischem Wandel sind die Anforderungen an die Ausgestaltung neuer Mobilitätskonzepte im letzten Jahrzehnt stark gestiegen. Dabei gilt es, den wachsenden gesellschaftlichen Herausforderungen durch ein variantenreiches Mobilitätsangebot und schnelle, komfortable Arten der Fortbewegung entgegenzutreten, um so den Bürgern Lebensqualität zu ermöglichen. Die Ausgestaltung der Mobilität der Zukunft muss vor allem auf nachhaltige Lösungen setzen, um die Folgen des Klimawandels möglichst gering zu halten und die Einwohner von Großstädten vor Emissionen zu schützen (Kollosche und Schwedes 2016; Hüttl et al. 2010).

Durch die Pariser Klimaziele, die Volkswagen-Abgasaffäre und die derzeit drohenden Fahrverbote in deutschen Großstädten ist die Diskussion über alternative Mobilitätskonzepte und Antriebstechnologien längst in der Mitte der deutschen Gesellschaft angekommen und hat einen regen Diskurs in der Wissenschaft und der Automobilindustrie entfacht. Experten sind sich mittlerweile einig, dass die Elektrifizierung des Pkw-Antriebs einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Ausgestaltung der Individualmobilität liefern kann. Durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen können lokale Lärm- und Schadstoffemissionen und der Verbrauch fossiler Ressourcen vermieden werden, außerdem ist der Ausstoß an Treibhausgasen insbesondere bei einem hohen Einsatz erneuerbarer Energien geringer als bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren (Umweltbundesamt 2016; Agora Verkehrswende 2017).

Die deutsche Bundesregierung unterstützt aktiv die Erforschung und den Ausbau der Elektromobilität in Deutschland und hat sich bereits 2011 zum Ziel gesetzt, durch gezielte Förderungen und Anreize für Industrie und Kunden Deutschland zu einem „Leitmarkt für Elektromobilität“ zu entwickeln (Bundesregierung 2011). Dazu wurde schon 2009 das Ziel geäußert, dass bis 2020 bereits eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland auf der Straße fahren (Bundesregierung 2009) und bis 2030 weitere 5 Millionen Fahr-

zeuge hinzukommen sollen. Dieses ambitionierte Ziel für 2020 scheint 9 Jahre später zwar nicht mehr erreichbar, dennoch deuten Fortschritte in der Batterieforschung und umfangreiche Investitionen durch die Industrie daraufhin, dass Elektrofahrzeuge schon in wenigen Jahren auch ohne weitere staatliche Subventionen eine wirtschaftlich attraktive Alternative zu herkömmlichen Fahrzeugen sein können (Ester 2016). Als Alternative zu ausschließlich batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen können auch Plug-In-Hybridfahrzeuge, die sowohl mit extern geladenem Strom wie auch mit fossilen Kraftstoffen angetrieben werden können, einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrs leisten (BCG 2018).

Neben komplexen Anforderungen an die Batterie zur Speicherung der aufgeladenen Energie stellt vor allem der Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs eine Herausforderung für Fahrzeugbesitzer, Anbieter der Ladeinfrastruktur und Stromnetzbetreiber dar. Während der Fahrzeugbesitzer vor allem an einem möglichst schnellen und unmittelbaren Ladevorgang, aber auch an einer langsamen Alterung der Batterie und geringen variablen Kosten interessiert ist, gilt es für Infrastruktur- und Stromnetzanbieter, die Ladevorgänge zeitlich möglichst breit zu verteilen und Nachfragespitzen nach Ladestationen und Ladeleistung zu glätten. Für Stromnetzbetreiber bietet eine zukünftig flexibel gestaltbare Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge außerdem die Möglichkeit, auf das schwankende Stromangebot durch regenerative Energiequellen zu reagieren und die so erzeugte Energie in den Batterien der Fahrzeuge zu speichern (Schönfelder et al. 2009; Leitinger und Litzlbauer 2011).

In dieser Arbeit werden repräsentative Befragungen zum Mobilitätsverhalten von Haushalten in Deutschland über einen Berichtszeitraum von einer Woche ausgewertet. Dazu wurde ein Algorithmus entwickelt, der zunächst Park- und Mobilitätsprofile der Fahrzeuge erzeugt und anschließend auf Basis verschiedener Nutzereingaben, unter anderem zur vorhandenen Ladeinfrastruktur und zu typischen Elektrofahrzeugen, Ladeprofile erzeugt. Diese repräsentativen Ladeprofile können anschließend hinsichtlich der benötigten Energie und der Flexibilität des Ladevorgangs ausgewertet und interpretiert werden. Bei der Generierung der Ladeprofile ist auch eine gezielte Auswertung einzelner Haushaltgruppen möglich.

Das erste Ziel dieser Arbeit ist das Entwickeln und Dokumentieren einer nachvollziehbaren Modellierung, mit der aus den untersuchten Daten unter Berücksichtigung verschiedener variabler Parameter, die ein mögliches Zukunftsszenario abbilden, Fahr-

zeugprofile generiert werden. Diese Fahrzeugprofile enthalten Informationen zum Mobilitätsverhalten der Fahrzeuge im Berichtszeitraum, wobei davon ausgegangen wird, dass das zukünftige Mobilitätsverhalten nicht von diesem abweicht. Ausgehend von den zurückgelegten Strecken und der angegebenen vorhandenen Ladeinfrastruktur wird das Ladeverhalten für zwei Extremladestrategien berechnet, mit dem das maximale Lastverschiebepotential ermittelt werden kann. Durch die Gewichtung der einzelnen Fahrzeugprofile mit den Hochrechnungsfaktoren aus der Mobilitätserhebung kann anschließend eine repräsentative Aggregation der Fahrzeugprofile erfolgen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit besteht darin, diese Mobilitäts- und Ladeprofile unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte auszuwerten. Dazu werden zunächst mit dem MATLAB-Algorithmus für 6 verschiedene Haushaltstypen und 3 mögliche Ladeszenarien Fahrzeugprofile berechnet. Bei der anschließenden Auswertung wird unter anderem auf Unterschiede im Mobilitätsverhalten an Werktagen und am Wochenende und den Einfluss der Lage der Wohnung des Haushalts eingegangen. Außerdem werden die Auswirkungen verschiedener Ladeinfrastruktur-Szenarien auf das Ladeverhalten und die Flexibilität des Ladezeitraums ausgewertet.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 werden Grundlagen zu den untersuchten Daten des Deutschen Mobilitätspanels, zur Elektromobilität und zum Ladevorgang der Elektrofahrzeuge zusammengefasst. Im Anschluss wird in Kapitel 3 der Algorithmus zur Erzeugung der Ladeprofile vorgestellt, der auf die Ergebnisse einer im Vorfeld dieser Bachelorarbeit durchgeführten Anforderungsanalyse angepasst ist. Die Ergebnisse für verschiedene Ladeszenarien und Haushaltstypen werden in Kapitel 4 aufbereitet und interpretiert. In Kapitel 5 wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen.

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt verschiedene Themen, die für die spätere Modellierung und Auswertung der Fahrzeugprofile relevant sind. Dies beinhaltet einen groben Überblick über den fachlichen Hintergrund dieser Arbeit, um so ein besseres Verständnis der entwickelten Methodik und der Ergebnisse zu ermöglichen.

Zunächst wird das Deutsche Mobilitätspanel, welches als Datengrundlage der erzeugten Fahrzeugprofile dient, vorgestellt. Dabei wird unter anderem auf den Hintergrund und die Motivation der Erhebung, die Struktur der vorliegenden Daten und auf die Eignung der Datensätze zur Verwendung in dieser Arbeit eingegangen.

Im zweiten Unterkapitel werden notwendige Informationen zum Thema Elektromobilität dargestellt. Zuerst werden dabei verschiedene (teil-)elektrische Antriebsvarianten vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf jenen liegt, die für die später generierten Fahrzeugprofile relevant sind. Im Anschluss wird auf die aktuelle Marktsituation und auf kurzfristige Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität eingegangen. Abschließend wird das langfristige Potential von Elektrofahrzeugen bewertet.

Im letzten Unterkapitel wird der Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs behandelt. Dabei werden zunächst verschiedene Ladesystemvarianten und Zukunftskonzepte im Rahmen des Smart Grid erklärt. Daraufhin werden der Ladevorgang und der zeitliche Verlauf des Ladestands mathematisch modelliert. In den letzten beiden Abschnitten wird auf verschiedene Ladestrategien und die Optimierung des Ladevorgangs eingegangen.

### 2.1. MOP - Das Deutsche Mobilitätspanel

Das Deutsche Mobilitätspanel (MOP) ist eine bundesweite Erhebung zur Alltagsmobilität und zur Nutzung von Personenkraftwagen (Pkw) in Deutschland, welche im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur seit 1994 durchgeführt wird. Im Rahmen der Untersuchung werden jährlich Haushalte<sup>1</sup> in einem zweistufigen Verfah-

---

<sup>1</sup> Im Rahmen der Umfrage 2015/2016 wurden 1843 Haushalte und damit 3774 Personen befragt.

ren zu ihrem Mobilitätsverhalten im Alltag befragt (Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie 2012, 2016).

Ziel der Erhebung ist es, das gesamte Mobilitätsverhalten der befragten Personen und Haushalte zu erfassen und sich dabei nicht nur auf einzelne Arten der Fortbewegung zu konzentrieren. Durch die Kombination der Mobilitätsdaten mit abgefragten Informationen zu den Personen und Haushalten wie zum Beispiel das Alter, die Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln und der Urbanisierungsgrad sowie der Angabe des Zwecks der zurückgelegten Strecken soll die Studie Ursachen von Verkehrsnachfrageänderungen aufzeigen und Anhaltspunkte für eine zweckgerichtete Verkehrsplanung liefern.

Das MOP ist eine haushaltsbezogene Querschnitts-Stichprobe, in deren Rahmen die ausgewählten Haushalte in einem Zeitraum von drei Jahren jährlich befragt werden. Die Zusammensetzung der Haushalte wechselt aber jährlich, deshalb spricht man hierbei von einem rotierenden Panel. Die so erhobenen Daten bestehen aus zwei Teilen, die sich durch die Befragung zur Alltagsmobilität und Angaben zur Pkw-Nutzung der Umfrageteilnehmer ergeben.

Der erste Teil der Befragung, welcher die Alltagsmobilität der Teilnehmer untersucht, findet im Herbst statt. Dabei führen alle Personen des Haushalts, die älter als 10 Jahre sind, für eine gesamte Woche ein Weg-Tagebuch, in dem sie möglichst jede zurückgelegte Strecke unter Angabe der Uhrzeit, Strecke, des Zwecks und des gewählten Verkehrsmittels dokumentieren.

Im zweiten Teil werden die Haushalte, die mindestens einen Pkw besitzen, im Frühjahr nach der Erhebung der Alltagsmobilität gebeten, über zwei Monate Angaben zur Fahrleistung und zum Kraftstoffverbrauch aller Pkw ihres Haushalts zu machen. Dazu füllen sie ein Tankbuch aus, in das neben Angaben zum Fahrzeug hauptsächlich die zurückgelegten Kilometer und der Verbrauch des Fahrzeugs eingetragen werden.

Die gesammelten Daten werden jährlich in sieben Datensätzen aufbereitet. Es gibt eine Haushalts-, Personen- und Kind-Datei, welche Informationen zu den befragten Personen und Haushalten beinhalten. Die Ergebnisse der Befragung zur Alltagsmobilität werden in der Wege-Datei dargestellt, außerdem findet eine Aggregation der zurückgelegten Strecken pro Tag in der Personen-Tage-Datei statt. Alle Personen, die kein Wegtagebuch geführt haben, sind nochmal in der Personen-ohne-Tagebuch-Datei aufgeführt. Die im Frühjahr gesammelten fahrzeugspezifischen Daten aus den Tankbüchern sind in der

Tankbuch-Datei zusammengetragen. In dieser Dateistruktur wurden die MOP-Datensätze der vergangenen drei Jahre in der MySQL-Datenbank des Instituts für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP) gespeichert.

Die MOP-Daten sind aufgrund einiger wesentlicher Vorteile besonders für Auswertungen der Mobilität, wie sie in dieser oder auch anderen Forschungsarbeiten in der Forschungsgruppe Transport und Energie durchgeführt werden, besonders geeignet. Die Daten bilden das Mobilitätsverhalten der Teilnehmer in einer ganzen Woche ab, womit die Tagesübergänge, zu welchen die Fahrzeuge überwiegend parken, in die Modellierung einbezogen werden können und eine gesamtjährliche Hochrechnung im Vergleich zur Verwendung reiner Tageserhebungen (z.B. „Mobilität in Deutschland“) plausibler ist, außerdem werden Unterschiede zwischen verschiedenen Wochentagen deutlich. Da die MOP-Daten schon seit über 20 Jahren jährlich erhoben werden, ohne dass sich die Datenstruktur signifikant geändert hat, liegen umfassende Daten vor, sodass man ein vermeintliches Ergebnis anhand mehrerer Jahrgänge überprüfen kann und sogar Auswertungen bzgl. zeitlicher Entwicklungen möglich sind. Der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus kann, solange die Datenstruktur des Mobilitätspanels weitestgehend unverändert bleibt, auch zukünftige Datensätze auswerten und damit für längere Zeit zu weiteren Modellen und Untersuchungen aktuelle Daten liefern.

Dadurch, dass die befragten Personen den Zweck jeder Fahrt angeben<sup>2</sup>, kann der Ort, an dem sich ein Fahrzeug gerade befindet, relativ konkret benannt werden, wodurch verschiedene mögliche Ladeszenarien<sup>3</sup> untersucht werden können. Auch für die spezifische Auswertung einzelner Haushaltsgruppen bieten die MOP-Daten einige Selektionsmöglichkeiten, wie zum Beispiel eine Untersuchung nach Regionen, Haushaltsgrößen, Bevölkerungsdichten des Wohnorts oder den Grad der Anbindung an den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV).

Dank der angegebenen Gewichtungsfaktoren für Haushalte, Personen, Wege und Tankbücher, die eine Über- oder Unterrepräsentation einzelner Gruppen im Vergleich zur tatsächlichen bundesweiten Verteilung anhand verschiedener Merkmale<sup>4</sup> ausgleichen,

---

<sup>2</sup> Mögliche Fahrtzwecke sind Weg zur Arbeit, Dienstlicher Weg, Einkaufsweg, Freizeitweg, Serviceweg (andere Personen transportieren), Fahrt nach Hause, Fahrt nach „außer Haus“ oder zum Zweitwohnsitz.

<sup>3</sup> Laden nur zuhause möglich, Laden auf der Arbeit möglich, Laden beim Einkaufen, etc.

<sup>4</sup> Gewichtung der Haushalte nach: Ortsgröße, Haushaltsgröße, Pkw-Anzahl

Gewichtung der Personen nach: Geschlecht und Alter

Gewichtung der Wege nach: Weglänge

Gewichtung der Pkws nach: Hubraum und Alter.

sind die MOP-Daten für ganz Deutschland und auch einzelne Regionen und Haushaltstypen repräsentativ. Unter der Annahme, dass hinreichend wenig Datensätze bei der Modellierung gelöscht bzw. modifiziert werden, können die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Arbeit ebenfalls als repräsentativ betrachtet werden und ermöglichen damit auch eine Skalierung auf die tatsächliche Anzahl der vorhandenen Pkws in Deutschland. Eine Anwendung dieser Hochrechnung ist die Erstellung einer aggregierten Lade-lastkurve für Deutschland, die auch für einzelne Regionen berechnet werden kann.

Bei der Modellierung und der Erstellung des Algorithmus haben sich aber auch einige Schwachstellen der MOP-Daten gezeigt. Zu diesen Schwachstellen zählt unter anderem, dass die zurückgelegten Wege zwar den Personen, nicht aber den vorhandenen Pkws im Haushalt zugeordnet sind. Dies ist vor allem ein Problem, wenn in einem Haushalt mehrere Personen mehrere Fahrzeuge nutzen. Außerdem fehlen häufig Tankbücher einzelner Pkws und damit wichtige Fahrzeuginformationen, um die Fahrzeuge sinnvoll durch entsprechende Elektrofahrzeuge zu substituieren. Aufgrund mit den verfügbaren Pkws unmöglich durchführbarer Fahrstrecken konnten einzelne Weg-Tagebücher nicht für die Modellierung verwendet werden. Der Effekt durch die hierdurch verlorenen Daten ist allerdings so gering, dass eine Hochrechnung der generierten Fahrzeugprofile immer noch als repräsentativ erachtet werden kann.

## **2.2. Elektromobilität**

Wie bereits in der Einleitung deutlich wurde, wächst spätestens seit Bekanntwerden der Manipulation von Abgaswerten durch Volkswagen und drohenden Fahrverboten in deutschen Großstädten das öffentliche Interesse an der Frage, ob und wann ein schrittweiser Umstieg auf elektrisch betriebene Fahrzeuge einen sinnvollen Beitrag zur Umweltpolitik in Deutschland leisten kann. Neben der Diskussion in Politik und Gesellschaft ist Elektromobilität besonders in den letzten Jahren auch zu einem der beherrschenden Themen in der Automobilindustrie und der Mobilitäts- und Energieforschung geworden. Dies hat einen rasanten Zuwachs an serienreifen und angekündigten Elektrofahrzeugen auf dem Automobilmarkt und einen deutlichen Anstieg wissenschaftlicher Untersuchungen im Themenbereich Elektromobilität ausgelöst (Clausen 2018).

Bevor im Hauptteil dieser Abschlussarbeit die Auswirkungen einer flächendeckenden Einführung von Elektrofahrzeugen in Deutschland näher untersucht werden, werden in diesem Kapitel einige grundlegende Teilaspekte der Elektromobilität behandelt. Dies

soll das technische Verständnis der Modellierung erleichtern und eine fundiertere Bewertung der Ergebnisse ermöglichen. Dabei werden zunächst verschiedene (teil-)elektrisch betriebene Antriebsvarianten vorgestellt. Anschließend wird auf den aktuellen Stand der Forschung und Fahrzeugentwicklung eingegangen und ein Ausblick auf die kurzfristige Marktentwicklung im Bereich der Elektromobilität gegeben. Abschließend wird das langfristige Potential zur Dekarbonisierung des Verkehrs durch Elektrofahrzeuge bewertet. Ziel dieses Unterkapitels ist es nicht, das Thema Elektromobilität in allen möglichen Facetten zu betrachten, sondern relevantes Wissen zusammenzufassen, das ausreicht, um die spätere Modellierung nachvollziehen zu können. Daher finden einige Teilaspekte, wie zum Beispiel die Brennstoffzelle, nur am Rande Erwähnung. Im darauffolgenden Unterkapitel 2.3 wird der für diese Arbeit wichtige Ladevorgang von Elektrofahrzeugen ausführlicher behandelt.

### **2.2.1. (Teil-)elektrische Antriebskonzepte**

Innerhalb der Gruppe der Elektrofahrzeuge gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Technik, der Wirtschaftlichkeit und des ökologischen Nutzens. Dadurch ist eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Antriebskonzepte Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV), Plug-In Hybridfahrzeuge (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV), Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (Range-Extended Electric Vehicle, REEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel-Cell Electric Vehicle, FCEV) sinnvoll. Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle, HEV), die nicht am Stromnetz geladen werden können, werden nicht zu den Elektrofahrzeugen gezählt und deshalb nicht näher betrachtet (Michaelis et al. 2012).

Grundsätzliche technische Unterschiede gibt es zwischen Brennstoffzellenfahrzeugen und den übrigen Antriebsvarianten, da diese keine Batterie verwenden, um elektrische Energie zu speichern, sondern mit zuvor meist durch Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff durch eine chemische Reaktion einen Elektromotor antreiben. Da die Brennstoffzellen-Technologie und deren Ladeinfrastruktur-Konzepte noch deutlich weiter von einem serienreifen Einsatz entfernt sind als die batteriebetriebenen Fahrzeuge, werden diese in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Gerade für Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung und großer Reichweite könnten Brennstoffzellen in 20-30 Jahren jedoch eine attraktive Alternativlösung hinsichtlich der Klimabilanz darstellen (Clausen 2018).

Plug-In-Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung unterscheiden sich von Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV) und den oben genannten Hybrid-Fahrzeugen dadurch, dass sie zumindest teilweise direkt mit elektrischem Strom betankt werden wohingegen HEV den Strom über ihren Verbrennungsmotor oder durch Energierückgewinnung erzeugen. Typischerweise verfügen PHEV und REEV über eine höhere Batteriekapazität als HEV und können längere Strecken durch einen oder mehrere Elektromotoren reinelektrisch zurücklegen. Es gibt keine eindeutige Abgrenzung zwischen den Bezeichnungen PHEV und REEV, häufige Kriterien sind die Batteriekapazität und die Motorauslegung. Während der PHEV häufig auf einen parallelen Antrieb des Elektro- und Verbrennungsmotors ausgelegt ist, erlauben REEV häufig nur einen seriellen Betrieb, sodass der Verbrennungsmotor nur dazu dient, durch Kraftstoffverbrennung die Reichweite des Fahrzeugs zu verlängern (Umweltbundesamt 2016; Kollasche und Schwedes 2016). Da sich die Konzepte PHEV und REEV zumindest hinsichtlich der Reichweite oder des Ladevorgangs nicht grundlegend unterscheiden, werden diese im Folgenden unter der Bezeichnung PHEV zusammengefasst.

Als BEV werden Fahrzeuge bezeichnet, die ausschließlich elektrisch betrieben werden und deshalb in der Regel über eine noch größere Batteriekapazität als PHEV verfügen. Charakteristisch für BEV ist also auch, dass ausschließlich Strom aus dem Netz als Energiequelle zur Fortbewegung genutzt wird. BEV spielen in Umweltstrategien zur Vermeidung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen eine große Rolle, da sie zum einen deutliche Effizienzvorteile gegenüber allen anderen Antriebsmethoden haben und zum anderen bei der Nutzung von erneuerbarem Strom in der Nutzungsphase klare Klimavorteile haben<sup>5</sup> (Umweltbundesamt 2016). Da sie im Betrieb keine Emissionen ausstoßen und bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich weniger Lärm erzeugen<sup>6</sup> kann der Einsatz von BEV außerdem die Innenstädte entlasten und potentielle Fahrverbote vermeiden (Clausen 2018).

---

<sup>5</sup> Auch bei der Nutzung des heutigen Strommix liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen schon unter den Emissionen von Benzinmotoren und gleichauf mit den Emissionen von Dieselfahrzeugen. Genauere Bewertungen der Klimabilanz hängen u.a. vom Fahrprofil und der Fahrleistung ab, für eine genauere Gegenüberstellung siehe Umweltbundesamt 2016.

<sup>6</sup> Ab einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h ist die Hauptursache der Lärmemissionen eines Fahrzeugs nicht mehr der Antrieb, sondern Wind- und Reifengeräusche.

### 2.2.2. Aktuelle Beispielfahrzeuge und kurzfristige Marktentwicklung

Um in den folgenden Kapiteln das Mobilitätsverhalten der befragten Haushalte möglichst realistisch durch Elektrofahrzeuge abzubilden, wurde eine Marktanalyse zu bereits serienreifen und erwerbzbaren Elektrofahrzeugen durchgeführt (Stand: Februar 2018). Besonders interessante Kennzahlen für die Modellierung waren die Batteriekapazität, welche in Kilowattstunden (kWh) angegeben wird, und der durchschnittliche Verbrauch, welcher in kWh pro 100 Kilometer bemessen wird. Aus diesen beiden Werten lässt sich auch die elektrische Reichweite des Fahrzeugs berechnen<sup>7</sup>. Außerdem wurden noch die maximale Motorleistung in Kilowatt (kW) und das Jahr des Markteinsetzes zusammengetragen und die Fahrzeugmodelle den verschiedenen Fahrzeugsegmenten<sup>8</sup> des Kraftfahr-Bundesamts (KBA) zugeordnet. Die insgesamt 20 verschiedenen Fahrzeugmodelle von 14 Herstellern sind im Anhang B in Tabelle 16 dargestellt und wurden in der IIP-Datenbank gespeichert, sodass dort auch zukünftige Elektrofahrzeuge nachgetragen werden können.

Insbesondere in den Fahrzeugsegmenten Mini, Kleinwagen und Kompaktklasse lassen sich vor allem Fahrzeuge finden, die aufgrund einer eher kleinen Batterie (20 – 30 kWh) eine Reichweite zwischen 150 und 250 Kilometern besitzen und damit vor allem für einen Einsatz im Alltag und im Stadtverkehr gedacht sind. In höheren Preisklassen finden sich bisher wenig konkurrierende Fahrzeuge zu den Modellen von Tesla. Es ist aber davon auszugehen, dass zukünftig auch andere Hersteller in diesen Fahrzeugsegmenten Batterien mit größeren Kapazitäten verbauen werden, wie zum Beispiel Jaguar mit dem 2018 angekündigten I-Pace, der über eine Batteriekapazität von 90 kWh verfügt (Jaguar Land Rover Ltd. 2018). Nutzerberichte zeigen jedoch, dass es je nach Fahrverhalten und externen Bedingungen deutliche Abweichungen zwischen der vom Hersteller angegebenen und der tatsächlichen Reichweite geben kann (Radgen 2018).

Für die kommenden Jahre haben auch deutsche Hersteller wie Volkswagen, BMW und Mercedes-Benz weitere (teil-)elektrisch betriebene Modelle angekündigt und bereiten damit eine schrittweise Anpassung ihrer Produktpalette vor. Ein entscheidendes Kriterium für die Akzeptanz der Kunden wird neben der Reichweite die Entwicklung des Anschaffungspreises sein (Clausen 2018). Bisher besitzt selbst bei einer überdurchschnitt-

---

<sup>7</sup>  $Reichweite = 100 \times \frac{Batteriekapazität}{Verbrauch}$ .

<sup>8</sup> Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse, Obere Mittelklasse, Oberklasse, Geländewagen, Sportwagen, Mini-Van, Großraum-Van, Utility, Wohnmobil und Sport Utility Vehicles (SUV).

lichen Fahrleistung kaum ein Elektrofahrzeug gegenüber einem vergleichbaren Benzin- oder Dieselfahrzeug Vorteile bei der Betrachtung der Gesamtbetriebskosten (engl. total cost of ownership, TCO) (Radgen 2018).

Eine umfangreiche Analyse der Boston Consulting Group (2018) geht davon aus, dass schon ab 2020 Verbesserungen am reinen Verbrennungsmotor nicht mehr ausreichen um die gesetzlichen Vorschriften hinsichtlich des Schadstoffausstoßes zu erfüllen und spätestens ab etwa 2025 geringere TCO durch sinkende Batteriekosten zu einem noch schnelleren Wachstum von Elektro- und Hybridantrieben führen werden. Die Studie gibt für den europäischen Automarkt für das Jahr 2025 einen Anteil von 13% BEV und 3% PHEV und für das Jahr 2030 einen Anteil von 22% BEV und 6% PHEV der neuzugelassenen Fahrzeuge an. Außerdem wird ein großes Wachstum an (Mild-)Hybridfahrzeugen (HEV) auf ca. 27% in 2030 erwartet, sodass der Anteil von Fahrzeugen mit reinen Verbrennungsantrieben 2030 in Europa nur noch 44% betragen wird (BCG 2018).

### **2.2.3. Langfristige Potentiale durch Elektrofahrzeuge**

Untersuchungen hinsichtlich der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen (Umweltbundesamt 2016; Hacker et al. 2011; Döring und Aigner-Walder 2017) kommen zu ambivalenten Ergebnissen. Einerseits scheint eine Elektrifizierung des Antriebs auf lange Sicht unvermeidbar, um im Kombination mit erneuerbaren Energiequellen emissionsfreie Individualmobilität zu ermöglichen und den Verbrauch endlicher fossiler Rohstoffe zu beenden. Andererseits gibt es gerade in der Batterietechnologie zwar große Entwicklungssprünge und weitere Technologiepotentiale hinsichtlich Kapazität, Gewicht, Lademöglichkeiten, Recycling etc., aber auch große Problemfelder, unter anderem die aufwendige und emissionsreiche Herstellung, die Verwendung von seltenen Erdmetallen, Entsorgungsschwierigkeiten und zu kurze Lebensdauern. Die Entwicklung und Herstellung der Batterien gilt schon jetzt als Kerntechnologie, die den zukünftigen Erfolg der Automobilhersteller wesentlich beeinflussen wird (Bundesregierung 2011).

Neben den hohen Herstellungskosten sind die Reichweite und die Unsicherheit bzgl. der Vorhersage der Reichweite aktuell noch ein Hauptproblem der Elektromobilität (Radgen 2018). Experten gehen jedoch davon aus, dass sich die Lithium-Ionen-Batterien in den kommenden zehn Jahren hinsichtlich des Verhältnisses von Ladekapazität zu Gewicht bzw. Volumen noch erheblich verbessern werden und der Kaufpreis von BEV schon zwischen 2023 und 2025 konkurrenzfähig sein könnte (Ester 2016; BCG 2018).

Mit Fortschritten in der Fahrzeugentwicklung muss aber auch ein Ausbau der Ladeinfrastruktur einhergehen, um Elektromobilität für eine größere Kundenmenge attraktiv zu machen (Clausen 2018). Dazu gehört zum einen die Möglichkeit, sein Fahrzeug zu Hause oder am Arbeitsplatz im Alltag aufladen zu können und zum anderen der flächendeckende Ausbau von Schnellladesäulen bzw. Tankstellen für Elektrofahrzeuge um längere Strecken problemlos zurücklegen zu können (Reichert et al. 2012). Hier gibt es bereits umfangreiche Kooperationen von Automobilherstellern mit Betreibern von Raststätten.

Plug-In-Hybridfahrzeuge lösen zwar das Reichweiten- und Infrastrukturproblem rein elektrisch betriebener Fahrzeuge durch einen zusätzlichen Verbrennungsmotor (Kollo-sche und Schwedes 2016). Dabei entstehen jedoch Nachteile, die wiederum die Vorteile von Elektrofahrzeuge schmälern, beispielsweise eine komplexere Antriebstechnik, noch höhere Produktionskosten und -emissionen, ein höheres Fahrzeuggewicht und damit ein höherer Verbrauch. Außerdem unterscheiden sich die Anforderungen an die Batterietechnologie im Vergleich zu rein batteriebetriebenen Fahrzeugen mit einer größeren elektrischen Reichweite (vgl. Vezzini 2010).

Eine weiterhin steigende Verbreitung von Elektrofahrzeugen erfordert nicht nur dringende Verbesserungen der Ladeinfrastruktur (Hüttl et al. 2010), sondern erhöht auch die Anforderungen an das Stromnetz erheblich. Laut Umweltbundesamt (2016, S. 111) könnte sich die Bruttostromnachfrage in der EU schon bis 2030 selbst bei einer moderaten Marktentwicklung für Elektromobilität um bis zu 10% erhöhen. Um die Auswirkung einer Verbreitung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen umweltbilanziell zu untersuchen muss also auch der Effekt auf die Gesamtemissionen des Strommix<sup>9</sup> näher untersucht werden.

Die Gestaltung des Ladevorgangs kann die Umweltbilanz dieses Mehrverbrauchs ebenfalls beeinflussen. So kann durch ein Demand Side Management (DSM, engl. für Laststeuerung) die Spitzenlast gesenkt und die Einbindung überschüssiger erneuerbarer Energien von 5% auf fast 10% gesteigert werden (Umweltbundesamt 2016, S. 110–114). Die Ergebnisse dieser Arbeit können Grundlage für zukünftige Untersuchungen des Lastverschiebepotentials in Deutschland sein.

---

<sup>9</sup> Dieser zusätzlich notwendige Strom wird in der Literatur häufig als Marginalmix bezeichnet.

## 2.3. Der Ladevorgang von Elektrofahrzeugen

Ein Hauptunterschied bei einem Umstieg von einem Fahrzeug mit herkömmlichen Verbrennungsmotor auf ein Elektrofahrzeug stellt für den Nutzer die grundlegend verschiedene Art der Energieversorgung dar. Während sowohl Benzin- wie auch Dieselfahrzeuge binnen weniger Minuten durch das Tanken von flüssigem Kraftstoff an Tankstellen wieder über ihre maximale Reichweite verfügen, gestaltet sich der Ladevorgang von Elektrofahrzeugen komplexer und hängt von zusätzlichen Einflussgrößen ab (Kaschub 2017).

Da die Ausgestaltung des Ladevorgangs Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise zur Erzeugung von Fahrzeugprofilen ist, wird in diesem Unterkapitel näher auf mögliche Formen des Ladens von Elektrofahrzeugen eingegangen. Dabei werden zunächst mögliche Ladesysteme erklärt und für verschiedene Einsatzzwecke bewertet, unter anderem wird dabei die verfügbare Ladeleistung betrachtet. Danach wird das Konzept „Smart Grid“ und dessen Schnittstellen mit der Elektromobilität vorgestellt. Anschließend wird der Ladevorgang der Fahrzeuge durch ein mathematisches Modell zusammengefasst. In den letzten beiden Abschnitten werden verschiedene Ladestrategien und dadurch entstehende Lastverschiebepotentiale vorgestellt und verschiedene Perspektiven auf die Optimierung des Ladevorgangs betrachtet.

### 2.3.1. Ladesystemvarianten

Grundsätzlich können drei verschiedene Konzepte der Energiezufuhr für Elektrofahrzeuge unterschieden werden:

- Induktives Laden über Induktionsspulen im Boden
- Ein Austausch der leeren Batterie durch eine aufgeladene Batterie und
- Konduktives Laden mittels einer physischen Verbindung („Ladekabel“).

Induktives Laden wäre für den Fahrzeugbesitzer zwar die attraktivste Methode um sein Fahrzeug aufzuladen, würde jedoch sehr hohe Investitionen in die Ladeinfrastruktur erfordern und die Konstruktion von Elektrofahrzeugen erschweren. Außerdem müssen die Belastungen für das Umfeld durch das dauerhafte elektromagnetische Feld kritisch betrachtet werden (Reichert et al. 2012).

Ein Batteriewechselkonzept würde Reichweitenprobleme und vor allen auch die lange Ladedauer von heutigen Elektrofahrzeugen umgehen (Bundesregierung 2009). Um eine funktionierende Infrastruktur hierfür aufzubauen wäre jedoch eine Vereinheitlichung der Batterien notwendig. Wie bereits erwähnt gilt die Konzeption und Herstellung von Batterien und Batteriemanagementsystemen als Kerntechnologie von Elektrofahrzeugen, deshalb ist nicht zu erwarten, dass die Automobilhersteller ihr bereits erworbenes Know-how zugunsten eines standardisierten Batteriewechselkonzepts aufgeben werden (Reichert et al. 2012; Ester 2016). Außerdem würde eine Vereinheitlichung der Batterien auch die physische Form der Batterie betreffen und damit die Einbindung in die Karosserie vorgeben, was den Spielraum für die Fahrzeugkonstruktion aufgrund der Größe der Batterien deutlich einschränkt (Reichert et al. 2012).

Aus oben genannten Gründen gilt das Laden mittels Ladekabel als wahrscheinlichstes Energiezufuhrkonzept für kommende BEV und PHEV und wird daher in dieser wissenschaftlichen Arbeit näher betrachtet. Für die spätere Berechnung der Ladeprofile ist hierbei vor allem relevant, mit welcher Ladeleistung die Elektrofahrzeuge an den verschiedenen möglichen Aufenthaltsorten geladen werden können.

Grundsätzlich kann ein Elektrofahrzeug mit Wechsel- bzw. Drehstrom (AC) oder Gleichstrom (DC) aufgeladen werden. Außerdem kann je nach maximal verfügbarer Ladeleistung in Normalladepunkte<sup>10</sup> ( $\leq 22$  kW) und Schnellladepunkte ( $> 22$  kW) unterschieden werden (BMW 2016), wobei Normalladepunkte in der Regel AC-Ladung und Schnellladepunkte DC-Ladung nutzen.

Zur Aufladung mittels Wechsel-/Drehstrom werden mittlerweile EU-weit einheitlich Ladeanschlüsse vom Typ 2 verwendet, welche sowohl einphasiges, wie auch dreiphasiges Laden ermöglichen (Hose et al. 2015; BMW 2016). In Tabelle 1 sind verschiedene Möglichkeiten zur AC-Ladung aufgelistet, welche auch durch eine Anbindung an die Stromversorgung des Haushalts genutzt werden können<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Ladepunkte mit einer Ladeleistung  $\leq 3,7$  kW, die nicht öffentlich zugänglich sind, werden in der Ladesäulenverordnung BMW 2016 hinsichtlich der technischen Vorgaben nochmals gesondert behandelt.

<sup>11</sup> Für eine Ladeleistung  $> 2,3$  kW ist die Installation einer Wallbox nötig, deren Kosten sich zwischen 500 und 200 € bewegen.

Tabelle 1: Verschiedene Möglichkeiten zur AC-Ladung.

Verwendeter Anschluss	Max. Ladeleistung	Phasen, Spannung, Strom
Schuko-Steckdose	2,3 kW	Einphasig, 230 V, 10 A
Blauer CEE <sup>12</sup> -Stecker („Camping-Stecker“)	3,7 kW	Einphasig, 230 V, 16 A
CEE-16 („Kleiner Industriestecker“)	11,1 kW	Dreiphasig, 400 V, 16 A
CEE-32 („Großer Industriestecker“)	22,2 kW	Dreiphasig, 400 V, 32 A
CEE-63, Mode-3 Ladekabel	43,6 kW	Dreiphasig, 400 V, 63 A

Quelle: (Mouli et al. 2016; The Mobility House 2018).

Das maximale Potential von DC-Ladung für Schnellladestationen ist derzeit noch nicht erforscht<sup>13</sup>, allerdings wird die maximal zu erreichende Ladeleistung nicht nur von der verfügbaren Leistung der Ladestation, sondern auch durch Ladekabel und -anschluss und durch die Batterie des Elektrofahrzeugs<sup>14</sup> begrenzt. Anders als bei der Wechselstromladung werden bei der Gleichstromladung derzeit noch verschiedene konkurrierende Stecker verwendet. Während in Europa hauptsächlich das Combined Charging System (CCS, auch Combo-2 genannt), welches mit dem Typ-2-Wechsel-/Drehstromstecker kompatibel ist, verbaut wird, gibt es außerdem noch den vor allem in japanischen Fahrzeugen verwendeten CHAdeMO-Standard. Vor Einführung des CCS entwickelte Tesla bereits das Supercharger-Ladesystem, welches eine Modifizierung der Typ-2-Steckverbindung ist (Mouli et al. 2016). Tabelle 2 fasst die maximal möglichen Ladeleistungen der verschiedenen Anschlüsse zur DC-Ladung zusammen. Es ist davon auszugehen, dass kommende Fahrzeuge auch höhere Spannungen von bis zu 800 V ermöglichen, wodurch sich die maximale Ladeleistung auf bis zu 350 kW erhöhen kann (Schöttle und Bitsche 2017).

Tabelle 2: Verschiedene Möglichkeiten zur DC-Ladung.

Verwendeter Anschluss	Max. Ladeleistung	Spannung, Strom
CCS/Combo 2 – Level 1	36 kW	200-450 V, bis zu 80 A
CCS/Combo 2 – Level 2	90 kW	200-450 V, bis zu 200 A
CCS/Combo 2 – Level 3	240 kW	200-600 V, bis zu 400 A
CHAdeMO	62,5 kW	200-500 V, bis zu 125 A
Tesla Supercharger	145 kW	400-480 V, bis zu 300 A

Quelle: (Mouli et al. 2016).

<sup>12</sup> CEE: Commission internationale de réglementation en vue de l’approbation de l’équipement électrique.

<sup>13</sup> Die bisher maximal erreichte Ladeleistung mit Serienfahrzeugen liegt bei 135 kW durch die Tesla Supercharger Ladestationen.

<sup>14</sup> Siehe Kapitel 2.3.3.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal des Ladesystems ist, ob bidirektionales Laden, also das Rückspeisen von Strom aus der Batterie des Fahrzeugs in das Stromnetz, möglich ist. Dadurch könnte ein Elektroauto künftig zum Beispiel als temporärer Speicher für regenerativen Strom genutzt werden und somit Schwankungen in der Stromerzeugung glätten (Reichert et al. 2012). Überlegungen hinsichtlich künftiger intelligenter Systeme, die die Möglichkeit der Rückspeisung der aufgeladenen Energie nutzen, werden unter den Begriffen Vehicle-to-Grid (V2G) und Vehicle-to-Home (V2H) zusammengefasst (siehe 2.3.2), jedoch in dieser Arbeit nicht ausführlich betrachtet.

### 2.3.2. Elektrofahrzeuge als Teil des Smart Grid

Der permanent steigende Anteil erneuerbarer Energien am Strommix in Deutschland und die Volatilität und Prognoseschwierigkeit des so erzeugten Stroms erhöhen die Anforderungen an die Flexibilität des Stromnetzes stark und erfordern zukünftig deutlich intelligentere Regelungssysteme. Überlegungen hinsichtlich der Ausgestaltung dieser Stromnetze werden unter dem Begriff *Smart Grid* zusammengefasst (Festag et al. 2016). Durch die bereits absehbare Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in Deutschland (vgl. Kapitel 2.2) wird das Aufladen der Elektrofahrzeuge zukünftig bei der Ausgestaltung des Smart Grids eine immer größere Rolle spielen.

Zum einen wird sich durch den Umstieg auf Elektrofahrzeuge die Stromnachfrage erhöhen. Dabei gilt zu beachten, dass die Fahrzeuge vor allem dann ihre umweltbilanziellen Vorteile ausspielen können, wenn diese erhöhte Nachfrage durch regenerativen Strom gedeckt wird (Umweltbundesamt 2016). Zum anderen können die Batterien der Elektrofahrzeuge aufgrund ihrer hohen Standzeit dazu genutzt werden, durch intelligente Kommunikation mit dem Stromnetz Spitzenlasten zu vermeiden, überschüssige Strommengen zu speichern und somit zu einer Glättung der Stromnachfrage beizutragen (Schönfelder et al. 2009). Es wäre außerdem technisch möglich, diesen so gespeicherten Strom dank bidirektionaler Ladesysteme (V2G und V2H) bei Bedarf wieder in das Stromnetz einzuspeisen (Schill et al. 2016).

Um sowohl für Netzbetreiber wie auch Fahrzeugbesitzer Anreize schaffen zu können, muss zunächst das ökonomische Potential dieser Maßnahmen untersucht werden. Dabei sind sich bisherige Untersuchungen einig, dass eine Optimierung des Ladevorgangs der Elektrofahrzeuge hinsichtlich der Nutzung des möglichen Ladezeitfensters ab einer gewissen Anzahl an Elektrofahrzeugen in Deutschland für beide Seiten lukrativ ist (Dallin-

ger et al. 2011). Vor einem Einsatz in der Praxis gibt es aber noch einige zu klärende Themen, wie zum Beispiel die Ausgestaltung der so entstehenden Geschäftssysteme, indem bspw. Fahrzeugbesitzern durch flexible Strompreise gezielt Anreize gesetzt werden. Außerdem bedarf es einer individuellen Anpassung des gesteuerten Ladevorgangs auf die Mobilitätsbedürfnisse des Fahrzeugbesitzers (Schönfelder et al. 2009).

Deutlich umstrittener ist derzeit das Potenzial eines V2G-Einsatzes von Elektrofahrzeugen. Hier stehen den möglichen Erträgen deutlich höhere Kosten gegenüber. Erstens erfordert V2G einen komplizierteren Ladevorgang, der mit steigenden Anforderungen an die Ladeinfrastruktur verbunden ist (bidirektionales Laden) und zweitens erhöht der V2G-Einsatz die Zahl genutzter Batterieladezyklen und verursacht damit Kosten durch die schnellere Alterung der Batterie (Dallinger et al. 2011). Allerdings hängt die Profitabilität dieser Systeme auch stark von bisher noch unbekanntem Größen ab. So kann einerseits der weiterhin steigende Anteil erneuerbarer Energien die Folgen von Engpässen durch klimatisch ungünstigen Bedingungen<sup>15</sup> auf das Stromangebot und damit den Ertrag des V2G-Einsatzes noch deutlich erhöhen, andererseits können durch Erfolge in der Batterieforschung die Alterungskosten der verbauten Batterien noch deutlich sinken (BCG 2018).

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Smart-Home Technologie, bei der eine direkte Anbindung des Elektrofahrzeugs an den Stromanschluss des Haushalts erfolgt. Durch eine bidirektionale Ladeverbindung des Fahrzeugs kann so auf Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen (PVA) oder Stromverbrauch durch Haushaltsgeräte reagieren und die Speichermöglichkeit der Fahrzeugbatterie ausnutzen<sup>16</sup> (Kaschub 2017).

Aufgrund der bisherigen Unklarheit des Nutzens von bidirektionalen Ladevorgängen liegt das Hauptinteresse dieser Arbeit auf der Optimierung des Ladezeitpunkts der Elektrofahrzeuge durch die Betrachtung sogenannter Lastverschiebepotentiale (LVP), wohingegen die Option, Energie aus der Batterie in das Stromnetz einzuspeisen in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird. Es besteht jedoch grundsätzlich die Möglichkeit, die ermittelten Ladeprofile auch für V2G-/V2H-Überlegungen zu verwenden.

---

<sup>15</sup> Da ein Hauptteil des regenerativen Stroms durch Solar- und Windenergie erzeugt wird, können längere windstille bewölkte Phasen das Stromangebot deutlich senken.

<sup>16</sup> Diese Anwendungen werden unter dem Stichwort Vehicle-to-Home (V2H) zusammengefasst.

### 2.3.3. Ladestand, nutzbare Ladeleistung und aufgeladene Energie

Im Unterkapitel 2.3.4 werden verschiedene Ladestrategien betrachtet, welche den Zeitraum, in welchen ein parkendes Fahrzeug aufgeladen wird und die insgesamt geladene Energiemenge bestimmen. Vor der Betrachtung dieser Ladestrategien ist es jedoch notwendig, den Ladestand des Fahrzeugs zu modellieren und die Geschwindigkeit, mit der die Batterie geladen werden kann, zu bestimmen.

Zur Modellierung des State of Charge (SOC, *engl. für Ladestand*) wird die Variable  $SOC_t$  eingeführt, welche die aufgeladene Energie, die einem Fahrzeug zum Zeitpunkt  $t$  zur Verfügung steht, in kWh angibt. Die Grenzen  $SOC_{min}$  und  $SOC_{max}$  können durch die beiden Konstanten  $c_{SOCmin}$  und  $c_{SOCmax}$  verändert werden,  $SOC_{max}$  darf jedoch die Batteriekapazität  $E_{Bat}$  nicht überschreiten:

$$SOC_{max} = c_{SOCmax} \times E_{Bat}, \quad \in [c_{SOCmin}, 1]$$

$$SOC_{min} = c_{SOCmin} \times E_{Bat}, \quad \in [0, c_{SOCmax}]$$

$$SOC_t \in [SOC_{min}, SOC_{max}] \quad \forall t \in T.$$

Häufig ist aber vor allem der relative Ladestand  $SOC_{proz_t}$  relevant, welcher den absoluten SOC ins Verhältnis zur Batteriekapazität setzt und in Prozent angegeben wird:

$$SOC_{proz_t} = \frac{SOC_t}{E_{Bat}} \quad [\%],$$

$$SOC_{proz_t} \in [c_{SOCmin}, c_{SOCmax}] \quad \forall t \in T.$$

Die in Kapitel 3 modellierten Ladeprofile geben unter anderem den Verlauf des Ladestands bei verschiedenen Ladestrategien innerhalb einer Woche an, das Zeitintervall zwischen zwei Datenpunkten kann dabei verändert werden. Bei der Betrachtung der Änderung des Ladestands  $\Delta SOC$  können verschiedene Fälle unterschieden werden:

- $\Delta SOC < 0$ , Fahrzeug fährt und verbraucht damit Energie.
- $\Delta SOC = 0$ , Fahrzeug parkt ohne zu laden<sup>17</sup>.
- $\Delta SOC > 0$ , Fahrzeug parkt und lädt Energie auf.

Die durch die Nutzung des Fahrzeugs in einem Zeitintervall verbrauchte Energie  $E_{Fahrt,t}$  ist wie auch bei herkömmlichen Pkws nicht nur von der gefahrenen Strecke  $S_{Fahrt,t}$ ,

<sup>17</sup> Der Effekt der Selbstentladung einer Batterie ist hinreichend klein um in diesem Modell nicht berücksichtigt zu werden.

sondern auch vom Fahrverhalten abhängig<sup>18</sup>, vereinfacht kann jedoch der vom Hersteller angegebene Verbrauch<sup>19</sup>  $Verbr_{el}$  angenommen und ggf. mit der Konstante  $c_{Verbr}$  an reale Bedingungen angepasst werden:

$$E_{Fahrt,t} = S_{Fahrt,t} \times \frac{c_{Verbr} \times Verbr_{el}}{100}$$

Die beim Aufladen der Batterie in einem Zeitintervall gespeicherte Energie  $E_{Lade,t}$  hängt von der Ladeleistung  $P_{Lade,t}$  und der Ladedauer  $T_{Lade,t}$  ab:

$$E_{Lade,t} = \int_{t=0}^{T_{Lade,t}} P_{Lade,t}(t) dt$$

Vereinfacht wird angenommen, dass die Ladeleistung eines Ladevorgangs in einem Zeitintervall konstant bleibt:

$$P_{Lade,t} \text{ const.} \Rightarrow E_{Lade,t} = T_{Lade,t} \times P_{Lade,t}$$

Zur Berechnung der gesamten Änderung des Ladestands innerhalb eines Zeitintervalls ( $\Delta SOC_t$ ) müssen nun alle Energieänderungen summiert werden. Es ist auch möglich, dass sich innerhalb eines Zeitintervalls mehrere Fahrten oder Ladevorgänge überlagern, dieser Fall wird im Unterkapitel 3.2.4 näher behandelt.

$$\Delta SOC_t = SOC_t - SOC_{t-1} \quad \forall t \in T \setminus \{t_0\}$$

$$\Delta SOC_t = -E_{Fahrt,t} + E_{Lade,t}$$

In dieser Arbeit wird außerdem davon ausgegangen, dass zum Aufladen des Fahrzeugs immer die maximal nutzbare Leistung  $P_{max,t}$  verwendet wird<sup>20</sup>:

$$P_{Lade,t} \in \{0, P_{max,t}\}$$

Zur Bestimmung der maximal nutzbaren Ladeleistung  $P_{max,t}$  müssen mehrere Faktoren, die die Ladeleistung begrenzen können, berücksichtigt werden. Zunächst kann eine Ladestation bedingt durch den Netzanschluss immer nur eine begrenzte maximale Ladeleistung  $P_{Ladestation,t}$  zur Verfügung stellen<sup>21</sup>. Zur vereinfachten Modellierung wird angenommen, dass, während der Fahrt automatisch  $P_{Ladestation,t} = 0$  gilt. Eine weitere obere

<sup>18</sup> Da bei Elektrofahrzeugen keine Restwärme des Motors zur Heizung des Innenraums genutzt werden kann, können bei Elektrofahrzeugen niedrige Außentemperaturen einen deutlich höheren Einfluss auf den Verbrauch haben Spicher 2012.

<sup>19</sup> Angegeben in kWh pro 100 Kilometer.

<sup>20</sup> Damit werden Ladeoptimierungsstrategien, welche  $P_{Lade}$  künstlich beschränken nicht näher betrachtet.

<sup>21</sup> Bei mehreren Ladepunkten an einer Ladestation ist nicht nur die Ladeleistung der einzelnen Ladepunkte, sondern auch die gesamte Leistung der Ladestation limitiert. Im Folgenden wird jedoch davon ausgegangen, dass jeder Ladepunkt einzeln beschränkt ist.

Grenze  $P_{\text{Verbindung},t}$  kann durch die Ladeverbindung bestehen. Verschiedene Ladesysteme wurden bereits in Unterkapitel 2.3.1 näher betrachtet.

Neben der Ladestation und der Ladeverbindung kann auch das Batteriemanagementsystem (BMS) durch eine begrenzte Ladeleistung den Ladevorgang kontrollieren, um somit Schäden an der Batterie zu verhindern und Alterungseffekte zu verringern. Vergangene Untersuchungen haben verschiedene negative Einflüsse auf die Alterung der Batterie ermittelt: Extreme Lagerungs- und Betriebstemperaturen und eine hohe Zyklen-Tiefe können eine Ursache schnellerer Abnutzung sein, des Weiteren können beim Ladevorgang eine zu hohe C-Rate und bei einem höheren SOC auch schon niedrigere Ladeleistungen schädlich für die Batterie sein (Schücking et al. 2017; Herb 2010). Zur Vermeidung von Tiefenentladungen und Überladungen wird der nutzbare SOC-Bereich ähnlich wie bei Smartphones durch den Hersteller nach oben und unten begrenzt (Liu 2017). In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass diese Begrenzung in der Angabe der Batteriekapazität  $E_{\text{Bat}}$  schon eingeflossen ist und dem Fahrer das gesamte SOC-Fenster von 0% bis 100% zur Verfügung steht. Eine Anpassung des Ladeverhaltens an die Außentemperatur wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass das BMS durch Kühlung der Batteriezellen in der Lage ist, die Betriebstemperatur während des Ladevorgangs in einem geeigneten Bereich zu halten.

Für die Ermittlung der nutzbaren Ladeleistung eines Ladevorgangs müssen also vor allem die Begrenzungen durch C-Rate und SOC berücksichtigt werden. Die C-Rate des Ladevorgangs gibt dabei das Verhältnis der Stromstärke des Stromflusses zur elektrischen Ladung der Batterie<sup>22</sup> an (Liu 2017). Die Begrenzung der Ladeleistung durch die C-Rate ist sehr fahrzeugspezifisch, weil die tatsächliche  $C_{\text{rate}}$  eines Ladevorgangs nicht nur von der Ladeleistung  $P_{\text{Lade}}$ , sondern auch von der Batteriekapazität  $E_{\text{Bat}}$  und der Nennspannung  $U_{\text{Nenn}}$  des Fahrzeugs abhängt und zudem verschiedene Batterien verschiedene C-Raten erlauben (Vezzini 2010).

Deshalb wird vereinfacht für die Berechnung der maximal möglichen Ladeleistung eine konstante Nennspannung von  $U_{\text{Nenn}} = 400 \text{ V}$  angenommen<sup>23</sup>. Dadurch kann die Grenze

---

<sup>22</sup> Die elektrische Ladung der Batterie (oft auch Nennkapazität genannt) ist meist in Ampere-Stunden (Ah) angegeben. In dieser Arbeit wird zur exakteren Angabe der Batteriekapazität jedoch die gespeicherte Energiemenge in kWh angegeben, welche neben der elektrischen Ladung auch die Nennspannung der Batterie berücksichtigt.

<sup>23</sup> Diese Annahme ist für AC-Ladung plausibel, da die Ladeleistung (max. 3,7 kW) einphasiger Ladevorgänge trotz niedriger Spannung (230 V) bei den betrachteten Batteriekapazitäten unterhalb der Begrenzungen liegt. Zukünftig sind jedoch auch Nennspannungen über 400 V für Fahrzeuge denkbar (Schöttle und Bitsche 2017).

der Ladeleistung  $P_{CRate}$ <sup>24</sup> in direkten Zusammenhang mit der Batteriekapazität  $E_{Bat}$  gesetzt und durch Vorgabe einer maximalen C-Rate  $C_{rate,max}$  berechnet werden:

$$C_{rate} = \frac{I}{Q} = \frac{I \times 400 \text{ V}}{Q \times 400 \text{ V}} = \frac{P_{Lade}}{E_{Bat}}$$

$$P_{CRate} = C_{rate,max} \times E_{Bat}$$

Da eine höhere Batteriekapazität bei gleichbleibender C-Rate eine höhere Ladeleistung ermöglicht sind vor allem Fahrzeuge mit einer großen Batterie für Schnellladeverfahren mit hohen Ladeleistungen geeignet. Eine C-Rate  $\leq 1$  hat i.d.R. keinen signifikanten Einfluss auf die Alterung der Batterie, Schnellladevorgänge mit einer C-Rate zwischen 1 und 3 können dagegen aufgrund größerer Abwärme durchaus schädlich für eine Batterie sein (Schücking et al. 2017). Ein weiterer Effekt hoher C-Raten ist die ungleichmäßige Aufladung der Batteriezellen, weshalb durch die ausschließliche Nutzung von Schnellladepunkten die Leistungsfähigkeit der Batterien schnell abnehmen kann (Vezzini 2010).

Die Begrenzung der Ladeleistung in Abhängigkeit des SOCs der Batterie wird in verschiedenen Fahrzeugen unterschiedlich gehandhabt (Kaschub 2017; Schücking et al. 2017), es lässt sich jedoch ein vereinfachter Zusammenhang herstellen, der für die Ziele dieser Arbeit ausreicht. Die in Elektrofahrzeugen verbauten Lithium-Ionen-Batterien werden nach dem sogenannten IUa-Verfahren geladen. Dabei wird die Batterie zunächst bei konstanter Stromstärke<sup>25</sup> und anschließend bei konstanter Spannung geladen, wobei in dieser zweiten Ladephase die Stromstärke exponentiell abfällt und somit nur deutlich langsamer Energie zugeführt werden kann. Sobald der Ladestrom eine bestimmte Grenze unterschreitet schaltet die Batterie den Ladevorgang selbstständig ab (Liu 2017). Die SOC-Grenze, an dem der Übergang zwischen den beiden Ladephasen erfolgt, hängt dabei nicht nur von der Ladeleistung, sondern auch von der Zelltechnologie der Batterie ab, liegt jedoch meist etwa bei 75-80 % (Kaschub 2017, S. 72–74; Leitinger und Litzlbauer 2011). Im Folgenden wird auf Basis verschiedener gemessener Ladekurven (Schücking et al. 2017; Kaschub 2017) vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen maximaler Ladeleistung  $P_{SOC,t}$  und  $SOCproz_{t-1}$  angenommen:

$$P_{SOC,t}(SOCproz_{t-1}) = 3 \frac{A}{Ah} \times E_{Bat} \times (1 - SOCproz_{t-1})$$

<sup>24</sup>  $P_{CRate}$  ist ein zeitpunktunabhängiger Wert, da die maximale C-Rate und die Batteriekapazität sich über den betrachteten Zeitraum nicht ändern.

<sup>25</sup> Dieser Abschnitt des Ladevorgangs wird im Folgenden Hauptladephase genannt.

Die SOC-abhängige maximale Ladeleistung  $P_{SOC,t}$  berücksichtigt außerdem die fahrzeug-spezifische Batteriekapazität, sodass auch hier vor allem die maximale C-Rate betrachtet wird. Bei einem SOC von 0% sind Schnellladevorgänge mit einer C-Rate von bis zu 3 erlaubt, ab einem SOC von 66,6% sind nur noch Normalladevorgänge mit einer C-Rate  $\leq 1$  erlaubt. In Abbildung 1 ist  $P_{SOC,t}$  in Abhängigkeit des prozentualen SOC für ein Beispiel-fahrzeug mit einer Batteriekapazität von 22 kWh<sup>26</sup> als schraffierte Fläche abgebildet.

Die maximal nutzbare Ladeleistung  $P_{max,t}$  zu einem bestimmten Zeitpunkt ist das Minimum aller zuvor bestimmten Begrenzungen und hängt somit von der verfügbaren Leistung an der Ladestation, der übertragbaren Leistung durch die Ladeverbindung, der begrenzten Leistung durch die C-Rate und damit auch durch die Batteriekapazität und der begrenzten Leistung durch den Ladestand ab:

$$P_{max,t} = \min(P_{Ladestation,t}, P_{Verbindung,t}, P_{CRate}, P_{SOC,t})$$

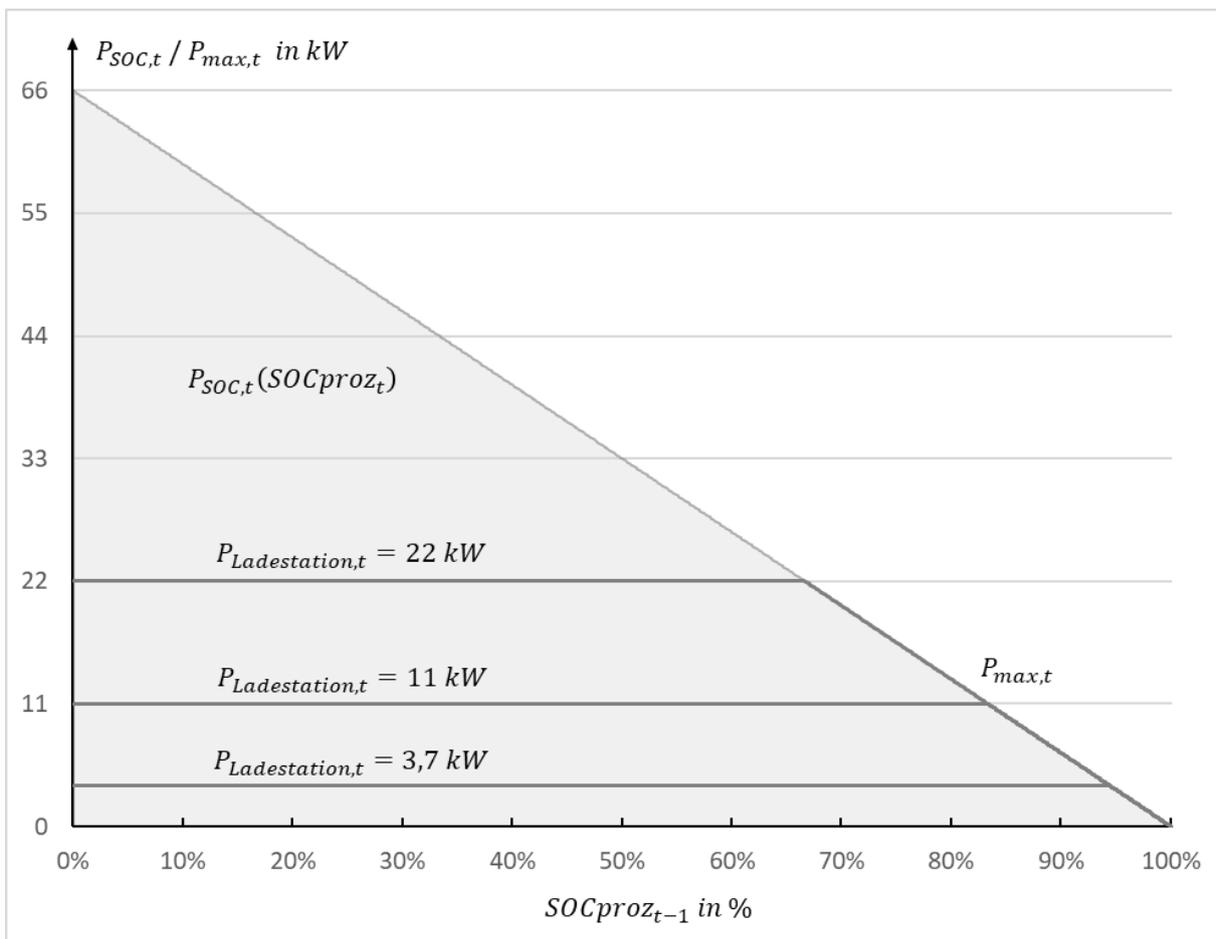


Abbildung 1:  $P_{SOC,t}$  und  $P_{max,t}$  in Abhängigkeit von  $SOCproz_{t-1}$  mit  $E_{Bat} = 22 \text{ kWh}$ .

<sup>26</sup> Bei durchschnittlichem Verbrauch ermöglicht das eine Reichweite von 100 bis 150 Kilometern.

In Abbildung 1 sind neben  $P_{SOC,t}$  auch verschiedene Kurven für  $P_{max,t}$  in Abhängigkeit von  $SOC_{proz_{t-1}}$  für ein Beispielfahrzeug mit einer Batteriekapazität von 22 kWh und typische Ladesysteme mit  $P_{Ladestation,t} = P_{Verbindung,t} = 22\text{ kW}, 11\text{ kW}$  und  $3,7\text{ kW}$  eingezeichnet. Abbildung 2 stellt den zeitlichen Verlauf von  $P_{max,t}$  und  $SOC_{proz_t}$  während eines Ladevorgangs für dieselben Beispielszenarios dar und zeigt damit den exponentiellen Leistungsabfall nach Beenden der Hauptladephase.

### 2.3.4. Ladestrategien und Lastverschiebepotentiale

Der Spielraum eines DSM zur intelligenten Steuerung der Stromnachfrage eines Fahrzeugs hängt vom individuellen Lastverschiebepotential LVP ab. Zur Bestimmung des LVPs können verschiedene Ladestrategien, die den Ladezeitpunkt und die geladene Energie beschrieben, betrachtet werden. Die Einschränkung eines Fahrzeugbesitzers hinsichtlich der Flexibilität seiner Mobilität durch Lastverschiebung kann mit Kosteneinsparungen durch flexible Strompreise belohnt werden.

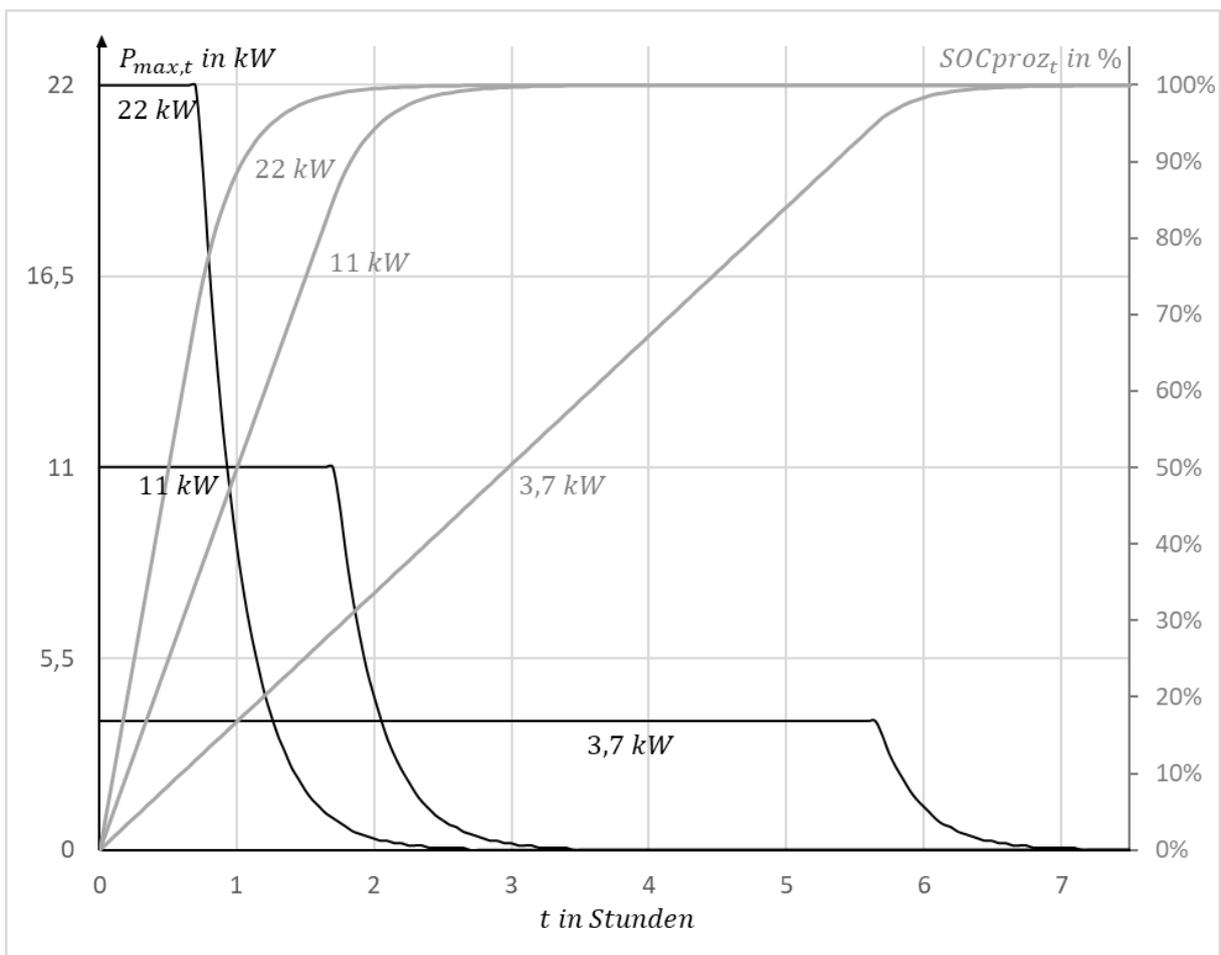


Abbildung 2:  $P_{max,t}$  und  $SOC_{proz_t}$  mit  $E_{Bat} = 22\text{ kWh}$  und verschiedene Ladestationen.

Zur Ermittlung des LVP eines Ladevorgangs eines parkenden Fahrzeugs sind mehrere Informationen nötig (Kaschub 2017, S. 70; Schäuble et al. 2017):

- Der Aufenthaltszeitraum des Fahrzeugs
- Die maximal mögliche Ladeleistung unter Berücksichtigung der vorhandenen Ladeinfrastruktur, der Batterieeigenschaften und des Ladestands des Fahrzeugs
- Der Ladestand der Batterie bei Ankunft und
- Der gewünschte / erforderliche Ladestand der Batterie bei Abfahrt

Diese Informationen liegen in den in Kapitel 3 generierten Ladeprofilen allesamt vor: Der Aufenthaltsort und der Zeitraum in dem das Fahrzeug parkt können direkt aus den MOP-Daten ausgelesen werden<sup>27</sup>, während die maximal mögliche Ladeleistung am Aufenthaltsort durch eine Nutzereingabe variiert werden kann. Der Ladestand bei Ankunft und Abfahrt ergibt sich durch die verbrauchte Energie vergangener und zukünftiger Fahrten. Somit kann für die einzelnen Fahrzeugprofile während der gesamten Parkdauer das LVP bestimmt werden<sup>28</sup>.

Im Folgenden werden verschiedene Ladestrategien beschrieben, die sich vor allem hinsichtlich der Flexibilität des Nutzers hinsichtlich anstehender Fahrten unterscheiden. Die einfachste und bisher am häufigsten verwendete Ladestrategie ist das unkontrollierte Laden, welches im Folgenden *Maximal-Strategie* genannt wird. Diese Strategie lässt dem Nutzer größtmögliche Flexibilität hinsichtlich seiner zukünftigen Mobilität.

***Maximal-Strategie:*** Starte den Ladevorgang bei Ankunft des Fahrzeugs mit maximal möglicher Ladeleistung, stoppe den Ladevorgang erst, wenn der maximale Ladestand des Fahrzeugs erreicht ist.

Neben der Maximal-Strategie sind folgende Variationen des Ladezeitraums möglich<sup>29</sup>:

- Ein späterer Beginn des Ladevorgangs
- Eine Unterbrechung des Ladevorgangs
- Eine Ladeleistung unterhalb der max. möglichen Ladeleistung des Systems<sup>30</sup> oder

---

<sup>27</sup> Der Aufenthaltsort wird hierbei aus dem Zweck der zuvor zurückgelegten Fahrt interpretiert.

<sup>28</sup> Während der Fahrt ist die maximal mögliche Ladeleistung gleich null und somit besteht auch keine LVP.

<sup>29</sup> Diese sind auch miteinander kombinierbar.

<sup>30</sup> Dieses Vorgehen ist zum Beispiel denkbar, um die Batterie zu schonen. Es wird in dieser Arbeit aber davon ausgegangen, dass die Batterie bereits selbstständig die maximal mögliche Ladeleistung steuert und dies somit nicht mehr vom Fahrzeugbesitzer oder Netzbetreiber berücksichtigt werden muss.

- Ein vorzeitiges Beenden des Ladevorgangs, sobald alle geplanten Wegstrecken vor der nächsten Lademöglichkeit mit der geladenen Energie durchführbar sind.

Daraus ergibt sich eine weitere mögliche Extrem-Ladestrategie, welche im folgenden *Minimal-Strategie* genannt wird:

***Minimal-Strategie:*** Starte den Ladevorgang so spät wie möglich mit maximaler Ladeleistung und beende den Ladevorgang bereits dann, wenn der für die kommenden Fahrten benötigte Ladestand erreicht ist.

Im Folgenden werden vor allem die beiden beschriebenen Extrem-Ladestrategien betrachtet, da sich aus der Differenz der so erreichbaren Ladestände das maximale LVP bei maximal möglicher Ladeleistung berechnen lässt (Vorgehensweise analog zu Kaschub 2017, S. 72; Kaschub et al. 2013). In der Praxis sind jedoch auch verschiedene Ladestrategien denkbar, die innerhalb dieser beiden Extrem-Ladestrategien liegen. In Abbildung 3 sind die Ladestände der Max.- und Min.-Strategie sowie das LVP als Differenz der beiden beispielhaft dargestellt. Außerdem sind als Linien folgende alternative Ladestrategien eingezeichnet:

- Beispiel 1: Starte den Ladevorgang bei Ankunft des Fahrzeugs und beende den Ladevorgang bereits dann, wenn der für die kommenden Fahrten benötigte Ladestand erreicht ist.
- Beispiel 2: Starte den Ladevorgang bei Ankunft des Fahrzeugs, unterbreche ihn bei einem festen Ladezustand („Notladung“) und lade so spät wie möglich die übrige benötigte Kapazität für die kommenden Fahrten.
- Beispiel 3: Starte den Ladevorgang bei Ankunft des Fahrzeugs, unterbreche ihn bei einem festen Ladezustand („Notladung“) und lade so spät wie möglich das Fahrzeug bis zum maximal erreichbaren Ladezustand.
- Beispiel 4: Starte den Ladevorgang so spät wie möglich und beende den Ladevorgang erst bei Erreichen des maximalen Ladezustands.

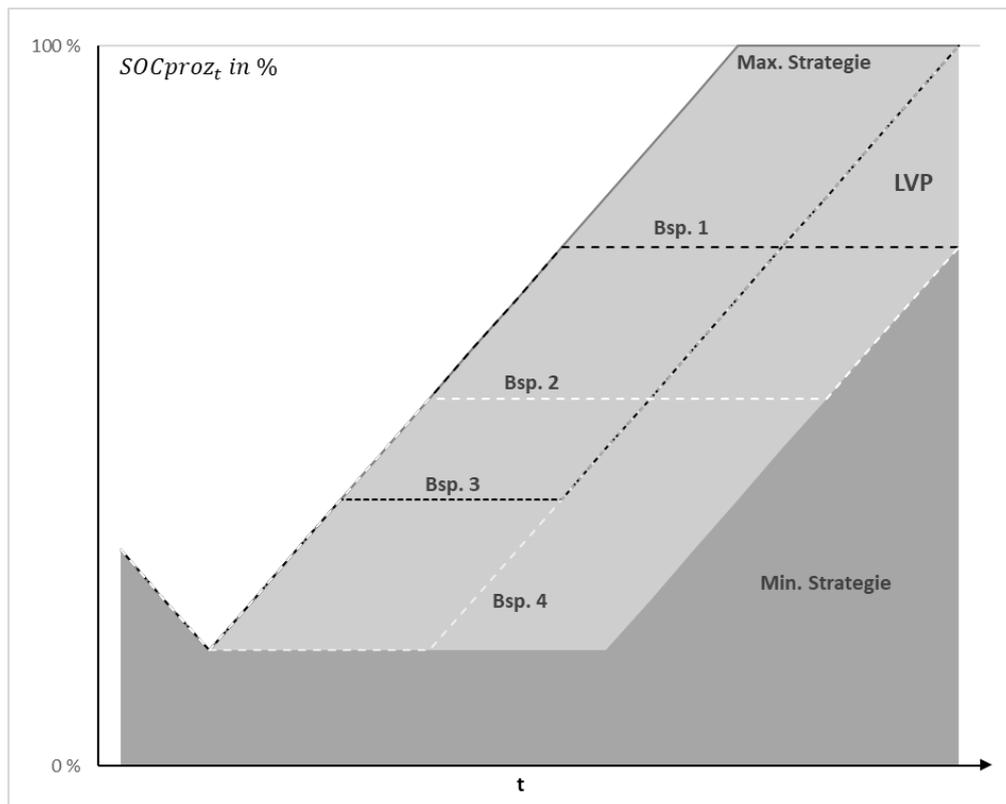


Abbildung 3: (Extrem-)Ladestrategien und Lastverschiebepotentiale

### 2.3.5. Optimierung des Ladeverhaltens

Die in diesem Kapitel bereits angesprochene Optimierung des Ladeverhaltens muss verschiedene Perspektiven und Interessen berücksichtigen: Zunächst gilt es, den Zeitpunkt des Ladevorgangs dem Mobilitätsverhalten des Fahrzeugbesitzers anzupassen, sodass dieser möglichst geringe Einschränkungen seiner Mobilität erfährt. Außerdem hat der Fahrzeugbesitzer Interesse an einer geringen Alterung der Batterie und geringen Kosten durch die Aufladung der Batterie (Leitinger und Litzlbauer 2011).

Eine weitere Perspektive ist die Sicht der Netzbetreiber, die durch ein gesteuertes Laden der Fahrzeuge einen reibungslosen und gleichzeitig kostenminimalen Betrieb der Stromversorgung ermöglichen möchten (Grahn et al. 2014). Dazu müssen durch geschickte Lastverschiebung lokale Spitzenlasten vermieden werden (Sundstrom und Binding 2012; Schönfelder et al. 2009; Hahn et al. 2013). Durch den zukünftigen Einsatz eines DMS in Elektrofahrzeugen können die Batterien der Fahrzeuge außerdem genutzt werden, um durch die Bereitstellung von Regelleistung gezielt Netzschwankungen auszugleichen (Schill et al. 2016; Mohsenian-Rad et al. 2010).

Abschließend gilt es noch, die angebotene Energiemenge durch die Stromerzeugung zu betrachten. Die erzeugte Strommenge durch erneuerbarer Energiequellen ist im Vergleich zu herkömmlichen Kraftwerken deutlich größeren Schwankungen unterworfen. Dadurch wird eine Anpassung des Ladeverhaltens an das Stromangebot bei einer wachsenden Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge und einen immer größeren Anteil regenerativen Energien am Strom-Mix immer wichtiger (Hacker et al. 2011, S. 105–106; Umweltbundesamt 2016).

Gegenstand zukünftiger Forschungen zur Optimierung des Ladeverhaltens muss neben der Bereitstellung technischer Möglichkeiten auch die Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen, Geschäftsmodellen und Mobilitätsdienstleistungen sein (Bundesregierung 2011; Ried et al. 2013), die umweltfreundliches und emissionsarmes Verhalten für alle Beteiligten wirtschaftlich attraktiv machen und Barrieren abbauen (Döring und Aigner-Walder 2017).

## 3 Generierung der Fahrzeugprofile

Am 1. Januar 2018 waren deutschlandweit 53.861 reine Elektrofahrzeuge (BEV) und 44.419 Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge zugelassen (KBA 2018). Damit steigt der relative Anteil an Elektrofahrzeugen am Gesamtbestand von 46,5 Millionen Pkw zwar weiterhin deutlich, dennoch sind repräsentative Untersuchungen zur Elektromobilität auf der Basis von realen Fahrzeugdaten bisher nicht möglich. Außerdem gibt es derzeit noch deutliche Unterschiede zwischen den Nutzern von herkömmlichen Pkws und Elektrofahrzeugen (sogenannte Early-Adopters), was repräsentative Untersuchungen zusätzlich erschwert (Frenzel et al. 2015). Daher eignen sich vor allem Untersuchungen zum generellen Mobilitätsverhalten, da angenommen werden kann, dass sich der Mobilitätsbedarf durch eine höhere Verbreitung von Elektromobilität nur geringfügig ändert.

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Erzeugung von repräsentativen Fahrzeugprofilen unter Verwendung der Daten des deutschen Mobilitätspanels (siehe 2.1) beschrieben. In diesen Profilen werden zum einen Informationen zum Aufenthaltsort des Fahrzeugs und zum Energieverbrauch durch zurückgelegte Fahrten über einen Zeitraum von einer Woche gespeichert, zum anderen wird aus einer zuvor festgelegten Ladefrastruktur das Ladeverhalten und das Lastverschiebepotential bei der Verwendung eines mit dem ursprünglichen Fahrzeug vergleichbaren Elektrofahrzeugs abgeleitet. Da die befragten Haushalte der MOP-Daten einen repräsentativen Querschnitt für die Bundesrepublik Deutschland darstellen, können die Fahrzeugprofile anschließend auch für gesamtheitliche Betrachtungen verwendet werden.

Die Fahrzeugprofile sollen Grundlage weiterer Untersuchungen innerhalb der Forschungsgruppe für Transport und Energie am IIP sein. Um den Anforderungen zur weiteren Verwendung zu entsprechen wurde zu Beginn der Abschlussarbeit eine Anforderungsanalyse mit den Mitarbeitern der Forschungsgruppe durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Workshops sind im ersten Unterkapitel zusammengefasst. Im Rahmen dieser Anforderungsanalyse wurden funktionale wie auch technische Anforderungen definiert.

Der zweite Teil dieses Kapitels beschreibt detailliert die einzelnen notwendigen Schritte zur Generierung der Fahrzeugprofile und geht dabei genauer auf die verwendeten Daten aus dem Mobilitätspanel, die Eingabemöglichkeiten durch den Nutzer, getroffene Annahmen und das Format der Ergebnisse ein. Die Struktur des Unterkapitels entspricht den fünf aufeinander aufbauenden Modulen des MATLAB-Algorithmus, um so neben dem Verständnis der Modellierung und der Interpretation der Ergebnisse auch ein Verständnis des Programmcodes zu erleichtern.

### **3.1. Zielsetzung und Anforderungsanalyse**

Im Vorfeld dieser Abschlussarbeit wurde mit der Forschungsgruppe für Transport und Energie im Rahmen eines gemeinsamen Workshops eine Anforderungsanalyse durchgeführt, die die Zielsetzung dieser Arbeit und vor allem das Ergebnis des entwickelten MATLAB-Programms näher definieren sollte. Damit sollte sichergestellt werden, dass die entwickelten Ergebnissen auch für weitere Forschungsarbeiten innerhalb der Forschungsgruppe genutzt werden können.

Die Ergebnisse dieser Anforderungsanalyse werden im Folgenden in zwei Kategorien unterteilt: Funktionale und technische/nichtfunktionale Anforderungen. Während die funktionalen Anforderungen die verwendeten Daten und Einflussmöglichkeiten durch den Nutzer, die Ergebnisform und das zugrundeliegende Modell näher spezifizieren, befassen sich die nichtfunktionalen Anforderungen mit der technischen Ausgestaltung des Programms, dessen Schnittstellen mit anderen Umgebungen und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Böhm et al. 2002).

#### **3.1.1. Funktionale Anforderungen**

Wie bereits oben beschrieben wird bei den funktionalen Anforderungen in Anforderungen hinsichtlich der verwendeten Daten, der beeinflussbaren Eingabeparameter, der Modellierungsschritte und der Ergebnisform unterschieden. Außerdem wurde im Rahmen der Anforderungsanalyse eine Priorisierung der Anforderungen vorgenommen.

Bei der Diskussion der verwendeten Daten wurde nochmals deutlich, dass die MOP-Daten unter den vorliegenden Studien die genauesten Datensätze zum Mobilitätsverhalten in Deutschland liefern und damit am besten zur Erstellung der Fahrzeugprofile geeignet sind. Gründe dafür sind vor allem die Repräsentativität der ausgewählten Haushalte und der Berichtszeitraum von einer ganzen Woche, wodurch sowohl Übergänge

zwischen zwei Tagen, wie auch Verhaltensunterschiede zwischen Werktagen und Wochenenden berücksichtigt werden können. Zusätzlich wurde als Anforderung benannt, dass das Programm sich nicht nur auf einen Jahrgang beschränken, sondern auch zukünftige MOP-Datensätze auswerten können soll (vgl. Kapitel 2.1). Die MOP-Daten stellen neben den Fahrzeug- und Mobilitätsdaten auch viele weitere Befragungsergebnisse zur Verfügung, sodass auch eine gefilterte Untersuchung von Haushalten mit bestimmten Eigenschaften möglich ist (siehe 3.2.1).

Als weitere Anforderung an den MATLAB-Algorithmus wurden mehrere modifizierbare Eingabeparameter genannt, mit denen sich verschiedene zukünftige Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität untersuchen lassen. Dabei wurden unter anderem das Ladeverhalten der Haushalte, die vorhandene Ladeinfrastruktur und die Fahrzeugdaten der Elektrofahrzeuge genannt.

Die Ladeinfrastruktur bzw. das Ladeverhalten der Haushalte soll dadurch beeinflussbar sein, dass verschiedene Orte, an denen ein Fahrzeug geladen werden könnte (z.B. „zu Hause“ oder „auf der Arbeit“), ausgewählt und miteinander kombiniert werden können. Außerdem soll zu jeder genutzten Lademöglichkeit individuell die maximale effektive Ladeleistung angegeben werden können. Als charakteristische Merkmale der Elektrofahrzeuge wurden die Batteriekapazität und der Verbrauch genannt, aus deren Kombination sich auch die Reichweite des Fahrzeugs ergibt. Die Möglichkeit der Anpassung dieser Fahrzeugdaten und die Verwendung verschiedener Fahrzeugtypen galt aber als optional. Um das Laden des Elektrofahrzeugs realistischer abzubilden wurden außerdem die Möglichkeit von Vorgaben zum Ladeverhalten der Batterie genannt, wie zum Beispiel ein minimaler und maximaler SOC und eine Verringerung der genutzten Ladeleistung bei steigendem SOC, um diese zu schonen.

Da manche Workshop-Teilnehmer schon selbst mit den MOP-Daten gearbeitet hatten, konnten einige Schwierigkeiten hinsichtlich der Modellierung benannt und besprochen werden, vor allem die fehlende Zuordnung der Wege zu den Fahrzeugen der Haushalte sowie Anpassungen der Fahrten, die notwendig sind um einen reibungslosen Wochenübergang zu ermöglichen. Im Kontext der funktionalen Anforderungen wurden verschiedene Optionen durchgesprochen, wie mit Mobilitätsprofilen, die durch ein rein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug aufgrund einer zu geringen Reichweite nicht abgebildet werden können, umgegangen werden soll. Die Möglichkeit, dass sich durch einen Umstieg auf Elektrofahrzeuge das Mobilitätsverhalten der Personen ändert wurde im

Workshop zwar kurz angesprochen, für die Modellierung der Fahrzeugprofile in dieser wissenschaftlichen Arbeit jedoch explizit ausgeklammert.

Als zentrales Ergebnis der Abschlussarbeit wurden der Algorithmus zur Erzeugung der elektrifizierten Fahrzeugprofile genannt, die unter Berücksichtigung der Eingabeparameter und des Aufenthaltsorts das Lastverschiebepotential jedes Fahrzeugs abbilden. Ein weiterer Wunsch war die Zusammenfassung dieser Profile zu einer aggregierten Ladelastkurve und zu Standardlastprofilen, die durch die Verwendung der Gewichtungsfaktoren der MOP-Daten möglichst repräsentativ für Deutschland sein sollten. Als weiteres Ziel wurde genannt, die Ergebnisse der Haushaltsbefragungen dahingehend zu nutzen, dass man die Fahrzeugprofile nach verschiedenen sinnvollen Kriterien unterscheiden kann, zum Beispiel nach Regionen, Regionstypen, Nutzergruppen, etc.

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde außerdem die Aggregation der einzelnen Lastverschiebepotentiale diskutiert. Für diese wissenschaftliche Arbeit wurde als Ziel gesetzt, zu prüfen inwiefern diese Aggregation mit den Ladeprofilen sinnvoll und technisch umsetzbar ist. Dazu finden sich in Kapitel 4.2.3 zwei verschiedene Ansätze, allerdings kann dies auch noch Schwerpunkt zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Als mögliche weitergehende Auswertung der Fahrzeugprofile wurde die Cluster-Bildung verschiedener Nutzergruppen angesprochen, jedoch wurde hierbei auf die begrenzte Bearbeitungszeit und andere Forschungsarbeiten verwiesen.

### **3.1.2. Technische Anforderungen**

Als grundlegendes Ziel wurde die Wiederverwendbarkeit des Programms und dessen Ergebnissen für spätere Untersuchungen innerhalb der Forschungsgruppe genannt. Für eine nachhaltige Nutzbarkeit sind neben der Berücksichtigung inhaltlicher Vorgaben auch einige nichtfunktionale Anforderungen zu erfüllen:

- Angemessene Performance<sup>31</sup>
- Strukturierter und verständlicher Programmcode
- Dokumentierte Annahmen und Modellierungsschritte
- Nachvollziehbarer Umgang mit inkonsistenten/unvollständigen Datensätzen und
- Langfristige Anpassungsfähigkeit an Änderungen der inhaltlichen Anforderungen

---

<sup>31</sup> Dies hat bei umfangreichen Excel-Auswertungen in der Vergangenheit ein größeres Problem dargestellt.

Des Weiteren wurden weitere optionale Anforderungen angesprochen, jedoch nicht detaillierter formuliert, so zum Beispiel die Implementation von Schnittstellen zu bereits existierenden Modellen und die Möglichkeit, neben den MOP-Daten weitere Datenquellen zu verwenden, beispielsweise Messungen von realen Elektrofahrzeugen.

Darüber hinaus wurden die Vor- und Nachteile verschiedener Programmiersprachen und Entwicklungsumgebungen diskutiert. Schließlich konnten sich die Workshop-Teilnehmer auf die Software MATLAB des Unternehmens MathWorks einigen, da diese eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Programmierung und Datenaufbereitung bietet und die meisten Mitarbeiter der Forschungsgruppe ebenfalls mit der Software vertraut sind. Durch die ausreichenden MATLAB-Kenntnisse der zukünftigen Nutzer entfällt eine aufwendige Ausgestaltung einer Benutzeroberfläche.

Der Vorschlag, die MOP-Daten aus mehreren Erhebungsjahren in der institutseigenen MySQL-Datenbank zu speichern fand breite Unterstützung, da MATLAB eine Schnittstellenfunktion zur Datenbank bietet. Es wurde außerdem der Vorschlag gemacht, Ergebnisse wie beispielsweise die Fahrzeugprofile in die Datenbank zu übertragen, um so die Ergebnisse auch ohne genauere Kenntnisse des Programms nutzen zu können.

## **3.2. MATLAB-Algorithmus zur Erzeugung der Mobilitäts- und Ladeprofile**

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen Schritte, die zur Generierung der Fahrzeugprofile notwendig sind, beschrieben. Der MATLAB-Algorithmus gliedert sich in fünf aufeinander aufbauende Module, welche jeweils in einem Abschnitt dieses Unterkapitels näher behandelt werden. Dabei wird auf die verwendeten Daten aus der MOP-Erhebung, die variablen Nutzereingaben, notwendige Modellierungsschritte, getroffene Annahmen und schließlich auf die Art und Form der (Zwischen-)Ergebnisse eingegangen. Der Programmablauf wird durch das Flow Chart in Abbildung 4 nochmals visualisiert.

Um die Benutzung des MATLAB-Algorithmus zu erleichtern wurde zusätzlich zu den Modulen eine Main-Datei geschrieben, in der die Nutzereingaben variiert und die als `functions` abgebildeten Module entweder einzeln<sup>32</sup> oder am Stück gestartet werden können. Die verwendeten Nutzereingaben bleiben als Variablen gespeichert, der Zugriff auf die Ergebnisse der Auswertung erfolgt ebenfalls in der Main-Datei.

---

<sup>32</sup> Hierzu müssen die einzelnen Module über den Befehl „Run Section“ gestartet werden.

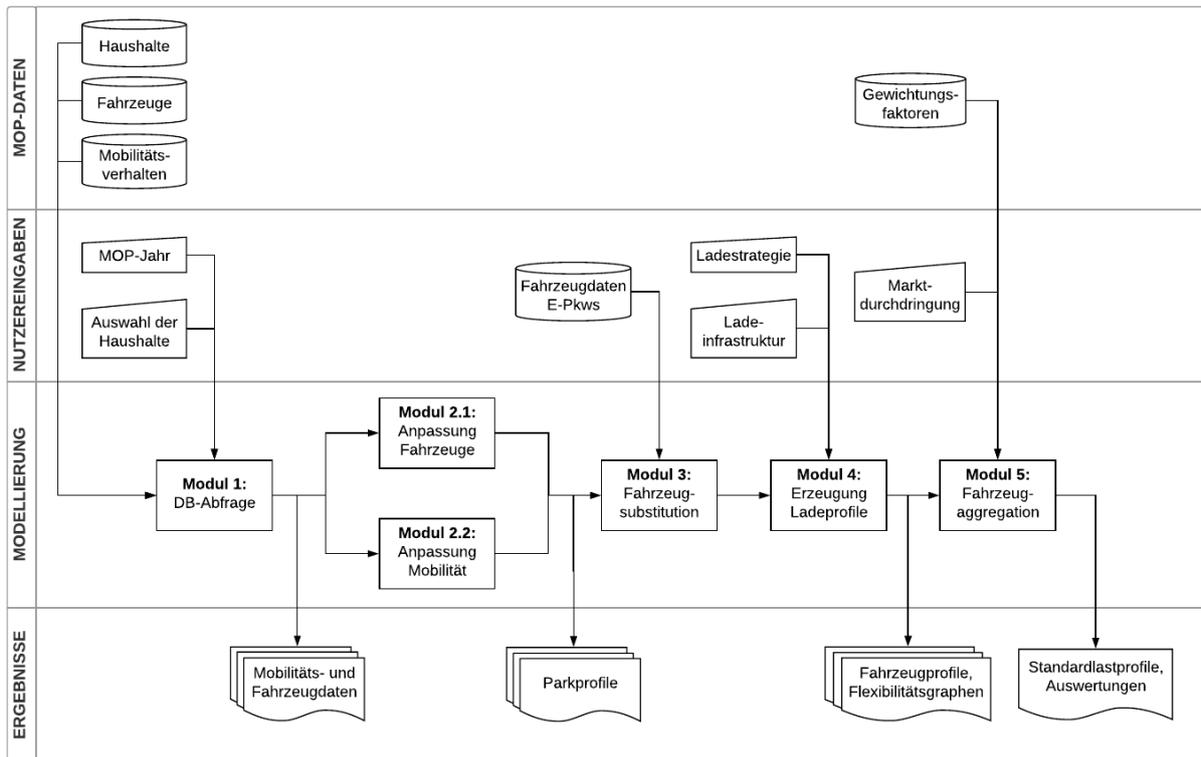


Abbildung 4: Flow Chart zur Erzeugung der Fahrzeugprofile und der Ladelastkurve.

### Modul 1: Auswahl der Haushalte und Datenbankabfrage

Durch eine Schnittstelle zur MySQL-Datenbank des IIP werden die benötigten MOP-Daten abgefragt und in Tabellen gespeichert. Der Benutzer wählt dabei das Jahr der Erhebung und hat die Möglichkeit, die betrachteten Haushalte nach verschiedenen Kriterien einzugrenzen.

### Modul 2: Anpassung der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten

Die Fahrzeug- und Mobilitätsdaten aus dem Mobilitätspanel werden für die späteren Schritte angepasst. Außerdem erfolgt eine Zuordnung der in den Haushalten zurückgelegten Pkw-Strecken zu den im Haushalt verfügbaren Fahrzeugen, sodass man schließlich vollständige Parkprofile der Fahrzeuge erhält.

### Modul 3: Fahrzeugsubstitution

Mithilfe der Herstellerangaben von realen Fahrzeugen, die in einer Datenbank gesammelt werden, werden die durchschnittlichen Fahrzeugeigenschaften heutiger Elektrofahrzeuge berechnet. Anschließend wird den Fahrzeugdaten der befragten Haushalte ein dem Fahrzeugsegment entsprechendes Durchschnitts-BEV und -PHEV zugeordnet.

#### Modul 4: Berechnung der Ladeprofile

Durch die Kombination der Mobilitätsdaten mit den fahrzeugspezifischen Daten der substituierten Fahrzeuge wird die verbrauchte Energie und damit der Ladebedarf ermittelt. Ausgehend von den Standzeiten des Fahrzeugs und den vom Benutzer getroffenen Annahmen hinsichtlich der genutzten Ladeinfrastruktur werden die beiden Extrem-Ladestrategien und damit die Lastverschiebepotentiale berechnet.

#### Modul 5: Fahrzeugaggregation und Auswertungen

Die einzelnen Fahrzeugprofile werden unter Verwendung der Gewichtungsfaktoren der MOP-Daten und vom Benutzer getroffenen Annahmen hinsichtlich der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu einer Fahrzeugflotte zusammengefasst. Es erfolgen verschiedene Auswertungen hinsichtlich des Mobilitäts- und Ladeverhaltens.

#### 3.2.1. Auswahl der Haushalte und Datenbankabfrage

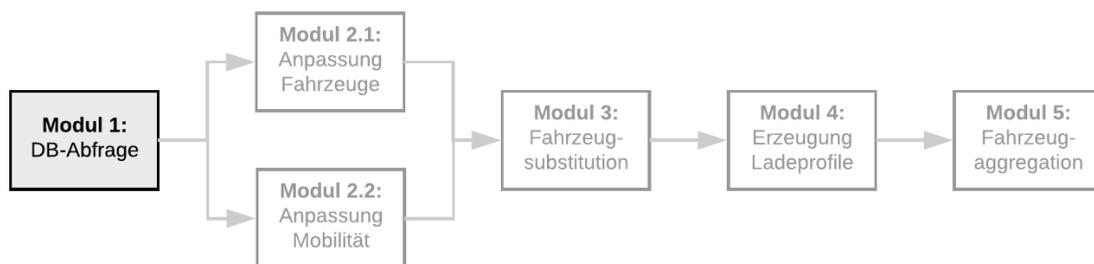


Abbildung 5: Flow Chart – Modul 1: DB-Abfrage.

Im ersten Modul des Algorithmus werden zwei SQL-Abfragen durchgeführt, um die für die folgenden Module benötigten Fahrzeug- und Mobilitätsdaten des Mobilitätspanels aus der IIP-Datenbank zu speichern. Dazu muss zunächst eine Verbindung von MATLAB zur Datenbank „iip-web-0001\_mobilitystudies“ auf dem Server „mysql2g.scc.kit.edu“ aufgebaut werden, wobei zu beachten ist, dass nur mit einer funktionierenden VPN-Verbindung auf den KIT-Server zugegriffen werden kann. Nachdem die beiden Datenbankabfragen erfolgt sind und die unbehandelten MOP-Daten in den beiden Tabellen `Fzg_Roh` und `Wege_Roh` gespeichert wurden, wird die Datenbankverbindung wieder aufgelöst. Die gespeicherten Rohdaten bleiben auch nach Durchführung der anschließenden Module unverändert, sodass auch nachträglich geprüft werden kann, welche Ausgangsdaten für die Auswertungen verwendet wurden.

Der Benutzer hat zwei Möglichkeiten, die Auswahl der Daten zu beeinflussen: Durch die Variable `jahr` kann er den Jahrgang der MOP-Erhebung bestimmen<sup>33</sup> und mithilfe der Stringvariable `bedingungen_HH` kann eine gefilterte Abfrage nach bestimmten Haushaltsmerkmalen erfolgen. Diese Eingabe muss SQL-kompatibel sein, sodass der Text in den beiden SQL-Befehlen an die `WHERE`-Klausel angehängt werden kann. In Tabelle 17 (Anhang A) sind die möglichen Auswahlkriterien aufgelistet.

*Beispiel für eine Abfrage aller Haushalte in Baden-Württemberg im Jahr 2015/2016:*

```
jahr = '1516';
bedingungen_HH = 'AND (tblHH.GKZ BETWEEN 8000 AND 8999)';
```

Die abgefragten Variablen der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgelistet und beschrieben. In der Abfrage werden nur Haushalte berücksichtigt, die über mindestens einen eigenen Pkw verfügen und nur Fahrtstrecken gespeichert, die mit dem Hauptverkehrsmittel „Pkw als Fahrer“ zurückgelegt wurden.

Tabelle 3: Beschreibung der in Modul 1 abgefragten Fahrzeugdaten.

Variable	Beschreibung
ID	ID des Haushalts
PKWHH	Anzahl der im Haushalt vorhandenen Pkw
GEWHHWO	Hochrechnungsfaktor des Haushalts
PKWNR	ID des Pkw innerhalb des Haushalts (aufsteigend nach absteigender geschätzter Jahresfahrleistung (Angabe der Teilnehmer))
PS	Motorleistung des Pkw in PS
BENZIN <sup>34</sup>	Kraftstoff
KMJAHR	Geschätzte Kilometer-Leistung pro Jahr
ANZTAGE	Anzahl der berichteten Tage im Tankbuch
GESKM	Im Berichtszeitraum des Tankbuchs insgesamt gefahrene Entfernung in km
KMpWOCHE	Hochrechnung der gefahrenen Kilometer auf eine Woche
VERB	Durchschnittlicher Verbrauch des Fahrzeugs in Litern pro 100 km im Berichtszeitraum (Tankbuch!)
HUB_KLAS <sup>35</sup>	Hubraumklasse des Fahrzeugs [ccm]
ALT_KLAS <sup>36</sup>	Altersklasse des Fahrzeugs
SEGMENT <sup>37</sup>	Pkw-Segment nach KBA-Klassifikation

<sup>33</sup> Derzeit sind die Datensätze aus den Erhebungen „1314“, „1415“ und „1516“ in der Datenbank verfügbar.

<sup>34</sup> Codierung siehe MOP-Codeplan.

<sup>35</sup> Codierung der Hubraumklassen: 1:  $\leq 1399$  ccm, 2: 1400 – 1599 ccm, 3: 1600 – 1999 ccm, 4:  $\geq 2000$  ccm.

<sup>36</sup> Codierung der Altersklassen: 1:  $\leq 0$ -3 Jahre, 2: 4-6 Jahre, 3: 7-9 Jahre, 4: 10 Jahre und älter.

<sup>37</sup> Die Codierung wird später ausführlicher behandelt.

Tabelle 4: Beschreibung der in Modul 1 abgefragten Mobilitätsdaten.

Variable	Beschreibung
IDHH	ID des Haushalts
PKWHH	Anzahl der im Haushalt vorhandenen Pkw
WEG_P	Nummer der Person innerhalb des Haushalts, die den Weg zurückgelegt hat
WEG_BERTAG	Berichtstag (Zahl der Tage seit Berichtsbeginn)
WEG_WOTAG	Wochentag (1 = Montag, ...)
WEG_DATUM	Datum des Tages
TAG_FAHRER	Anzahl der Personen im Haushalt, die am Berichtstag Wege mit einem Pkw zurücklegen
DIFF	Differenz PKWHH – TAG_FAHRER
WEG_NRT	Ordnungszahl des Weges an einem Tag
WEG_AB	Uhrzeit, zu der der Weg begonnen wurde
WEG_AN	Uhrzeit, zu der der Weg beendet wurde
WEG_KM	Von der befragten Person angegebene oder geschätzte Entfernung in km
WEG_ZWECK <sup>38</sup>	Zweck des Weges, der zurückgelegt wurde

### 3.2.2. Anpassung der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten

Die Anpassung der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten wurde in zwei Teilmodule getrennt, die im Folgenden nacheinander behandelt werden.

#### Modul 2.1: Anpassung der Fahrzeugdaten

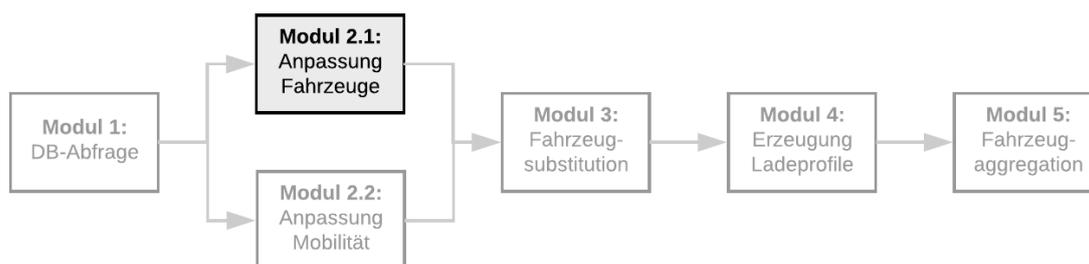


Abbildung 6: Flow Chart – Modul 2.1: Anpassung der Fahrzeugdaten.

#### Sortieren der Fahrzeug-Daten

Die Fahrzeugdaten werden aufsteigend nach Haushalts-ID (ID) und innerhalb der Haushalte nach PKWNR sortiert. Die PKWNR wird in den MOP-Daten nach absteigender geschätzter Jahresfahrleistung vergeben, sodass die kleinste PKWNR der größten Fahrleistung entspricht.

<sup>38</sup> Die Codierung wird später ausführlicher behandelt.

### Verbessern der Fahrzeugsortierung nach Fahrleistung

Bei einigen Fahrzeugen ist keine Angabe zur Jahresfahrleistung vorhanden<sup>39</sup>. Da die Sortierung der Fahrzeuge innerhalb eines Haushalts später eine wichtige Rolle bei der Zuordnung der gefahrenen Strecken spielt, werden bei fehlenden Angaben die Fahrzeuge des Haushalts neu sortiert. Dazu wird anhand der Tankbücher die durchschnittlich gefahrene Strecke pro Woche ( $KM_{pWoche}$ ) im Berichtszeitraum betrachtet.

### Ergänzen fehlender Angaben zum Fahrzeug-Segment

Bei einigen Fahrzeugen fehlt die Angabe des Fahrzeug-Segments nach KBA-Klassifikation (`SEGMENT`). Die spätere Fahrzeugsubstitution richtet sich nach diesem Segment, deshalb wird bei den Fahrzeugen, bei denen Informationen zur Leistung (`PS`) vorliegen, das entsprechende Fahrzeugsegment ergänzt. Die dafür verwendeten PS-Grenzen können durch den Benutzer über die Variablen des Arrays `leistungsgrenzen` modifiziert werden. Die in dieser Arbeit verwendete Einteilung orientiert sich an den von Hacker et. al. (2011, S. 26) verwendeten Grenzen, welche in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

Tabelle 5: Leistungsgrenzen zur Zuordnung der KBA-Segmente.

Kraftstoff	Leistung in PS	KBA-Segment (MOP-Codierung)
Alle	< 68	Mini (1)
Alle	68 – 102	Kleinwagen (2)
Alle	102 – 163,2	Kompaktklasse (3)
Benzin, ...	163,2 – 231,2	Mittelklasse (4)
Diesel	163.2 – 204	Mittelklasse (4)
Benzin, ...	≥ 231,2	Obere Mittelklasse (5)
Diesel	≥ 204	Obere Mittelklasse (5)

Quelle: (Hacker et al. 2011, S. 26)

### Ergänzen fehlender Fahrzeuge der Haushalte

Die Anzahl der berichteten Fahrzeuge pro Haushalt in den Fahrzeugdaten stimmt oft nicht mit der angegebenen Anzahl bei den Mobilitätsdaten (`PKWHH`) überein, da die Haushalte nicht für alle Fahrzeuge ein Tankbuch führen müssen und sich der Pkw-Bestand in der halbjährigen Pause zwischen den Befragungen verändern kann.

<sup>39</sup> KMJAHR = -9.

In dieser Arbeit wird von einem gleichbleibenden Mobilitätsbedarf der Haushalte ausgegangen. Damit bilden die Mobilitätsdaten die Ausgangsbasis der Untersuchungen, sodass die Fahrzeugliste an die Angabe `PKWHH` aus den Mobilitätsdaten angepasst wird. Für fehlende Fahrzeuge wird eine neue Zeile ergänzt, welche am Fahrzeugsegment „-10“ erkennbar ist, wohingegen überflüssige Fahrzeugdaten entfernt wurden<sup>40</sup>.

#### **Modul 2.2: Anpassung der Mobilitätsdaten**

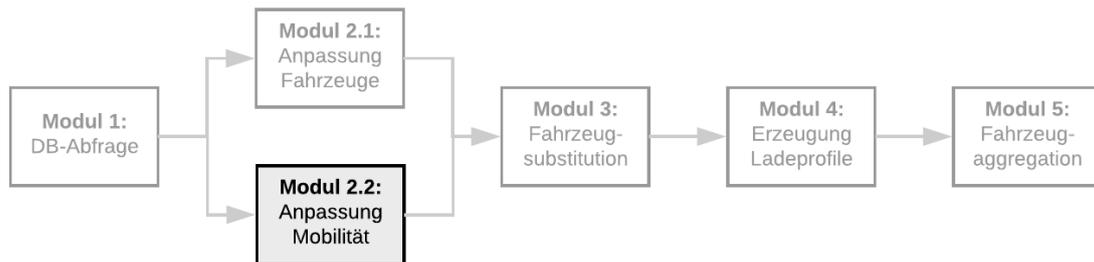


Abbildung 7: Flow Chart – Modul 2.2: Anpassung der Mobilitätsdaten.

#### **Zuordnung Wege – Fahrzeuge: Personen, die sich ein Fahrzeug teilen müssen**

Ein großes Problem bei der Verwendung der MOP-Daten ist, dass die befragten Haushalte nicht angeben, welches der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge die einzelnen Personen für ihre Pkw-Strecken nutzen. Also müssen zunächst die einzelnen Strecken den Fahrzeugen zugeordnet werden, um daraus Parkprofile ableiten zu können.

Dazu werden in den Mobilitätsdaten zwei Spalten ergänzt: Falls die Strecken zweier Personen zusammgelegt werden gibt `PERSNR2` die Personennummer an, der die Strecken zugeordnet wurden (siehe nächster Absatz), `PKWNR` gibt die Fahrzeugnummer des Haushalts an, mit der die Strecke zurückgelegt wurde. Die Reihenfolge der Nummerierung entspricht dabei der Sortierung der Fahrzeugliste (`tblFzg`) nach absteigender Fahrleistung. Damit ist über die `PKWNR` eine Zuordnung der beiden Datensätze möglich.

Zunächst wird dazu der komplizierteste Fall betrachtet, nämlich wenn an einem Berichtstag mehr Personen Wege als Fahrer mit dem Pkw zurücklegen, als dem Haushalt Fahrzeuge zur Verfügung stehen ( $PKWHH - TAG\_FAHRER = DIFF < 0$ ).

Ist nur ein Fahrzeug vorhanden ( $PKWHH == 1$ ) werden unabhängig von der fahrenden Person alle Strecken diesem Fahrzeug zugeordnet ( $PKWNR == 1$ )<sup>41</sup>. Bei mehr als einem Pkw werden iterativ die zurückgelegten Strecken zweier Personen mit Hilfe der

---

<sup>40</sup> Dieser Fall tritt nur sehr selten auf.

<sup>41</sup> Ob die Fahrten so durchführbar sind wird am Ende der Zuordnung kontrolliert.

Variable `PERSNR2` zusammengeführt, bis die Anzahl benötigter und vorhandener Fahrzeuge übereinstimmt ( $DIFF = 0$ ). Dazu werden die Strecken der Personen, die möglichst wenig Kilometer am Berichtstag zurücklegen über eine identische `PERSNR2` zu einem gemeinsamen Mobilitätsprofil zusammengeführt. Zunächst untersucht der Algorithmus, ob zwei Personen am Berichtstag nur nacheinander ein Fahrzeug benötigen. Falls nicht wird geprüft, ob eine Person sämtliche Wege zurücklegen kann, nachdem eine andere Person zu Hause angekommen ist und bevor diese die nächste Strecke zurücklegt. So konnten bei den untersuchten MOP-Daten in fast allen Haushalten die Anzahl benötigter Fahrzeuge der tatsächlich vorhandenen Anzahl angeglichen werden. Haushalte, denen an einem Berichtstag nach Durchlaufen des Algorithmus immer noch zu wenig Fahrzeuge zur Verfügung stehen ( $DIFF < 0$ ) werden aus den Mobilitäts- und Fahrzeugdaten entfernt und im Folgenden nicht weiter betrachtet (siehe 3.3.1).

#### **Zuordnung Wege – Fahrzeuge: Vergeben der Pkw-Nummer**

Nachdem im vorherigen Abschnitt sichergestellt wurde, dass den Haushalten für die täglichen (zusammengeführten) Mobilitätsprofile der Personen ausreichend Fahrzeuge zur Verfügung stehen, werden nun die Fahrzeuge den Personen zugeordnet. Im ersten Schritt wird geprüft, ob über die gesamte Woche höchstens so viele Fahrer<sup>42</sup> wie Fahrzeuge vorhanden sind ( $woche\_fahrer \leq PKWHH$ ). Falls ja wird den Mobilitätsprofilen nach absteigender wöchentlicher Fahrleistung eine `PKWNR` zugeordnet. Andernfalls wird die `PKWNR` für jeden Berichtstag unabhängig von den übrigen Tagen nach täglicher Fahrleistung vergeben. Diese Vorgehensweise kann zu einer leichten Überauslastung der Fahrzeuge führen, da in Haushalten mit mehr Fahrzeugen als Fahrern „überflüssigen“ Fahrzeugen keine Wege zugeordnet werden.

#### **Formatieren des Datums und der Uhrzeit**

In den MOP-Daten ist das Datum der aufgezeichneten Wege im Format „ddmmyy“ angegeben. Um die Zahl, die das Datum angibt auf- und absteigend sortieren zu können, wird das Format in „yymmdd“ umgewandelt. Außerdem wird in den beiden Variablen `ABZEITmin` und `ANZEITmin` die Abfahrts- und Ankunftszeit der Strecken in vergangenen Minuten seit Wochenbeginn gespeichert. Dabei wird berücksichtigt, falls Wege erst am Folgetag enden. Wenn Strecken erst in der folgenden Berichtswoche enden würden,

---

<sup>42</sup> Hierfür werden die zusammengelegten Mobilitätsprofile mit der Nummerierung `PERSNR2` betrachtet.

wird die Ankunftszeit auf den Beginn der Woche gesetzt. Ist dies nicht möglich endet die Fahrt eine Minute vor Beginn der ersten Strecke in der Woche.

#### **Zuordnung Wege – Fahrzeuge: Plausibilitätscheck**

Zunächst werden die Mobilitätsdaten innerhalb der Haushalte nach  $PKWNR$  und der Abfahrtszeit  $ABZEIT_{min}$  sortiert. Anschließend wird sichergestellt, dass sich die aufeinanderfolgenden Fahrten nicht überschneiden, indem in fehlerhaften Haushalten die Mobilitäts- und Fahrzeugdaten der Haushalte gelöscht werden. Durch eine Anpassung fehlerhafter Angaben in den in der Datenbank gespeicherten MOP-Daten kann die Anzahl der so gelöschten Datensätze reduziert werden (siehe 3.3.1).

#### **Ergänzen des letzten Heimwegs**

Für die Erzeugung der Ladeprofile wird davon ausgegangen, dass die Haushalte ihr wöchentliches Mobilitätsverhalten nach dem Ende des Berichtszeitraums beibehalten. Deshalb wird abschließend sichergestellt, dass die letzte Fahrt der Fahrzeuge in der berichteten Woche zu Hause endet<sup>43</sup>. Dazu wird zunächst angenommen, dass der Fahrtzweck „Rundkurs“ ( $ZWECK = 77$ ) dem Zweck „nach Hause“ ( $ZWECK = 7$ ) und „Keine Angabe“ ( $ZWECK = 99$ ) dem Zweck „Anders“ ( $ZWECK = 8$ ) entspricht und entsprechende Einträge werden in `tblWege` korrigiert.

Anschließend wird für jedes Fahrzeug überprüft, ob am Ende des Berichtszeitraums ein Weg, der zu Hause endet, ergänzt werden muss. Wenn ja wird die letzte gefahrene Strecke als Heimweg mit derselben Fahrtstrecke und Fahrtdauer kopiert. Die erwartete Verweildauer am Aufenthaltsort zwischen den beiden Fahrten wird berechnet, indem die übrigen Verweildauern des Pkws nach Fahrten mit demselben Zweck gemittelt werden. Liegen neben der letzten Fahrt keine weiteren Fahrten mit dem Zweck vor, wird eine zuvor berechnete durchschnittliche Verweildauer nach Fahrtzweck verwendet, die die Mobilitätsdaten aller Fahrzeuge berücksichtigt.

Liegt die so ermittelte Ankunftszeit des ergänzten Heimwegs nach der Abfahrtszeit des ersten berichteten Weges, wird die Verweildauer reduziert, sodass die Ankunftszeit eine Minute vor der Abfahrt ist. Falls auch dies nicht möglich ist wird die letzte Fahrt vor dem Heimweg gelöscht und der Algorithmus für den vorherigen Weg nochmal durchlaufen.

---

<sup>43</sup> Als Heimweg werden Fahrten mit dem Fahrtzweck „nach Hause“ ( $ZWECK = 7$ ), „Weg nach außer Haus, z.B. Ferienwohnung oder Hotel“ ( $ZWECK = 9$ ) und „Weg zum 2. Wohnsitz“ ( $ZWECK = 10$ ) gezählt.

### Aktualisieren der Fahrzeugdaten: BEV-ID, Startort, Bewegt

Da nach der Anpassung der Mobilitätsdaten keine Haushalte mehr gelöscht werden, werden nun die Fahrzeugprofile nach aufsteigender Haushalts-ID (ID) und PKWNR mit einer eindeutigen Zahl (BEVID) beschriftet. Anschließend wird geprüft, ob dem Fahrzeug im Berichtszeitraum Fahrten zugeordnet wurden (wenn ja: BEWEGT = 1) und an welchem Ort sich das Fahrzeug am Übergang zur Folgewoche befindet (STARTORT). Außerdem werden die Fahrten in `tblWege` mit der zugehörigen BEVID versehen.

### 3.2.3. Fahrzeugsubstitution

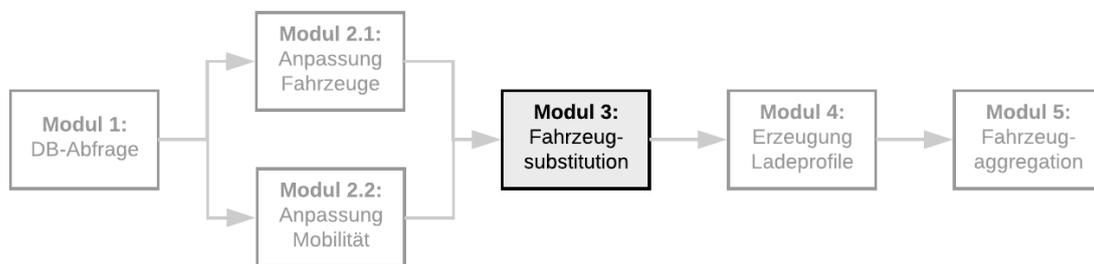


Abbildung 8: Flow Chart – Modul 3: Fahrzeugsubstitution.

#### Abfrage der BEV-Daten

Um realistische Annahmen zu den fahrzeugspezifischen Daten „Batteriekapazität“ und „elektrischer Verbrauch“ (und damit zur Reichweite) der verwendeten Elektrofahrzeuge zu treffen, werden in einer Tabelle in der IIP-Datenbank (`tbl_MOP_BEV`) Informationen zu aktuellen batteriebetriebenen Fahrzeugmodellen gespeichert. Dort können auch einzelne Fahrzeugmodelle für die Fahrzeugsubstitution ausgeschlossen werden (`aktiv = 0`). Durch eine SQL-Abfrage werden die durchschnittlichen Herstellerangaben zu Batteriekapazität und Verbrauch je Fahrzeugsegment, welche für die anschließende Fahrzeugsubstitution verwendet werden, ermittelt und in `tblBEV` gespeichert. Die derzeit in der Datenbank enthaltenen Fahrzeugmodelle sind in Tabelle 16 im Anhang aufgeführt.

#### Berechnen des Standard-BEV

Die Zuordnung der Elektrofahrzeuge (BEV) zu den Fahrzeugprofilen erfolgt anhand der angegebenen Fahrzeugsegmente. Falls vom Haushalt diesbezüglich keine Angaben gemacht wurden oder in der BEV-Tabelle keine Herstellerangaben zu einem Segment gefunden werden, werden die Batteriekapazität und der Verbrauch eines *Standard-BEV* angenommen. Die Kennzahlen des *Standard-BEV* werden dabei mithilfe sämtlicher be-

rücksichtiger Herstellerangaben ermittelt, indem die durchschnittlichen Angaben je Fahrzeugsegment nach Häufigkeit des Segments in den MOP-Daten gewichtet werden. In Tabelle 6 sind beispielhaft die Häufigkeiten der Fahrzeugsegmente in der Erhebung aus dem Jahr 2015/2016 aufgeführt <sup>44</sup>. Der Benutzer hat außerdem die Möglichkeit, durch die Konstante `c_realverb` den von den Fahrzeugherstellern angegebenen Verbrauch (nach oben) zu korrigieren, bevor die Daten den Fahrzeugen zugeteilt werden.

Tabelle 6: Häufigkeit der angegebenen KBA-Segmente in den MOP-Daten 2015/2016.

Pkw-Segment	ID	Häufigkeit
Mini	1	5,92 %
Kleinwagen	2	19,58 %
Kompaktklasse	3	26,21 %
Mittelklasse	4	15,97 %
Obere Mittelklasse	5	2,90 %
Oberklasse	6	0,58 %
Geländewagen	7	3,54 %
Sportwagen	8	1,22 %
Mini-Van	9	6,37 %
Großraum-Van	10	5,86 %
Utility	11	3,86 %
Wohnmobil	12	0,58 %
SUV	13	5,28 %
Keine Angabe	-9	2,12 %

### Ergänzen der BEV- und PHEV-Angaben in den Fahrzeugdaten

Abschließend werden die oben ermittelten durchschnittlichen Werte der Fahrzeugsegmente bzw. des Standard-BEVs den Fahrzeugdaten zugeordnet<sup>45</sup>. Außerdem werden die Fahrzeugdaten um die Werte eines vergleichbaren Plug-In-Hybridfahrzeugs (PHEV) ergänzt, dessen Batteriekapazität in einem linearen Zusammenhang mit der des BEVs steht. PHEV verfügen meist über eine kleinere Batterie als vergleichbare BEV und damit auch über eine geringere Reichweite<sup>46</sup>. Durch die die Variable `phev_batterie` wird das Verhältnis von PHEV- zu BEV-Batteriekapazität durch den Nutzer vorgegeben.

---

<sup>44</sup> Dabei werden nur die Fahrzeuge der Haushalte berücksichtigt, für die ein Tankbuch geführt wurde.

<sup>45</sup> Die Batteriekapazität ist in kWh, der Verbrauch in kWh / 100km und die Reichweite in km angegeben.

<sup>46</sup> Der elektrische Verbrauch von aktuellen BEV und PHEV ist hingegen ähnlich groß, daher wird hier keine Anpassung vorgenommen.

Die Fahrzeugliste wird außerdem um die binäre Variable `BEV` erweitert, die angibt, ob die Fahrten mit einem BEV durchgeführt werden können. Nach der Fahrzeugsubstitution wird zunächst jedem Fahrzeug der Wert `BEV = 1` zugeordnet, dies wird bei der Erzeugung der Ladeprofile ggf. korrigiert (siehe 3.2.4).

### 3.2.4. Berechnung der Ladeprofile

Die Erzeugung der Ladeprofile erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird die verbrauchte Energie durch die gefahrenen Strecken berechnet, daraufhin wird für jedes Zeitintervall die verbrauchte Energie sowie die maximal aufladbare Energie in den Fahrzeugprofilen gespeichert. Im letzten Schritt werden die Maximal- und Minimal-Ladestrategie ergänzt.

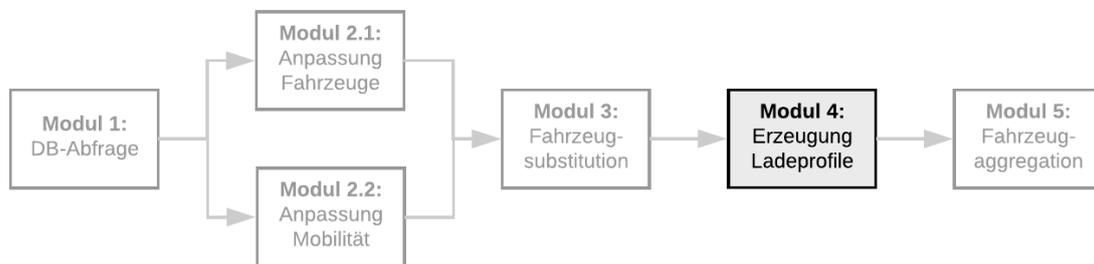


Abbildung 9: Flow Chart – Modul 4: Erzeugung der Ladeprofile.

#### **Teil 1: Berechne verbrauchte Energie durch gefahrene Strecken**

Bevor die Ladeprofile der einzelnen Fahrzeuge erstellt werden können, muss die verbrauchte Energie  $E_{Fahrt}$  jedes Wegs berechnet werden. Dazu wird der Verbrauch des Fahrzeugs aus der Tabelle `tblFzg`, die die Ergebnisse der Fahrzeugsubstitution enthält, ausgelesen und die verbrauchte Energie der Strecke in `tblWege` gespeichert.

#### **Teil 2: Berechne Energieverbrauch und verfügbare Energie je Intervall**

Die in diesem Modul berechneten Ladeprofile werden in den beiden dreidimensionalen Arrays `profileBEV(Zeitpunkt, Wert, BEVID)` und `profilePHEV(...)` gespeichert. Der Zeitabstand zwischen zwei betrachteten Zeitpunkten kann vom Benutzer durch die Angabe `intervall` verändert werden, womit sich die Anzahl der Datenpunkte je Profil ändert. Die Informationen in den verschiedenen Spalten der Ladeprofile, die im Folgenden berechnet werden, sind in Tabelle 7 beschrieben. Die dritte Dimension der Fahrzeugprofile gibt die `BEVID` an, es gibt also für jedes nach der Fahrzeugsubstitution berücksichtigte Fahrzeug zwei Ladeprofile.

Tabelle 7: Gespeicherte Informationen in den erstellten Ladeprofilen.

Spalte	Bezeichnung	Beschreibung
1	$t - 1$	Zeitpunkt zu Beginn des Intervalls (min seit Berichtsbeginn)
2	$t$	Zeitpunkt am Ende des Intervalls (min seit Berichtsbeginn)
3	$Ort_{t-1}$	Aufenthaltsort zu Beginn des Intervalls
4	$Ort_t$	Aufenthaltsort am Ende des Intervalls
5	$E_{Fahrt,t}$	Durch Fahrt verbrauchte Energie im Intervall (kWh)
6	$P_{Ladestation,t}$	Maximal verfügbare Leistung der Ladestation im Intervall (kW)
7	$E_{Ladestation,t}$	Maximal verfügbare Energie der Ladestation im Intervall (kWh)
8	$E_{Fahrt,t}(Max)$	Durch Fahrt verbrauchte elektrische Energie im Intervall nach Maximal-Strategie (kWh) <sup>47</sup>
9	$E_{Fahrt,t}(Min)$	Durch Fahrt verbrauchte elektrische Energie im Intervall nach Minimal-Strategie (kWh) <sup>47</sup>
10	$P_{Lade,t}(Max)$	Genutzte Ladeleistung nach Maximal-Strategie (kW)
11	$P_{Lade,t}(Min)$	Genutzte Ladeleistung nach Minimal-Strategie (kW)
12	$E_{Lade,t}(Max)$	Geladene Energie im Intervall nach Maximal-Strategie (kWh)
13	$E_{Lade,t}(Min)$	Geladene Energie im Intervall nach Minimal-Strategie (kWh)
14	$SOC_t(Max)$	Absoluter Ladestand des Fahrzeugs am Ende des Intervalls nach Maximal-Strategie (kWh)
15	$SOC_t(Min)$	Absoluter Ladestand des Fahrzeugs am Ende des Intervalls nach Minimal-Strategie (kWh)
16	$SOC_{proz_t}(Max)$	Anteiliger Ladestand des Fahrzeugs am Ende des Intervalls nach Maximal-Strategie (%)
17	$SOC_{proz_t}(Min)$	Anteiliger Ladestand des Fahrzeugs am Ende des Intervalls nach Minimal-Strategie (%)

Zur Berechnung der Ladeprofile der Fahrzeuge werden im ersten Schritt alle zurückgelegten Strecken nacheinander betrachtet und in den Fahrzeugprofilen der Aufenthaltsort des Fahrzeugs vor und nach dem Intervall ( $Ort_{t-1}$  und  $Ort_t$ ) durch Betrachtung des Fahrtzwecks gespeichert. Außerdem werden der Energieverbrauch  $E_{Fahrt,t}$ , die verfügbare Ladeleistung  $P_{Ladestation,t}$  und die damit maximal aufladbare Energie  $E_{Ladestation,t}$  gespeichert. Der Benutzer kann dabei mit der Eingabe des Arrays `laden` bestimmen, welche maximale Ladeleistung  $P_{Ladestation}$  an den möglichen Aufenthaltsorten der Fahrzeuge verfügbar ist. In Tabelle 8 sind diese Aufenthaltsorte mit ihrer Codierung und ihrer Häufigkeit aufgelistet. Da die Aufenthaltsorte, die verbrauchte Energie und die vorhandene Ladeinfrastruktur nicht von den Fahrzeugdaten des substituierten Elektrofahr-

<sup>47</sup> Bei Hybrid-Fahrzeugen kann durch den Einsatz des Verbrennungsmotors die tatsächlich verbrauchte elektrische Energie des Fahrzeugs von der benötigten Energie  $E_{Fahrt,t}$  für die gesamte zurückgelegte Strecke abweichen.

zeugs abhängt, werden die ermittelten Daten zunächst nur in `profileBEV` gespeichert. Und vor dem Berechnen der Ladestrategien im dritten Teil der Generierung der Ladeprofile in `profilePHEV` kopiert.

Tabelle 8: Verteilung der Aufenthaltsorte der Fahrzeuge.

Codierung	Aufenthaltsort	Zeit pro Woche	Zeitanteil
0	Unterwegs (Fahren)	5h 22min	3,19 %
1	Arbeits- / Ausbildungsstätte	12h 12min	7,26 %
2	Dienstlicher Aufenthalt	1h 44min	1,03 %
3	Ausbildungsstätte	22min	0,22 %
4	Besorgung / Einkauf	2h 47min	1,66 %
5	Freizeit	5h 54min	3,51 %
6	Aufenthalt nach: Jemanden holen/bringen	58min	0,58 %
7	Zuhause	5d 16h 16min	81,11 %
8	Ort unbekannt	0min	0 %
9	außer Haus, z.B. Ferienwohnung oder Hotel	1h 56min	1,15 %
10	2. Wohnsitz	29min	0,29 %

### Erfasse nächsten Weg

Sobald ein neuer Weg betrachtet wird, wird zunächst überprüft, ob der Weg noch zum selben Fahrzeug gehört. Falls nicht wird das Fahrzeugprofil des vorherigen Fahrzeugs vervollständigt, indem bis zum Ende des Berichtszeitraums die verfügbare Ladeleistung und Energie pro Intervall am letzten Aufenthaltsort eingetragen wird. Anschließend wird das Fahrzeugprofil in `profileBEV` abgespeichert und ein neues Fahrzeugprofil mit  $Ort_{t_0} = STARTORT(BEVID)$  angelegt. Unabhängig davon, ob es sich um eine neues Fahrzeug handelt oder nicht, wird der Verbrauch pro Intervalldauer  $E_{Fahrt,intervall}$  anhand des Gesamtverbrauchs und der Fahrdauer ermittelt.

### Vor der Fahrt

Zunächst werden die Intervalle zwischen Ankunft des vorherigen Wegs und Abfahrt des betrachteten Wegs mit der verfügbaren Ladeleistung und Energiemenge am Aufenthaltsort befüllt ( $E_{Fahrt,t} = 0$ ).

#### **Fahrtbeginn**

Im zweiten Schritt wird das Intervall, in dem das Fahrzeug losfährt, betrachtet. Anhand der Intervallgrenzen und der Abfahrtszeit werden anteilig die verbrauchte Energie  $E_{Fahrt,t}$  und die aufladbare Energie  $E_{Ladestation,t}$  berechnet und eingetragen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass Fahrten schon innerhalb des Intervalls wieder enden können und anschließend im selben Intervall nochmal geladen werden kann. Außerdem kann die vorherige Fahrt erst in dem Intervall enden, in dem die betrachtete Fahrt beginnt. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug über diese kurze Dauer zwischen den beiden Fahrten nicht geladen wird (ein Laden nach der zweiten Fahrt ist jedoch möglich). Die insgesamt verbrauchte Energie  $E_{Fahrt,t}$  addiert sich dann aus den beiden Fahrten im Intervall.

#### **Fahrt über volles Intervall**

Wenn das Fahrzeug über die gesamte Intervalldauer unterwegs ist, ist  $E_{Fahrt,t} = E_{Fahrt,intervall}$  und  $P_{Ladestation,t} = E_{Ladestation,t} = 0$ . Falls die Fahrt zum Ende des Intervalls endet, muss dies beim Aufenthaltsort  $Ort_t$  am Ende des Intervalls berücksichtigt werden.

#### **Fahrtende**

In dem Intervall, in dem die betrachtete Fahrt endet, werden wie bei Fahrtbeginn zunächst die Zeiteile, in denen das Fahrzeug fährt bzw. lädt und damit  $E_{Fahrt,t}$  und  $E_{Ladestation,t}$  berechnet. Wenn die nächste Fahrt des Fahrzeugs schon im selben Intervall beginnt, wird die aufladbare Energie bei der Betrachtung des Folgewegs korrigiert. Ist die betrachtete Strecke die letzte in `tblWege` muss für das letzte Fahrzeug das Fahrzeugprofil noch für die Intervalle nach Ende der letzten Strecke vervollständigt werden.

#### **Erzeuge Ladeprofile für Fahrzeuge ohne Wegaufzeichnungen**

Da die Profile in den vorherigen Schritten durch eine Schleife über die Mobilitätsdaten befüllt wurden, wurden die im Berichtszeitraum unbewegten Fahrzeuge bisher nicht berücksichtigt. Für diese Fahrzeuge werden in einer separaten Schleife die Ladeprofile angelegt, indem in jedem Intervall die verfügbare Ladeleistung und Energiemenge eingetragen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das Fahrzeug zuhause befindet.

### Teil 3: Ergänze Ladestrategien

Nachdem anhand der Mobilitätsdaten für jedes Fahrzeug zu jedem Intervall der Aufenthaltsort, die verbrauchte und die maximal aufladbare Energie bestimmt wurde, können die zwischengespeicherten BEV-Profile in das Array `profilePHEV` übertragen werden. Anschließend wird in diesem Schritt das Ladeverhalten unter Annahme der in Kapitel 2.3.4 näher beschriebenen Maximal- und Minimal-Ladestrategie und damit das Lastverschiebepotential (LVP) je Fahrzeugprofil bestimmt und in den beiden Arrays `profileBEV` und `profilePHEV` jeweils gespeichert.

Für beide Strategien wird die tatsächlich genutzte Ladeleistung  $P_{Lade,t}$  und die aufgeladene Energie  $E_{Lade,t}$  im betrachteten Intervall, sowie der absolute Ladestand  $SOC_t$  und der anteilige Ladestand  $SOCproz_t$  am Ende des Intervalls bestimmt und gespeichert. Der relative Ladestand  $SOCproz_t$  bewegt sich dabei zwischen einer vorgegebenen Ober- und Untergrenze ( $soc\_proz\_max \triangleq c_{SOCmax}$  und  $soc\_proz\_min \triangleq c_{SOCmin}$ ).

Bei Hybridfahrzeugen können nach dem Erreichen des  $SOC_{min}$  Strecken mit dem Verbrennungsmotor zurückgelegt werden. Deshalb wird zusätzlich die tatsächlich verbrauchte elektrische Energie für beide Ladestrategien gespeichert ( $E_{Fahrt,t}(Max)$  und  $E_{Fahrt,t}(Min)$ ). Abschließend wird überprüft, ob die Reichweite des BEV ausreicht, um alle Strecken elektrisch zurückzulegen.

#### Maximal-Ladestrategie (BEV)

Zur Modellierung der Maximal-Ladestrategie wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug zu Beginn des Berichtszeitraums über einen vollen Akku verfügt ( $SOC_{t_0} = SOC_{max}$ ). Um die aufgeladene Energie zu berechnen wird zunächst die SOC-abhängige maximale Ladeleistung  $P_{SOC,t}$  und damit die maximal nutzbare Ladeleistung  $P_{max,t}$  berechnet (vgl. Kapitel 2.3.3). Bei Annahme der Maximal-Ladestrategie wird davon ausgegangen, dass der Fahrzeugbesitzer zum frühesten möglichen Zeitpunkt sein Fahrzeug auflädt. Es wird also die maximal aufladbare Energie in jedem Intervall berechnet und in das Fahrzeugprofil eingetragen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der maximal zulässige Ladestand  $SOC_{max}$  nicht überschritten wird. Es ist möglich, dass die Zeit nach der letzten Fahrt im Berichtszeitraum nicht ausreicht, um das Fahrzeug bis zum Wochenübergang bis zum maximalen SOC zu laden. Daher wird das Ladeverhalten für mehrere Wochen fortlaufend untersucht, bis sich ein Gleichgewicht im Ladeverhalten einstellt.

#### Minimal-Ladestrategie (BEV)

Zur Anwendung der Minimal-Ladestrategie wird zunächst der Zeitpunkt ermittelt, an dem das Fahrzeug bei Anwendung der Maximal-Ladestrategie den niedrigsten Ladestand erreicht ( $soc\_kleinst\_row$ ). Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt der Ladestand bei Minimal-Ladestrategie gerade dem minimal möglichen Ladestand entspricht ( $SOC_t = SOC_{min}$ ). Ausgehend von diesem Zeitpunkt wird durch eine Rückwärtsiteration<sup>48</sup> das Ladeverhalten unter Annahme einer Minimalstrategie bestimmt. Die in einem Intervall verbrauchte Energie wird zum vorherigen Zeitpunkt addiert und die maximal aufladbare Energie subtrahiert, sodass ein spätmöglichstes Laden modelliert wird. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Ladestand nicht außerhalb der vom Benutzer festgelegten Grenzen liegen darf ( $SOC_t \in [SOC_{min}, SOC_{max}] \forall t \in T$ ).

Bei der Rückwärtsiteration wird außerdem geprüft, ob die Reichweite des Fahrzeugs in Kombination mit den Lademöglichkeiten zwischen den Fahrten ausreicht, um alle Fahrten mit einem Elektrofahrzeug zurückzulegen. Eine zu geringe Reichweite lässt sich dadurch erkennen, dass der mindestens benötigte Ladestand (Minimal-Ladestrategie) über dem maximal möglichen Ladestand (Maximal-Ladestrategie) liegt (Kaschub 2017):

$$SOC_t(Min) > SOC_t(Max) \Rightarrow \text{Modellierung als BEV nicht möglich.}$$

#### Maximal-Ladestrategie (PHEV)

Die Berechnung der Maximal-Ladestrategie bei PHEVs erfolgt analog zum Vorgehen bei BEVs, jedoch wird ein Unterschreiten von  $SOC_{min}$  durch zu lange Strecken verhindert, da in diesem Fall das Hybridfahrzeug mit dem Verbrennungsmotor weiterfahren würde. In diesem Fall weicht also die verbrauchte elektrische Energie  $E_{Fahrt,t}(Max)$  von der insgesamt verbrauchten Energie  $E_{Fahrt,t}$  ab.

#### Minimal-Ladestrategie (PHEV)

Die Berechnung der Minimal-Ladestrategie bei PHEVs erfolgt analog zum Vorgehen bei BEVs, jedoch wird verhindert, dass der Ladestand nach Minimal-Ladestrategie den maximal möglichen Ladestand übersteigt, indem diese, wenn nötig, gleichgesetzt werden und die verbrauchte elektrische Energie  $E_{Fahrt,t}(Min)$  entsprechend angepasst wird.

---

<sup>48</sup> Der Ausgangs-Zeitpunkt liegt i.d.R. innerhalb des Berichtszeitraums, deshalb wird die Rückwärtsiteration in zwei Teilen durchgeführt: Zunächst bis zum Beginn des Berichtszeitraums und dann vom Ende des Berichtszeitraums bis zum Ausgangs-Zeitpunkt.

**Wandle, wenn nötig BEV in PHEV um**

Nachdem zuvor bereits überprüft wurde, ob die Fahrten dem zugeordneten BEV durchgeführt werden können, werden nun die Ladeprofile der Fahrzeuge mit zu geringer Reichweite durch die Ladeprofile der jeweiligen Plug-In-Hybridfahrzeuge aus `profilePHEV` ersetzt (Vermerk in den Fahrzeugdaten: `BEV = 0`). Da diese neben dem in der Batterie gespeicherten Strom auch zugetankten Kraftstoff zur Fortbewegung nutzen können entfällt bei diesen das Reichweitenproblem.

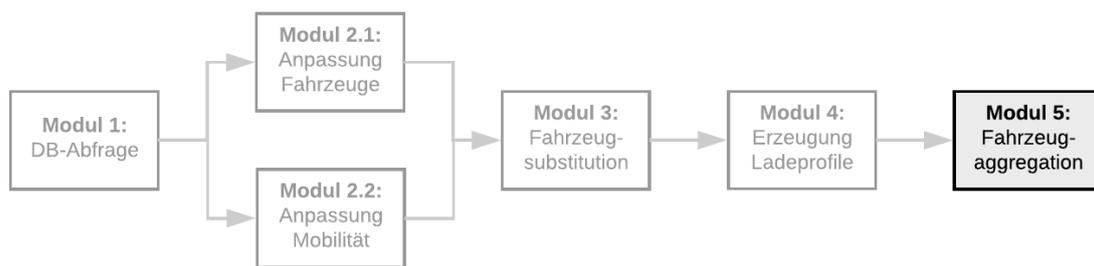
**3.2.5. Fahrzeugaggregation und Auswertungen**

Abbildung 10: Flow Chart – Modul 5: Fahrzeugaggregation.

Im letzten Modul werden die Fahrzeugprofile der betrachteten Haushalte zu einer haushaltsübergreifenden Fahrzeugflotte zusammengefasst. Dazu werden die Gewichtungsfaktoren der Haushalte aus den MOP-Daten berücksichtigt, außerdem kann der Benutzer Angaben zur Marktdurchdringung von Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeugen machen: Für die Fahrzeuge, deren Mobilitätsverhalten einen Einsatz eines vergleichbaren BEVs ermöglichen, geben `c_BEV_BEVio` und `c_PHEV_BEVio` jeweils den Marktanteil für Elektro- und Hybridfahrzeuge an. Durch `c_PHEV_BEVnio` wird der Marktanteil der Hybridfahrzeuge an der Anzahl Fahrzeugen, für die der Einsatz eines BEVs aufgrund zu geringer Reichweite nicht möglich ist, angegeben. Außerdem werden weitere Auswertungen der erzeugten Ladeprofile durchgeführt.

**Fahrzeugflotte und Standardlastprofile**

Im Modul Fahrzeugaggregation wird neben der gesamten Fahrzeugflotte (`fahrzeugflotte`), die alle von den Haushalten angegebenen Fahrzeuge berücksichtigt, auch eine Fahrzeugflotte betrachtet, die nur Fahrzeuge einschließt, die im Berichtszeitraum auch tatsächlich Strecken zurücklegen (`fahrzeugflotte_bew`).

Die Spaltenwerte der beiden Fahrzeugflotten, die für jedes Intervall durch Aufsummieren der einzelnen gewichteten Ladeprofile berechnet werden, können für verschiedene Anwendungen interpretiert werden. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die berechneten Kennzahlen und eine mögliche Interpretation.

Tabelle 9: Enthaltene Informationen der aggregierten Fahrzeugflotte.

Spalte	Bezeichnung	Beschreibung / Interpretation
1	$t - 1$	Zeitpunkt zu Beginn des Intervalls (min seit Berichtsbeginn)
2	$t$	Zeitpunkt am Ende des Intervalls (min seit Berichtsbeginn)
3	$\Sigma (E_{Fahrt,t})$	Durch Fahrten verbrauchte Energie (kWh)
4	$\Sigma (P_{Ladestation,t})$	Maximal verfügbare Leistung der Ladeinfrastruktur (kW)
5	$\Sigma (E_{Ladestation,t})$	Maximal verfügbare Energie der Ladeinfrastruktur (kWh)
6	$\Sigma (E_{Fahrt,t}(Max))$	Durch Fahrten verbrauchte elektrische Energie nach Maximal-Strategie (kWh)
7	$\Sigma (E_{Fahrt,t}(Min))$	Durch Fahrten verbrauchte elektrische Energie nach Minimal-Strategie (kWh) <sup>47</sup>
8	$\Sigma (P_{Lade,t}(Max))$	Genutzte Ladeleistung nach Maximal-Strategie (kW)
9	$\Sigma (P_{Lade,t}(Min))$	Genutzte Ladeleistung nach Minimal-Strategie (kW)
10	$\Sigma (E_{Lade,t}(Max))$	Geladene Energie nach Maximal-Strategie (kWh)
11	$\Sigma (E_{Lade,t}(Min))$	Geladene Energie nach Minimal-Strategie (kWh)
12	$\Sigma (SOC_t(Max))$	Summierter absoluter Ladestand aller Fahrzeuge nach Maximal-Strategie (kWh)
13	$\Sigma (SOC_t(Min))$	Summierter absoluter Ladestand aller Fahrzeuge nach Minimal-Strategie (kWh)
14	$avg(SOCprozt(Max))$	Durchschnittlicher relativer Ladestand nach Maximal-Strategie (%)
15	$avg(SOCprozt(Min))$	Durchschnittlicher relativer Ladestand nach Minimal-Strategie (%)
16	$\frac{\Sigma (SOC_t(Max))}{\Sigma (E_{Bat})}$	Summierter absoluter Ladestand nach Maximal-Strategie im Verhältnis zu der Batteriekapazität der Fahrzeugflotte
17	$\frac{\Sigma (SOC_t(Min))}{\Sigma (E_{Bat})}$	Summierter absoluter Ladestand nach Minimal-Strategie im Verhältnis zu der Batteriekapazität der Fahrzeugflotte

Auf Basis der betrachteten Fahrzeugflotte werden sogenannte Standardlastprofile (`standardlastprofil` und `standardlastprofil_bew`) berechnet, die die aufsummierten Werte der Fahrzeugflotte durch die Anzahl der Fahrzeuge dividiert. Das Standardlastprofil bildet somit das durchschnittliche Mobilitäts- und Ladeverhalten aller betrachteten Fahrzeuge ab.

### **Aufenthaltsort und Aufenthaltsdauer**

Für die berechneten Mobilitätsprofile werden in diesem Abschnitt Auswertungen hinsichtlich des Aufenthaltsorts und der Aufenthaltsdauer durchgeführt. Auch hierbei wird zwischen der Betrachtung aller Fahrzeuge und der Betrachtung der bewegten Fahrzeuge unterschieden (`aufenthaltsorte`, `aufenthaltsdauer`, `aufenthaltsorte_bew`, `aufenthaltsdauer_bew`).

Zur Auswertung der Aufenthaltsorte wird für jedes Intervall und jeden möglichen Aufenthaltsort (0 – 10, siehe Tabelle 8) unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren und der angegebenen Marktdurchdringung die Anzahl der Fahrzeuge am jeweiligen Aufenthaltsort bestimmt.

Bei der Berechnung der Aufenthaltsdauer an den möglichen Aufenthaltsorten wird die insgesamt Aufenthaltsdauer aller betrachteten Fahrzeuge und die Anzahl der Aufenthalte bestimmt. Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer kann also als Quotient der beiden Werte ermittelt werden. Bei der Betrachtung der Aufenthaltsdauern wird zwischen Aufhalten an Werktagen und am Wochenende unterschieden.

### **Genutzte Ladeinfrastruktur**

Im letzten Abschnitts des Moduls wird die genutzte Ladeinfrastruktur ausgewertet. In Anlehnung an die benötigten Auswertungen in Kapitel 4 wird in die verschiedenen Gruppierungen der Ladeorte *Charging near Home*, *Charging near Work* und *Public Charging* unterschieden (siehe 4.1.3), wobei eine Anpassung der Gruppierung im Code des Moduls möglich ist. Zu den verschiedenen Gruppen und zur Kombination aller Ladegruppen wird zu jedem Intervall die summierte Ladeleistung und geladene Energie aller betrachteten Fahrzeuge bestimmt. Dabei wird nochmals unterteilt in verfügbare Leistung/Energie, Maximal- und Minimal-Strategie. Die Ergebnisse werden im Array `laden_orte` gespeichert.

Eine Auswertung der Anteile der verschiedenen Lademöglichkeiten an der insgesamt geladenen Energie bei ungesteuertem Laden erfolgt nach Aufenthaltsorten im Array `nutzung_ladeinfrastruktur`. Bei dieser Auswertung wird zwischen Werktagen, Samstagen und Sonntagen unterschieden.

### 3.3. Kritische Betrachtung

Dieses Unterkapitel widmet sich Fehlerquellen und Schwächen der durchgeführten Modellierung und beurteilt deren Auswirkungen auf die Plausibilität der Ergebnisse. Dabei wird zunächst auf die Mängel der verwendeten Daten aus der MOP-Erhebung eingegangen, anschließend werden getroffene Annahmen diskutiert.

#### 3.3.1. Verwendete Daten

##### **Abstand zwischen Haushalts- und Fahrzeugbefragung, fehlende Tankbücher**

Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben liegt zwischen der Befragung zu den Mobilitäts- und Haushaltsdaten und der Aufzeichnung der Tankbücher etwa ein halbes Jahr. In diesem Zeitraum kann sich die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands oder sogar die Anzahl der im Haushalt lebenden Personen und damit deren Mobilitätsverhalten verändern. Die Modellierung in dieser Arbeit konzentriert sich daher vor allem auf das erfragte Mobilitätsverhalten aus der Herbst-Befragung und verwendet die zu diesem Zeitpunkt angegebene Anzahl an Pkws im Haushalt. Aus den Tankbüchern werden nur die fahrzeugspezifischen Daten der Fahrzeuge des Haushalts, für die ein Tankbuch geführt wurde<sup>49</sup> zur Fahrzeugsubstitution verwendet. Fehlende Fahrzeuge werden ergänzt (siehe 3.2.2 und 3.2.3). Dies hat einen geringen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der abgebildeten Fahrzeugflotte, jedoch wird dem durch eine detaillierte Fahrzeugsubstitution (s. unten) entgegengewirkt.

##### **Zuordnung Wege-Fahrzeuge**

Ein großer Mangel der verwendeten MOP-Daten ist, dass die zu ihrem Mobilitätsverhalten befragten Personen nicht angeben, mit welchem der verfügbaren Fahrzeuge sie die Pkw-Strecken zurückgelegt haben. Eine nachträgliche Zuordnung auf Basis eines Algorithmus ist nicht nur aufwendig und kompliziert, sondern bildet auch niemals vollständig die Realität ab. Vor allem wenn im Haushalt mehrere Pkw zur Verfügung stehen und noch mehr Personen regelmäßig die Pkws verwenden ist eine sinnvolle Zuordnung ohne eine nähere Untersuchung jedes einzelnen betroffenen Haushalts schwierig. Da der für diese Arbeit geschriebene Algorithmus auch für zukünftige Datensätze verwendet werden soll lag die oberste Priorität darauf, die Zuordnung so durchzuführen, dass die erzeugten Fahrzeugprofile zur Modellierung des Ladevorgangs verwendet werden kön-

---

<sup>49</sup> In vielen Haushalten wurde nicht für jeden im Haushalt vorhandenen Pkw ein Tankbuch geführt.

nen. Eine weitere Schwäche der erfolgten Zuordnung ist, dass in Haushalten, in denen die Anzahl vorhandener Pkw die benötigte Fahrzeuganzahl übersteigt, trotzdem nur die notwendige Anzahl an Pkw verwendet wird, da eine Verteilung der Fahrten einer Person auf mehrere Fahrzeuge sehr ungenau und aufwendig wäre. Die bewegten Fahrzeuge sind in diesem Fall also etwas „überbelastet“.

Um die Zuordnung trotzdem möglichst genau zu gestalten, wurde darauf geachtet, dass

- Personen wenn möglich über die gesamte Woche dasselbe Fahrzeug verwenden,
- Wenn nötig sich Personen mit einem möglichst geringen Mobilitätsbedarf ein Fahrzeug teilen und
- Die Zuordnung der Personen zu den Fahrzeugen sich an der jeweiligen Fahrleistung orientiert.

#### Hinzufügen und Entfernen von Datensätzen

Der unbehandelte Datensatz aus der MOP-Erhebung 2015/2016 umfasste 1425 Haushalte, 1553 Fahrzeuge und 30883 Wegen mit dem Pkw. In Tabelle 10 ist die Anzahl der bei der Anwendung des Algorithmus gelöschten oder künstlich hinzugefügten Datensätze aufgeführt:

Tabelle 10: Anzahl der Veränderungen der MOP-Daten.

Grund	Haushalte	Fahrzeuge	Wege
Überflüssiges Tankbuch	0	-5	0
Fehlendes Tankbuch	0	+609	0
Keine Personen-Fahrzeug-Zuordnung	-5	-11	-311
Plausibilitätscheck Abfahrt/Ankunft	-41	-48	-1136
Letzte Fahrt endet nicht zuhause, Fahrt kann nicht ergänzt werden	0	0	-16
Letzte Fahrt endet nicht zuhause, Fahrt kann ergänzt werden	0	0	+54
<b>Gesamt</b>	<b>-48</b>	<b>+545</b>	<b>-1409</b>

Es fällt auf, dass vor allem die Anzahl gelöschter Datensätze bei Durchführung des Plausibilitätschecks unzureichend groß ist. Die Menge der entfernten Datensätze bei nicht durchführbarer Personen-Pkw-Zuordnung ist auf besonders komplexe Haushalts- bzw. Mobilitätssituationen (viele Fahrzeuge und zurückgelegte Strecken) zurückzuführen.

Bei näherer Betrachtung der problematischen Haushalte beim Plausibilitätscheck fällt auf, dass in fast allen betroffenen Haushalten nur ein Pkw vorhanden ist und die berichteten Fahrten mit nur diesem angegebenen Fahrzeug nicht durchführbar sind. Ein häufiger Grund dafür ist, dass einzelne Fahrten von zwei verschiedenen Personen des Haushalts angegeben wurden oder dass Fahrten sich um wenige Minuten überschneiden. In diesen Fällen können die Daten in den Wegtagebüchern nachträglich bereinigt werden.

Für die MOP-Erhebung 2015/2016 konnten so durch Verbesserungen der Weg-Datei die Daten von 22 Haushalten, 22 Fahrzeugen und 535 Wegen erhalten bleiben und damit die Repräsentativität der Daten deutlich erhöht werden. Diese bereinigten Daten werden in den Auswertungen in Kapitel 4 verwendet.

#### **Einfluss des Zeitpunkts und der Zeitdauer der Erhebung**

Abschließend muss berücksichtigt werden, dass die Mobilitätsdaten alle in einem ähnlichen Zeitraum (September oder Oktober) erhoben wurden. Das Mobilitätsverhalten, und insbesondere die Wahl des Verkehrsmittels kann zum Beispiel witterungsbedingt oder durch Ferienzeiten schwanken. Dies wird in den erhobenen Daten allerdings nicht berücksichtigt und macht daher die Annahme der exakten Fortführung des Mobilitätsverhaltens unplausibler.

Dass die MOP-Erhebung über einen Zeitraum von insgesamt einer Woche das Mobilitätsverhalten abbildet qualifiziert sie für Untersuchungen mehr als tagesbasierte Erhebungen (z.B. Mobilität in Deutschland), da auch das Verhalten über Nacht abgebildet wird und für jedes genutzte Fahrzeug zwischen Werktags- und Wochenend-Verhalten unterschieden werden kann.

Dennoch ist die Annahme, dass das Mobilitätsverhalten der berichteten Woche auch zukünftig genauso fortgeführt wird, ungenau und macht die Ergebnisse anfällig für besondere Ereignisse wie die Reparatur des Pkw, Urlaub, usw. In den MOP-Daten wird zwar erfragt, ob solche Besonderheiten im Berichtszeitraum vorgefallen sind, jedoch wurde für die Modellierung entschieden, dass die geringe Anzahl solcher Besonderheiten auch in den Ladeprofilen abgebildet werden und nicht eliminiert werden soll.

### 3.3.2. Getroffene Annahmen

#### **Fahrzeugsubstitution**

Die Elektrofahrzeuge werden den herkömmlichen Fahrzeugdaten (wenn möglich) anhand des KBA-Segments zugeteilt. Es gibt einige weitere Einflussfaktoren auf die Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs, das ein herkömmliches Fahrzeug ersetzen soll, jedoch werden durch Betrachtung des Fahrzeugsegments gleich mehrere Kriterien einigermaßen zuverlässig abgebildet: Sitzplätze und Stauraum, Komfort, Antriebsleistung, Preisklasse und Serviceangebot. Die Verknüpfung von aktuellen tatsächlichen Fahrzeugwerten, der Zuordnung nach dem Fahrzeugmerkmal „Segment“ und der Korrekturmöglichkeit der Herstellerangaben hinsichtlich des Verbrauchs erzeugen eine möglichst detaillierte Abbildung der Realität und auch bei fehlendem Segment wird durch die Gewichtung nach Häufigkeit des Segments die Zusammensetzung der tatsächlichen Fahrzeugflotte berücksichtigt.

Die gesammelten Informationen zu aktuellen Elektrofahrzeugen in der Datenbank ließen sich auch noch um Herstellerdaten für Plug-In-Hybridfahrzeuge erweitern. Die aktuelle Marktsituation der PHEVs ist jedoch noch sehr viel unübersichtlicher und die Kaufentscheidung daher meist noch deutlich individueller, weshalb in dieser Arbeit darauf verzichtet wurde und die Batteriekapazität in ein lineares Verhältnis zu der eines reinen Elektrofahrzeugs gesetzt wurde (in dieser Arbeit: 33,3%).

#### **Gleichbleibendes Mobilitätsverhalten bei Verwendung des E-Pkws**

Bei der Erstellung der Fahrzeugprofile wird davon ausgegangen, dass das Mobilitätsverhalten der Personen trotz einem Umstieg auf ein (teil-)elektrisch betriebenes Fahrzeug unverändert bleibt. Der Wechsel des Antriebs und der Lademöglichkeiten könnte aber Einfluss auf die Fahrtzeiten haben und mit einem flächendeckenden Ausbau der Infrastruktur könnte zukünftig eine verstärkte Nutzung von Schnellladevorgängen eine Rolle bei der Routenplanung spielen. Nicht zuletzt könnte die Nutzung des Elektrofahrzeugs einen Verdrängungseffekt auf andere Verkehrsmittel wie ÖPNV oder Fahrrad ausüben, oder das Elektrofahrzeug nur als zusätzlicher Zweitwagen neben einem herkömmlichen Pkw verwendet werden (Holtsmark und Skonhoft 2014).

### **Nutzung der Ladeinfrastruktur**

Die Annahme, dass alle zukünftigen Besitzer eines Elektrofahrzeugs über dieselbe Ladeinfrastruktur (bspw. Zuhause) verfügen, erscheint zunächst sehr unrealistisch, jedoch besteht die Möglichkeit, die untersuchten Haushalte gefiltert zu betrachten und damit unterschiedliche Annahmen zur möglichen Ladeinfrastruktur zu treffen. Die so berechneten Ladeprofile ließen sich anschließend wieder zu einer gesamten Fahrzeugflotte zusammenführen. Durch die einheitliche Verwendung der Ladeinfrastruktur bleibt dafür die Eingabe verständlich und Effekte einer Variierung lassen sich deutlich ablesen.

In der Auswertung wird außerdem nicht berücksichtigt, dass zukünftige Besitzer von Elektrofahrzeugen durch eine vorausschauende Routenplanung und eine besser ausgebaute Schnellladeinfrastruktur auch mit einem BEV Fahrten, die die Reichweite des Fahrzeugs übersteigen, zurücklegen können. Eine weitere Möglichkeit für BEV-Nutzer, insbesondere wenn diese hauptsächlich in der Innenstadt Wege zurücklegen, ist das Nutzen von Carsharing-Services für die seltenen Strecken, die die Reichweite des Fahrzeugs übersteigen.

## 4 Auswertungen und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird der zuvor beschriebene MATLAB-Algorithmus mit variierenden Nutzereingaben auf aktuelle MOP-Daten angewendet, sodass für verschiedene Haushaltstypen und Ladeszenarien repräsentative Ladeprofile für Deutschland erstellt, aggregiert und ausgewertet werden können. Durch die Betrachtung der unterschiedlichen Haushaltstypen wird in diesem Kapitel untersucht ob sich das Mobilitäts- und Ladeverhalten in der Stadt und auf dem Land signifikant voneinander unterscheidet.

Im ersten Unterkapitel wird die Methodik bei der Erstellung und Auswertung der Ladeprofile beschrieben. Das zweite Unterkapitel trägt die Ergebnisse der Auswertung der Fahrzeug- und Ladeprofile zusammen. Dabei werden nacheinander das Mobilitätsverhalten, Standardlastprofile und Lastverschiebepotentiale behandelt, wobei die Auswertung nach Haushaltstyp, Ladeszenario und Wochentag erfolgt. Im letzten Unterkapitel werden die zuvor dargestellten Ergebnisse interpretiert. Dazu werden verschiedene Aussagen zum Mobilitätsverhalten der Haushalte und dem Einfluss der Ladeinfrastruktur auf das Ladeverhalten getroffen und durch die Auswertungen belegt.

### 4.1. Methodik

In diesem Unterkapitel wird die Vorgehensweise zur Untersuchung des Mobilitäts- und Ladeverhaltens der Haushalte in Deutschland beschrieben, um so ein besseres Verständnis der in den darauffolgenden Unterkapiteln dargestellten Ergebnisse und Interpretation zu ermöglichen. Zunächst wird ein Basismodell vorgestellt, das die für alle untersuchten Datensätze und Ladeszenarien gültigen Annahmen zusammenfasst. Anschließend wird zunächst auf die 6 untersuchten Haushaltstypen, die nach Grad der Urbanisierung ausgewählt wurden, und danach auf die drei verschiedenen betrachteten Ladeszenarien eingegangen. Abschließend wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der Mobilitäts- und Ladeprofile kurz erklärt.

### 4.1.1. Basismodell

Zur Erzeugung der Ladeprofile mit dem MATLAB-Algorithmus sind nicht nur die Angaben zu den in diesem Kapitel betrachteten Unterscheidungskriterien „Haushaltstyp“ und „Ladeinfrastruktur“, sondern noch weitere Benutzereingaben nötig. Für ein besseres Verständnis und eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dieses Kapitels werden die übrigen nicht variierten Eingabeparameter zu einem Basismodell zusammengefasst und im Folgenden vorgestellt.

**Eingangsdaten:** In allen Auswertungen werden die Datensätze der aktuellsten vorliegenden MOP-Erhebung aus dem Jahr 2015/2016 untersucht.

```
jahr = 1516;
```

**Fahrzeugsegmente:** Zur Bestimmung der fehlenden Fahrzeugsegmente nach Motorleistungsklassen werden die Angaben aus Tabelle 5 verwendet.

```
grenze_oberemittelklasse = 231.2;  
grenze_oberemittelklasse_diesel = 204;  
grenze_mittelklasse = 163.2;  
grenze_kompaktklasse = 102;  
grenze_kleinwagen = 68;
```

**Fahrzeugsubstitution:** Für die Fahrzeugsubstitution werden die in Tabelle 16 aufgeführten Modelle verwendet, wobei als realer Verbrauch der angegebene Verbrauch durch die Hersteller angenommen wird. Die Batteriekapazität der PHEVs beträgt ein Drittel der vergleichbaren BEVs.

```
c_realverb = 1;  
phev_batterie = 1/3;
```

**SOC-Begrenzungen:** Der prozentuale SOC bewegt sich zwischen 5% und 100%.

```
soc_proz_min = 5;  
soc_proz_max = 100;
```

**Intervalldauer:** Als Intervalldauer werden 10 Minuten verwendet.

```
intervall = 10;
```

**Marktanteil:** Wer ein BEV fahren kann fährt BEV, wer kein BEV fahren kann fährt PHEV.

```
c_BEV_BEVio = 1;  
c_PHEV_BEVio = 0;  
c_PHEV_BEVnio = 1;
```

### 4.1.2. Haushaltstypen

In den Auswertungen in diesem Kapitel werden unter anderem die Auswirkungen des Urbanisierungsgrads auf das Mobilitäts- und Ladeverhalten untersucht. Dazu werden die untersuchten Haushalte im Folgenden in 6 Haushaltstypen<sup>50</sup> eingeteilt. Die Unterscheidung erfolgt dabei nach der Selbsteinschätzung der befragten Haushalte zur Lage ihrer Wohnung<sup>51</sup>. Die betrachteten Haushaltstypen sind:

- **Typ 1:** Haushalte im inneren Stadtbereich einer Großstadt
- **Typ 2:** Haushalte am Stadtrand / in einem Vorort einer Großstadt
- **Typ 3:** Haushalte im inneren Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt
- **Typ 4:** Haushalte am Stadtrand / in einem Vorort einer mittelgroßen Stadt
- **Typ 5:** Haushalte in einer Kleinstadt / in einer großen Gemeinde
- **Typ 6:** Haushalte auf dem Land / in einer kleinen Landgemeinde

Die Abfrage der Fahrzeug- und Mobilitätsdaten erfolgt durch die Nutzereingabe `bedingungen_HH = 'AND tblHH.LAGE = hhtyp'`, wobei `hhtyp` für die Nummer des Haushaltstyps steht. Die durchschnittliche Anzahl an Personen und Fahrzeugen je Haushaltstyp in den gewichteten MOP-Daten sind in Abbildung 11 aufgeführt.

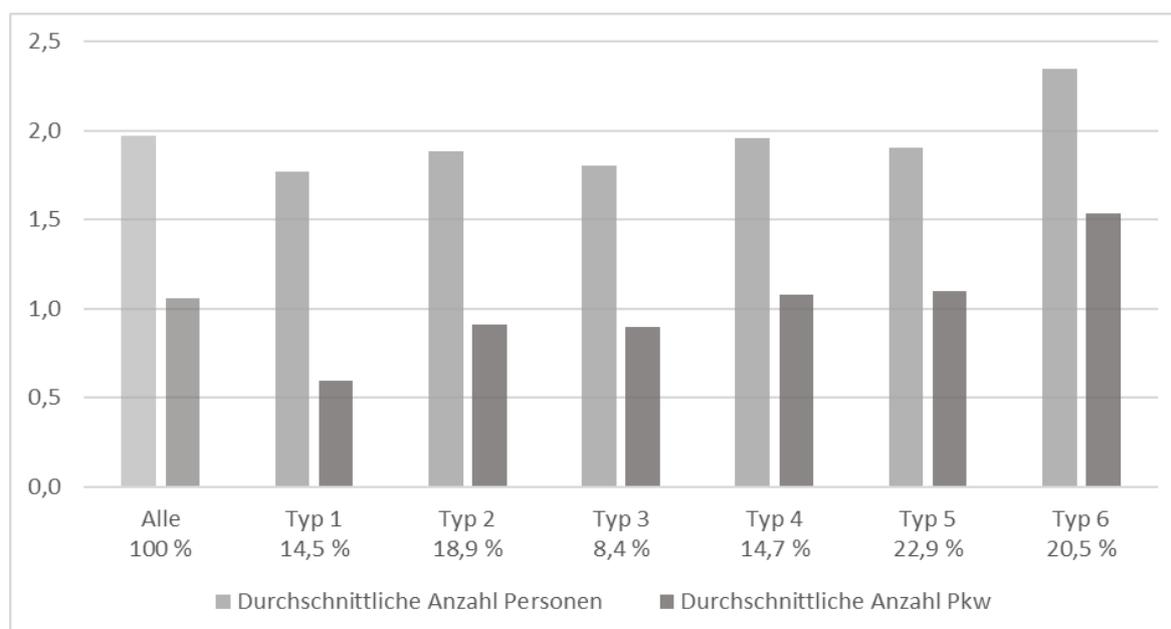


Abbildung 11: Durchschnittliche Personen- und Pkw-Anzahl je Haushaltstyp.

<sup>50</sup> Zusätzlich werden die Auswertungen Haushaltstyp-übergreifend durchgeführt.

<sup>51</sup> Bei 4 Haushalten mit insgesamt 6 Fahrzeugen wurde in der Befragung 2015/2016 keine Angabe gemacht, diese werden in den folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt.

### 4.1.3. Ladeszenarien

Die Entscheidung zu einem Kauf eines Elektrofahrzeugs und das Ladeverhalten eines Fahrzeugbesitzers wird wesentlich durch die vorhandene Ladeinfrastruktur beeinflusst. Bei der Erzeugung der Ladeprofile gibt es die Möglichkeit, verschiedene Ladeszenarien, die die vorhandene Infrastruktur<sup>52</sup> beschreiben, anzugeben. Bei der Modellierung der Ladeprofile wird davon ausgegangen, dass jeder Fahrzeugbesitzer über dieselben Lademöglichkeiten verfügt und ggf. auch nutzt. Für die Auswertung des Mobilitäts- und Ladeverhaltens werden im Folgenden drei verschiedene Ladeszenarien beschrieben. Die verfügbaren Ladeleistungen  $P_{Ladestation,t}$  der drei Ladeszenarien, die im MATLAB-Algorithmus über `laden` eingegeben werden, sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Beschreibung der 3 Ladeszenarien: Ladeleistungen je Aufenthaltsort.

Aufenthaltsort	Szenario A	Szenario B	Szenario C
0 - Unterwegs	-	-	-
1 - Arbeit	-	3,7 kW	3,7 kW
2 - Dienstreise	-	-	-
3 - Ausbildung	-	3,7 kW	3,7 kW
4 - Einkauf	-	-	22 kW
5 - Freizeit	-	-	22 kW
6 - Serviceweg	-	-	-
7 - Zuhause	3,7 kW	3,7 kW	3,7 kW
8 - Anders	-	-	-
9 - Hotel	-	-	-
10 - Außer Haus	-	-	-

#### Szenario A: Charging near Home

In ersten Szenario wird davon ausgegangen, dass alle Personen ihr Elektrofahrzeug ausschließlich zuhause laden. Dabei steht ihnen eine Leistung von 3,7 kW zur Verfügung.

#### Szenario B: Charging near Home and Work

Im zweiten Szenario haben die Fahrzeugbesitzer zusätzlich die Möglichkeit, ihr Fahrzeug auch an der Arbeitsstelle bzw. ihrem Ausbildungsplatz zu laden. Dabei können sie genauso wie zuhause eine Leistung von 3,7 kW nutzen.

<sup>52</sup> In Kapitel 2.3.1 wurden verschiedene Ladesystemvarianten bereits ausführlich behandelt.

**Szenario C: Charging near Home and Work, Public Charging**

Im letzten Szenario können die Fahrzeugbesitzer zusätzlich zu den Lademöglichkeiten mit 3,7 kW zuhause und am Arbeitsplatz auch öffentliche Ladestellen nutzen, welche an Einkaufs- und an Freizeitsorten mit einer Ladeleistung von 22 kW vorhanden sind.

**4.1.4. Vorgehensweise**

Zunächst wurde der MATLAB-Algorithmus für die 21 möglichen Kombinationen aus Haushaltsbedingung und Ladeszenario unter Berücksichtigung des Basismodells durchgeführt und die so erzeugten Ergebnisse gespeichert. Die anschließenden Auswertungen, die hauptsächlich auf den aggregierten Ergebnissen aus Modul 5 (siehe 3.2.5) basieren, wurden in Microsoft Excel durchgeführt.

Bei den Auswertungen wurde die Gewichtung aus den MOP-Daten übernommen, um eine möglichst genaue Repräsentativität für Deutschland zu gewährleisten. Für Aussagen über die Gesamtfahrzeugflotte wurden jedoch nur die Fahrzeuge berücksichtigt, denen im Berichtszeitraum mindestens eine gefahrene Strecke zugeordnet wurde, da die übrigen Fahrzeuge keine Energie verbrauchen und damit auch für die Modellierung des Energiebedarfs keine Rolle spielen.

Bei der Darstellung von Zeitverläufen (z.B. Standardlastprofile) wurden die Ergebnisse durch die Verwendung des zentrierten einfachen gleitenden Mittelwerts 9-ter Ordnung bei einem Zeitintervall von 10 Minuten geglättet. Bei den zeitabhängigen Untersuchungen wurden die Ergebnisse außerdem in die Kategorien Werktag (Mo-Fr) und Wochenende (Sa-So) unterteilt. Im Rahmen der Auswertung zeigte sich, dass zwischen Samstag und Sonntag keine signifikanten Unterschiede im Mobilitätsverhalten der Haushalte bestehen, daher wurde auf eine getrennte Betrachtung verzichtet.

**4.2. Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der erfolgten Auswertungen der MOP-Daten aus 2015/2016 dargestellt. Dabei wird zunächst das Mobilitätsverhalten der Haushalte untersucht, anschließend werden für die verschiedenen Haushaltstypen und Ladeszenarien Standardlastprofile erstellt. Abschließend erfolgt eine Untersuchung des Lastverschiebepotentials zur Optimierung des Ladevorgangs.

### 4.2.1. Auswertung des Mobilitätsverhaltens

Im Rahmen der Auswertung des Mobilitätsverhaltens wird nacheinander die Anzahl der Fahrzeuge, das Verkehrsaufkommen, die Verteilung der Aufenthaltsorte der Fahrzeuge, die Dauer der Aufenthalte und die durch die Fahrten verbrauchte Energie betrachtet.

#### Anzahl, Zusammensetzung und Repräsentativität der betrachteten Fahrzeuge

Jedem befragten Haushalt wird im Rahmen der MOP-Erhebung ein Hochrechnungsfaktor, der die Zahl der repräsentierten Haushalte in der Grundgesamtheit angibt, zugewiesen. Diese Hochrechnungsfaktoren gewichten die Haushalte nach Gebietsstand, Einwohnerzahl des Wohnortes, Haushaltsgröße und Pkw-Besitz (Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie 2012). Für die Gewichtung der mit dem Algorithmus erzeugten Mobilitätsprofile wird der Hochrechnungsfaktor des Haushalts als die Anzahl der Fahrzeuge, die ein Ladeprofil in der Grundgesamtheit repräsentiert interpretiert.

Setzt man die Anzahl abgebildeter Fahrzeuge in Verhältnis zu den Angaben zum Pkw-Besitz in den MOP-Haushaltsdaten, die in Abbildung 11 zusammengefasst wurden, kann man eine Aussage über die Repräsentativität der erzeugten Ladeprofile treffen. Die Anzahl der durch die Ladeprofile repräsentierten Fahrzeuge je Haushaltstyp, deren Anteil an der gesamten betrachteten Fahrzeugflotte und die jeweiligen Anteile an der tatsächlichen Fahrzeuganzahl sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Außerdem sind in der Tabelle die Anzahl und der Anteil der „bewegten“ Fahrzeuge, auf die sich die folgenden Auswertungen hauptsächlich beziehen, angegeben.

Tabelle 12: Betrachtete Fahrzeugflotte nach Haushaltstypen.

Haushaltstyp	Fahrzeuge	Anteil	Fahrzeuge (bewegt)	Anteil (bewegt)	Repräsentativität <sup>53</sup>
Typ 1	3.410.643	8,17 %	2.884.539	6,91%	98,18 %
Typ 2	6.816.768	16,33 %	5.760.356	13,80%	98,50 %
Typ 3	2.949.445	7,07 %	2.428.746	5,82%	97,29 %
Typ 4	6.201.169	14,85 %	5.144.802	12,32%	97,40 %
Typ 5	10.064.008	24,11 %	8.606.227	20,62%	99,41 %
Typ 6	12.305.198	29,48 %	10.200.947	24,44%	97,35 %
<b>Gesamt</b>	<b>41.747.231</b>	<b>100,00 %</b>	<b>35.025.617</b>	<b>83,90%</b>	<b>98,10 %</b>

<sup>53</sup> Mit der in den MOP-Daten angegebenen PKW-Anzahl der Haushalte wurde die Größe der Fahrzeugflotte der einzelnen Haushaltstypen berechnet. Die Repräsentativität ergibt sich als Quotient aus der Anzahl der im Modell abgebildeten Fahrzeuge und der insgesamten Fahrzeugflottengröße.

## Verkehrsaufkommen

Um mögliche Unterschiede im Mobilitätsverhalten der Haushaltstypen zu identifizieren wurde zunächst das Verkehrsaufkommen an Werktagen und am Wochenende betrachtet. Dazu ist in Abbildung 12 die durchschnittliche tägliche Streckenanzahl und die täglich gefahrene Strecke pro Fahrzeug für die verschiedenen Haushaltstypen abgebildet. Auffällig ist dabei das insgesamt höhere Verkehrsaufkommen an Werktagen und die großen Unterschiede in der täglich gefahrenen Strecke an Werktagen zwischen Haushaltstyp 1 und 6. Generell liegt bei Haushalten mit geringerem Urbanisierungsgrad tendenziell ein höheres Verkehrsaufkommen vor.

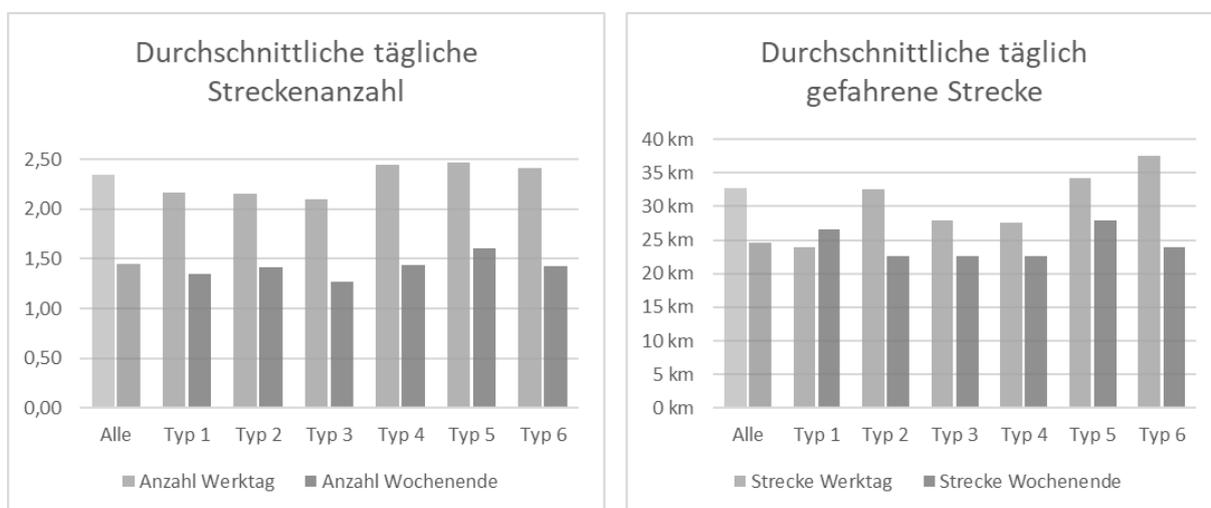


Abbildung 12: Auswertung des durchschnittlichen Verkehrsaufkommens.

## Aufenthaltsorte

Im Hinblick auf das mögliche Ladeverhalten von Elektrofahrzeug-Besitzern und die Gestaltung einer geeigneten Ladeinfrastruktur ist interessant, an welchen Orten sich die Fahrzeuge zu verschiedenen Tageszeiten aufhalten. Dazu wurden die Mobilitätsprofile ausgewertet, indem der Aufenthaltsort auf Basis des vorgehenden Wegzwecks bestimmt wurde. Die verschiedenen möglichen Aufenthaltsorte wurden dann in Anlehnung an die bereits vorgestellten Ladeszenarien in die Kategorien *Zuhause*, *Arbeit*, *Öffentlicher Ort*, *Sonstiges* und *Unterwegs* eingeteilt<sup>54</sup>. In Abbildung 13 ist die Verteilung der Aufenthaltsorte der gesamten Fahrzeugflotte und der bewegten Fahrzeuge dargestellt. In Anhang C

<sup>54</sup> Die Einteilung der Aufenthaltsorte setzen sich wie folgt aus den nummerierten Kategorien zusammen:

Zuhause: Zuhause (7)

Arbeit: Arbeit (1), Ausbildung (3)

Öffentlicher Ort: Einkauf (4), Freizeit (5)

Sonstiges: Dienstreise (2), Serviceweg (6), Anders (8), Hotel (9), außer Haus (10).

Unterwegs: Unterwegs (0).

in Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 ist zudem die Verteilung der Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge für die einzelnen Haushaltstypen dargestellt. Dabei wird vor allem deutlich, dass bei Typ 1 überdurchschnittlich viele Fahrzeuge sich am Wochenende außer Haus befinden, während bei Typ 6 besonders viele Fahrzeuge an Werktagen für den Weg zur Arbeit genutzt werden.

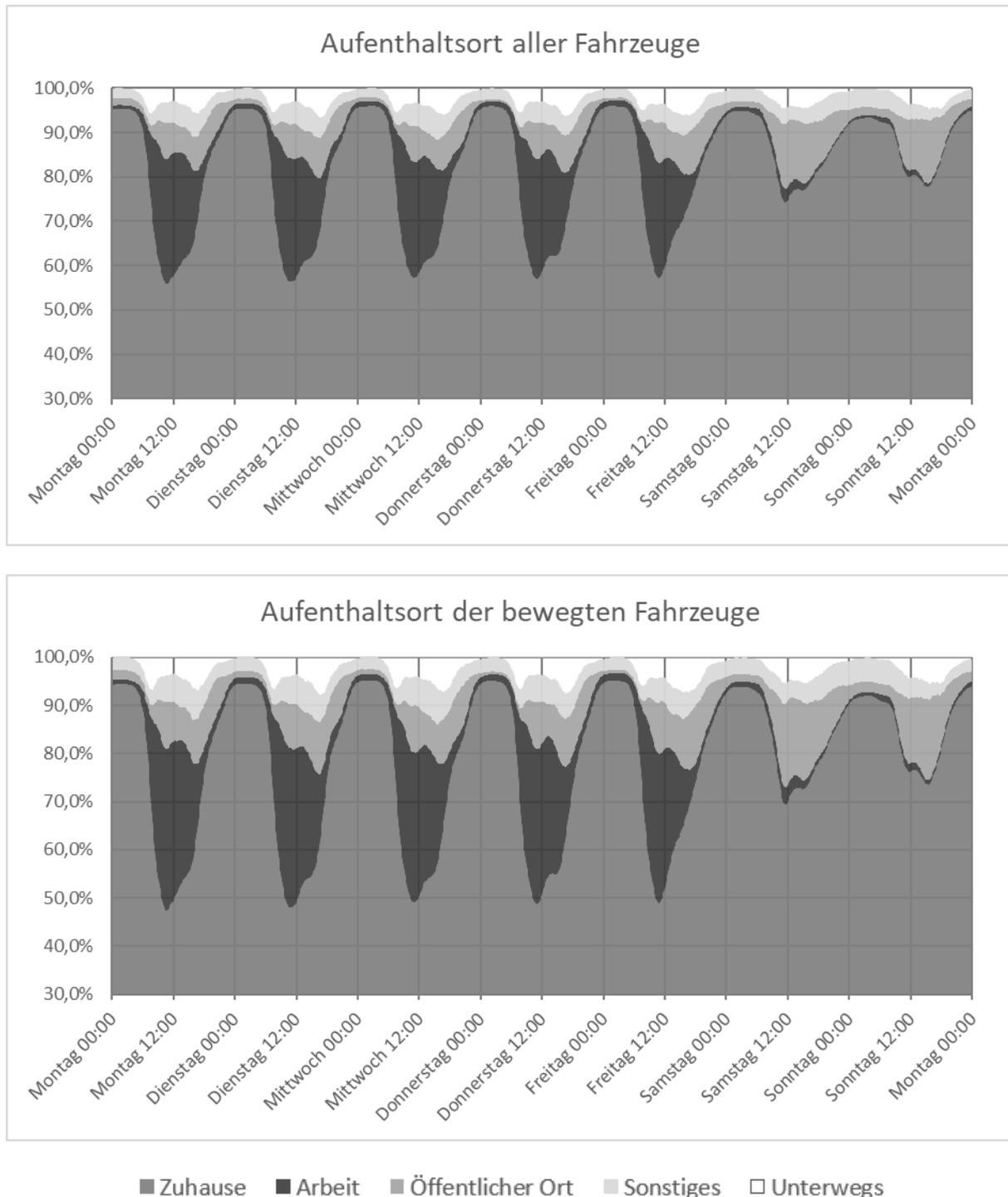


Abbildung 13: Aufenthaltsorte der Fahrzeuge in der gesamten Woche.

### Aufenthaltsdauern

Neben den Aufenthaltsorten ist für die Untersuchung des Ladeverhaltens und der Möglichkeiten zur Ladeoptimierung auch interessant, wie lange Fahrzeuge sich durchschnittlich an einem Ort aufhalten, bevor sie die nächste Strecke zurücklegen. In Tabelle 13 sind die durchschnittlichen Aufenthaltsdauern an Werktagen und am Wochenende für die gesamte Fahrzeugflotte aufgeführt, eine ausführlichere Auswertung der Aufenthaltsdauern nach Haushaltstyp befindet sich in Anhang D in Abbildung 23. Die Aufenthaltsdauer am Wochenende ist dabei aus verschiedenen Gründen in allen Kategorien größer als an den Werktagen: Die längeren Aufenthalte zuhause sind auf eine generell geringere Mobilität am Wochenende zurückzuführen (vgl. Abbildung 12). Zu den sonstigen Aufenthaltsorten zählen unter anderem Aufenthalte an Zweitwohnsitzen und in Hotels, was die deutlich längere durchschnittlichere Aufenthaltsdauer an diesen Orten am Wochenende erklärt. Die längere „Aufenthaltsdauer“ in der Kategorie Unterwegs, die der durchschnittlichen Fahrtzeit entspricht, lässt sich durch die längere durchschnittliche Streckenlänge, die mitunter auf lange Urlaubsfahrten zurückzuführen ist, erklären.

Tabelle 13: Durchschnittliche Aufenthaltsdauer der bewegten Fahrzeuge je Aufenthaltsort.

Aufenthaltsort	Aufenthaltsdauer Werktags	Aufenthaltsdauer Wochenende
Zuhause	13,50 h	20,11 h
Arbeit	7,02 h	7,27 h
Öffentlicher Ort	1,42 h	2,27 h
Sonstiges	2,28 h	7,15 h
Unterwegs	0,20 h	0,29 h

### Energieverbrauch

Die Ausgangsbasis für die Modellierung des Ladeverhaltens ist das Mobilitätsverhalten der Haushalte und damit die zurückgelegten Strecken der Fahrzeuge. Durch eine geeignete Fahrzeugs substitution werden im MATLAB-Algorithmus den Mobilitätsprofilen bereits möglichst passende Elektrofahrzeuge zugeordnet, deren Kenngrößen Batteriekapazität und elektrischer Verbrauch<sup>55</sup> für die Erzeugung der Ladeprofile verwendet werden, sodass für jede zurückgelegte Strecke die verbrauchte elektrische Energie  $E_{Fahrt}$  berechnet und den Zeitintervallen zugeordnet werden konnte. Durch die Gewichtung der Fahrzeugprofile mit den Hochrechnungsfaktoren der Haushalte kann nun die durch-

<sup>55</sup> Der durchschnittliche elektrische Verbrauch der substituierten Fahrzeuge liegt bei jedem Haushaltstyp bei etwa 15 kWh pro 100 km.

schnittlich verbrauchte Energie pro Stunde berechnet werden. In Abbildung 14 ist der Energieverbrauch pro Fahrzeug an Werktagen und am Wochenende dargestellt (bei der Berechnung des Durchschnitts wurden nur die bewegten Fahrzeuge betrachtet). Die Fläche unter der Kurve entspricht der elektrischen Energie, die zuvor aufgeladen werden muss, wenn die gefahrenen Strecken vollständig elektrisch zurückgelegt werden.

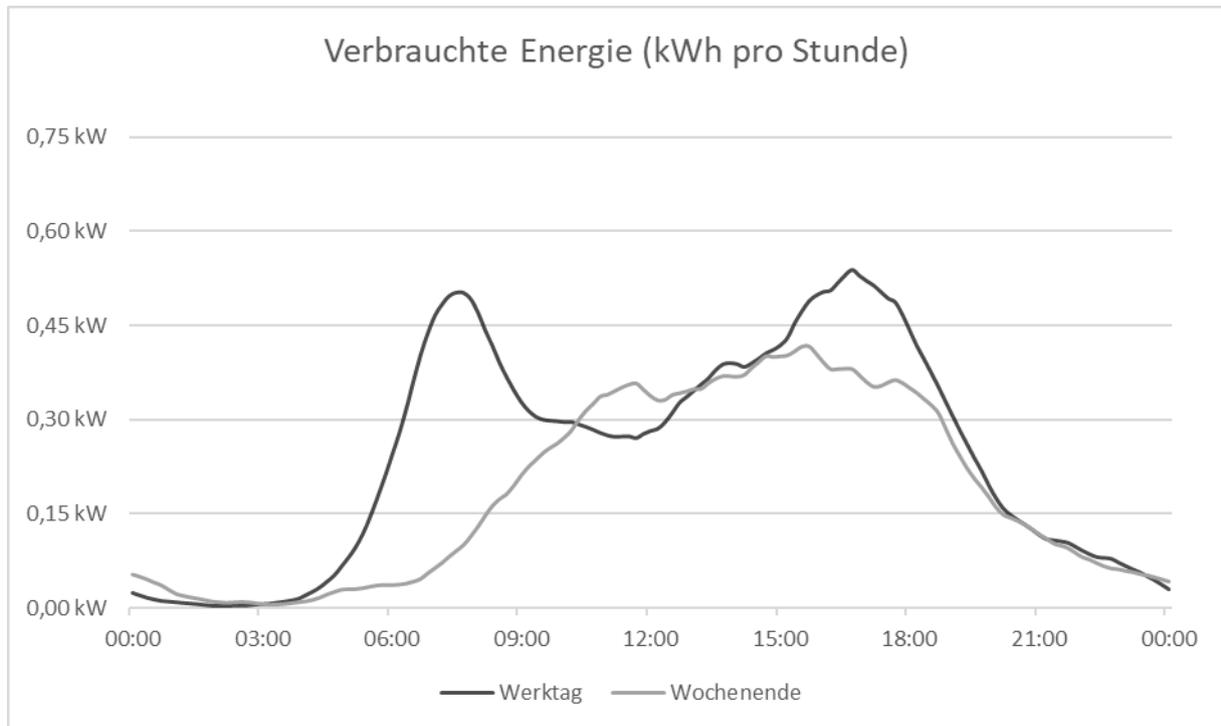


Abbildung 14: Durchschnittlich verbrauchte Energie pro Stunde.

In der Abbildung ist der deutlich größere Energiebedarf an Werktagen durch den Berufsverkehr und der spätere Anstieg der Kurve am Wochenende zu erkennen. Weitere Auswertungen haben ergeben, dass das Mobilitätsverhalten an Sonntagen im Vergleich zu Samstagen ein bis zwei Stunden später ansteigt und sinkt. Für die Auswertungen nach Haushaltstyp in Abbildung 15 wurde jedoch zugunsten der Übersichtlichkeit und der Konsistenz zu den übrigen Auswertungen auf eine Unterscheidung zwischen Samstag und Sonntag verzichtet.

Die Haushaltstypen 1 und 4 verbrauchen an Werktagen signifikant weniger Energie als das durchschnittliche Fahrzeug (nicht jedoch am Wochenende), wohingegen Typ 6 einen überdurchschnittlichen Energieverbrauch an Werktagen aufweist. Parallelen zwischen den beiden Haushaltstypen im inneren Stadtbereich (1 und 3) und den beiden am Stadtrand bzw. im Vorort (2 und 4) sind nicht ersichtlich.

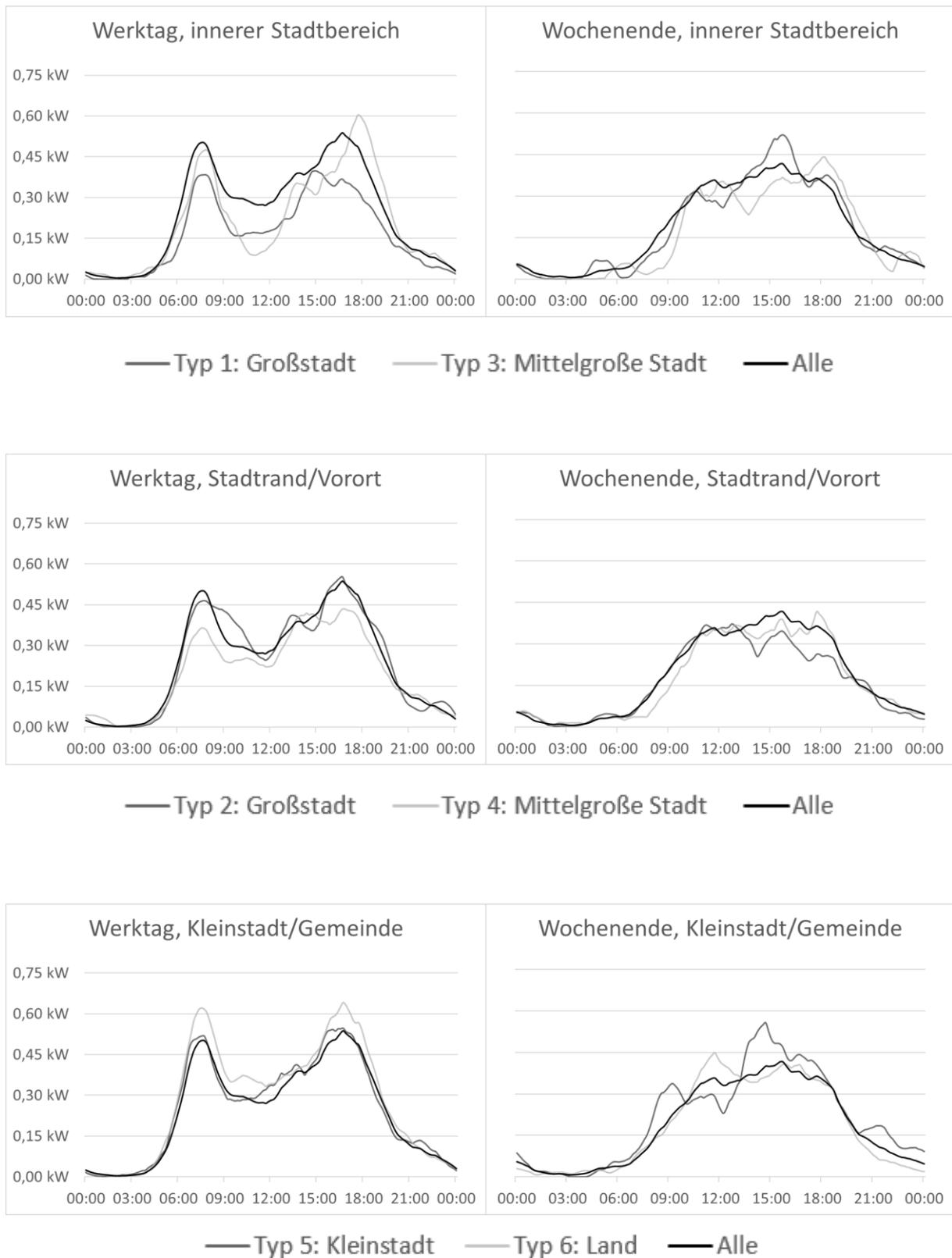


Abbildung 15: Vergleich der durchschnittlich verbrauchten Energie (kWh/h) je Haushaltstyp.

### 4.2.2. Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden

Bei der Untersuchung der Ladeprofile wird zunächst das ungesteuerte Laden betrachtet, welches in den Ladeprofilen durch die *Maximal-Strategie* dargestellt wird. Beim ungesteuerten Laden wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeugbesitzer sein Fahrzeug immer wenn möglich mit der vorhandenen Ladeinfrastruktur verbindet und das Fahrzeug mit der maximal nutzbaren Ladeleistung geladen wird, bis der maximale Ladestand erreicht ist (Kaschub 2017, S. 39). Im Folgenden wird ausgewertet, wie viele Mobilitätsprofile durch ein reines Elektrofahrzeug abgebildet werden konnten und wie groß der Anteil der elektrisch zurückgelegten Strecke ist. Anschließend werden für die substituierten Elektrofahrzeuge Standardlastprofile (SLP) dargestellt und die Anteile der verschiedenen Lademöglichkeiten an der gesamten aufgeladenen Energie berechnet.

#### Anteil der elektrisch durchführbaren Mobilität

Falls ein Fahrzeug aufgrund einer zu geringen Batteriekapazität bzw. einer nicht ausreichenden Ladeinfrastruktur nicht alle Strecken mit elektrischer Energie zurücklegen kann, wird das Fahrzeug als Plug-In-Hybridfahrzeug modelliert, das in dieser Auswertung über eine um 2/3 reduzierte Batteriekapazität verfügt und Fahrten, die die Reichweite übersteigen mit einem Verbrennungsmotor zurücklegt. In Tabelle 14 ist für jeden Haushaltstyp aufgeführt, welcher Anteil der insgesamt bewegten Fahrzeuge mit dem jeweils substituierten Elektrofahrzeug bei gegebenem Ladeszenario abbildbar ist. Auffällig ist, dass für Typ 2 wenige Fahrzeuge und für Typ 4 überdurchschnittlich viele Fahrzeuge abgebildet werden können, außerdem können bei Typ 3 durch das Hin zunehmen von öffentlichem Laden (Szenario C) deutlich mehr Fahrzeuge als zuvor abgebildet werden.

Tabelle 14: Anteil der mit dem substituierten BEV abbildbaren Mobilitätsprofile.

Haushaltstyp	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Typ 1	90,59 %	91,48 %	94,08 %
Typ 2	86,33 %	87,01 %	90,63 %
Typ 3	89,65 %	90,23 %	96,63 %
Typ 4	92,70 %	93,24 %	95,45 %
Typ 5	91,18 %	91,27 %	92,97 %
Typ 6	89,51 %	90,12 %	94,39 %
<b>Alle</b>	<b>89,82 %</b>	<b>90,47 %</b>	<b>93,71 %</b>

Nachdem die Fahrzeuge, die nicht durch ein BEV abgebildet werden können durch ein PHEV ersetzt wurden, kann berechnet werden, wie groß der Anteil der mit elektrischer Energie zurückgelegten Fahrtstrecke ist. Diese Anteile sind für jeden Haushaltstyp je Ladeszenario in Tabelle 15 aufgeführt. Auch in dieser Auswertung sind dieselben bereits oben aufgeführten Eigenschaften der Haushaltstypen 2, 3 und 4 erkennbar.

Tabelle 15: Anteil der mit elektrischer Energie zurückgelegten Strecke.

Haushaltstyp	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Typ 1	77,35 %	78,79 %	83,64 %
Typ 2	74,20 %	75,71 %	81,48 %
Typ 3	81,28 %	82,22 %	91,24 %
Typ 4	87,09 %	87,96 %	91,13 %
Typ 5	84,03 %	84,98 %	87,05 %
Typ 6	84,48 %	86,18 %	90,12 %
<b>Alle</b>	<b>82,20 %</b>	<b>83,71 %</b>	<b>87,72 %</b>

### Standardlastprofile

Zur Prognose des nachgefragten Stroms bei ungesteuertem Laden wurden auf Basis der Ladeprofile sogenannte Standardlastprofile berechnet, die ähnlich wie bei Lastprofilen für den Stromverbrauch von Haushalten die durchschnittlich nachgefragte Strommenge angeben. Die Standardlastprofile wurden für jedes Ladeszenario berechnet, wobei in Werktage und Wochenende unterschieden wird. Bei Ladeszenarien mit mehreren Lademöglichkeiten (B, C) ist die nachgefragte Strommenge nach Aufenthaltsort aufgeteilt.

In Abbildung 16 sind die Standardlastprofile für die gesamte betrachtete Fahrzeugflotte dargestellt, für die einzelnen Haushaltstypen sind in Anhang E in Abbildung 24, Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 die Standardlastprofile abgebildet. In allen Standardlastprofilen sind die durch den vermehrten Einsatz von Elektrofahrzeugen immer problematischeren Lastspitzen zu erkennen, insbesondere, wenn alle Fahrzeuge ungesteuert und nur zu Hause geladen werden. Beim Vergleich der verschiedenen Ladeszenarien ist ersichtlich, dass ein besseres Ladeinfrastrukturangebot die Stromnachfrage glätten kann. Der größte Unterschied zwischen den Haushaltstypen liegt bei der Nachfrage an öffentlichen Ladestationen.

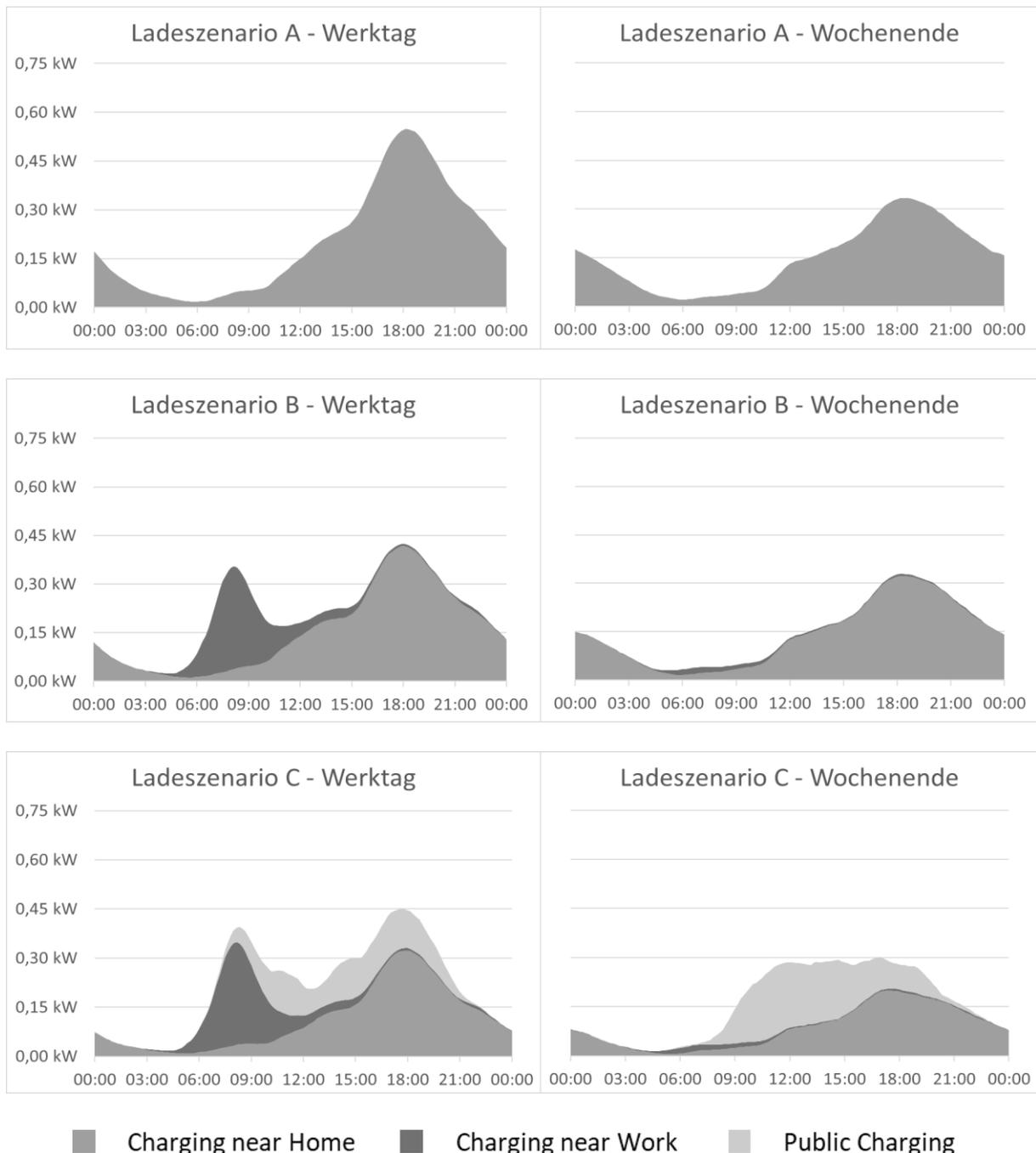


Abbildung 16: Standardlastprofile je Ladeszenario für Werktage und Wochenende.

Die Standardlastprofile können zum einen dazu verwendet werden, bei einer großen Elektrofahrzeugflotte die nachgefragte Strommenge zu prognostizieren und das Stromnetz darauf anpassen, zum anderen kann das Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge durch eine Kombination der SLPs mit einer Stromangebotskurve und der Berücksichtigung von Lastverschiebepotentialen im Hinblick auf die Nutzung regenerativer Energien und der Vermeidung von Spitzenlasten optimiert werden.

### Anteil der verschiedenen Ladetypen

Ausgehend von den Standardlastprofilen kann berechnet werden wie groß der Anteil der verschiedenen berücksichtigten Ladetypen *Charging near Home*, *Charging near Work* und *Public Charging* an der gesamten aufgeladenen Energiemenge ist. In Abbildung 17 werden die verschiedenen Haushaltstypen dazu einander gegenübergestellt<sup>56</sup>. Neben leichten Unterschieden zwischen den verschiedenen Haushaltstypen kann man außerdem Unterschiede in der Ladeinfrastrukturnutzung an Werktagen und am Wochenende erkennen: Am Wochenende geht die Nutzung von Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz stark zurück, dafür wird viel Energie durch öffentliche Ladestellen aufgeladen, sodass die Nutzung der Lademöglichkeiten zuhause anteilig ca. gleichbleibt.

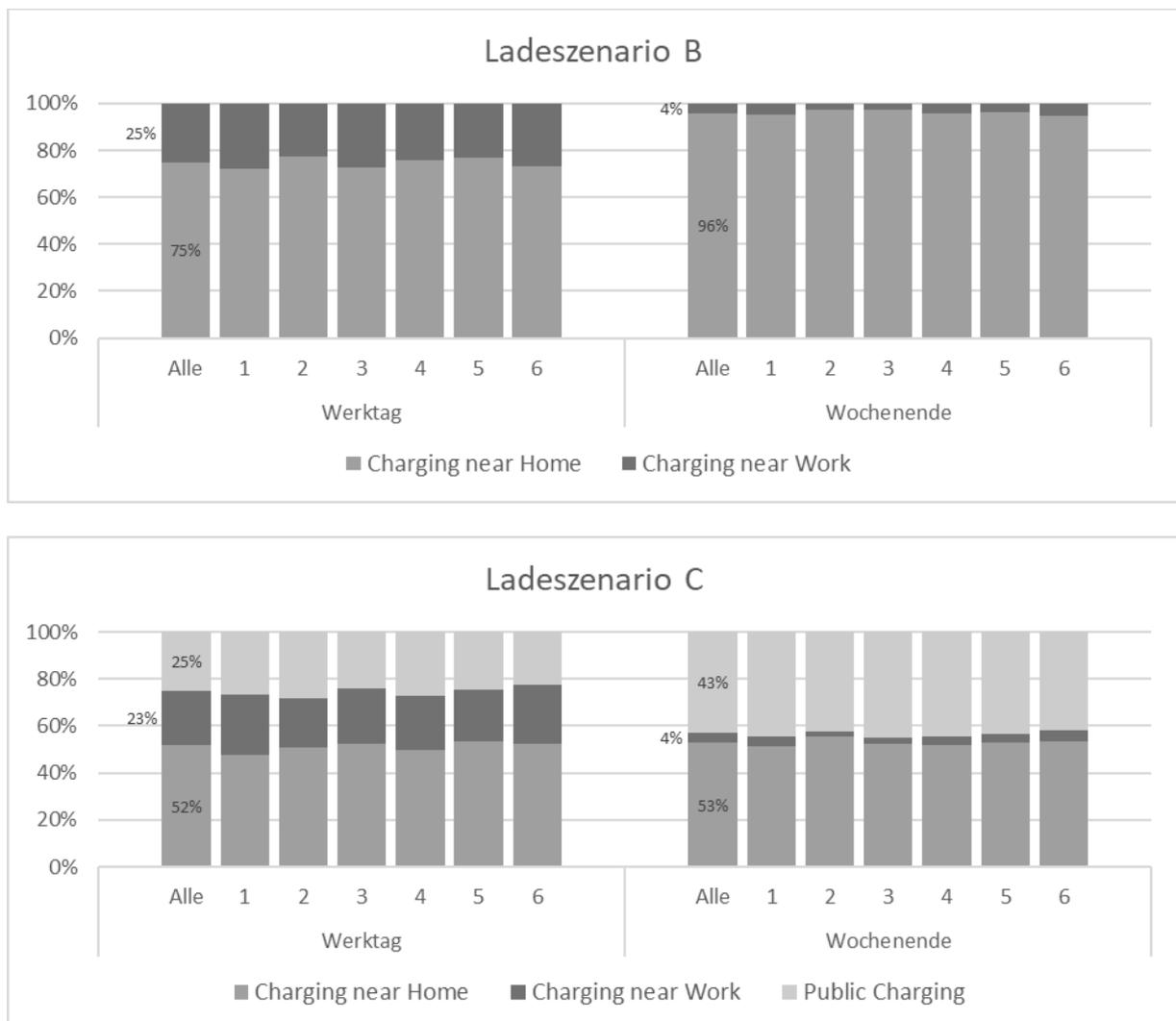


Abbildung 17: Anteil der verschiedenen Lademöglichkeiten im Standardlastprofil.

<sup>56</sup> Da bei Ladeszenario A nur *Charging near Home* betrachtet wird, erfolgt die Auswertung nur für die Ladeszenarien B und C.

### 4.2.3. Lastverschiebepotentiale

Zur Bestimmung der Lastverschiebepotentiale (LVP) werden im Folgenden zwei Methoden verwendet: Zunächst wird die Ladedauer der gesamten Aufenthaltsdauer gegenübergestellt, anschließend wird der zeitliche Verlauf der verfügbaren Energie und der aufgeladenen Energie bei den beiden Extrem-Ladestrategien dargestellt.

#### Ladedauer und Aufenthaltsdauer

In Abbildung 18 ist der durchschnittliche Anteil der Ladedauer an der gesamten Aufenthaltsdauer<sup>57</sup>, für die verschiedenen Ladetypen dargestellt. Dabei wird zum sowohl nach Haushaltstypen, als auch nach Ladeszenarien unterschieden, außerdem erfolgt eine Unterteilung in Werktag und Wochenende. Die verwendete Farbskala vergleicht die verschiedenen Haushaltstypen miteinander, indem ein höherer Anteil der Ladedauer und damit ein geringeres LVP durch eine dunklere Färbung dargestellt wird.

		Werktag			Wochenende		
		A	B	C	A	B	C
<b>Alle</b>	Home	10,7%	8,3%	5,9%	8,1%	7,7%	4,6%
	Work	-	14,2%	13,8%	-	13,9%	13,6%
	Public	-	-	6,4%	-	-	5,7%
<b>Typ 1</b>	Home	8,2%	6,1%	4,1%	6,4%	6,1%	3,8%
	Work	-	10,5%	10,1%	-	17,1%	17,1%
	Public	-	-	5,2%	-	-	5,5%
<b>Typ 2</b>	Home	9,5%	7,6%	5,4%	7,0%	6,6%	4,1%
	Work	-	13,5%	13,4%	-	6,5%	6,0%
	Public	-	-	6,3%	-	-	4,6%
<b>Typ 3</b>	Home	9,7%	7,2%	5,7%	7,2%	7,0%	4,2%
	Work	-	12,2%	11,9%	-	7,5%	7,5%
	Public	-	-	7,3%	-	-	5,3%
<b>Typ 4</b>	Home	9,6%	7,4%	4,9%	7,6%	7,2%	4,3%
	Work	-	13,4%	13,0%	-	12,8%	12,6%
	Public	-	-	5,6%	-	-	5,4%
<b>Typ 5</b>	Home	10,7%	8,3%	5,9%	8,6%	8,2%	4,6%
	Work	-	14,9%	14,5%	-	13,5%	13,5%
	Public	-	-	6,5%	-	-	5,4%
<b>Typ 6</b>	Home	13,1%	9,8%	7,3%	9,3%	8,7%	5,4%
	Work	-	15,9%	15,3%	-	21,4%	20,7%
	Public	-	-	6,9%	-	-	6,9%

Abbildung 18: Anteil der Ladedauer an der Aufenthaltsdauer bei ungesteuertem Laden.

<sup>57</sup> Ein geringerer Anteil der Ladedauer entspricht einem größeren LVP (vgl. Develder et al. 2016).

Bei der Betrachtung aller Haushalte fällt auf, dass das LVP bei dem Ladetyp *Charging near Work* am geringsten ist, wobei auch hier nur durchschnittlich 14% der Aufenthaltsdauer zum Laden genutzt werden. Der Ladetyp *Charging near Home* wird durch die Hinzunahme anderer Ladetypen (Szenario B, C) mehr und mehr ersetzt, wodurch auch Spitzenlasten vermieden werden können (siehe Standardlastprofile). Im Gegensatz zu den anderen Ladetypen wird das Laden zuhause an Werktagen für alle Haushaltstypen anteilig mehr genutzt als am Wochenende.

Beim Vergleich der verschiedenen Haushaltstypen lässt sich durch die Farbskala recht deutlich ein Unterschied im Lastverschiebepotential erkennen. Das größte LVP liegt bei Haushaltstyp 1 (innerer Stadtbereich einer Großstadt) vor, das geringste LVP bei den Haushaltstypen 5 (Kleinstadt / Große Gemeinde) und 6 (Auf dem Land / kleine Landgemeinde). Das LVP der übrigen drei Haushaltstypen ähnelt sich stark, jedoch ist bei Haushaltstyp 3 (innerer Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt) das LVP beim Laden am Arbeitsplatz etwas größer, das LVP beim öffentlichen Laden dafür geringer. Am Wochenende ist dafür bei Typ 2 (Stadtrand / Vorort einer Großstadt) ein etwas größeres LVP vorhanden.

### **Zeitlicher Verlauf von verfügbarer Energie und Max-/Min-Strategie**

Beim Generieren der Ladeprofile wird nicht nur die tatsächlich geladene Energie bei Maximal- bzw. Minimal-Strategie, sondern auch die gesamte durch die Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellte Energie berechnet. Auch wenn eine Optimierung des Ladevorgangs für jedes einzelne Fahrzeugprofil durchgeführt werden muss, kann durch einen Vergleich der genutzten und der verfügbaren Energiemenge ähnlich wie beim vorherigen Vergleich der Lade- mit der Aufenthaltsdauer fahrzeugübergreifend eine ungefähre Aussage zum Lastverschiebepotential der Fahrzeugflotte getroffen werden.

In Abbildung 18 ist der zeitliche Verlauf der verfügbaren Energie und der geladenen Energie nach Maximal- und Minimal-Strategie der bewegten Fahrzeuge an einem durchschnittlichen Werktag und am Wochenende dargestellt. Es wurde für jedes Ladeszenario eine eigene Grafik erstellt, sodass man den Einfluss hinzugenommener Ladetypen erkennen kann. In Anhang F in Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Anteile der verschiedenen Ladetypen je Ladeszenario nochmal abgebildet.

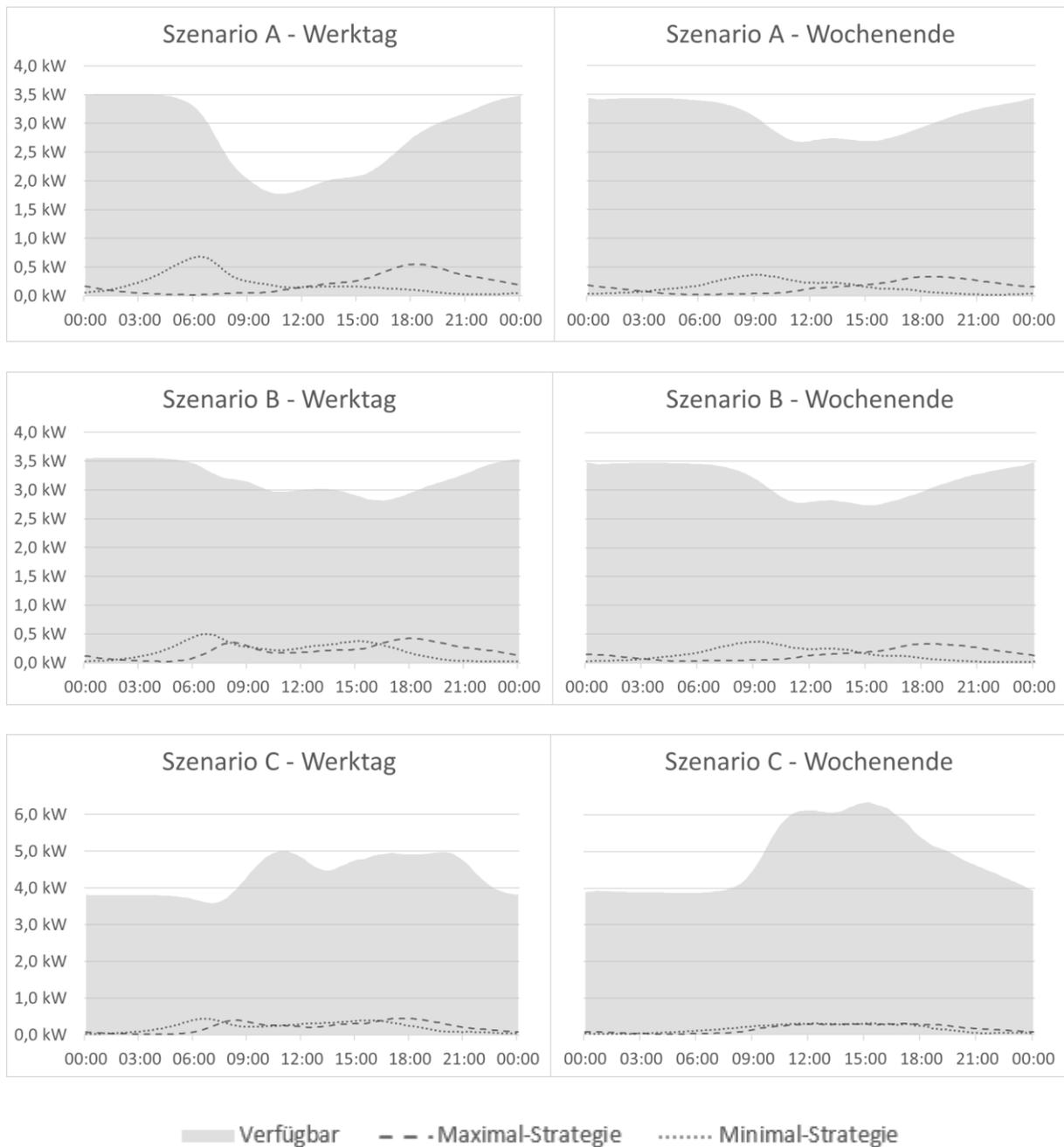


Abbildung 19: Verlauf der verfügbaren und geladenen Energie bei Max-/Min-Strategie.

In den Abbildungen ist bei allen drei Ladeszenarien eine große Differenz zwischen verfügbarer und genutzter Energie zu erkennen, die als ein relativ großes LVP interpretiert werden kann. Ein großes LVP kann beim Ladetyp *Charging near Home* in der Nacht genutzt werden. Der Ladetyp *Charging near Work* gleicht bei den Szenarien B und C die sinkende verfügbare Energie zuhause aus und glättet damit die verfügbare Energie deutlich. Das hauptsächlich tagsüber genutzte *Public Charging* bietet ein großes Synergiepotential mit der Erzeugung regenerativen Stroms durch Photovoltaikanlagen.

## 4.3. Interpretation der Ergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die bereits vorgestellten Ergebnisse interpretiert. Dazu werden aus den erstellten Diagrammen verschiedene Aussagen zum Mobilitäts- und Ladeverhalten der verschiedenen Haushaltstypen und zum Einfluss der Ladeinfrastruktur abgeleitet und anhand der Auswertungen der erzeugten Mobilitäts- und Ladeprofile aus dem vorherigen Unterkapitel belegt und diskutiert.

### 4.3.1. Mobilitätsverhalten

*Die meisten Fahrzeuge werden nur zu einem geringen Zeitanteil für Fahrten genutzt.*

Der Anteil der im Berichtszeitraum nicht bewegten Fahrzeuge und die durchschnittlichen Aufenthaltsorte und -dauern der Fahrzeuge zeigen, dass das durchschnittliche Fahrzeug die meiste Zeit seines Lebenszyklus steht. Damit besitzen neue Mobilitätskonzepte wie Carsharing ein großes ökonomisches Potential, indem Fahrzeuge besser genutzt werden und kalendarische Alterungseffekte vermieden werden können. Außerdem bietet eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur an privaten und öffentlichen Parkplätzen Potentiale zur Ladeoptimierung durch ein größeres LVP.

*Das Mobilitätsverhalten an Werktagen und am Wochenende unterscheidet sich durch Berufsverkehr und Freizeitfahrten stark.*

Das unterschiedliche Mobilitätsverhalten an Werktagen und am Wochenende wird in fast allen durchgeführten Untersuchungen im vorherigen Kapitel deutlich. Einen großen Anteil daran hat der Berufsverkehr vormittags und nachmittags an Werktagen. Dennoch werden am Wochenende durchschnittlich noch längere Strecken zurückgelegt, was möglicherweise auf Urlaubsfahrten zurückzuführen ist. An den durchschnittlichen Aufenthaltsorten lässt sich erkennen, dass sich am Wochenende deutlich mehr Fahrzeuge an öffentlichen Orten (Einkaufen und Freizeit) aufhalten. Zwischen dem Mobilitätsverhalten an Samstagen und Sonntagen konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden, die befragten Haushalte sind sonntags zwar durchschnittlich ein bis zwei Stunden später mobil, das Verkehrsaufkommen weicht allerdings nicht wesentlich voneinander ab.

*Im inneren Stadtbereich größerer Städte geht die Pkw-Nutzung durch das bessere ÖPNV-Angebot und das größere absolute Verkehrsaufkommen zurück.*

Zum einen lässt sich die geringere Pkw-Nutzung schon bei der Auswertung des Pkw-Bestands der Haushalte erkennen, zum anderen ist beispielsweise bei den Ergebnissen

des Verkehrsaufkommens und der verbrauchten Energie auch fahrzeugspezifisch eine geringere Mobilität mit dem eigenen Pkw zu sehen. Am deutlichsten wird dieser Unterschied beim Vergleich der Haushaltstypen 1 und 6 an Werktagen. Auffällig ist, dass die Fahrzeuge des Haushaltstyp 1 am Wochenende mobiler als an Werktagen sind.

*In Vororten und am Stadtrand größerer Städte nimmt das Mobilitätsverhalten an Werktagen durch Pendlerstrecken nicht signifikant zu.*

Entgegen vermeintlicher Annahmen liegt für die Haushaltstypen 2 und 4, also Haushalten am Stadtrand oder in Vororten (mittel-)großer Städte, kein überdurchschnittliches Verkehrsaufkommen an Werktagen (bspw. durch Pendlerstrecken) vor. Im Gegenteil befinden sich bei den Haushaltstypen 1 und 3 (innerer Stadtbereich) an Werktagen anteilig sogar mehr Fahrzeuge an der Arbeitsstelle (siehe Anhang C).

*Auf dem Land und in kleinen Gemeinden nimmt die Mobilität mit dem Pkw zu.*

Anders als in den Vororten größerer Städte lässt sich für Haushalte auf dem Land und in kleinen Gemeinden und Städten (Typ 5 und 6) ein deutlich größeres Verkehrsaufkommen mit dem Pkw erkennen. Insbesondere auf dem Land an Werktagen führt der Berufsverkehr zu einem überdurchschnittlichen Mobilitätsverhalten. Die verstärkte Nutzung des Pkws kann mit längeren Arbeitswegen und auch mit einem geringeren Angebot an alternativen Verkehrsmitteln begründet werden.

### **4.3.2. Ladeverhalten und Einfluss der Ladeinfrastruktur**

*Das alltägliche Mobilitätsverhalten der meisten Haushalte lässt sich schon mit dem heutigen Stand der Batterieentwicklung und Ladeinfrastruktur mit einem BEV durchführen.*

Ein Großteil der erzeugten Mobilitätsprofile konnte mit den substituierten Elektrofahrzeugen, die auf den Daten aktueller Fahrzeugmodelle beruhen, durchgeführt werden, was dem Vorurteil einer zu geringen Reichweite heutiger Elektrofahrzeuge widerspricht. Wichtiger als eine Erhöhung der Reichweite scheint eine präzisere Vorhersage der verbleibenden Reichweite und ein Ausbau der Schnellladeinfrastruktur, falls gelegentlich nicht alltägliche längere Strecken mit dem Elektrofahrzeug zurückgelegt werden müssen. Ein komfortables und kostengünstiges Angebot an Leihfahrzeugen sowie verbrauchsarme Hybridfahrzeuge können eine sinnvolle Ergänzung zu reinen Elektrofahrzeugen sein.

*Ungesteuertes Laden führt zu erheblichen Spitzenlasten.*

Die Standardlastprofile zeigen, dass ein ähnliches Mobilitätsverhalten der meisten Haushalte (z.B. durch ähnliche Arbeitszeiten) bei ungesteuertem Laden zu Spitzenlasten führen, die bei einem steigenden Anteil an Elektrofahrzeugen durchaus ein Problem für Netzbetreiber darstellen können. Insbesondere bei Ladeszenario A, bei dem Fahrzeuge nur zuhause geladen werden können, ist an Werktagen gegen Nachmittag die Spitzenlast für alle Haushaltstypen sehr groß. Die maximale genutzte Ladeleistung je Fahrzeug ist bei den ländlichen Haushalten (Typ 5 und 6) durch den häufigeren Pkw-Einsatz im Berufsverkehr am größten.

*Der Grad der Urbanisierung hat einen signifikanten Einfluss auf die Standardlastprofile*

Die Unterschiede der in Anhang E dargestellten Standardlastprofile für die 6 verschiedenen Haushaltstypen legen nahe, dass die Lage der Wohnung einen Einfluss auf die Stromnachfrage bei ungesteuertem Laden hat. Die größten Abweichungen liegen an Werktagen bei den Spitzenlasten und am Wochenende beim Einfluss des öffentlichen Ladens vor.

*Ein Ausbau der Ladeinfrastruktur auf der Arbeit und an öffentlichen Orten kann zu einer Glättung der Stromnachfrage führen.*

Beim Vergleich der Spitzenlasten in den Standardlastprofilen der unterschiedlichen Ladeszenarien wird deutlich, dass vor allem das Laden am Arbeitsplatz einen positiven Einfluss auf die maximale Amplitude der Stromnachfrage hat. Je nach Haushaltstyp kann auch öffentliches Laden Spitzenlasten verringern. Durch öffentliche Ladestationen wird durch öffentliches Laden mehr Energie tagsüber aufgeladen, was bspw. durch eine Kombination mit dem Einsatz von Solarstrom sinnvoll sein kann.

*Beim Laden der Fahrzeuge in der Nähe der Wohnung liegt über Nacht ein erhebliches Lastverschiebepotential vor.*

Der durchschnittliche Aufenthaltsort zeigt, dass sich die meisten Fahrzeuge über Nacht zuhause befinden und im Zeitverlauf der genutzten und verfügbaren Energiemenge in Abbildung 19 und Anhang F ist ersichtlich, dass nur ein geringer Teil der dort verfügbaren Energiemenge tatsächlich genutzt wird. Somit könnte eine Lastverschiebung beim Laden in der Nähe der Wohnung zu einer erheblichen Verringerung der Spitzenlasten führen. Außerdem bietet die lange Standzeit zuhause Möglichkeiten für die Nutzung der Fahrzeugbatterie für V2G- und V2H-Konzepte.

## 5 Schlussbetrachtung

Im letzten Kapitel wird zum einen die in dieser Arbeit erfolgte Generierung und Auswertung repräsentativer Ladeprofile für Deutschland zusammengefasst. Dabei wird unter anderem auf die Vorgehensweise aus Kapitel 3 und die Ergebnisse der ausgewerteten Mobilitäts- und Ladeprofile in Kapitel 4 eingegangen. Abschließend wird ein kurzer Ausblick gegeben.

### 5.1. Zusammenfassung

Nachdem in Kapitel 2 auf die verwendeten MOP-Daten eingegangen wurde und grundlegende Informationen zu Elektrofahrzeugen und insbesondere zum Ladevorgang dieser Fahrzeuge zusammengetragen wurden, wurde in Kapitel 3 ein Algorithmus zur Erstellung repräsentativer Ladeprofile auf Basis der MOP-Daten vorgestellt. Anschließend wurden in Kapitel 4 erzeugte Fahrzeugprofile bei verschiedenen Angaben zur Auswahl der Haushalte und der verfügbaren Ladeinfrastruktur ausgewertet und interpretiert.

Das erste Ziel dieser Arbeit war, einen nachvollziehbaren Algorithmus zur Generierung repräsentativer Ladeprofile auf Basis der MOP-Daten zu erzeugen und ausführlich zu beschreiben. Dabei wurden die im Vorfeld der Bachelorarbeit benannten Anforderungen (siehe Kapitel 3.1) bestmöglich erfüllt: Der Algorithmus ist auf verschiedene (auch zukünftige) MOP-Datensätze anwendbar, es können einzelne Haushaltsgruppen separat betrachtet werden, der Benutzer kann Angaben zur vorhandenen Ladeinfrastruktur machen und es werden beide Extrem-Ladestrategien berechnet. Durch die in der Datenbank gespeicherten Fahrzeuginformationen und weitere Nutzereingaben können die substituierten Fahrzeuge verändert werden, außerdem erfolgt eine Aggregation der Fahrzeuge nach den Gewichtungsfaktoren aus den MOP-Daten, sodass die Ladeprofile insgesamt die Fahrzeugflotte in Deutschland abbilden. Auch wenn in dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen wurde, besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, den Algorithmus zur Bestimmung der Maximal- und Minimal-Ladestrategien und der Fahrzeugaggregation auch auf MOP-fremde Daten anzuwenden. Die ausführliche Beschreibung

der Vorgehensweise zur Erstellung der Ladeprofile in Kapitel 3.2, dessen Struktur mit dem Aufbau des MATLAB-Programms übereinstimmt, erleichtert die Benutzung und Erweiterung des Algorithmus. In Kapitel 3.3 wurden die Ergebnisse des Algorithmus kritisch betrachtet. Dabei wurde unter anderem auf Mängel der verwendeten Daten, notwendige getroffene Annahmen und Grenzen der Modellierung eingegangen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit war, die untersuchten Mobilitätsdaten auszuwerten, den Einfluss verschiedener Ladeszenarien auf die erzeugten Ladeprofile zu untersuchen und durch eine Betrachtung verschiedener Haushaltsgruppen den Einfluss des Urbanisierungsgrads auf das Mobilitäts- und Ladeverhalten zu analysieren. Dazu wurden in Kapitel 4 verschiedene Auswertungen, beispielsweise zum Verkehrsaufkommen, den Aufenthaltsorten, der Dauer der Aufenthalte und der verbrauchten Energie der Fahrzeuge durchgeführt. Außerdem wurden Standardlastprofile für verschiedene Ladeszenarien und Haushaltstypen an Werktagen und am Wochenende erstellt und zwei Untersuchungen zum Lastverschiebepotential der aufzuladenden Fahrzeuge durchgeführt. Auf Basis dieser Untersuchungen wurden in Kapitel 4.3 verschiedene Aussagen zum Mobilitätsverhalten und dem Einfluss der Ladeinfrastruktur getroffen und durch die verschiedenen Auswertungen der Ladeprofile belegt.

Für verwandte Forschungszwecke kann zum einen die Vorgehensweise zur Erstellung der Ladeprofile relevant sein, indem durch Anpassungen der Benutzereingaben oder des Algorithmus selbst passende Ladeprofile für weiterführende Auswertungen generiert werden können. Zum anderen können die Erkenntnisse aus den Auswertungen der Ladeprofile in dieser Arbeit, wie z.B. die Standardlastprofile, für zukünftige Arbeiten im Bereich der Ladeoptimierung von Elektrofahrzeugen verwendet werden.

## **5.2. Ausblick**

Die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise zur Erzeugung von repräsentativen Ladeprofilen kann durch zukünftige Forschungsarbeiten noch erweitert werden. Dazu könnten zum Beispiel stochastische Modelle zur Erzeugung von Mobilitätsprofilen, zur Vorhersage des Aufenthaltsorts des Fahrzeugs oder zur Bestimmung der vorhandenen Ladeinfrastruktur erstellt werden, sodass die Ladeprofile das Nutzerverhalten und die externen Bedingungen noch realistischer darstellen.

Auf Basis der beiden berechneten Extrem-Ladestrategien und der verfügbaren Ladeinfrastruktur könnte ein Offline- oder Online-Algorithmus entwickelt werden, der das La-

deverhalten für die Fahrzeugprofile optimiert, indem es den Nutzen einer Zielfunktion maximiert (siehe Hahn et al. 2013). Basis für eine Zielfunktion könnte ein flexibler Strompreis-Verlauf sein, der die Angebotsschwankung von regenerativen Energien und gesteigerte Nachfragemengen zu Spitzenzeiten berücksichtigt und so dem Nutzer wirtschaftliche Anreize zu einem umweltfreundlicheren Verhalten setzt.

Zukünftige Arbeiten könnten die Ergebnisse und Interpretationen in dieser Arbeit mit ähnlicher Literatur vergleichen und so ggf. die Relevanz der getroffenen Aussagen unterstreichen. Dabei könnten unter anderem die in Kapitel 3.3 aufgeführten Schwächen der MOP-Daten, beispielsweise der Einfluss der Jahreszeit, kritisch betrachtet werden. Durch eine Untersuchung der Varianz des Ladeverhaltens könnte die Aussagekraft der Standardlastprofile näher untersucht werden.

Gegenstand weitergehender Forschung könnten weitere Auswertungen der Ladeprofile auf Basis der MOP-Daten sein, beispielsweise nach regionalen Aspekten, oder indem die Ladeprofile in verschiedene typische Fahrzeug-Klassen eingeteilt werden, was die Aussagekraft der Standardlastprofile durch eine geringere Streuung erhöhen würde. Durch eine Modifizierung des Algorithmus könnte die Auswirkung einer haushaltsübergreifenden Nutzung von Fahrzeugen nach regionalen Aspekten wichtige Erkenntnisse zum Potential durch zukünftige Sharing-Konzepte wie Fuhrparks oder autonome Taxi-Fahrzeuge liefern.

Für die Nutzung von Lastverschiebepotentialen sind natürlich nicht nur die Fahrzeuge privater Haushalte, sondern auch die zurückgelegten Strecken im Transportsektor, welche für einen hohen Anteil der Emissionen verantwortlich sind (Creutzig und Edenhofer 2010), interessant. Einzelne Unternehmen, wie beispielsweise die Deutsche Post stellen ihre Fahrzeugflotte schon jetzt auf elektrisch betriebene Fahrzeuge um. Durch die Einbindung von Mobilitätsdaten in geeignetem Format können auch diese mit den Modulen 4 und 5 des entwickelten Algorithmus hinsichtlich des LVPs ausgewertet werden.

Durch die in der Anforderungsanalyse abgestimmte Vorgehensweise und die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten zur gezielten Erzeugung der Ladeprofile versuchen die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit einen Beitrag zur Optimierung des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen zu leisten und damit den Einsatz umweltfreundlicherer und ressourcenschonenderer Stromquellen und Antriebstechnologien für Kunden wie auch für Stromnetzbetreiber zukünftig attraktiver zu machen.

# Literaturverzeichnis

Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende.

BCG (2018): The Electric Car Tipping Point. The Future of Powertrains for Owned and Shared Mobility.

BMW (2017): Der neue BMW i3 und BMW i3s. Preisliste November 2017.

BMW (2016): Ladesäulenverordnung (LSV): Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile.

Böhm, Rolf; Fuchs, Emmerich; Fischer, Markus (2002): System-Entwicklung in der Wirtschaftsinformatik. 5. vollst. überarb. Auflage. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH (Wirtschaftsinformatik).

Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung.

Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität.

Clausen, Jens (2018): Roadmap Elektromobilität Deutschland. Ziele, Chancen, Risiken, notwendige Maßnahmen und politische Initiativen.

Creutzig, Felix; Edenhofer, Ottmar (2010): Mobilität im Wandel. Wie der Klimaschutz den Transportsektor vor neue Herausforderungen stellt. In: *Internationales Verkehrswesen* 62.

Dallinger, David; Krampe, Daniel; Wietschel, Martin (2011): Vehicle-to-Grid Regulation Reserves Based on a Dynamic Simulation of Mobility Behavior. In: *IEEE Trans. Smart Grid* 2 (2), S. 302–313. DOI: 10.1109/TSG.2011.2131692.

Deutsche Post DHL Group (2016): Fakten zum StreetScooter.

Develder, Chris; Sadeghianpourhamami, Nasrin; Strobbe, Matthias; Refa, Nazir (2016): Quantifying flexibility in EV charging as DR potential: Analysis of two real-world data sets. Unter Mitarbeit von George Maltabarow und Z. Y. Dong. Piscataway, NJ: IEEE.

Döring, Thomas; Aigner-Walder, Birgit (2017): Verkehrs-, umwelt- und raumbezogene Aspekte der Elektromobilität aus der Sicht des Nutzerverhaltens. In: *Raumforsch Raumordn* 75 (4), S. 339–353. DOI: 10.1007/s13147-016-0472-x.

Ester, Patrick (2016): Vision IKT für Elektromobilität. Szenarien, Basisinnovationen und Expertenbewertung.

Festag, Andreas; Rehme, Marco; Kruse, Jan (2016): Studie Mobilität 2025+. Koexistenz oder Konvergenz von IKT für Automotive? Hg. v. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Frenzel, Ina; Jarass, Julia; Trommer, Stefan; Lenz, Barbara (2015): Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Hg. v. DLR.

Grahn, Pia; Alvehag, Karin; Soder, Lennart (2014): PHEV Utilization Model Considering Type-of-Trip and Recharging Flexibility. In: *IEEE Trans. Smart Grid* 5 (1), S. 139–148. DOI: 10.1109/TSG.2013.2279022.

Hacker, Florian; Harthan, Ralph; Kasten, Peter; Loreck, Charlotte; Zimmer, Wiebke (2011): OPTUM: Marktpotenziale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität.

Hahn, Tobias; Schönfelder, Martin; Jochem, Patrick; Heuveline, Vincent; Fichtner, Wolf (2013): Model-Based Quantification of Load Shift Potentials and Optimized Charging of Electric Vehicles. In: *SGRE* 04 (05), S. 398–408. DOI: 10.4236/sgre.2013.45046.

Herb, Frieder (2010): Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Dissertation. Universität Ulm.

Holtmark, Bjart; Skonhoft, Anders (2014): The Norwegian support and subsidy policy of electric cars. Should it be adopted by other countries? In: *Environmental Science & Policy* 42, S. 160–168. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.06.006.

Hose, Christian; Lübke, Karsten; Nolte, Thomas; Obermeier, Thomas (2015): Einführung von Elektromobilität in Deutschland: Eine Bestandsaufnahme von Barrieren und Lösungsansätzen. In: *Arbeitspapiere der FOM*.

Hüttl, Reinhard F.; Pischetsrieder, Bernd; Spath, Dieter (2010): Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hyundai (2017): IONIQ Elektro.

Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (2012): Das Deutsche Mobilitätspanel (MOP): Informationen zur Datennutzung.

Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (2016): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen, Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung.

Jaguar Land Rover Ltd. (2018): Der neue vollelektrische Jaguar I-Pace.

Kaschub, Thomas (2017): Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung. Promotion, Karlsruhe.

Kaschub, Thomas; Heinrichs, Heidi, Jochem, Patric; Fichtner, Wolf (2013): Modeling Load Shifting Potentials of Electric Vehicles.

KBA (2018): Jahresbilanz des Fahrzeugbestands am 01.01.2018. Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html?nn=644526](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526), zuletzt geprüft am 21.03.2018.

KIA (2017): Der KIA Soul EV.

Kollosche, Ingo; Schwedes, Oliver (2016): Mobilität im Wandel. In: *Transformationen und Entwicklungen im Personen.*

Leitinger, C.; Litzlbauer, M. (2011): Netzintegration und Ladestrategien der Elektromobilität. In: *Elektrotech. Inftech.* 128 (1-2), S. 10–15. DOI: 10.1007/s00502-011-0800-3.

Liu, Lan (2017): Einfluss der privaten Elektrofahrzeuge auf Mittel- und Niederspannungsnetze. Dissertation, Darmstadt.

Mercedes-Benz (2017): B-Klasse Sports Tourer.

Michaelis, Julia; Plötz, Patrick; Gnann, Till; Wietschel, Martin (2012): Vergleich alternativer Antriebstechnologien: Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug. In: Patrick Jochem, Witold-Roger Pogonietz, Armin Grundwald und Wolf Fichtner (Hg.): *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen*, S. 51–79.

Model3.info (2018): Tesla Model 3 - Technische Daten. Online verfügbar unter <https://www.model3.info/de/tesla-model-3-technische-daten>, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Mohsenian-Rad, Amir-Hamed; Wong, Vincent W. S.; Jatskevich, Juri; Schober, Robert; Leon-Garcia, Alberto (2010): Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid. In: *IEEE Trans. Smart Grid* 1 (3), S. 320–331. DOI: 10.1109/TSG.2010.2089069.

Mouli, Gautham Ram Chandra; Kaptein, Johan; Bauer, Pavol; Zeman, Miro (2016): Implementation of dynamic charging and V2G using Chademo and CCS/Combo DC charging standard. In: IEEE (Hg.): 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn, MI, USA, 27.06.2016 - 29.06.2016: IEEE, S. 1–6.

Nissan (2017): Nissan e-NV200 EVALIA.

Nissan (2018): Nissan LEAF, Broschüre und Preisliste.

Opel (2017): Der neue Ampera-e.

Radgen, Peter (2018): Von der Schwierigkeit, nicht nur im Kopf umzuparken – Ein Selbstversuch zur Elektromobilität. In: Olaf Kühne und Florian Weber (Hg.): Bausteine der Energiewende, S. 587–607.

Reichert, Carolin; Reimann, Katja; Lohr, Jörg (2012): Elektromobilität – Antworten auf die fünf entscheidenden Fragen. In: Hans-Gerd Servatius (Hg.): Smart Energy. Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem. Berlin u.a.: Springer, S. 453–461.

Renault (2017): Renault ZOE - Preise und Ausstattungen.

Ried, Sabrina; Jochem, Patrick; Fichtner, Wolf (2013): Chancen für IKT durch zukünftige Dienstleistungs-Geschäftsmodelle für Flotten mit Elektrofahrzeugen.

Schäuble, Johannes; Kaschub, Thomas; Ensslen, Axel; Jochem, Patrick; Fichtner, Wolf (2017): Generating electric vehicle load profiles from empirical data of three EV fleets in Southwest Germany. In: *Journal of Cleaner Production* 150, S. 253–266. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.150.

Schill, Wolf-Peter; Niemeyer, Moritz; Zerrahn, Alexander; Diekmann, Jochen (2016): Bereitstellung von Regelleistung durch Elektrofahrzeuge. Modellrechnungen für Deutschland im Jahr 2035. In: *Z Energiewirtschaft* 40 (2), S. 73–87. DOI: 10.1007/s12398-016-0174-7.

Schönfelder, Martin; Pathmaperuma, Daniel; Reiner, Ulrich; Fichtner, Wolf; Schmeck, Hartmut; Leibfried, Thomas (2009): Elektromobilität. In: *uwf* 17 (4), S. 373–380. DOI: 10.1007/s00550-009-0157-9.

Schöttle, Markus; Bitsche, Ottmar (2017): „Schnelles Laden, das zählt künftig zum erweiterten Kern unserer Marke“. In: *ATZ Elektron* 12 (5), S. 22–25. DOI: 10.1007/s35658-017-0083-5.

Schücking, Maximilian; Jochem, Patrick; Fichtner, Wolf; Wollersheim, Olaf; Stella, Kevin (2017): Charging strategies for economic operations of electric vehicles in commercial applications. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 51, S. 173–189. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.032.

smart (2017): smart electric drive.

Spicher, Ulrich (2012): Analyse der Effizienz zukünftiger Antriebssysteme für die individuelle Mobilität. In: *MTZ Motortech Z* 73 (2), S. 98–105. DOI: 10.1365/s35146-012-0242-4.

Sundstrom, Olle; Binding, Carl (2012): Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints. In: *IEEE Trans. Smart Grid* 3 (1), S. 26–37. DOI: 10.1109/TSG.2011.2168431.

Tesla (2018a): Tesla Model S. Online verfügbar unter [https://www.tesla.com/de\\_DE/models](https://www.tesla.com/de_DE/models), zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Tesla (2018b): Tesla Model X. Online verfügbar unter [https://www.tesla.com/de\\_DE/modelx](https://www.tesla.com/de_DE/modelx), zuletzt geprüft am 15.04.2018.

The Mobility House (2018): Ladekabelarten und Steckertypen für Elektroautos. Online verfügbar unter <http://www.mobilityhouse.com/de/ladekabelarten-und-steckertypen/>, zuletzt geprüft am 13.03.2018.

Umweltbundesamt (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Unter Mitarbeit von Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich und Axel Liebich. Hg. v. Umweltbundesamt.

Vezzini, Andrea (2010): Elektrofahrzeuge. Mobilität und erneuerbare Energie. In: *Phys. Unserer Zeit* 41 (1), S. 36–42. DOI: 10.1002/piuz.201001221.

Volkswagen (2018a): Der e-Golf. Technik und Preise.

Volkswagen (2018b): Der e-up! Technik und Preise.

zoom (2017): Nissan EVALIA Stadtindianer. In zwei Welten zuhause.

## Anhang A: Verwendete Elektrofahrzeuge

Tabelle 16: Für die Fahrzeugs substitution verwendete Elektrofahrzeuge<sup>58</sup>.

Segment <sup>59</sup>	Marke	Modell	Batterie (kWh)	Verbrauch (kWh/100km)	Leistung (kW)
1	Smart	Fortwo electric Drive	17,6	12,9	60
1	VW	e-up!	18,7	11,7	60
2	Smart	Forfour electric Drive	17,6	13,1	60
2	Renault	ZOE Z.E. 40	41	11,2	68
2	BMW	i3 94Ah	27,2	13,6	125
3	Hyundai	Ioniq Elektro	28	11,5	88
3	VW	e-Golf	35,8	12,7	100
3	Nissan	Nissan Leaf	40	19,4	110
3	Chevrolet / Opel	Chevrolet Bolt / Opel Ampera-e	60	14,5	150
4	Tesla	Model 3	50	14,1	192
5	Tesla	Model S 75D	75	18,6	315
6	Tesla	Model S 100D	100	18,9	315
7	Tesla	Model X 75D	75	20,8	245
8	Tesla	Model S P100D	100	20	515
9	KIA	KIA Soul EV	30	14,3	81,4
9	Mercedes-Benz	B 250e	28	16,6	132
10	Nissan	e-NV200 Evalia	24	16,5	80
11	StreetScooter	StreetScooter Work	20	25	30
11	Nissan	e-NV200 Evalia	24	16,5	80
12	Nissan / zoom	EVALIA Stadtindianer	24	16,5	80
13	Tesla	Tesla Model X 75D	75	20,8	245
13	Jaguar	I-Pace	90	21,2	294

Quellen: (smart 2017; Volkswagen 2018b; Renault 2017; BMW 2017; Hyundai 2017; Volkswagen 2018a; Nissan 2018; Opel 2017; Model3.info 2018; Tesla 2018a, 2018b; KIA 2017; Mercedes-Benz 2017; Nissan 2017; Deutsche Post DHL Group 2016; zoom 2017; Jaguar Land Rover Ltd. 2018).

<sup>58</sup> Manche Fahrzeuge wurden für mehrere Fahrzeugsegmente verwendet und tauchen deshalb in der Tabelle doppelt auf.

<sup>59</sup> 1 - Mini, 2 - Kleinwagen, 3 - Kompaktklasse, 4 - Mittelklasse, 5 - Obere Mittelklasse, 6 - Oberklasse, 7 - Geländewagen, 8 - Sportwagen, 9 - Mini-Van, 10 - Großraum-Van, 11 - Utility, 12 - Wohnmobil, 13 - SUV.

## Anhang B: Erhobene Haushaltsinformationen

Tabelle 17: In den MOP-Befragungen erhobene Haushaltsinformationen.

Variable	Werte	Beschreibung
BIK		Raumtyp nach GKBK10: Einw.-Zahl näherungsweise - die Unterteilung nach Regionskern und Regionsrand erfolgt anhand der Einwohner-Arbeitsplatz-Dichte (E-A). Beträgt sie mehr als 1000 E-A pro km <sup>2</sup> , wird die Lage als Regionskern definiert
	0	(10) mehr als 500.000 Einw., Wohnung im Regionskern gelegen
	1	(9) mehr als 500.000 Einw., Wohnung am Regionsrand
	2	(8) 100.000 - 500.000 Einw., Wohnung im Regionskern
	3	(7) 100.000 - 500.000 Einw., Wohnung am Regionsrand
	4	(6) 50.000 - 100.000 Einw., Wohnung im Regionskern
	5	(5) 50.000 - 100.000 Einw., Wohnung am Regionsrand
	6	(4) 20.000 - 50.000 Einw.
	7	(3) 5.000 - 20.000 Einw.
	8	(2) 2.000 - 5.000 Einw.
9	(1) unter 2.000 Einw.	
RAUMTYP		Raumtyp nach BIK (s. BIK), zusammengefasst:
	1	mehr als 100.000 Einw., Lage im Kern
	2	mehr als 100.000 Einw., Lage am Rand
	3	20.000 - 100.000 Einw.
	4	5.000 - 20.000 Einw.
5	unter 5.000 Einw.	
REGION		Siedlungsstrukturelle Regionstypen nach BBSR 7er Skala (ehemals BBR, ehemals BFLR); weitere Hinweise auf: <a href="http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_340582/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebiets-typen/Regionstypen/regionstypen.html?__nnn=true">http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_340582/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebiets-typen/Regionstypen/regionstypen.html?__nnn=true</a>
	1	Hochverdichtete Agglomerationsräume
	2	Agglomerationsräume mit herausragenden Zentren
	3	Verstädterte Räume höherer Dichte
	4	Verstädterte Räume mittlerer Dichte mit großen Oberzentren
	5	Verstädterte Räume mittlerer Dichte ohne große Oberzentren
	6	Ländliche Räume höherer Dichte
	7	Ländliche Räume geringerer Dichte
KREIS		Siedlungsstrukturelle Regionstypen nach BBSR 9er Skala:
	1	Kernstädte in Agglomerationsräumen
	2	Hochverdichtete Kreise in Agglomerationsräumen
	3	Verdichtete Kreise in Agglomerationsräumen
	4	Ländliche Kreise in Agglomerationsräumen
	5	Kernstädte in verdichterten Räumen
	6	Verdichtete Kreise in verdichterten Räumen
	7	Ländliche Kreise in verdichterten Räumen
	8	Ländliche Kreise höherer Dichte in ländlichen Räumen
9	Ländliche Kreise geringerer Dichte in ländlichen Räumen	

GEMEINDE	Siedlungsstrukturelle Regionstypen nach BBSR 17er Skala:
1	Größere Kernstädte in Agglomerationsräumen
2	Kernstädte in Agglomerationsräumen
3	Ober- / Mittelzentren in hochverdichteten Kreisen von Agglomerationsräumen
4	Sonstige Gemeinden in hochverdichteten Kreisen von Agglomerationsräumen
5	Ober- / Mittelzentren in verdichteten Kreisen von Agglomerationsräumen
6	Sonstige Gemeinden in verdichteten Kreisen von Agglomerationsräumen
7	Ober- / Mittelzentren in ländlichen Kreisen von Agglomerationsräumen
8	Sonstige Gemeinden in ländlichen Kreisen von Agglomerationsräumen
9	Kernstädte in verstädterten Räumen
10	Ober- / Mittelzentren in verdichteten Kreisen innerhalb von verstädterten Räumen
11	Sonstige Gemeinden in verdichteten Kreisen innerhalb von verstädterten Räumen
12	Ober- / Mittelzentren in ländlichen Kreisen innerhalb von verstädterten Räumen
13	Sonstige Gemeinden in ländlichen Kreisen innerhalb von verstädterten Räumen
14	Ober- / Mittelzentren in ländlichen Kreisen höherer Dichte
15	Sonstige Gemeinden in ländlichen Kreisen höherer Dichte
16	Ober- / Mittelzentren in ländlichen Kreisen geringere Dichte
17	Sonstige Gemeinden in ländlichen Kreisen geringerer Dichte
GKZ	Gemeindekennzahl (aus Datenschutzgründen nur die ersten 5 Stellen, d.h. Kreiskennzahl - führende Nullen fehlen). Belegung der Ziffern von links nach rechts: Ziffern 1 und 2: Bundesland
1	Schleswig-Holstein
2	Hamburg
3	Niedersachsen
4	Bremen
5	Nordrhein-Westfalen
6	Hessen
7	Rheinland-Pfalz
8	Baden-Württemberg
9	Bayern
10	Saarland
11	Berlin
12	Brandenburg
13	Mecklenburg-Vorpommern
14	Sachsen
15	Sachsen-Anhalt
16	Thüringen
	Ziffer 3: Regierungsbezirk
	Ziffern 4 und 5: Kreis

---

PLZ		Postleitzahl (erste 3 Stellen (in 2012 nur die ersten 2 Stellen) - führende Nullen fehlen)
	0-99999	PLZ
EWZahl		Einwohnergrößenklasse (Gemeindegrößenklasse (politisch))
	1	unter 2000
	2	2.000 bis unter 5.000
	3	5.000 bis unter 20.000
	4	20.000 bis unter 50.000
	5	50.000 bis unter 100.000
	6	100.000 bis unter 500.000
	7	500.000 und mehr
WETTER		Zuordnung des HH-Wohnortes in den Wetterbereich der Wetterstationen:
	1	Wetterbereich 1: Wetterstation Hamburg
	2	Wetterbereich 2: Wetterstation Essen-Bredene
	3	Wetterbereich 3: Wetterstation Flughafen Frankfurt/Main
	4	Wetterbereich 4: Wetterstation Ulm / Münsterhausen
	5	Wetterbereich 5: Wetterstation Berlin-Schönefeld
	6	Wetterbereich 6: Wetterstation Gera-Leumnitz
UMZUG		Bei Wiederholer-HH: Angabe, ob der Haushalt im Lauf des vergangenen Jahres umgezogen ist (siehe Hinweise)
	0	Nein (kein Umzug)
	1	Ja (Umzug)
LAGE		Lage der Wohnung des HHs nach Einschätzung und Angabe des HHs selbst
	1	Im inneren Stadtbereich einer Großstadt
	2	Am Stadtrand / in einem Vorort einer Großstadt
	3	Im inneren Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt
	4	Am Stadtrand / in einem Vorort einer mittelgroßen Stadt
	5	In einer Kleinstadt / in einer großen Gemeinde
	6	Auf dem Land / in einer kleinen Landgemeinde
	9	Keine Angabe
HHTYP		Haushaltstyp (da diese Typisierung auf Angaben aus der Anwerbung basiert gibt es Abweichungen gegenüber Typisierungen auf Basis von Angaben aus dem Datensatz; nicht in Welle 1995).
	1	Kleinhaushalt mit Berufstätigen (1-2 Personen)
	2	Kleinhaushalt ohne Berufstätige (1-2 Personen, Rentner)
	3	Haushalt mit Kindern unter 18 Jahren
	4	Haushalt ohne Kinder, 3 und mehr Erwachsene
HHGRO		Anzahl der im Haushalt lebenden Personen
	0-99999	Anzahl Personen
PO_10		Anzahl der im Haushalt lebenden Kinder unter 10 Jahren
	0-99999	Anzahl Kinder

EINKO		Monatliches Netto-Einkommen des Haushalts (wurde in 2002/2003 für die Erstberichter-Kohorte erhoben, andere Klassierung)
	1	bis unter 500 €
	2	500 bis unter 1.000 €
	3	1.000 bis unter 1.500 €
	4	1.500 bis unter 2.000 €
	5	2.000 bis unter 2.500 €
	6	2.500 bis unter 3.000 €
	7	3.000 bis unter 3.500 €
	8	3.500 bis unter 4.000 € (bis 2012/2013: 3.500 € und mehr)
	9	4.000 bis unter 5.000 €
	10	5.000 € und mehr
	99	Keine Angabe
PKWHH		Anzahl der im Haushalt vorhandenen Pkw
	0-99999	Anzahl Pkw
PARKGAR		Angabe, ob eine Garage oder ein privater Parkplatz vorhanden ist
	1	Ja
	9	Keine Angabe / Nein
PARKPROB		Angabe bezüglich der Schwierigkeit, in der Nähe der Wohnung einen Parkplatz zu finden
	1	Sehr schwierig
	2	Schwierig
	3	Nicht besonders schwierig
	4	Überhaupt nicht schwierig
	9	Keine Angabe
OEFFZUF		Zufriedenheit mit der Anbindung an öffentliche Verkehrsmittel
	1	Im Großen und Ganzen zufrieden
	2	Sollte verbessert werden
	9	Keine Angabe

Quelle: Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie 2016.

## Anhang C: Aufenthaltsorte der Fahrzeuge

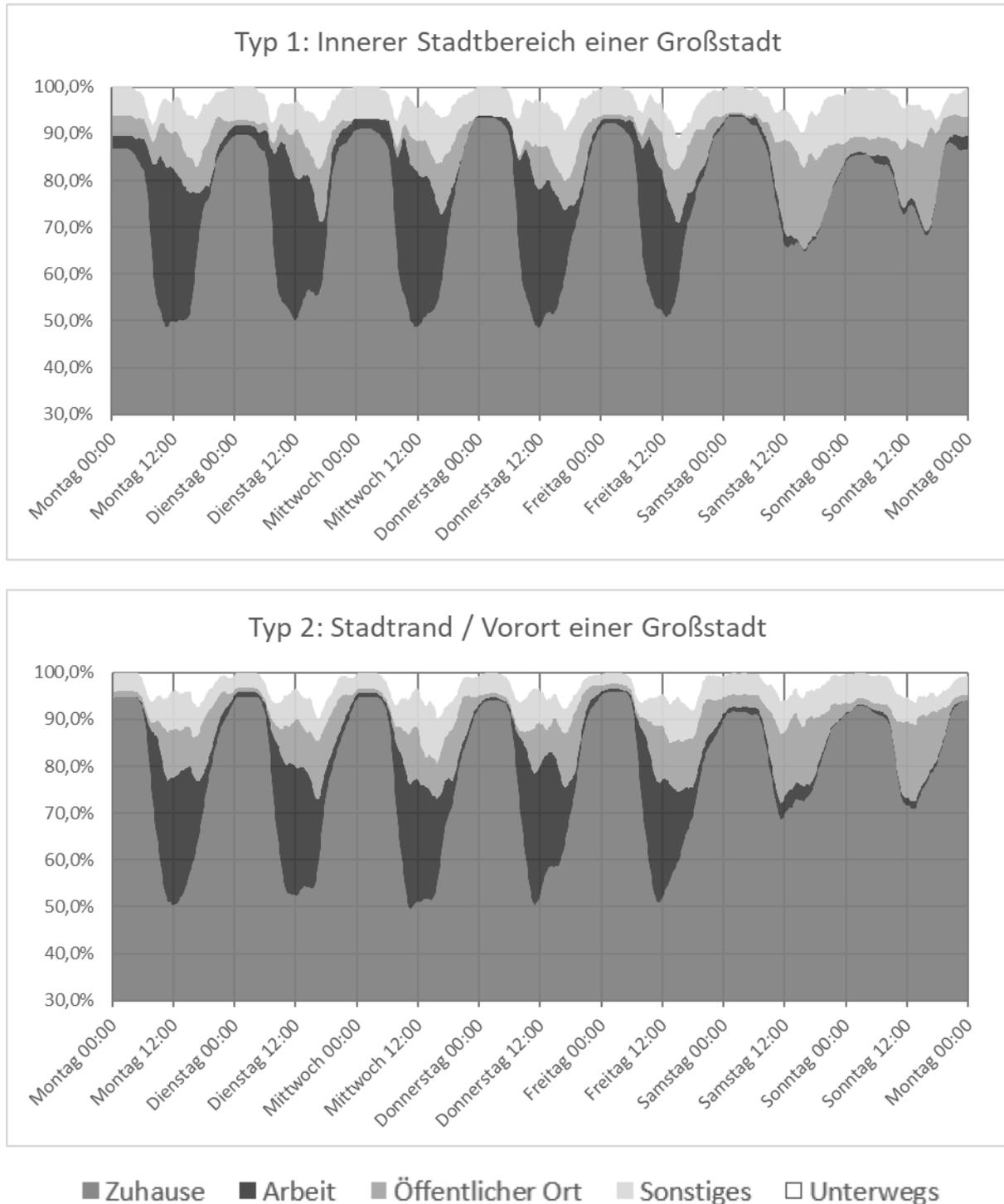


Abbildung 20: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 1 & 2).

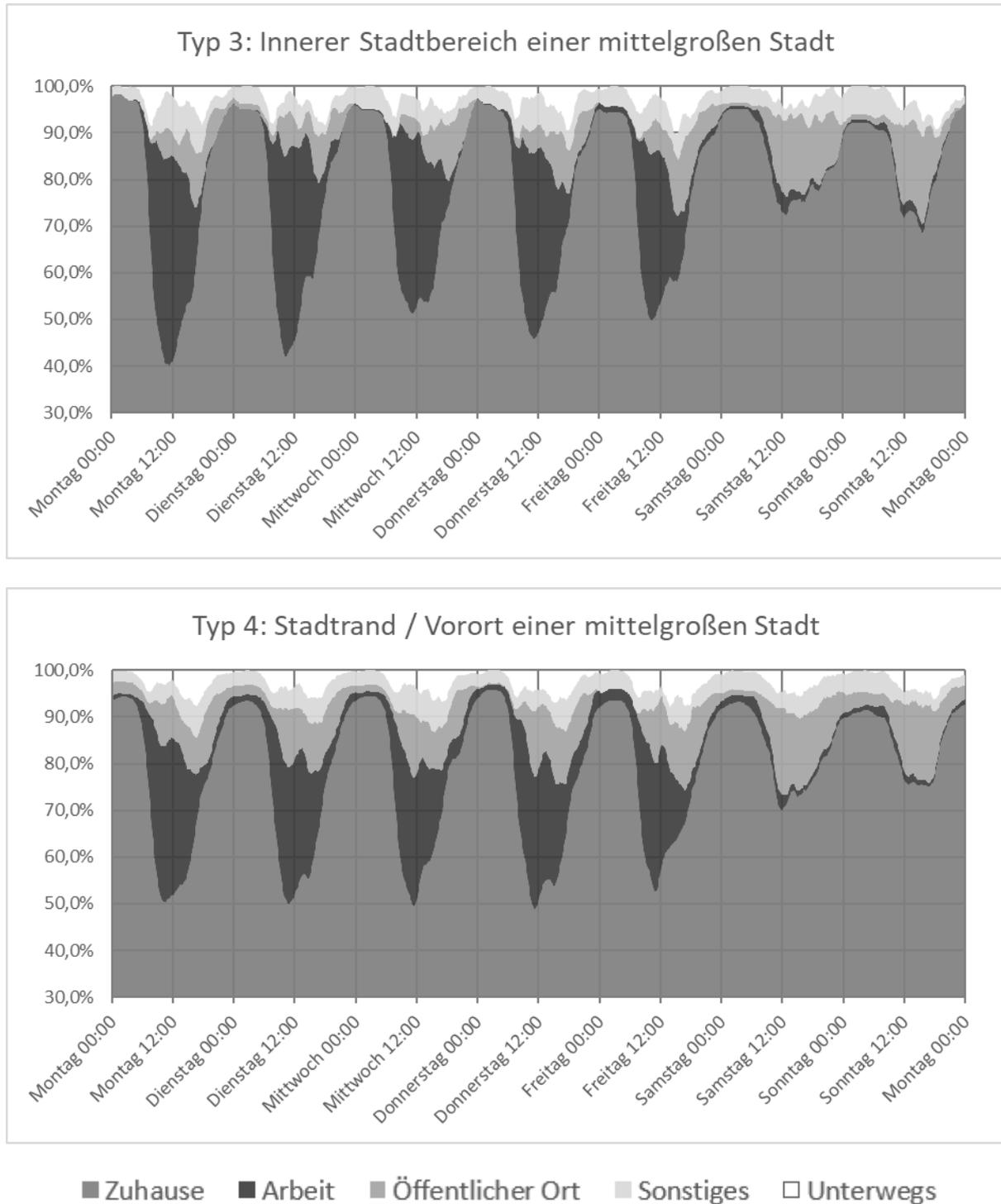
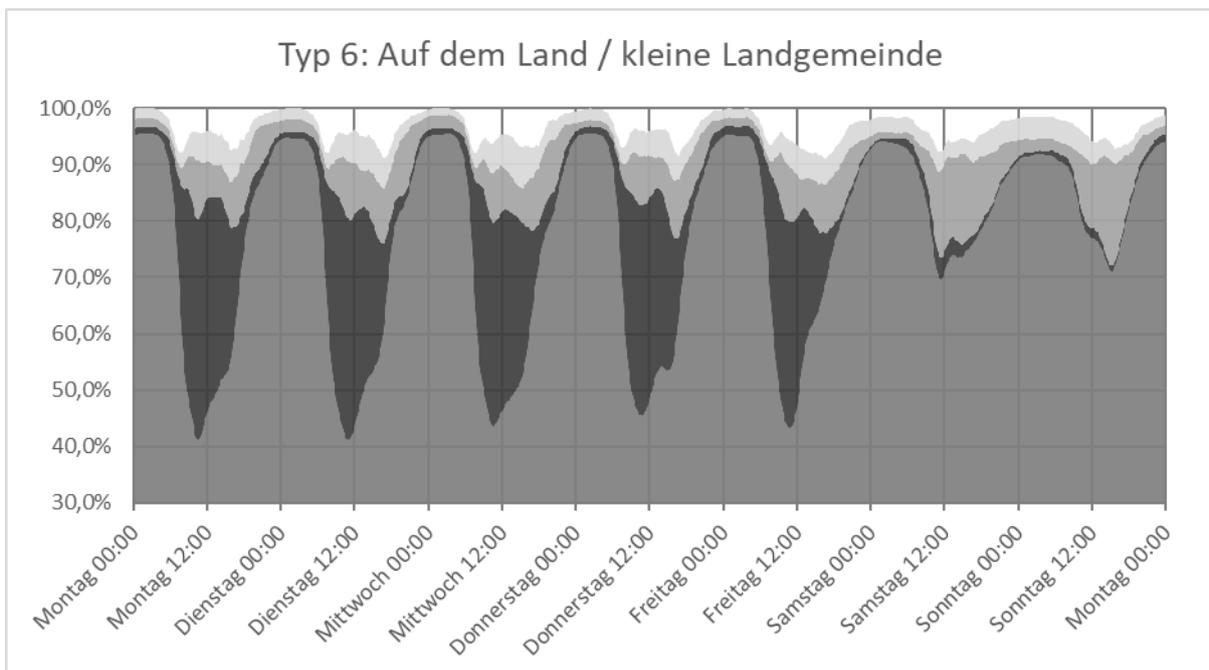
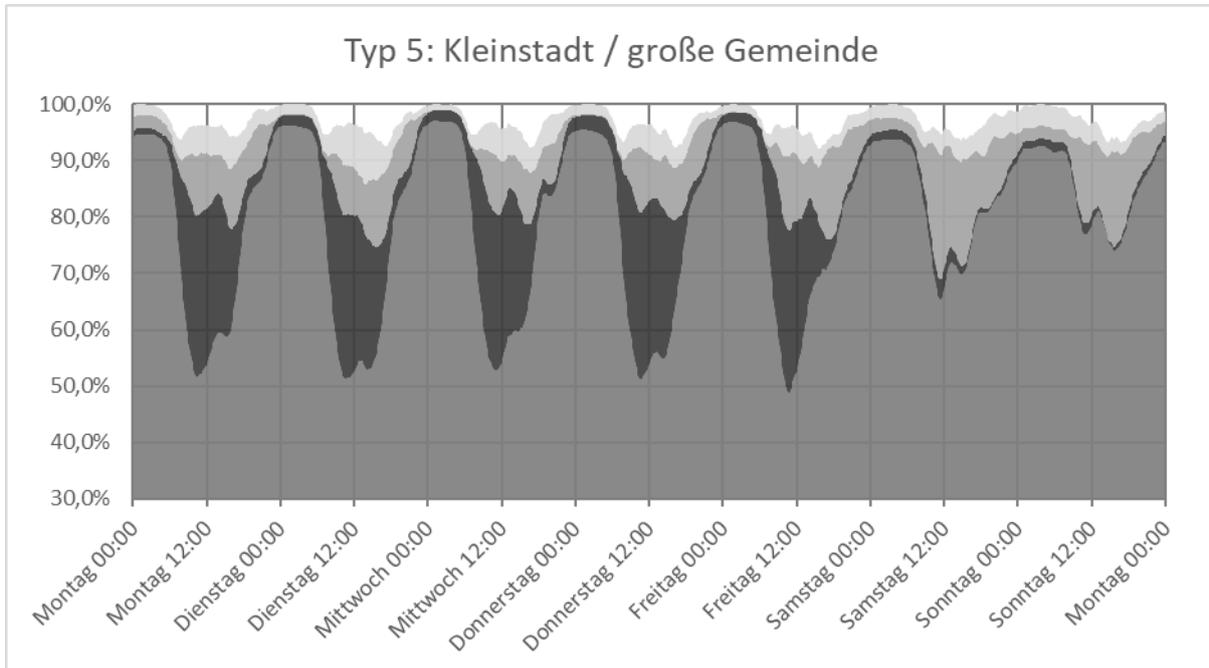


Abbildung 21: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 3 & 4).



■ Zuhause ■ Arbeit ■ Öffentlicher Ort ■ Sonstiges □ Unterwegs

Abbildung 22: Aufenthaltsorte der bewegten Fahrzeuge in der gesamten Woche (Typ 5 & 6).

## Anhang D: Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge

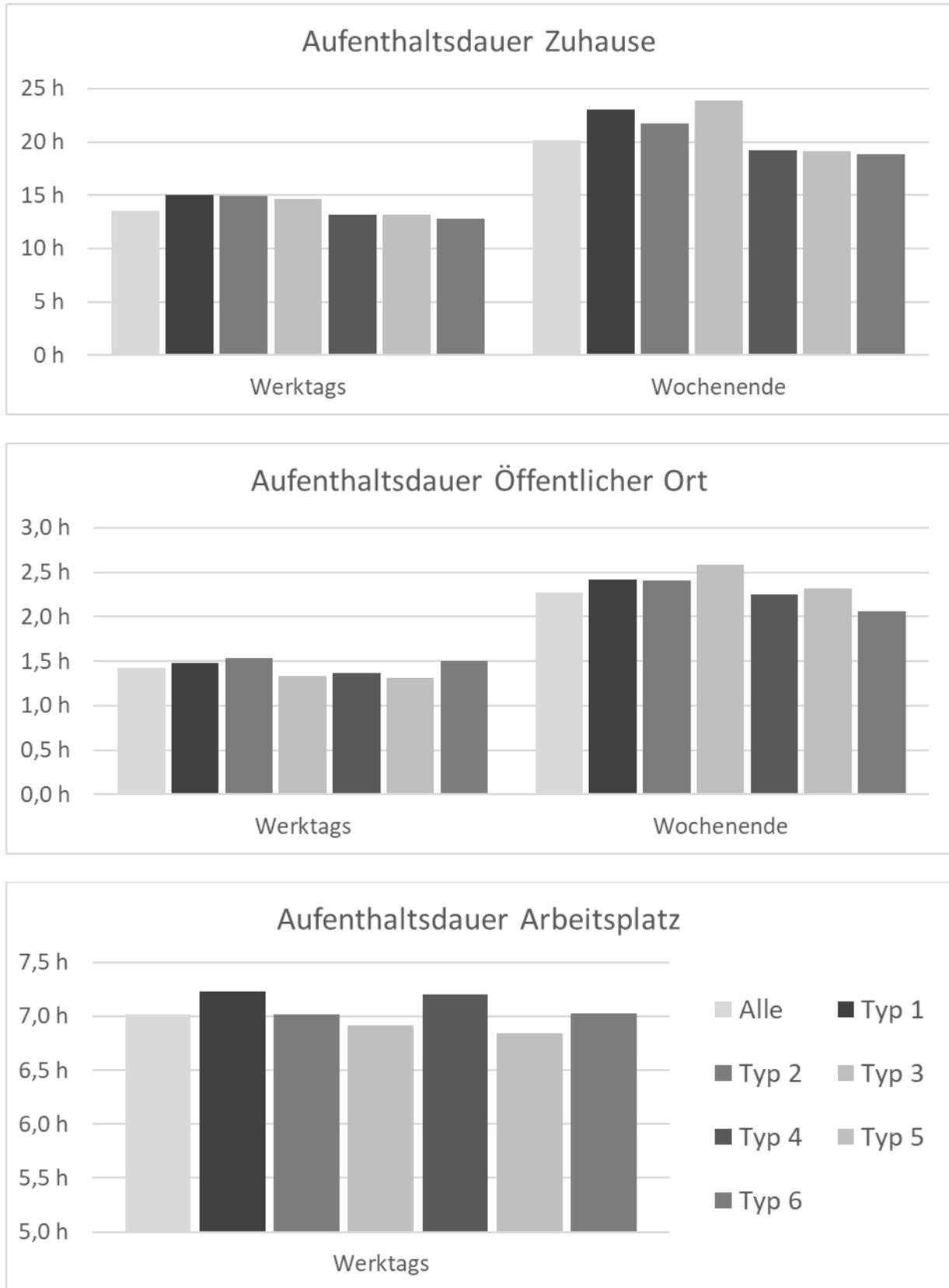


Abbildung 23: Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge nach Aufenthaltsort und Haushaltstyp.

# Anhang E: Standardlastprofile

## Typ 1: Innerer Stadtbereich einer Großstadt

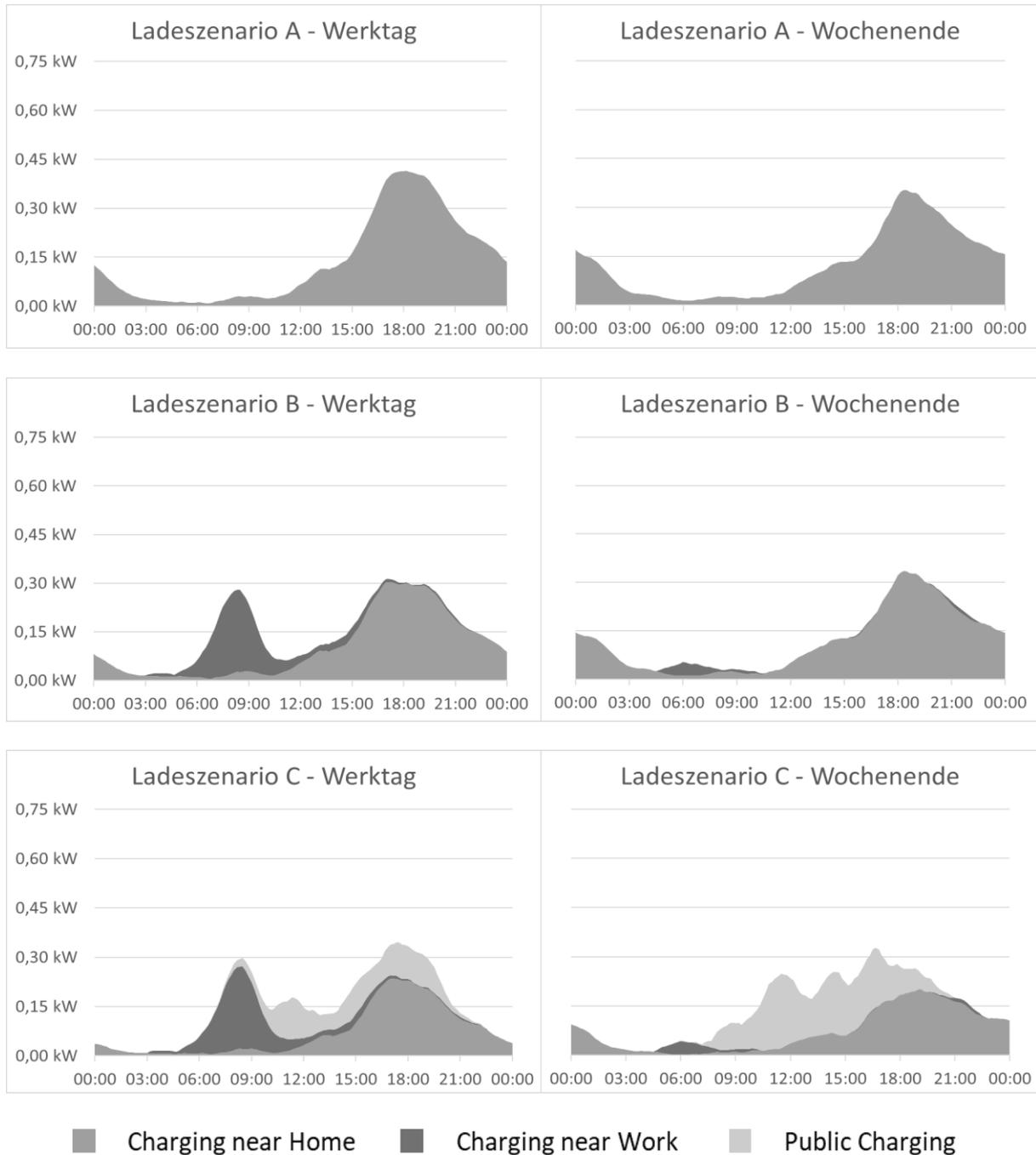


Abbildung 24: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 1).

**Typ 2: Stadtrand / Vorort einer Großstadt**

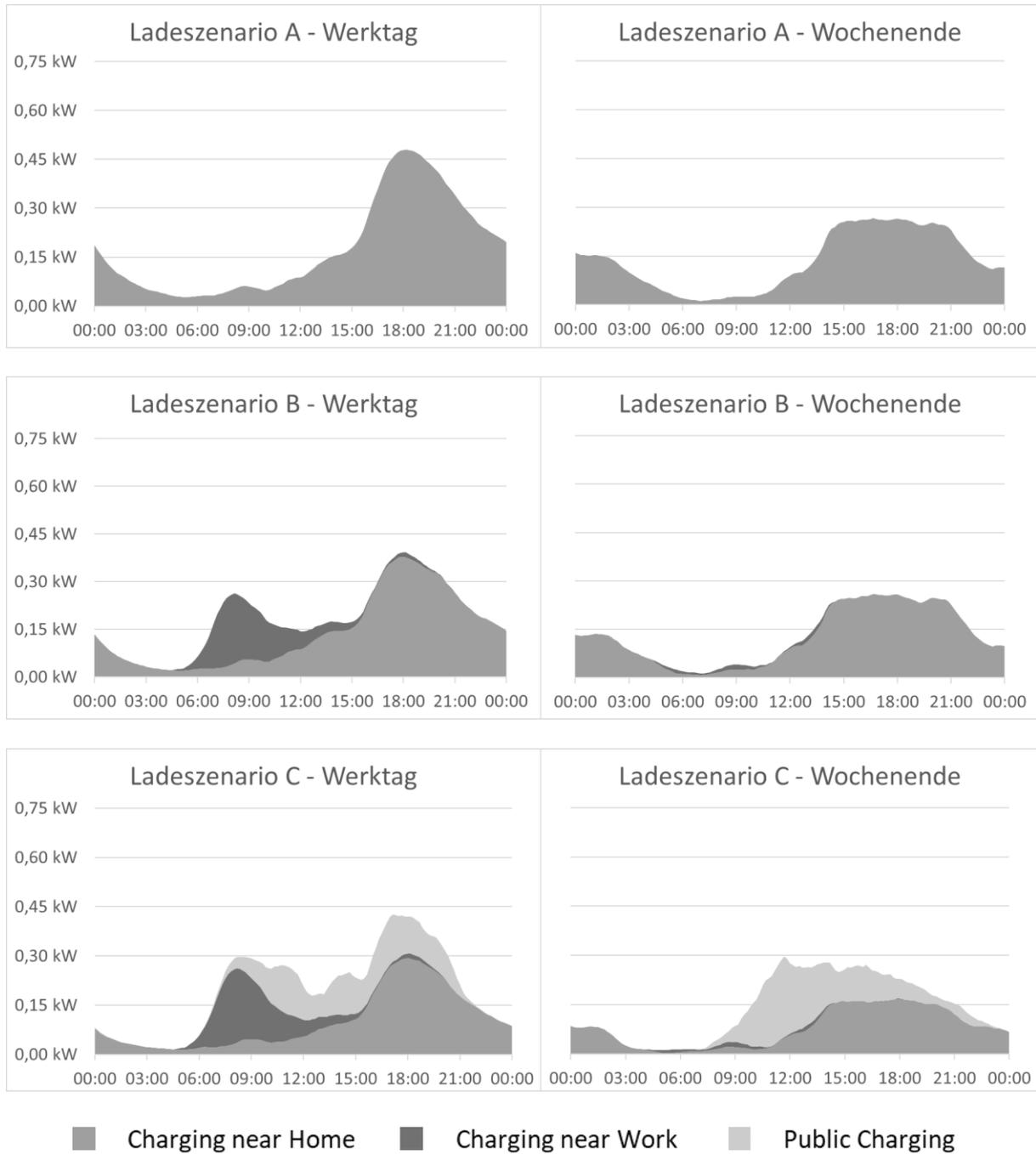


Abbildung 25: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 2).

**Typ 3: Innerer Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt**

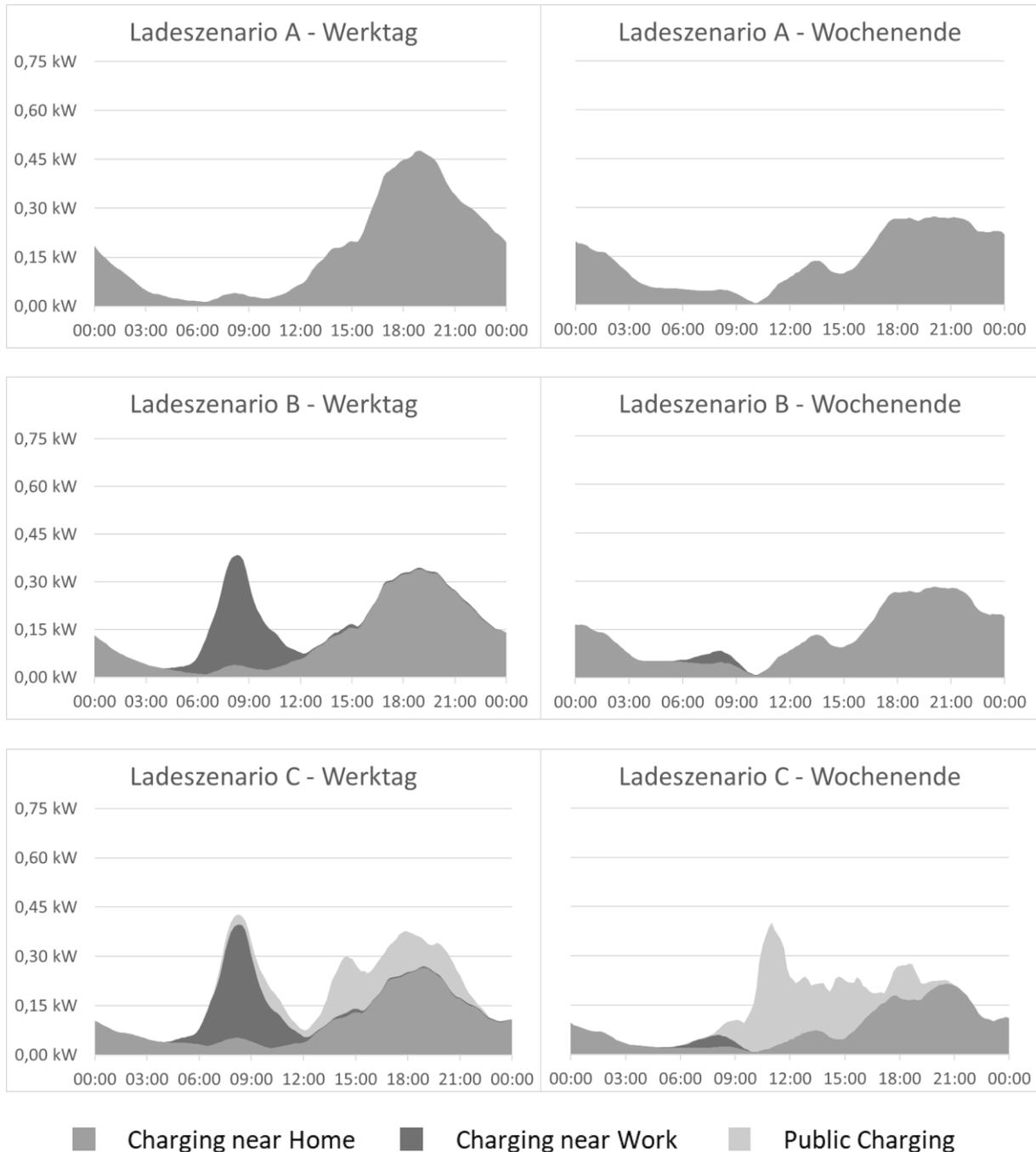


Abbildung 26: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 3).

**Typ 4: Stadtrand / Vorort einer mittelgroßen Stadt**

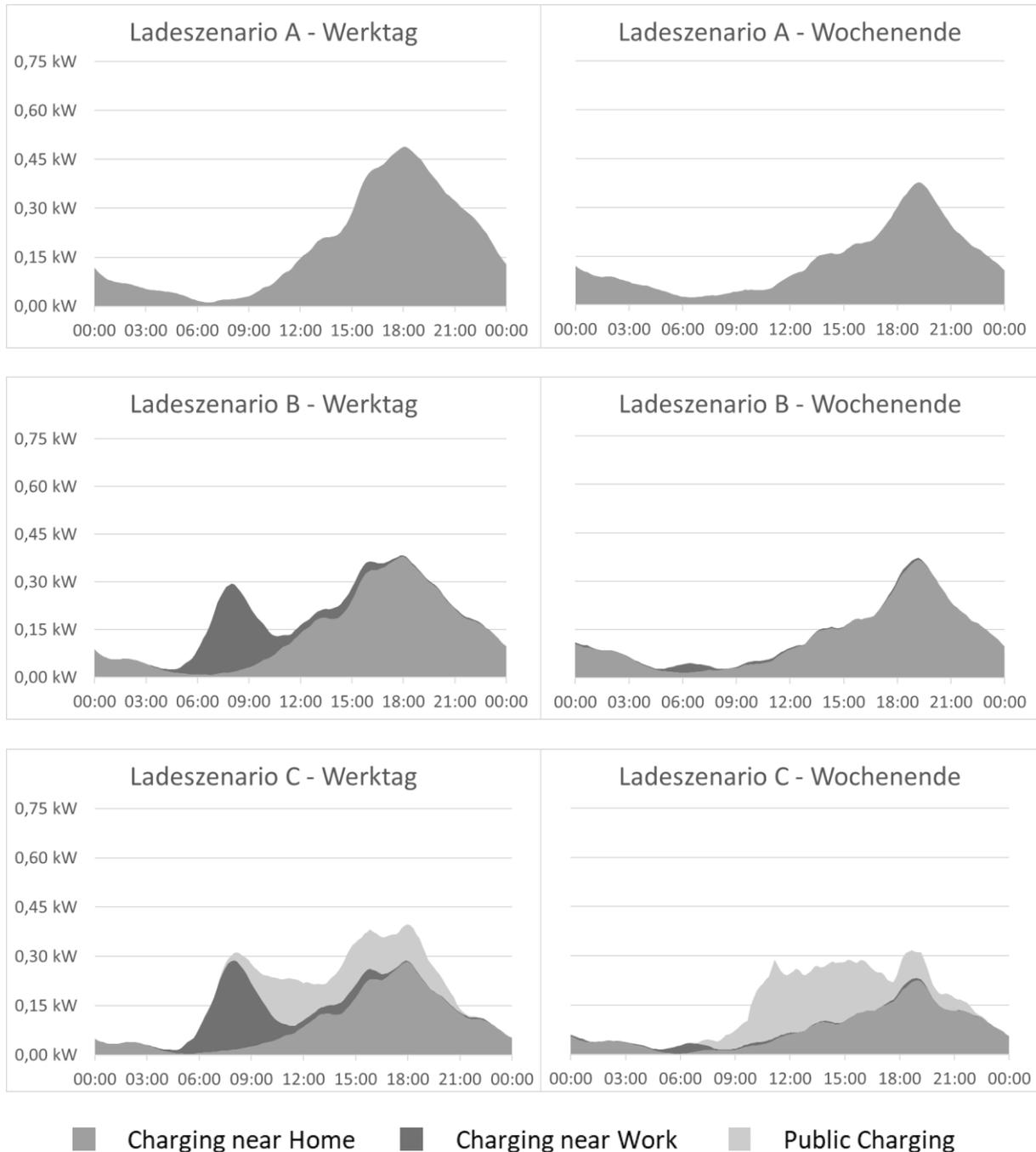


Abbildung 27: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 4).

**Typ 5: Kleinstadt / große Gemeinde**

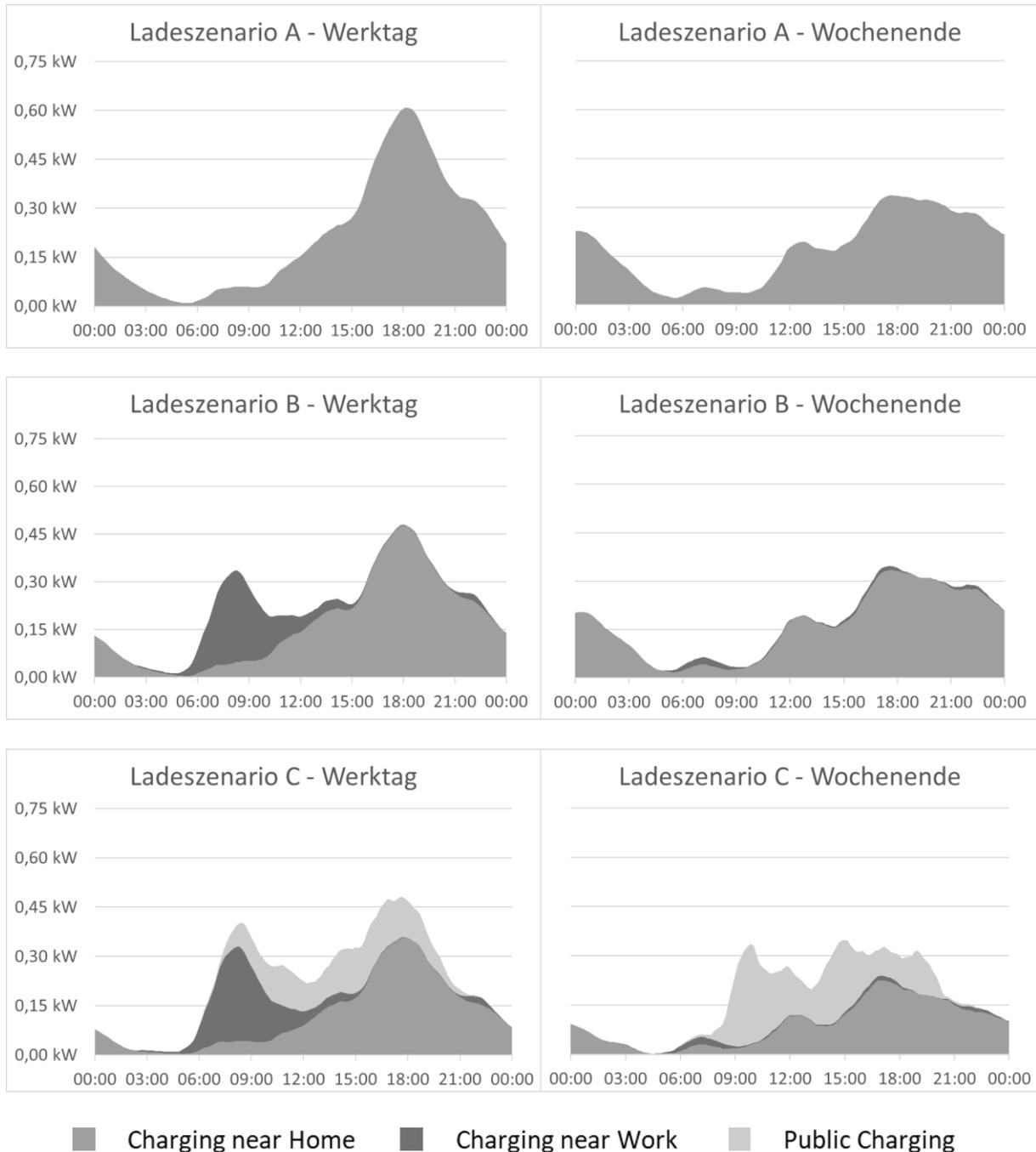


Abbildung 28: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 5).

**Typ 6: Auf dem Land / kleine Landgemeinde**

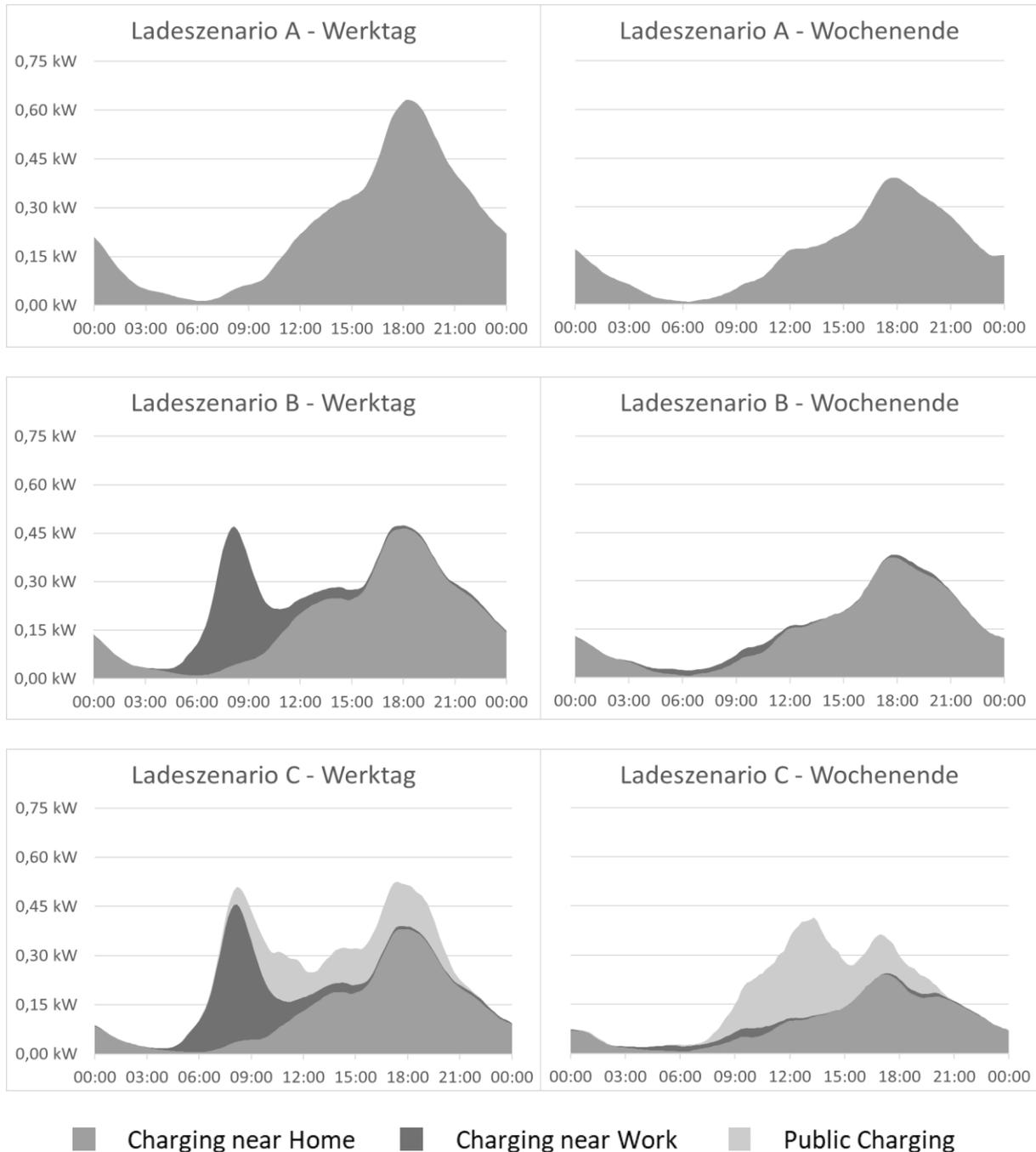


Abbildung 29: Standardlastprofile bei ungesteuertem Laden je Ladeszenario (Typ 6).

# Anhang F: Lastverschiebepotentiale

## Ladeszenario A: Charging near Home

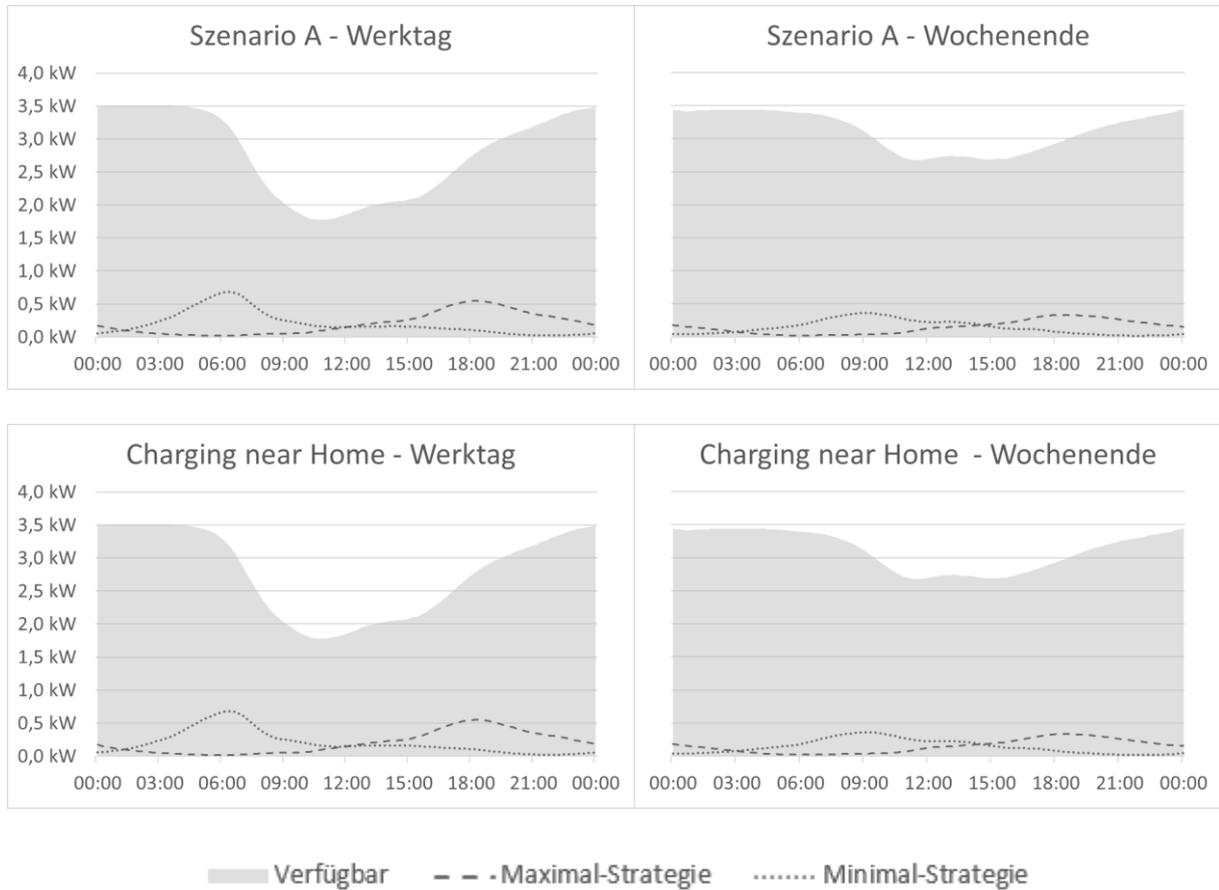


Abbildung 30: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario A).

### Ladeszenario B: Charging near Home & Charging near Work



Abbildung 31: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario B).

**Ladeszenario C: Charging near Home, Charging near Work & Public Charging**

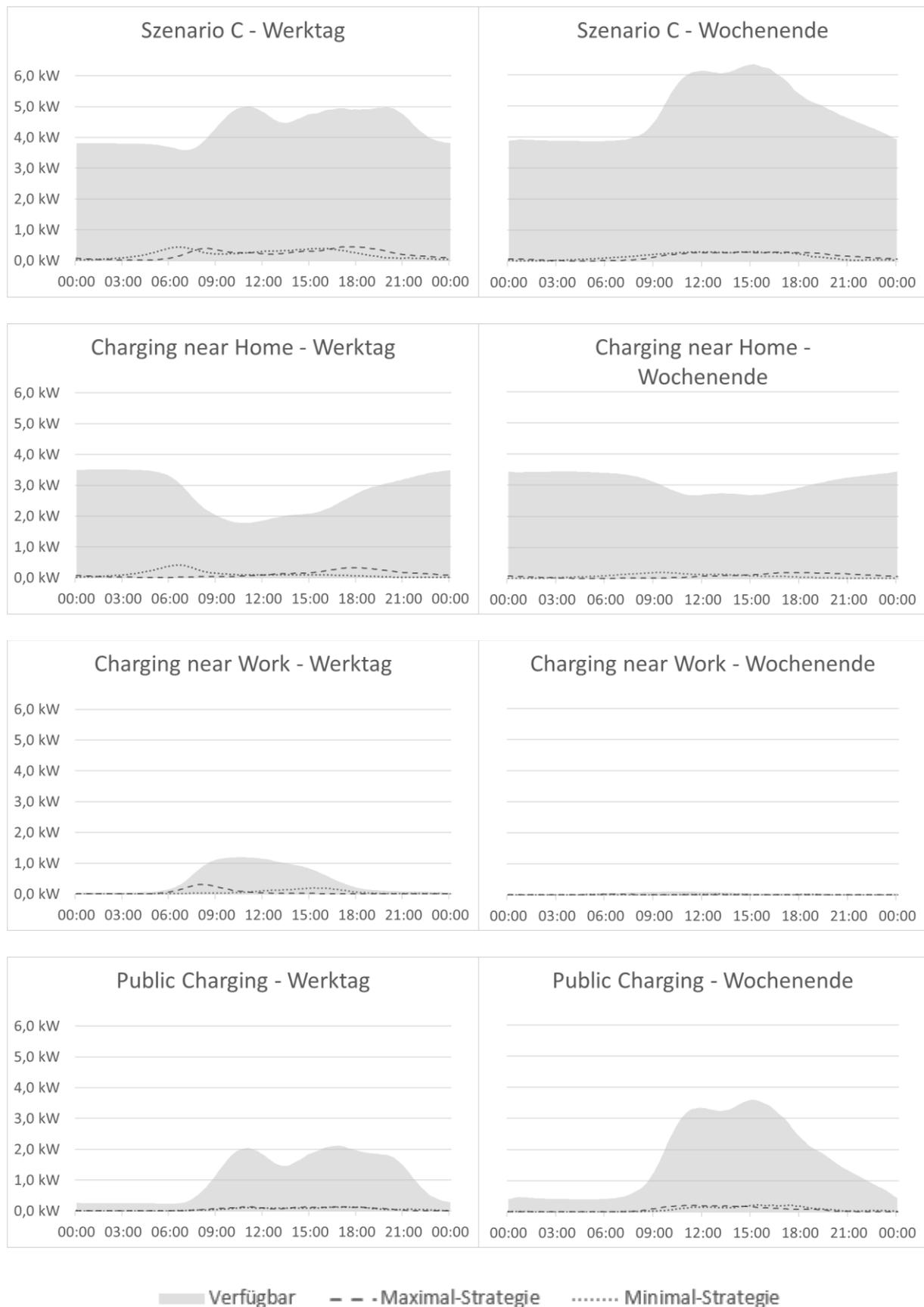


Abbildung 32: Verfügbare und geladene Energie bei Max-/Min-Strategie (Ladeszenario C).

# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Arbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet zu haben.

Ebenso versichere ich, dass diese Arbeit oder Teile daraus weder von mir selbst noch von anderen als Leistungsnachweise andernorts eingereicht wurden. Sämtliche Sekundärliteratur und sonstige Quellen sind nachgewiesen und in der Bibliographie aufgeführt. Das Gleiche gilt für graphische Darstellungen und Bilder sowie für alle Internet-Quellen.

Karlsruhe, den 16. April 2018

.....  
(Daniel Heinz)

# Working Paper Series in Production and Energy

---

## recent issues

- No. 1** Alexandra-Gwyn Paetz, Lisa Landzettel, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:  
Eine netnografische Analyse der Nutzererfahrungen mit E-Rollern
- No. 2** Felix Teufel, Michael Miller, Massimo Genoese, Wolf Fichtner:  
Review of System Dynamics models for electricity market simulations
- No. 3** Patrick Jochem, Thomas Kaschub, Wolf Fichtner:  
How to integrate electric vehicles in the future energy system?
- No. 4** Sven Killinger, Kai Mainzer, Russell McKenna, Niklas Kreifels, Wolf Fichtner:  
A regional simulation and optimization of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives
- No. 5** Kathrin Dudenhöffer, Rahul Arora, Alizée Diverrez, Axel Ensslen, Patrick Jochem, Jasmin Tücking:  
Potentials for Electric Vehicles in France, Germany, and India
- No. 6** Russell McKenna, Carsten Herbes, Wolf Fichtner:  
Energieautarkie: Definitionen, Für- bzw. Gegenargumente, und entstehende Forschungsbedarfe
- No. 7** Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Onshore wind energy in Baden-Württemberg: a bottom-up economic assessment of the socio-technical potential
- No. 8** Axel Ensslen, Alexandra-Gwyn Paetz, Sonja Babrowski, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:  
On the road to an electric mobility mass market - How can early adopters be characterized?
- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt
- No. 10** Hannes Schwarz, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner:  
Two-stage stochastic, large-scale optimization of a decentralized energy system – a residential quarter as case study
- No. 11** Leon Hofmann, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Development of a multi-energy residential service demand model for evaluation of prosumers' effects on current and future residential load profiles for heat and electricity
- No. 12** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:  
Energy autonomy in residential buildings: a techno-economic model-based analysis of the scale effects
- No. 13** Johannes Schäuble, Silvia Balaban, Peter Krasselt, Patrick Jochem, Mahmut Özkan, Friederike Schnellhas-Mende, Wolf Fichtner, Thomas Leibfried, Oliver Raabe:  
Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von Elektrofahrzeugen

---

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

# Working Paper Series in Production and Energy

---

## recent issues

- No. 14** Marian Hayn, Valentin Bertsch, Anne Zander, Stefan Nickel, Wolf Fichtner:  
The impact of electricity tariffs on residential demand side flexibility
- No. 15** Erik Merkel, Robert Kunze, Russel McKenna, Wolf Fichtner:  
Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016 anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden
- No. 16** Russell McKenna, Valentin Bertsch, Kai Mainzer, Wolf Fichtner:  
Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimisation to develop feasible energy concepts in small communities
- No. 17** Tilman Apitzsch, Christian Klöffler, Patrick Jochem, Martin Doppelbauer, Wolf Fichtner:  
Metaheuristics for online drive train efficiency optimization in electric vehicles
- No. 18** Felix Hübner, Georg von Grone, Frank Schultmann:  
Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen
- No. 19** Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann:  
Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen
- No. 20** Juri Lüth, Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Photovoltaik auf Gebäuden: eine GIS-gestützte Ermittlung des Potenzials in Baden-Württemberg
- No. 21** Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann:  
Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt
- No. 22** Felix Hübner, Ulli Schellenbaum, Christian Stürck; Patrick Gerhards, Frank Schultmann:  
Evaluation von Schedulingproblemen für die Projektplanung von Großprojekten am Beispiel des kerntechnischen Rückbaus
- No. 23** Martin Hain, Hans Schermeyer, Marliese Uhrig-Homburg, Wolf Fichtner:  
An Electricity Price Modeling Framework for Renewable-Dominant Markets
- No. 24** Hannes Schwarz, Lars Kotthoff, Holger Hoos, Wolf Fichtner and Valentin Bertsch:  
Using automated algorithm configuration to improve the optimization of decentralized energy systems modeled as large-scale, two-stage stochastic programs
- No. 25** Felix Hübner, Tobias Hünlich, Florian Frost, Rebekka Volk, Frank Schultmann  
Analyse des internationalen Marktes für den Rückbau kerntechnischer Anlagen: Stand und Ausblick

---

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

# Working Paper Series in Production and Energy

---

## recent issues

- No. 26** Jann Weinand, Russell McKenna, Wolf Fichtner  
Developing a municipality typology for modelling decentralised energy systems
- Nr. 27** Andreas Bublitz, Dogan Keles, Florian Zimmermann, Christoph Fraunholz, Wolf Fichtner  
A survey on electricity market design: Insights from theory and real-world implementations of capacity remuneration mechanisms
- Nr. 28** Felix Hübner, Sven Möller, Frank Schultmann  
Entwicklung eines Expertensystems für die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte
- Nr. 29** Alexander Harbrecht, Russell McKenna, David Fischer, Wolf Fichtner  
Behavior-oriented Modeling of Electric Vehicle Load Profiles: A Stochastic Simulation Model Considering Different Household Characteristics, Charging Decisions and Locations

---

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

**Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16  
D-76187 Karlsruhe

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy  
**No. 30**, Oktober 2018

ISSN 2196-7296

---

[www.iip.kit.edu](http://www.iip.kit.edu)

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)