

Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im Jahr 2050 in Deutschland

Judith Auer

No. 34 | FEBRUAR 2019

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im Jahr 2050 in Deutschland

Judith Auer

email: judith-auer@web.de

Im Rahmen dieser Arbeit soll der mit dem Markthochlauf von Elektrofahrzeugen einhergehende Aufbau von Ladeinfrastruktur unter quantitativen und finanziellen Aspekten untersucht werden. Ziel ist es, die notwendige Anzahl an Ladepunkten und die Höhe der Gesamtinvestitionen für Ladeinfrastruktur bei einer Quote von 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland zu simulieren. In diesem Zuge werden das Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung analysiert und mögliche Standorte für Ladesäulen auf ihre Funktionalitätsanforderungen geprüft. Mithilfe spezifischer Annahmen für ein Best- und ein Worst-Case-Szenario kann auf Basis dessen eine Simulation der Ladeinfrastruktur entwickelt werden.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass mit einem quantitativen Bedarf für rund 40 Millionen Ladepunkte und einem Investitionsvolumen von 80 bis 110 Milliarden Euro gerechnet werden kann. Abschließend wird die Simulation evaluiert und die Plausibilität der Ergebnisse geprüft.

Karlsruhe, 31. Juli 2018

Bachelorarbeit

LADEINFRASTRUKTUR FÜR ELEKTROMOBILITÄT IM JAHR 2050 IN DEUTSCHLAND

cand. wi. -ing. Judith Auer

Matrikelnummer: 1802835

Am Elektrotechnischen Institut (ETI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Lehrstuhl Hybridelektrische Fahrzeuge

Prüfer und Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

PD Dr. rer. pol. Patrick Jochem

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) an der Fakultät für
Wirtschaftswissenschaften

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung bedachtet habe.

Judith Auer

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit soll der mit dem Markthochlauf von Elektrofahrzeugen einhergehende Aufbau von Ladeinfrastruktur unter quantitativen und finanziellen Aspekten untersucht werden. Ziel ist es, die notwendige Anzahl an Ladepunkten und die Höhe der Gesamtinvestitionen für Ladeinfrastruktur bei einer Quote von 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland zu simulieren. In diesem Zuge werden das Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung analysiert und mögliche Standorte für Ladesäulen auf ihre Funktionalitätsanforderungen geprüft. Mithilfe spezifischer Annahmen für ein Best- und ein Worst-Case-Szenario kann auf Basis dessen eine Simulation der Ladeinfrastruktur entwickelt werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass mit einem quantitativen Bedarf für rund 40 Millionen Ladepunkte und einem Investitionsvolumen von 80 bis 110 Milliarden Euro gerechnet werden kann. Abschließend wird die Simulation evaluiert und die Plausibilität der Ergebnisse geprüft.

Abstract

The market launch of battery electric vehicles is accompanied by building charging infrastructure which will be investigated under quantitative and financial aspects within this thesis. Given the underlying assumption of a coverage of 100% of electric vehicles in the private transport sector in Germany in 2050, the aim of this thesis is to simulate the necessary number of charging points and the total amount of investments needed. Therefore, the mobility behavior of the German population is analyzed, and possible localizations of charging stations are examined based on their functionality. After developing a simulation by means of assumptions for a best and a worst case scenario, a quantitative need of 40 million charging points and an overall investment of 100 billion euros is calculated. Finally, the implemented simulation is evaluated and the results are reviewed regarding plausibility.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	viii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation.....	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehen	2
2. Vorgehensweise zur Erstellung einer Simulation für Ladeinfrastruktur bei 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland	3
2.1. Daten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP).....	4
2.2. Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge.....	5
2.3. Daten zur Ladeinfrastruktur im <i>Fernverkehrsraum</i>	7
3. Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw	8
3.1. Nutzung privater Pkw	8
3.1.1. Verkehrsleistung	9
3.1.2. Wegezwecke	10
3.2. Park- und Wohnsituation	10
3.2.1. Parksituation	11
3.2.2. Wohnsituation.....	11
4. Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur.....	13
4.1. Standortübergreifende Anforderungen an den Ladevorgang.....	14
4.1.1. Steckertypen für induktives Laden	14
4.1.2. Wechselstrom- und Gleichstromladen.....	15
4.1.3. Anschlussleistung, effektive Ladeleistung und Gesamtladewirkungsgrad	16
4.1.4. Analyse der Investitionen	17
4.1.5. Energiemanagement	19
4.1.6. Abrechnungssystem.....	19
4.2. Privater Bereich: <i>Privater Parkraum</i>	19
4.2.1. Ladeverfahren.....	19
4.2.2. Funktionalitäten der Ladesäulen.....	20
4.2.3. Investitionen	21
4.3. Privater Bereich: <i>Geteilter Parkraum</i>	22
4.3.1. Ladeverfahren.....	23
4.3.2. Funktionalitäten der Ladesäulen.....	23
4.3.3. Investitionen	24
4.4. Halb-öffentlicher Bereich: <i>Arbeitgeber</i>	26

4.4.1.	Ladeverfahren	27
4.4.2.	Funktionalitäten der Ladesäulen.....	27
4.4.3.	Investitionen	28
4.5.	Halb-öffentlicher Bereich: <i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>	29
4.5.1.	Ladeverfahren	29
4.5.2.	Funktionalitäten der Ladesäulen.....	30
4.5.3.	Investitionen	31
4.6.	Öffentlicher Bereich: <i>Nahverkehrsraum</i>	32
4.6.1.	Ladeverfahren	32
4.6.2.	Funktionalitäten der Ladesäulen.....	33
4.6.3.	Investitionen	33
4.7.	Öffentlicher Bereich: <i>Fernverkehrsraum</i>	33
4.7.1.	Ladeverfahren	33
4.7.2.	Funktionalitäten der Ladesäulen.....	34
4.7.3.	Investitionen	34
5.	Simulation der Ladeinfrastruktur bei 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland	35
5.1.	Grundlegende Annahmen für relevante Einflussfaktoren auf den Personenverkehr.....	36
5.1.1.	Mobilitätsverhalten der Nutzer	36
5.1.2.	Technische Entwicklungen.....	38
5.1.3.	Ökonomische und politische Entwicklungen	42
5.2.	Analyse und Auswertung der Mobilitätsdaten.....	46
5.2.1.	Anpassung der Datenaufbereitung im MATLAB Programm.....	47
5.2.2.	Modifizierung der Ladeprofile im MATLAB Programm	50
5.2.3.	Auswertung der Ladeprofile im MATLAB Programm.....	55
5.2.4.	Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur auf Basis der MOP-Daten in Microsoft Excel.....	58
5.2.5.	Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur im <i>Fernverkehrsraum</i> in Microsoft Excel	58
5.2.6.	Berechnung der Ausnutzung der Ladeinfrastruktur und Kalkulation der Investitionshöhen in Microsoft Excel.....	60
5.2.7.	Abschätzung der Nutzungsgebühren für den einzelnen Nutzer in Microsoft Excel	60
6.	Ergebnisse	62
6.1.	Quantitativer Bedarf für Ladeinfrastruktur	62
6.2.	Investitionshöhe	63

6.3. Nutzungsgebühren	63
7. Evaluation	64
7.1. Datengrundlage	64
7.2. Kritische Betrachtung getroffener Annahmen	65
7.3. Plausibilität der Ergebnisse	67
7.4. Mögliche Weiterentwicklungen der Simulation	69
8. Zusammenfassung	71
A Anhang	72
B Abbildungsverzeichnis	77
C Tabellenverzeichnis	78
D Literaturverzeichnis	79

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current, <i>engl. für Wechselstrom</i>
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BEV	Battery Electric Vehicle, <i>engl. für batterieelektrisches Fahrzeug</i>
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCS	Combined Charging System
DC	Direct Current, <i>engl. für Gleichstrom</i>
IFV	Institut für Verkehrswesen
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
IOR	Institut für Operations Research
KIT	Karlsruher Instituts für Technologie
LSV	Ladesäulenverordnung
MiD	Mobilität in Deutschland
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle, <i>engl. für Plug-In-Hybridfahrzeug</i>
RFID	Radio Frequency Identification, <i>engl. für „Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen“</i>
SOC	State Of Charge, <i>engl. für Ladezustand</i>
V2G	Vehicle-to-Grid, <i>engl. für „Fahrzeug-zum-Netz“</i>

1. Einleitung

Die Umsetzung der Energiewende in Deutschland ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts (Kemfert und Canzler, 2016). Das Erreichen der Klimaziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 erfordert eine grundlegende Neugestaltung des Transportsektors, wofür die Unabhängigkeit des Verkehrssystems von fossilen Energieträgern eine wesentliche Rolle spielt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2016). Elektrofahrzeuge sind nicht nur frei von Abgasemissionen, sondern fördern zudem die Integration Erneuerbarer Energien (Pehnt et al., 2012). Somit kann Elektromobilität einen großen Beitrag zur Energiewende leisten und die nachhaltige Bereitstellung und Nutzung von Energie fördern. Voraussetzung für die erfolgreiche Etablierung von Elektrofahrzeugen ist jedoch eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur (Kampker et al., 2013). Dieser Sachverhalt bildet die Grundlage für die Motivation der vorliegenden Arbeit.

1.1. Motivation

Die Bundesregierung setzt im Klimaschutzplan die Ziele aus dem Übereinkommen der Weltklimakonferenz von Paris um und sieht bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 80% gegenüber dem Jahr 1990 vor (BMUB, 2016). Der Straßenverkehrssektor macht etwa ein Fünftel der CO₂-Emissionen Deutschlands aus und ist zu mehr als 90% von fossilen Kraftstoffen abhängig (Helms et al., 2014). Angesichts der Tatsache, dass der Antrieb herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor außerdem auf schwindenden Ressourcen basiert, ist ein tiefgreifender Wandel des Transportsystems in Richtung nachhaltiger Mobilität notwendig (Proff et al., 2012). Alternative Antriebstechnologien, also Batterie-, Plug-In-Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge, bieten hier großes Potential. Insbesondere batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) fahren bei einem CO₂-neutralen Strommix gänzlich emissionsfrei und sind daher für die Umsetzung der Klimaziele besonders interessant (Michaelis et al., 2012). Außerdem fördern BEVs durch ihre Unabhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe die Versorgungssicherheit Europas (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2017).

Um die flächendeckende Nutzung von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen, ist der Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur notwendig (Tomforde et al., 2014). Aktuell wird dieser von der Bundesregierung unterstützt (BMVI, 2017). Allerdings gibt es auch Stimmen in der Politik, die bezweifeln, dass bei einer Zunahme der Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen ausreichend Ladekapazitäten zur Verfügung stehen werden (Viehmann, 2017). Darüber hinaus steht der Aufbau von Ladeinfrastruktur in Zusammenhang mit hohen Investitions- und Betriebskosten, die aufgrund zugleich niedriger Strompreise eine lange Amortisationszeit ergeben und somit eine deutschlandweite Installation ausbremsen könnten (Hoerstebroek und Hahn, 2012). Um zur Beurteilung der Situation einen Zuwachs an faktenbasiertem Wissen zu erhalten, soll die vorliegende Problematik untersucht und anhand plausibler Grundannahmen berechnet werden.

1.2. Zielsetzung und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist, den quantitativen Bedarf der Ladeinfrastruktur bei einem hundertprozentigen Marktanteil von Elektrofahrzeugen und die Höhe der damit verbundenen Investitionen zu simulieren. Dabei wird das Jahr 2050 als Zeithorizont gewählt und alle privaten Personenkraftwagen in Deutschland betrachtet. Zunächst wird das heutige Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw analysiert. Im Anschluss daran werden insgesamt sechs Bereiche für die Standorte potentieller Lademöglichkeiten im privaten, halböffentlichen oder öffentlichen Raum identifiziert. Für diese Bereiche werden Anforderungen an die Ladeinfrastruktur spezifiziert und die Höhe der Investitionen pro Ladepunkt abgeschätzt. Auf dieser Basis und unter Berücksichtigung vorher getroffener Annahmen kann schlussendlich für zwei erarbeitete Entwicklungsszenarien die Anzahl der notwendigen Ladepunkte sowie die Höhe der Investitionen für die Infrastruktur im Jahr 2050 simuliert werden. In diesem Zuge prognostiziert die vorliegende Arbeit die dabei zu erwartenden Gebühren für die Nutzung der Ladepunkte.

Insgesamt lässt sich folgende Forschungsfrage formulieren: Wie viele Ladepunkte werden für eine Quote von 100% batterieelektrischen, privaten Pkw im Jahr 2050 in Deutschland benötigt, wie hoch sind die Investitionen für diese Ladeinfrastruktur und wie wird sie refinanziert?

2. Vorgehensweise zur Erstellung einer Simulation für Ladeinfrastruktur bei 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland

Anfang 2018 gab es in Deutschland rund 46,5 Millionen gemeldete Personenkraftwagen, wovon mit etwa 41,5 Millionen Fahrzeugen der größte Anteil (89,3%) in privater Hand lag (Kraftfahrt-Bundesamt, 2018)¹. Diese Arbeit beruht auf der Annahme, dass bis 2050 alle privaten Pkw batterieelektrisch betrieben sein werden. Dafür ist der Aufbau einer entsprechenden Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge notwendig, deren quantitativer und finanzieller Umfang in dieser Arbeit bestimmt werden soll. Zu den grundlegenden Annahmen zur Berechnung dieser Ladeinfrastruktur gehören außer der Festlegung des Marktanteils von Elektrofahrzeugen auf 100% im privaten Verkehr die geografische Eingrenzung auf Deutschland und das Festlegen des Zeithorizonts auf das Jahr 2050. Außerdem wird in dieser Arbeit vereinfachend davon ausgegangen, dass die gesamte, notwendige Ladeinfrastruktur zum Anfang des Jahres 2050 installiert wird. Der Status Quo des Aufbaus von Lademöglichkeiten und die Entwicklungen bis zum Jahr 2050 werden nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird zur Kalkulation der Höhe der Investitionen vom heutigen Geldwert ausgegangen.

In Kapitel 2 werden die konzeptionellen Grundlagen erörtert, die zur Berechnung der Anzahl der Ladepunkte im Jahr 2050 in Deutschland sowie zur Kalkulation der damit verbundenen Investitionshöhe erforderlich sind. Im Folgenden werden die in der Arbeit hauptsächlich genutzten Daten und die zur Analyse dieser eingesetzten Programme vorgestellt.

Für die Untersuchung des Mobilitätsverhaltens der deutschen Bevölkerung eignen sich zwei verschiedene Erhebungen. Hierunter fällt zum Einen die repräsentative Studie „Mobilität in Deutschland (MiD)“, welche den alltäglichen Verkehr sowie grundlegende Daten zur Haushaltssituation der Befragten erfasst (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt et al., 2010). Die gleiche Intention

¹ Mithilfe der Daten des Deutschen Mobilitätspanels werden 41.747.231 Fahrzeuge (Jahrgang 2015/2016) berechnet. Diese Zahl gilt im Folgenden als Gesamtanzahl der privaten Pkw nach heutigem Stand.

hat das „Deutsche Mobilitätspanel (MOP)“, welche die zweite nationale Erhebung in diesem Bereich darstellt (Weiss et al., 2014). Da am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bereits ein in der Programmierumgebung MATLAB erstelltes Programm zur Verarbeitung der MOP-Daten vorliegt, basiert diese Arbeit auf den Erhebungen des Deutschen Mobilitätspanels. Dieses wird in Kapitel 2.1 vorgestellt. Zur Untersuchung der notwendigen Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im Jahr 2050 wird das genannte Programm entsprechend der Forschungsfrage angepasst und weiterentwickelt (Kapitel 2.2). Die daraus generierten Resultate werden anschließend mithilfe von Microsoft Excel ausgewertet. Da die Mobilitätshebungen des MOP keine Simulation von Schnellladesäulen im Fernverkehr ermöglichen, werden in diesem Bereich zusätzliche Daten hinzugezogen (siehe Kapitel 2.3).

2.1. Daten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP)

In dieser jährlich durchgeführten Studie des Instituts für Verkehrswesen (IFV) des KIT werden von für Deutschland repräsentativen Haushalten Daten zu allen Wegen der Haushaltsmitglieder, sowie Informationen zu den Haushalten und den Befragten gesammelt (Weiss et al., 2014). Die für die Simulation von Ladeinfrastruktur zentralen Ergebnisse der Erhebung liegen in Form eines Haushalts- und eines Wegedatensatzes in einer Datenbank des IIP vor (Heinz, 2018).

Der Haushaltsdatensatz enthält für jeden Haushalt neben der haushaltsspezifischen ID und einem Gewichtungsfaktor für die Hochrechnung der Stichprobe auf Deutschland u.a. Informationen zu Personenanzahl, Lage, Anzahl der im Haushalt verfügbaren Pkw sowie über den Eigentümer und üblichen Abstellort jedes Fahrzeugs. Der Wegedatensatz gibt Aufschluss über Abfahrts- und Ankunftszeit, den Zweck, die Entfernung und das hauptsächlich genutzte Verkehrsmittel für jeden erfassten Weg und ordnet die Wege eindeutigen Haushalten und Personen im Haushalt zu.

2.2. Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland“ von Daniel Heinz am IIP wurden die Daten des Deutschen Mobilitätspanels bereits aufbereitet und ein Algorithmus zur Erstellung von Standardlastprofilen und zur Identifizierung von Lastverschiebepotentialen bei Elektrofahrzeugen auf Basis der Mobilitätsdaten implementiert. Heinz' (2018) primäres Ziel war die Entwicklung von Mobilitäts- und Ladeprofilen für Elektrofahrzeuge in Deutschland in der Programmierumgebung MATLAB.

Das von Heinz entworfene MATLAB Programm besteht aus einem `Main` Modul und sechs weiteren Modulen, über die die folgende Abbildung eine Übersicht bietet. Das Modul `Main` beinhaltet die Funktionsaufrufe zu den weiteren Modulen und bietet außerdem die Möglichkeit zur Anpassung grundlegender Einstellungen (Heinz, 2018). Nachfolgend werden die für diese Arbeit wichtigsten Module vorgestellt.

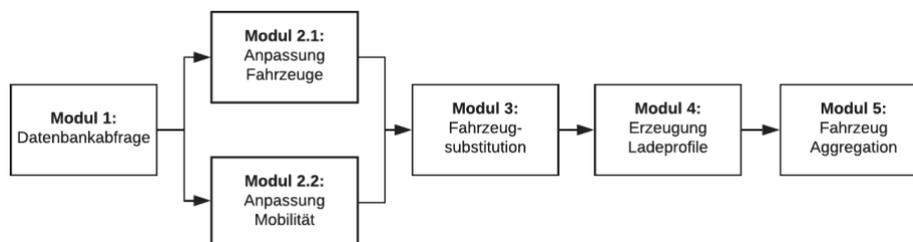


Abbildung 1: Flow Chart des MATLAB Programms zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge von Heinz (Darstellung nach Heinz (2018))

Fahrzeugs substitution

Heinz (2018) wandelt im Modul `mod_3_Fzgs substitution` die Fahrzeuge aus der Erhebung zunächst in äquivalente Elektrofahrzeuge anhand aktueller Modelle (Stand Februar 2018) um und listet diese zusammen mit relevanten Informationen des zugehörigen Haushalts (siehe Kapitel 2.2) in der Tabelle `tblFzg` auf. Hierbei nutzt er die in einer weiteren Datenbank des IIP vorliegenden Fahrzeugmodelle, welche im Rahmen einer Marktanalyse der in

Serie gefertigten und käuflich erwerbbaeren Elektrofahrzeuge zusammengetragen wurden (Heinz, 2018). Dabei sind insbesondere die durch den Fahrzeughersteller angegebene Batteriekapazität sowie der elektrische Verbrauch interessant.

An dieser Stelle wird noch nicht berücksichtigt, ob eine Modellierung des ursprünglichen Fahrzeugs als BEV ohne Anpassungen im Mobilitätsverhalten des Nutzers überhaupt möglich ist, oder ob der elektrische Verbrauch beispielsweise auf Langstreckenfahrten die Kapazität der Batterie übersteigen würde. Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht über die Elektrofahrzeugmodelle in der Datenbank des IIP.

Tabelle 1: Elektrofahrzeugmodelle in der Datenbank des IIP

Segment_ID	Segment	Batteriekapazität kWh	Verbrauch kWh/100km	Reichweite km	AVG_max_Leistung kW
1	'Mini'	18,15	12,3	147,5609756	60
2	'Kleinwagen'	28,6	12,6333333	226,3852243	84,333333
3	'Kompaktklasse'	40,95	14,525	281,9277108	112
4	'Mittelklasse'	50	14,1	354,6099291	192
5	'Obere Mittelklasse'	75	18,6	403,2258065	315
6	'Oberklasse'	100	18,9	529,1005291	315
7	'Geländewagen'	75	20,8	360,5769231	245
8	'Sportwagen'	100	20	500	515
9	'Mini-Van'	29	15,45	187,7022654	106,7
10	'Großraum-Van'	24	16,5	145,4545455	80
11	'Utility'	22	20,75	106,0240964	55
12	'Wohnmobil'	24	16,5	145,4545455	80
13	'SUV'	82,5	21	392,8571429	269,5

Berechnung der Ladeprofile

Für die Erstellung der Ladeprofile gibt es zunächst im Modul `Main` des Programms die Möglichkeit, in Abhängigkeit des Standortes eines Fahrzeugs, welcher sich aus dem Zweck der zuvor zurückgelegten Fahrt ergibt, anzugeben, ob ein Ladevorgang vor Ort möglich ist und welche spezifische Ladeleistung am jeweiligen Standort vorliegt. Auf Basis dieser Angaben kann im Modul `mod4_Ladeprofile` jedem Weg des Wegedatensatzes die vorhandene Ladeleistung am Zielort zugeordnet werden, wobei vorausgesetzt wird, dass entsprechende Lademöglichkeiten gegeben sind. Danach ist die Erstellung von Mobilitätsprofilen für die mit einem Pkw zurückgelegten Wege möglich. Dafür wird unter Angabe einer zeitlichen Intervallgröße für jedes Fahrzeug der Erhebung eine Tabelle `profileBEV` erstellt, welche das Mobilitätsprotokoll des Fahrzeugs

für eine durchschnittliche Woche enthält. Dieses beinhaltet für jedes Zeitintervall der Woche u.a. den Standort des Fahrzeugs zu Beginn und am Ende des Intervalls, die verbrauchte Energie innerhalb des Intervalls und die verfügbare Ladeleistung an der Ladesäule¹. Außerdem werden von Heinz in `mod4_Ladeprofile` zwei Ladestrategien entwickelt, welche abbilden, ob ein Fahrzeug direkt nach dem Ankommen am Zielort (Maximalstrategie) oder so spät wie möglich vor der nächsten Abfahrt (Minimalstrategie) geladen wird. Mithilfe dieser Ladestrategien wird die für das Fahrzeug zuvor erstellte Tabelle `profileBEV` um das entsprechende Ladeprofil ergänzt, indem für jedes Intervall die geladene Energie und der aktuelle Ladezustand der Batterie (State Of Charge (SOC)) eingetragen wird. Schlussendlich ist in diesem Modul zu prüfen, ob das erstellte Fahrzeugprofil eine Modellierung des Pkw als BEV ermöglicht. Ist dies aufgrund von Langstreckenfahrten nicht der Fall, wird das Fahrzeug zu einem Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) umgewandelt und davon ausgegangen, dass es, wenn nötig, verbrennungsmotorisch weiterfährt. Ein BEV müsste an dieser Stelle seine Fahrt unterbrechen und geladen werden. Da die Wegeprotokolle der MOP-Befragung aber keine solche Ladevorgänge beinhalten, kann die Ladeinfrastruktur für Langstreckenfahrten im Fernverkehr nicht mithilfe des MATLAB Programms anhand der MOP-Daten simuliert werden.

2.3. Daten zur Ladeinfrastruktur im *Fernverkehrsraum*

Zur Berechnung der Anzahl der Ladepunkte im Fernverkehr (siehe Kapitel 5.2.5) wird auf verschiedene andere Quellen zurückgegriffen. Einerseits liegen im Poster "How Many Fast Charging Stations Do We Need Along the German Highway Network?" (Reuter-Oppermann et al., 2017) Daten zur Anzahl der Schnellladesäulen bei einer bzw. sieben Millionen Elektrofahrzeugen vor. In der am Institut für Operations Research (IOR) des KIT geschriebenen Masterarbeit „Capacitated Fast Charging Infrastructure for the German Autobahn“ (Graf, 2017) wird andererseits die Anzahl der Ladepunkte pro Ladestation entlang der Autobahnen unter der Annahme berechnet, dass 15% der privaten Pkw in Deutschland Elektrofahrzeuge wären.

¹ Verändert sich der Standort des Fahrzeugs innerhalb eines Intervalls, wird das Maximum der an den beiden Standorten verfügbaren Ladeleistungen angenommen.

3. Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw

Das folgende Kapitel gibt Aufschluss über das heutige Mobilitätsverhalten und die Wohnsituation der deutschen Bevölkerung. Die grundlegenden Fragestellungen sind dabei einerseits, wie hoch die durchschnittliche Verkehrsleistung ist und wie der Zweck eines Weges auf Basis der vorliegenden Daten ermittelt werden kann. Dies wird in Kapitel 3.1 erläutert. Andererseits soll analysiert werden, wo und wie die Allgemeinheit wohnt, welche Parksituation vorliegt und welche potentiellen Lademöglichkeiten sich daraus ergeben. Hierauf wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

3.1. Nutzung privater Pkw

Im Zuge der Analyse der MOP-Daten innerhalb dieser Arbeit gilt ein Pkw als privat, wenn das Eigentumsverhältnis mit „eigener Haushalt ist Eigentümer“, „eigene Firma ist Eigentümer“ oder „Arbeitgeber ist Eigentümer“ angegeben ist. Auf diese Weise werden nicht nur Pkw im privaten Besitz, sondern auch Dienstwagen erfasst, da diese genauso für die Untersuchung der benötigten Ladeinfrastruktur hinzugezogen werden sollen.¹ „Sonstige Eigentumsverhältnisse“ und die Antwort „Keine Angabe“ werden nicht berücksichtigt.

¹ Dementsprechend wird auch keine Unterscheidung zwischen dienstlicher und privater Nutzung vorgenommen, die mithilfe der MOP-Daten ebenfalls möglich wäre.

3.1.1. Verkehrsleistung

Mithilfe des MATLAB Programms ist es möglich, die Verkehrsleistung der privaten Pkw in Deutschland zu ermitteln. An dieser Stelle sollen vorab erste Ergebnisse gezeigt werden, um einen Rahmen für die Bedürfnisse der privaten Nutzung von Fahrzeugen in Deutschland vorzustellen: Der Mittelwert der zurückgelegten Entfernungen pro Tag und Fahrzeug liegt bei 33,52 km, werden nur bewegte Fahrzeuge betrachtet, sind es 38,04 km pro Tag.

Die folgende Grafik zeigt die durchschnittliche tägliche Verkehrsleistung für jedes Fahrzeug der MOP-Befragung.

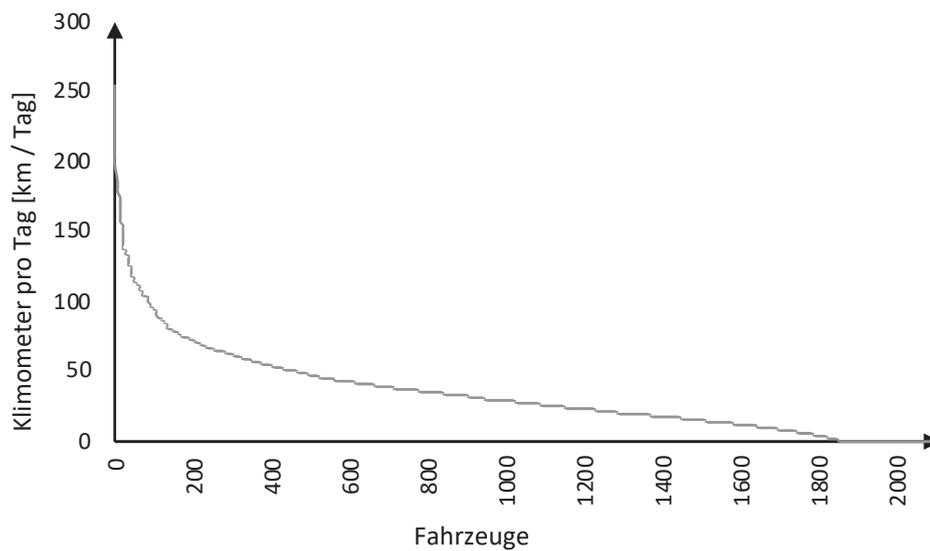


Abbildung 2: Kilometer pro Tag - alle Fahrzeuge

3.1.2. Wegezwecke

Der Zweck eines Weges gibt Aufschluss über den Standort eines Fahrzeugs nach jeder zurückgelegten Strecke. In der folgenden Tabelle wird ersichtlich, welche Werte die Variable „Zweck eines Weges“ innerhalb der MOP-Befragung annehmen kann und welcher Bedeutung dies entspricht. Außerdem ist die Codierung im MATLAB Programm und der Name des Standortes aufgeführt, der für ein Fahrzeug nach dem Zurücklegen eines entsprechenden Weges angenommen wird.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Wegezweck, Standort und Anforderungsbereich¹

Antwort- code Wegezweck MOP	Antworttext Wegezweck	MOP	Standort Codie- rung MATLAB	Standort Bezeichnung	Standortzuteilung zu Anforderungsbereichen
-	-		0	"unterwegs"	-
1	Weg zur Arbeitsstätte		1	"Arbeit"	Halböffentlicher Bereich: <i>Arbeitgeber</i>
2	Dienstlicher Weg (z. B. Dienstreise, Handwerker		2	"Dienstreise"	-
3	Weg zur Ausbildungsstätte		3	"Ausbildungsstätte"	Halböffentlicher Bereich: <i>Arbeitgeber</i>
4	Besorgung, Einkaufsweg		4	"Einkauf"	Halb-öffentlicher Bereich: <i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>
5	Freizeitweg		5	"Freizeit"	Halb-öffentlicher Bereich: <i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>
6	Jemanden holen, bringen (d. h. Serviceweg)		6	"Serviceweg"	-
7	Nach Hause		7	"Zu Hause"	Privater Bereich: <i>Privater und Geteilter Parkraum</i> ; Öffentlicher Bereich: <i>Nahverkehrsraum</i>
8	Anderes		8	"Anders"	-
9	Weg nach außer Haus (z. B. Ferienwohnung, Hotel)		9	"Hotel"	Halböffentlicher Bereich: <i>Arbeitgeber</i>
10	Weg zum 2. Wohnsitz		10	"2. Wohnsitz"	-
11	Sonstige private Erledigung		-	-	-
77	Beginn und Ende des Weges am selben Ort, "Rundkurs" oder Spazierweg		-	-	-

3.2. Park- und Wohnsituation

Ob ein Elektrofahrzeug im häuslichen Bereich (Standort „Zu Hause“) laden kann, hängt maßgeblich davon ab, ob ein privater Stellplatz vorhanden ist. Ist dies der Fall, liegt es nahe, eine Ladesäule zu installieren, an der das Fahrzeug seine Batterie während der im Normalfall langen Standzeiten zu Hause laden kann.² Wird das Fahrzeug am Standort „Zu Hause“ jedoch standardmäßig am

¹ Die Zuteilung der Standorte zu konkreten Anforderungsbereichen wird in Kapitel 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) vorgenommen.

² Private Stellplätze sind in den MOP-Daten zu 82 % (Best- und Worst-Case-Szenario) belegt (siehe Kapitel 6.1 („Quantitativer Bedarf für Ladeinfrastruktur“)).

Straßenrand abgestellt, sind Alternativlösungen zum Laden im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich erforderlich.

Bei Vorhandensein eines privaten Stellplatzes wird eine weitere Unterscheidung bezüglich der Wohnsituation des Haushalts vorgenommen. Der Aufbau von Ladeinfrastruktur für Mehrfamilienhäuser etwa bringt andere Anforderungen an die Funktionalitäten einer Ladesäule mit sich als die Bereitstellung einer Lademöglichkeit für Fahrzeuge, die in der Garage eines Einfamilienhauses parken (siehe Kapitel 4 „Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“). Daher muss an dieser Stelle nicht nur die Parksituation der privaten Pkw in Deutschland analysiert, sondern auch die Wohnsituation der deutschen Haushalte ermittelt werden. Diese wird innerhalb der MOP-Studie allerdings nicht abgefragt. Aufgrund fehlender Informationen über die Korrelation beider Parameter, kann für die Simulation daher nicht berücksichtigt werden, inwiefern das Vorhandensein eines Parkplatzes vom Wohnen in einem Ein- oder Mehrfamilienhaus abhängt. Park- und Wohnsituation werden daher im weiteren Verlauf getrennt voneinander betrachtet.

3.2.1. Parksituation

Mithilfe des MATLAB Programms kann nach einigen Anpassungen die Parksituation der im Rahmen der Befragungen des Deutschen Mobilitätspanels erfassten Pkw untersucht werden. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass es hierfür notwendig ist, die im Modul `mod1_DB` aus dem Haushaltsdatensatz entnommenen Informationen um die Abfrage der in Summe vorhandenen Parkplätze für jeden Haushalt zu ergänzen. Daraus kann ermittelt werden, dass mit rund 79% der Großteil aller Pkw der Befragung im Normalfall auf einem „privaten Stellplatz“ oder in einer „Garage“ abgestellt werden. Die verbleibenden 21% parken am Straßenrand.

3.2.2. Wohnsituation

Da in der Erhebung des Deutschen Mobilitätspanels keine Abfrage der Wohngebäudeart der erfassten Haushalte stattfindet, muss zur Analyse der Wohnsituation auf andere Quellen zurückgegriffen werden. Dabei ist festzuhalten, dass nicht das Eigentumsverhältnis, sondern die Art des Wohngebäudes von Interesse ist.

Nach Untersuchungen des Statistischen Bundesamts wohnten im Jahr 2014 31% aller Haushalte in Wohngebäuden mit nur einer Wohnung und 17% bzw. 52% in Wohngebäuden mit zwei bzw. drei oder mehr Wohnungen (Statistisches Bundesamt, 2018a).

Für die Simulation werden zu Einfamilienhäusern zugehörige Parkplätze dem *Privaten Parkraum* zugeteilt (siehe Kapitel 4.2). Für Stellplätze von Wohngebäuden mit zwei oder mehr Wohnungen, wobei hierzu auch Zweifamilienhäuser gezählt werden, wird die Annahme getroffen, dass potentielle Ladesäulen theoretisch nicht mehr ausschließlich für den Fahrzeugbesitzer zugänglich sind und daher zum *Geteilten Parkraum* zählen (Kapitel 4.3).

4. Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur

Das nachstehende Kapitel befasst sich mit der technischen Umsetzung der Ladeinfrastruktur für verschiedene Anforderungsbereiche. Die notwendigen Funktionalitäten und die daraus resultierenden Kosten einer Ladesäule hängen maßgeblich von ihrem Standort und dem jeweiligen Zugang des Benutzers zur Ladesäule ab. Nicht nur die Unterscheidung des Ladens mit Wechsel- bzw. Gleichstrom und die Ladeleistung sind von wesentlicher Bedeutung. Auch aus der Notwendigkeit der Authentifizierung und Autorisierung des Benutzers, der Erfordernis eines Stromzählers und eines Abrechnungssystems und etwaigem Schutz vor Vandalismus oder natürlichen, äußeren Einflüssen ergeben sich verschiedene Ladesäulentypen, die je nach Anforderungsbereich unterschiedlich ausgestattet sind und deren Investitionshöhen variieren.

Aufgrund dieser Verschiedenheiten im Funktionsumfang einer Ladesäule wird im vorliegenden Kapitel in Anlehnung an den Bericht zum Status der Elektromobilität in Norwegen (Figenbaum, 2018) eine Unterscheidung der Infrastruktur zwischen privatem, halb-öffentlichem und öffentlichen Bereich vorgenommen (Tabelle 3). Der private Bereich gliedert sich dabei in den *Privaten Parkraum* (Kapitel 4.2) und den *Geteilten Parkraum* (Kapitel 4.3) auf, während der halb-öffentliche Bereich nochmals unterteilt wird in die Aufstellungsorte *Arbeitgeber* (Kapitel 4.4) und *Allgemein zugängliche Einrichtungen* (Kapitel 4.5). Letzterer meint dabei Institutionen mit öffentlich zugänglichen Parkplätzen in privater Hand wie zum Beispiel in Einkaufszentren oder Parkhäusern. Der öffentliche Bereich wird in die Rubriken *Nahverkehrsraum* (Kapitel 4.6) und *Fernverkehrsraum* (Kapitel 4.7) gegliedert. Eine Übersicht über die sechs Anforderungsbereiche, im Folgenden auch kurz „Bereich“ genannt, zusammen mit einer Zuordnung der möglichen Standorte aus den MOP-Daten, bietet Tabelle 2.

Tabelle 3: Übersicht über die Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur

Privater Bereich		Halb-öffentlicher Bereich		Öffentlicher Bereich	
<i>Privater Parkraum</i>	<i>Geteilter Parkraum</i>	<i>Arbeitgeber</i>	<i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>	<i>Nahverkehrsraum</i>	<i>Fernverkehrsraum</i>

In den jeweiligen Unterkapiteln der Bereiche wird zunächst der Anschluss der Ladesäule an das Wechsel- oder Gleichstromnetz und die Ladeleistung spezifiziert. Danach werden die Standorte auf ihre Umgebung hinsichtlich der notwendigen Funktionalitäten der Ladesäulen geprüft. Auf Basis dieser Parameter kann schlussendlich die Höhe der Investitionen für die unterschiedlichen Ladesäulen nach aktuellem Stand aufgeschlüsselt werden, welche die Basis für die Kalkulation der Investitionshöhen im Jahr 2050 bildet (siehe Kapitel 5.2.6). Alle Informationen dieses Kapitels sind in Tabelle 6 im Anhang zusammengefasst.

4.1. Standortübergreifende Anforderungen an den Ladevorgang

Im Folgenden werden zunächst pauschale Anforderungen an die Ladesäulen der verschiedenen Bereiche vorgestellt, die unabhängig vom Standort einer Ladesäule gelten sollen. Dabei wird gleichzeitig die Vorgehensweise zur Ermittlung der entsprechenden Annahmen erläutert. Weitere, standortspezifisch angepasste Anforderungen und die zugehörigen, zur Entwicklung der Anforderungen getroffenen Annahmen, werden in den jeweiligen Unterkapiteln aufgezeigt und erörtert.

Ein „Ladepunkt“ bedeutet gemäß der Ladesäulenverordnung (LSV) eine Lademöglichkeit für genau ein Elektrofahrzeug (BMWI, 2015). Der Begriff „Ladesäule“ meint im Folgenden die Apparatur an sich, welche mehrere Ladepunkte bieten kann, während „Ladestation“ die Ansammlung einiger Ladesäulen bezeichnet.

4.1.1. Steckertypen für induktives Laden

In dieser Arbeit wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass der Ladevorgang kabelgebunden stattfindet, auch induktiv genannt, weshalb die Spezifizierung eines Steckers erforderlich ist. In Abgrenzung dazu gibt es zwei weitere Systeme zum Laden eines Elektrofahrzeugs, welche im Kapitel 5.1.2 vorgestellt werden (siehe Abschnitte „Ladevorgang via Induktives Laden“ und „Ladevorgang via Batteriewechsel“).

Für alle Anforderungsbereiche wird der von der EU in der Richtlinie 2014/94/EU über den „Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2014) festgelegte Standard-

Stecker angenommen. Nach deutschem Recht, welches das EU-Recht umsetzt, sind neu errichtete Ladesäulen heutzutage grundsätzlich mit dem jeweiligen Standard-Stecker auszustatten (BMW, 2015). Weitere Steckertypen an einer Ladesäule sind optional.

Für das Laden mit Wechselstrom (AC) entspricht der festgelegte Standard dem Stecker „Typ 2“ (BMW, 2015), auch „Mennekes-Stecker“ genannt. Dieser Stecker ist in Europa bereits am häufigsten (The Mobility House, 2017a). Bei Gleichstromladung (DC) ist der Steckertyp „Combo 2“ erforderlich (BMW, 2015), welcher auch als „Combined Charging System (CCS)“ bezeichnet wird (Bach, 2018a). Dieser ist zum Schnellladen geeignet, ermöglicht aber auch Normalladen (Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), 2018).

4.1.2. Wechselstrom- und Gleichstromladen

Die Batterie eines Elektrofahrzeugs erfordert eine Ladung mit Gleichstrom. Das deutsche Mittel- und Niederspannungsnetz stellt allerdings Wechselstrom zur Verfügung.¹ Beim „Laden mit Wechselstrom“ wird das angeschlossene Fahrzeug über die Ladesäule direkt mit dem Wechselspannungsnetz verbunden, und ein Gleichrichter zur Umwandlung von AC in DC befindet sich im Auto selbst (Dorresteijn, 2012). In dieser Arbeit werden drei Arten der AC-Ladung ausgewählt und für die Simulation der Ladepunkte genutzt. Hierbei handelt es sich zum Einen um den einphasigen Anschluss (230 V) mit einer Stromstärke von 16 A für eine Leistung von 3,7 kW (Bach, 2018b). Zum Anderen wird für das Jahr 2050 der Einsatz von Ladesäulen mit 11 kW bzw. 22 kW angenommen. Diese werden dreiphasig mit einer Spannung von 400 V angeschlossen und bieten somit bei 16 A bzw. 32 A die entsprechende Anschlussleistung (Bach, 2018b).

„Laden mit Gleichstrom“ bedeutet, dass sich im Gegensatz zum vorherigen Beispiel das Ladegerät zur Umwandlung des Wechselstroms aus dem Nieder- oder Mittelspannungsnetz¹ in den von der Batterie benötigten Gleichstrom in der Ladesäule selbst befindet (Bach, 2018b), wodurch deutlich höhere Ladeleistungen möglich werden (Schnellladen).

¹ Tatsächlich gibt es seit März 2018 ein erstes Gleichstromnetz auf Mittelspannungsebene auf dem Campus der RWTH Aachen (RWTH Aachen University und E.ON Energy Research Center, 2018).

Für die privaten Bereiche und beim *Arbeitgeber* wird in der Arbeit in Anlehnung an Dorresteiijn (2012) davon ausgegangen, dass mit Wechselstrom geladen wird (Normalladen). Im öffentlichen Bereich wird unterschieden zwischen dem *Nahverkehrsraum*, in dem sowohl mit Wechselstrom als auch mit Gleichstrom geladen wird, und der Rubrik Autobahn. Für letztere wird aufgrund der enorm verkürzten Ladezeit die Annahme getroffen, dass Ladestationen entlang der Autobahnen in Zukunft in erster Linie mit Gleichstrom angeschlossen sein werden (Figenbaum, 2018). Für *Allgemein zugängliche Einrichtungen* wird ebenfalls angenommen, dass sowohl das Laden mit Wechsel- als auch mit Gleichstrom möglich ist.

4.1.3. Anschlussleistung, effektive Ladeleistung und Gesamtladewirkungsgrad

Bei der unter dem jeweiligen Ladeverfahren in den folgenden Unterkapiteln angegebenen Ladeleistung handelt es sich um die Brutto-Ladeleistung der Ladesäulen, die im weiteren Verlauf auch mit „Anschlussleistung“ bezeichnet werden soll. In der Realität entstehen beim Laden durch den Innenwiderstand der Fahrzeugbatterie Verluste, welche die tatsächliche Ladeleistung verringern (Karle, 2018). Analog kann auch beim Entladen nicht die volle von der Batterie zur Verfügung gestellte Energie genutzt werden. Der Ladewirkungsgrad beschreibt in der Literatur das Verhältnis von der Batterie hinzugeführter Energie zu aus ihr entnommener Energie (Karle, 2018). Weiterhin müssen für die Simulation die Wirkungsgrade von Ladesäule und Ladekabel miteinbezogen werden, welche durch das Freiwerden von Wärme im Ladegerät und Leitungswiderstände im Kabel entstehen. Der „Gesamtladewirkungsgrad“ soll in dieser Arbeit alle Verluste beinhalten. Auf die grundlegenden Annahmen für den Gesamtladewirkungsgrad im Jahr 2050 wird in Kapitel 5.1.2 (Abschnitt „Gesamtladewirkungsgrad“) näher eingegangen.

Da Batterien nicht über den gesamten Ladevorgang mit der gleichen Leistung geladen werden können, wird die tatsächliche Ladeleistung im MATLAB Programm in linearer Abhängigkeit des SOCs modelliert (siehe Heinz (2018)).

Darüber hinaus ist die Ladeleistung selbst ein Wert, der sich in den kommenden Jahren verändern kann, welcher in diesem Kapitel aber für jedes Ladeverfahren geschätzt und als fix angenommen wurde. Hierfür wurden

Informationen aus verschiedenen Quellen gesammelt. Zum Einen diente die Übersicht über die typischen Standorte für Ladeinfrastruktur und die entsprechenden Ladeleistungen der NPE (2018) als Grundlage. Zum Anderen gab der Bericht zum Status der Elektromobilität in Norwegen (Figenbaum, 2018) und die Studie „eMobil 2050 – Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz“ (Hacker et al., 2014) Aufschluss über mögliche Ladeleistungen für verschiedene Anforderungen.

Die Ladeleistung für die verschiedenen Bereiche wird jeweils im Unterkapitel „Ladeverfahren“ vorgestellt. Prinzipiell wird in der Arbeit angenommen, dass sowohl die Rahmenbedingungen für den Anschluss von Ladesäulen vor Ort als auch die Eigenschaften der Fahrzeuge das spezifizierte Ladeverfahren ermöglichen. Darunter fällt beispielsweise die Auslegung des Elektroanschlusses des Parkplatzes oder die fahrzeugseitige, maximale Ladeleistung.

4.1.4. Analyse der Investitionen

Zur Abschätzung der Höhe der Investitionen der verschiedenen Ladesäulen wurden ebenfalls aus verschiedenen Quellen Informationen bezogen. Dabei wurde in Anlehnung an die Unterteilung der Nettokosten für Ladeinfrastruktur der NPE (2015) eine Unterscheidung in „Investition in Hardware“ und „Sonstige Investitionen“ vorgenommen.

In den Kapiteln 3.2 bis 3.7 werden die Zahlen für die Mitte des Jahres 2018 vorgestellt. In Kapitel 5.1.3 (Abschnitt „Investition in Hardware“) werden die Annahmen für die Preisentwicklung für das Jahr 2050 erläutert.

Investition in Hardware

Zur Ermittlung der Höhe der Investitionen in Hardware wurden zunächst die aktuellen Marktpreise für verschiedene Ladesäulen gemäß der identifizierten Anforderungen für den privaten und halb-öffentlichen Gebrauch sowie für den Einsatz im öffentlichen *Nahverkehrsraum* ermittelt.

Die Auswahl für beispielgebende Hersteller von Ladesäulen fiel dabei auf die Firmen KEBA, ABL Sursum, Mennekes und ICU. KEBA produziert die von Daimler bevorzugte Ladesäule und ist zusammen mit ABL Sursum, dem Kooperationspartner von VW, im Markt etabliert und weit verbreitet (The

Mobility House, 2017b). Mennekes bietet ein breites Produktportfolio von Ladesäulen für verschiedenste Bereiche an und entwickelte den mittlerweile als europäischen Standard eingeführten Typ 2 Stecker mit (Mennekes, 2018a). Die Firma ICU bietet insbesondere für Gewerbekunden passende Ladelösungen an (The Mobility House, 2017c). Damit ist ICU vor allem für die halböffentlichen Bereiche beim *Arbeitgeber* und *Allgemein zugängliche Einrichtungen* interessant.

Auskunft über Modelle, die den Anforderungen des öffentlichen Zugangs im *Nahverkehrsraum* entsprechen oder sich zum Aufbau entlang von Autobahnen eignen, war schwieriger zu erhalten. Ursache für letzteres könnte u.a. sein, dass der Markt für Schnellladestationen einem großen Wettbewerb ausgesetzt ist und die Daten nicht kommuniziert werden dürfen, wie z.B. die Firma IONITY auf entsprechende Anfragen antwortet (Entwistle, 2018). Außerdem gibt es laut dem Hersteller EVTEC teilweise noch sehr große Unterschiede in der Auslegung des Begriffs „Schnellladestation“ und dementsprechend auch in deren Kosten (Mock, 2018). Für die Kalkulation diente an dieser Stelle daher die Nettokostenschätzung für Hardware (einschließlich Kommunikation und intelligentem Zähler) im Statusbericht der NPE (2015). Sie enthält neben den Investitionshöhen für Ladesäulen im Jahr 2015 auch eine Prognose für das Jahr 2020, auf deren Basis, wie in Kapitel 5.1.3 (Abschnitt „Investition in Hardware“) erläutert, eine Abschätzung der Kosten im Jahr 2050 vorgenommen werden konnte. Auf gleiche Weise wurden mithilfe dieser Berechnung außerdem die Werte von 2015 für das Niveau der Mitte des Jahres 2018 angepasst, sodass die im Folgenden vorgestellten Zahlen der NPE mit den aktuellen Marktpreisen vergleichbar sind.

Sonstige Investitionen

Die „Sonstigen Investitionen“ enthalten, ebenfalls in Anlehnung an die Aufstellung der NPE (2015), neben den Aufwendungen für den Netzanschluss gegebenenfalls auch die Investition für die Genehmigung, Planung und Standortsuche einer Ladesäule, sowie für Montage, Bau und Beschilderung. Nicht berücksichtigt werden die Investitionen für die Sicherstellung der Energieversorgung oder den Netzausbau (siehe Kapitel 5.1.2 Abschnitt „Energieversorgung und Netzausbau“). Die Höhe der „Sonstigen Investitionen“ wird dabei, erkennbar aus den Daten der NPE (2015), als über die Zeit hinweg konstant angenommen und kann somit direkt auf das Jahr 2050 übertragen werden.

4.1.5. Energiemanagement

Das von einigen Herstellern angebotene Feature der Kompatibilität und Kommunikation der Ladesäule mit Gebäude-Energiemanagement-Systemen über entsprechende Schnittstellen wird im Folgenden zum Vergleich nicht weiter berücksichtigt und für die Zukunft als Standard angenommen. Dieses ist u.a. wichtig, um Geräte und Anlagen in Gebäuden zu koordinieren (Becker, 2014) und sicherzustellen, dass Netzüberlastungen aufgrund der hohen Zahl an Elektrofahrzeugen vermieden werden (Agsten et al., 2011).

4.1.6. Abrechnungssystem

Im Zuge der Weiterentwicklung der technischen Systeme im Bereich Ladeinfrastruktur wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass das Abrechnungssystem einer Ladesäule, sofern ein solches am jeweiligen Standort benötigt wird, plattformunabhängig und für alle Elektrofahrzeuge und ihre Nutzer anwendbar ist.

4.2. Privater Bereich: *Privater Parkraum*

Der *Private Parkraum* bezeichnet in dieser Arbeit Parkmöglichkeiten auf dem Grundstück (Miete oder Eigentum) des Elektrofahrzeugbesitzers. Dies könnte beispielsweise eine Garage oder ein Carport sein, in dem der Wagen im Regelfall abgestellt wird. Hieraus ergeben sich, verglichen mit den darauffolgenden Bereichen, die simpelsten Anforderungen an die Infrastruktur. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass ein Parkplatz potentiell auch genau einer Ladesäule entspricht. Doppelparkplätze bräuchten demnach zwei Ladesäulen, um Anschlussmöglichkeiten für zwei Fahrzeuge zu bieten.

Rechtliche Hürden wie die Notwendigkeit der Zustimmung des Vermieters zur Installation einer Ladesäule an einem gemieteten Parkplatz (Nowosak, 2018) werden für das Jahr 2050 als gelöst angenommen (siehe auch Kapitel 5.1.3 Abschnitt „Veränderungen der Rechtslage“).

4.2.1. Ladeverfahren

Figenbaum (2018) geht im Bericht zum Status der Elektromobilität in Norwegen von 3,5 bzw. 7 oder 11 kW angeschlossener Ladeleistung im privaten Raum aus. Dorresteijn (2012) vermutet in privaten Haushalten AC-Ladung über Nacht, bei Bedarf aber auch Laden mit Gleichstrom. Sowohl die Untersuchungen

der NPE (2018) als auch die Analysen in der Studie „eMobil 2050“ (Hacker et al., 2014) ergeben eine Anschlussleistung von 3,7 kW für den häuslichen Bereich im Jahr 2050.

Für diese Arbeit wird daher angenommen, dass ein Drittel aller privaten Stellplätze im Jahr 2050 mit 3,7 kW (AC) ausgestattet sind. An der Hälfte der Parkplätze von privaten Haushalten werden Ladesäulen mit 11 kW (AC) installiert, an den verbleibenden rund 17% solche mit 22 kW.

4.2.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Authentifizierung und Autorisierung

Zur Vereinfachung des Szenarios wird für die Simulation angenommen, dass Nutzer, die angeben, auf dem eigenen Grundstück zu parken, ihr Fahrzeug tatsächlich in unmittelbarer Nähe zum Wohngebäude abstellen und nicht etwa einen privaten, aber dennoch theoretisch öffentlich zugänglichen Parkplatz beispielsweise am Straßenrand im Wohngebiet anmieten. Dadurch ergibt sich, dass keine Autorisierung des Nutzers an der Ladesäule nötig ist, da nur der Fahrzeugbesitzer selbst Zugang dazu hat. Dementsprechend bedarf es auch keiner Authentifizierung der Person.

Stromzähler und Abrechnungssystem

Aufbauend auf dem vorrausgegangenen Punkt kann angenommen werden, dass kein zusätzliches System zur Quantifizierung der entnommenen Energiemenge und deren Abrechnung erforderlich ist. Die Ladesäule kann stattdessen direkt in den hauseigenen Stromkreis integriert werden. Die Abrechnung erfolgt demnach zusammen mit der üblichen Stromrechnung des Haushalts.

Schutz

Da wie bereits beschrieben davon ausgegangen wird, dass Fremde keinen Zugang zur privaten Ladestation haben, kann davon ausgegangen werden, dass folglich auch kein nennenswerter Schutz oder eine Absicherung der Ladesäule vor beispielsweise Vandalismus notwendig ist (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation et al., 2010). Gleichzeitig ist die Gefahr vor einer Beschädigung der Ladesäule durch schwerwiegende Unfälle in Tiefgaragen oder auf großen Parkplätzen gering.

4.2.3. Investitionen

Durch den geringeren Aufwand und weniger umfangreiche Anforderungen an die Funktionalitäten von Ladesäulen im privaten Bereich sinken die Kosten für die Infrastruktur im Vergleich zu anderen Bereichen (Proff et al., 2012).

Investition in Hardware

Für die 33% der Parkplätze im *Privaten Parkraum*, an denen mit 3,7 kW geladen werden soll, eignet sich zum Beispiel die Wallbox 98.112 KeContact P30 e-series von der Firma KEBA, welche eine Ladeleistung von bis zu 4,6 kW ermöglicht und 699,00 € kostet (The Mobility House, 2017d). Die Ladesäule eMH1 EVSE824 von ABL Sursum liegt mit ebenfalls 699,00 € für 3,7 kW im gleichen Preissegment (The Mobility House, 2017e). Des Weiteren wäre das Modell AMTRON® Start 3,7 C2 von Mennekes geeignet, welche mit 802,00 € etwas teurer ist (Mennekes, 2018b). Für die Kalkulation der Investitionshöhe für Ladesäulen mit 3,7 kW wurde mit 733,33 € der Mittelwert der drei Modelle gewählt.

Die Hälfte der Parkplätze im *Privaten Parkraum* werden in der Simulation mit einer Ladeleistung von 11 kW ausgestattet. Ein entsprechendes Modell der Firma Mennekes (AMTRON® Start 11 C2) kostet 853,00 € (Mennekes, 2018c). Die vergleichbare Ladesäule von ABL Sursum (eMH1 EVSE803) ist mit 819,00 € etwas preisgünstiger (The Mobility House, 2017f). Auch hier wird das arithmetische Mittel mit 836,00 € angenommen.

Für die Berechnung der Höhe der Investitionen für Ladesäulen mit 22 kW im *Privaten Parkraum* werden 1.026,67 € pro Ladepunkt angenommen. Dies ist der Mittelwert aus den Ladesäulen KEBA Wallbox 97.919 KeContact P30 c-series (1.199,00 € (The Mobility House, 2017e)), AMTRON® Start 22 C2 von Mennekes geeignet (982,00 € (Mennekes, 2018f)) und eMH1 EVSE563 der Firma ABL Sursum (899,00 € (The Mobility House, 2017h)).

Sonstige Investitionen

Die Investitionen für die Installation einer Ladesäule im *Privaten Parkraum* können stark variieren und sind vor allem abhängig von der Anschlusssituation vor Ort. Maßgebend für die Montagekosten sind dabei die Entfernung der Ladesäule zum Hauptverteiler für die Anbindung des

Starkstromanschlusses, die Notwendigkeit von Wanddurchbrüchen oder Grabungen zur Verlegung von Kabeln und die Bezahlung eines Elektrikers (Elektronik Zeit, 2017). Des Weiteren sind das Vorhandensein notwendiger Sicherungen in der Ladesäule, die gegebenenfalls zusätzlich montiert werden müssen, und der Bedarf einer Datenverbindung für die intelligente Ansteuerung des Ladepunktes Einflussfaktoren für die Höhe der Anschlusskosten. Außerdem ist ausschlaggebend, ob die Montage an einer Wand oder freistehend erfolgen soll. Letzteres erfordert einen zusätzlichen Standfuß, wobei für diese Arbeit zur besseren Vergleichbarkeit davon ausgegangen wird, dass dies nicht der Fall ist.

Richter et al. (2010) gehen von 1.000,00 € für die Höhe der Investitionen von Ladesäulen im privaten Bereich aus, während Suttner (2015) diesen Wert je nach Anschlussbedingungen auf 500,00 € bis 2.000,00 € schätzt. Der Verteilnetzbetreiber und Energieversorger Innogy geht für die Standardinstallation einer Ladesäule im privaten Bereich inklusive Montage und Inbetriebnahme von 1.100,00 € aus, wie er auf entsprechende Anfragen antwortet (McCourt, 2018). Darin sind neben den Kosten für den Elektriker die Verkabelung, gegebenenfalls notwendige Mauerdurchbrüche, der Anschluss an den Verteilerkasten und die erforderlichen Sicherungsschalter enthalten (Innogy, 2018).

Für die vorliegende Arbeit werden auf dieser Grundlage 1.000,00 € für die Höhe der „Sonstigen Investitionen“ im *Privaten Parkraum* angenommen.

4.3. Privater Bereich: *Geteilter Parkraum*

Unter der Rubrik *Geteilter Parkraum* werden in dieser Arbeit Stellplätze zusammengefasst, die zwar (Miet-)Eigentum des Nutzers sind, trotzdem aber für einen bestimmten Kreis anderer Nutzer ebenfalls zugänglich sind. Dieser Fall tritt in Mehrfamilienhäusern, also Mietshäusern oder Gebäuden mit Eigentumswohnungen, und Wohnanlagen auf, deren Bewohner sich einen großen Parkplatz oder eine (Tief-) Garage teilen.

Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Parkmöglichkeit zugangsbeschränkt ist und nur Mitglieder der Parkgemeinschaft Zutritt haben. In diesem Zusammenhang wird auch davon ausgegangen, dass jeder Fahrzeugbesitzer innerhalb des Parkraumes über einen ihm fest zugewiesenen Parkplatz verfügt, welcher mit einer Ladesäule ausgestattet werden kann.

Die Installation von Ladesäulen in *Geteilten Parkräumen* wird heutzutage noch durch die Notwendigkeit der Einberufung einer Eigentümerversammlung und der Zustimmung aller Wohnungseigentümer erschwert (Kloepfer, 2016), wie der Fall einer gescheiterten Klage um die Erlaubnis zur Verlegung einer Stromzuleitung zum Hausverteiler durch einen Miteigentümer zeigt (FOCUS Online, 2017). Diesbezüglich liegt allerdings schon ein Gesetzesentwurf des Deutschen Bundestags vor, der die Rechtslage zur Förderung des Ladeinfrastrukturaufbaus vereinfachen soll (Deutscher Bundestag, 2018). Daher kann in der Simulation davon ausgegangen werden, dass die Installation von Ladesäulen auch im *Geteilten Parkraum* ohne Beachtung weiterer Restriktionen möglich ist (siehe auch Kapitel 5.1.3 Abschnitt „Veränderungen der Rechtslage“).

4.3.1. Ladeverfahren

Laut Informationen der NPE (2018) könnten Elektrofahrzeuge auf den Parkmöglichkeiten von Mehrparteienhäusern und Wohnkomplexen mit 3,7 kW oder 11 bis 22 kW geladen werden. Diese Werte entsprechen den Ergebnissen für den *Privaten Parkraum* (Kapitel 4.2.1).

Analog zu diesen Annahmen wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass die Hälfte der Stellplätze in *Geteiltem Parkraum* mit einer Anschlussleistung von 11 kW (AC), ein Drittel mit 3,7 kW (AC) und rund 17% mit 22 kW (AC) ausgestattet sein werden.

4.3.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Authentifizierung und Autorisierung

Da alle Parteien der Parkgemeinschaft Zugang zu jedem der Parkplätze haben, ist eine Authentifizierung des Parkplatzeigners bzw. -mieters vonnöten.¹ Dies könnte zum Beispiel über den Wohnungsschlüssel oder durch Freischaltung mittels Radio Frequency Identification (RFID) geschehen, wodurch der Zugang nur für autorisierte Personen gewährleistet wird (Fraunhofer-Gesellschaft für Integrierte Schaltungen (IIS), 2018). Des Weiteren wäre die Nutzung einer herstellerspezifischen App möglich. Da in dieser Arbeit zur Vereinheitlichung von der Authentifizierung des Nutzers über seine RFID-Karte ausgegangen wird,

¹ Andernfalls wäre das Laden auf Kosten des Nachbarn möglich (siehe „Stromzähler und Abrechnungssystem“).

verfügen alle zur Kostenabschätzung in Kapitel 4.3.3 („Investitionen“) ausgewählten Ladesäulen über die Möglichkeit zur Identifizierung des Nutzers per RFID.

Stromzähler und Abrechnungssystem

Ebenso wie im privaten Bereich könnten Ladesäulen im *Geteilten Parkraum* direkt in die Unterverteilung des Wohngebäudes eingebunden werden. Insbesondere dann, wenn sich beispielsweise die Tiefgarage eines Mehrfamilienhauses auf einer Ebene mit dem Hausanschlussraum befindet, ist ein Anschluss des Ladepunktes hinter die wohnungsspezifischen Stromzähler leicht realisierbar. Auf diese Weise braucht die Ladesäule keinen eigenen Stromzähler. Die Abrechnung kann, genauso wie im *Privaten Parkraum*, mit der üblichen Stromrechnung erfolgen. Davon wird in dieser Arbeit ausgegangen.

Schutz

Da wie oben beschrieben nur Bewohner des Wohnkomplexes Zugang zu den Parkmöglichkeiten haben, wird davon ausgegangen, dass kein Schutz der Ladesäule, beispielsweise vor Vandalismus (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation et al., 2010), vorgenommen werden muss.

4.3.3. Investitionen

Investition in Hardware

Für die 33% der Parkplätze im *Geteilten Parkraum*, die für die Simulation mit einer Anschlussleistung von 3,7 kW ausgestattet werden, eignet sich die Ladesäule AMTRON® Premium 3,7 C2 von Mennekes, die 1.974,00 € kostet (Mennekes, 2018e). ICU bietet mit der ICU Eve Mini Wallbox für 1.015,00 € inklusive RFID-System ein vergleichbares Modell (ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018). Für die schon für den *Privaten Parkraum* vorgestellte Ladesäule eMH1 EVSE824 von ABL Sursum gibt es eine zusätzliche Montageplatte, welche die Ladesäule um die Möglichkeit der Identifizierung per RFID ergänzt (RFIDM00 für 320,00 € (ABL SURSUM, 2018a)). Somit ist die Ladesäule für insgesamt 1.019,00 €¹ ebenfalls für den Einsatz im *Geteilten Parkraum* geeignet. Dieser Wert wurde für die Berechnung des Mittelwerts für die Simulation verwendet, der bei 1.336,00 € liegt.

¹ Eigene Berechnung

Das vergleichbare Modell von Mennekes mit einer Anschlussleistung von 11 kW liegt preislich bei 2.463,00 € (AMTRON® Premium 11 C2 (Mennekes, 2018f)). Die auch für den privaten Bereich aufgezeigte Ladesäule emh1 EVSE803 mit der zuvor vorgestellten Montageplatte RFIDM00 von ABL Sursum kostet insgesamt 1.139,00 €¹ bei einer Ladeleistung von 11 kW. Die Eve Mini Wallbox des Herstellers ICU ist für 1.170,00 € ebenfalls mit 11 kW und der Authentifizierungsmöglichkeit über RFID ausgestattet (ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018). Somit wird für die Höhe der Investitionen für Ladesäulen mit 11 kW, mit denen in der Simulation die Hälfte aller Parkplätze im *Geteilten Parkraum* ausgestattet werden, ein Betrag von durchschnittlich 1.678,00 € angenommen.

Die verbleibenden 17% aller Ladesäulen im *Geteilten Parkraum* sollen in der Simulation eine Anschlussleistung von 22 kW bieten. Hierfür wäre die Wallbox 98.152 KeContact P30 b-series von KEBA für 1.249,00 € geeignet (The Mobility House, 2017i). Außerdem bietet sich die Ladesäule AMTRON® Premium 22 C2 von Mennekes an (2.725,00 € (Mennekes, 2018g)). Inklusive RFID-Option ist auch die emh1 EVSE563 von ABL Sursum (1.219,00 € (The Mobility House, 2017h)) geeignet. Des Weiteren steht für den Gebrauch im *Geteilten Parkraum* die ICU Eve Mini Wallbox zur Wahl (1.190,00 €, (ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018)). Für diesen Bereich ergibt sich daraus ein Mittelwert von 1.595,75 €, der für diese Arbeit für die Höhe der Hardwareinvestitionen angenommen wird. Dieser unter dem Mittelwert für Ladesäulen mit nur 11 kW liegende Wert ist dadurch zu erklären, dass bei 22 kW zusätzlich eine Ladesäule der Firma KEBA geeignet ist, welche vergleichsweise günstig ist und das arithmetische Mittel dadurch verringert.

Sonstige Investitionen

Die Höhe der Investition für die Installation einer Ladesäule im *Geteilten Parkraum* wird analog zum *Privaten Parkraum* mit 1.000,00 € abgeschätzt.

¹ Eigene Berechnung

4.4. Halb-öffentlicher Bereich: *Arbeitgeber*

Das Laden beim Arbeitgeber spielt insbesondere für Autofahrer ohne eigenen Stellplatz und entsprechende Lademöglichkeiten zu Hause eine große Rolle (Neubauer und Wood, 2014), da es hier, ähnlich wie im privaten Bereich, zu vergleichsweise langen Standzeiten kommt. Die Wahl eines konkreten Stellplatzes innerhalb des Firmenparkplatzes bleibt dabei aus Gründen der Praktikabilität für Mitarbeiter offen. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Firmen ihre Parkplätze zukünftig mit ausreichend Infrastruktur ausstatten.

Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur, ähnlich wie firmeninterne Fitnessstudios oder Kindergärten, für Arbeitgeber zum Vorteil im Wettbewerb um Arbeitnehmer wird. Denkbar ist in diesem Zusammenhang auch, dass Arbeitgeber, um ihre Attraktivität zu steigern, die Nutzung ihrer Infrastruktur kostengünstiger anbieten könnten, als die Deckung der Investitionen eigentlich erfordern würde. Da sich hierdurch Anpassungen im Ladeverhalten der Arbeitnehmer einstellen würden, welche die Nachfrage nach Ladeinfrastruktur in allen Bereichen verändern würden, wird dieser Effekt im Folgenden nicht miteinbezogen. Stattdessen wird in diesem Bereich nach der Berechnung der Gesamtinvestitionen keine weitere Zuteilung dieser zu Ladesäulennutzern oder den Arbeitgebern für die Ergebnisse dieser Arbeit vorgenommen, sondern lediglich der Gesamtbetrag betrachtet.¹

Da die Anforderungen an Ladesäulen auf Hotelparkplätzen den Voraussetzungen an Ladeinfrastruktur im Parkraum von Arbeitgebern stark ähneln, werden die beiden Kategorien aus den MOP-Daten (Standort „Arbeitgeber“ und „Hotel“) für diese Arbeit zusammengefasst und im weiteren Verlauf vereinfacht mit *Arbeitgeber* bezeichnet. Zu diesem Bereich wird außerdem der vergleichbare Standort „Ausbildungsstätte“ gezählt.

¹ Im Gegensatz dazu wird in Kapitel 6.3 („Nutzungsgebühren“) für die Bereiche *Privater* und *Geteilter Parkraum* die Höhe der Investition in eine einzelne Ladesäule und für die Bereiche *Allgemein zugängliche Einrichtungen* sowie den *Nah-* und *Fernverkehrsraum* die Nutzungsgebühren für 10 Minuten Laden oder Parken an einer Ladesäule vorgestellt. Somit wird eine Beurteilung der Ergebnisse aus Nutzersicht möglich. Hierauf wird im Bereich *Arbeitgeber* verzichtet.

4.4.1. Ladeverfahren

In der Studie „eMobil 2050“ wird eine Anschlussleistung von 22 kW am Arbeitsplatz im Jahre 2050 als Annahme getroffen (Hacker et al., 2014). Die NPE (2018) geht an dieser Stelle von 3,7 kW aus.

Für die Simulation wird angenommen, dass die Parkplätze von *Arbeitgebern* in 67% bzw. 33% der Fällen Anschlussleistungen von 11 kW (AC) bzw. 22 kW (AC) zur Verfügung stellen.

4.4.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Obwohl die Höhe der Gesamtinvestitionen im Bereich *Arbeitgeber* in dieser Arbeit nicht auf die Endnutzer umgelegt wird, soll die Infrastruktur die Möglichkeit dazu bieten. Dies spiegelt sich in den Funktionalitäten bezüglich Authentifizierung und Autorisierung sowie Stromzähler und Abrechnungssystem wieder.

Authentifizierung und Autorisierung

Für die Nutzung von Firmen-Infrastruktur ist eine Authentifizierung des Benutzers im Hinblick auf die Abrechnung der entnommenen Energiemenge notwendig. Dabei liegt es nahe, die Umsetzung der Zugangskontrolle und die Zuordnung zu einem Mitarbeiter mithilfe des im vorangehenden Kapitel vorgestellten RFID-Systems durchzuführen, welches in vielen Firmen ohnehin zur Identitätsprüfung beispielsweise an der Eingangstür oder sogar für die Zufahrt auf den Firmenparkplatz eingesetzt wird.

Stromzähler und Abrechnungssystem

Anders als im vorherigen Kapitel kann für die Infrastruktur beim *Arbeitgeber*, wie eingangs erläutert, nicht davon ausgegangen werden, dass den Nutzern konkrete Stellplätze zugewiesen sind. Zur Quantifizierung der entnommenen Energiemenge werden in dieser Arbeit im Bereich *Arbeitgeber* demnach Ladesäulen mit integriertem Stromzähler vorausgesetzt, um eine nutzergebundene Abrechnung zu ermöglichen. Diese kann direkt über die auch für den Zugang verwendete RFID-Karte erfolgen, wovon im Folgenden ausgegangen wird.

Schutz

Unter der Prämisse, dass nur Mitarbeiter Zugang zu den firmeneigenen Parkplätzen haben, wird in der Arbeit die Annahme getroffen, dass kein zusätzlicher Schutz der Ladesäulen vor Fremdeinwirkung vonnöten ist. Die in Kapitel 4.6.2 („Schutz“) vorgestellten, erhöhten, physischen Anforderungen an Ladesäulen im Bereich der *Allgemein zugänglichen Einrichtungen*, die auf Firmenparkplätzen (im Außenbereich) aufgrund von Gefahren durch Unfälle oder kritische Wetterbedingungen ebenfalls vorliegen könnten, werden zur Vereinfachung an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

4.4.3. Investitionen

Investitionen in Hardware

Für den Aufbau auf Parkplätzen von Firmen und Hotels nach den Anforderungen aus dem vorangehenden Unterkapitel eignet sich die Ladesäule AMTRON® Premium 11 C2 von ABL Sursum (2.463,00 € (The Mobility House, 2017f)). Ebenfalls passend wäre die ICU Eve Mini Wallbox inklusive Zugangsschutz per RFID für 1.110,00 € (ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018). Beide bieten eine Anschlussleistung von 11 kW, womit in der Simulation für durchschnittlich 1.786,50 € zwei Drittel aller Stellplätze mit Ladesäulen beim *Arbeitgeber* ausgestattet werden sollen.

Das passende Produkt von Mennekes für das Laden mit 22 kW ist das Modell AMTRON® Premium 22 C2 für 2.725,00 € (Mennekes, 2018g). Von ICU ist die Ladesäule Eve Mini Wallbox für 1.130,00 € inklusive RFID-System geeignet (ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018). Außerdem bietet sich die KEBA Wallbox 97.925 KeContact P30 c-series für 1399,00 € an (The Mobility House, 2017j). Für die Kalkulation der Investitionshöhe für Ladesäulen mit 22 kW Anschlussleistung werden 1.751,33 € pro Ladepunkt angenommen. Dieser im Vergleich zu Ladesäulen mit 11 kW geringere Wert ergibt sich, da zusätzlich zu den Herstellern Mennekes und ICU auch KEBA eine passende Ladesäule anbietet, wodurch der Durchschnittspreis sinkt.

Sonstige Investitionen

Da die Parkplätze von Firmen und Hotels zwar für eine ausgewählte Nutzergruppe zugänglich, aber dennoch nicht öffentlich und zudem Privateigentum sind, orientiert sich die Investitionshöhe für die Installation von

Ladesäulen in diesem Bereich am *Privaten Parkraum*. Aufgrund des höheren baulichen Aufwands für den Netzanschluss einer Vielzahl an Ladesäulen für Mitarbeiter und Gäste verglichen mit der Installation einiger weniger Ladepunkte für den privaten Gebrauch (McCourt, 2018) wird der Wert hierfür um 200,00 € nach oben korrigiert. Die Annahme von 1.200,00 € pro Ladepunkt befindet sich dabei leicht über dem Wert für den privaten Bereich, aber immer noch im Rahmen der Angaben in Kapitel 4.2.3 („Investitionen“) vorgestellten Quellen.

4.5. Halb-öffentlicher Bereich: *Allgemein zugängliche Einrichtungen*

Neben dem Laden zu Hause und beim *Arbeitgeber* stellt das Laden in Einkaufszentren, Freizeit- und Kultureinrichtungen, gewerblich betriebenen Parkplätzen und -häusern und Ähnlichem eine sehr gute Möglichkeit zum Decken des täglichen Ladebedarfs eines Elektrofahrzeugs dar, sofern die dortigen Stellplätze mit entsprechender Infrastruktur ausgestattet sind. Dieser Bereich wird im Folgenden als *Allgemein zugängliche Einrichtungen* bezeichnet, da sie zwar für jedermann zugänglich, aber Eigentum des Betreibers sind.

Eine Schwierigkeit könnten hier die Öffnungszeiten der jeweiligen Institutionen darstellen (Proff et al., 2012). In Rahmen dieser Arbeit wird jedoch angenommen, dass die Parkplätze mit Ladeinfrastruktur rund um die Uhr zugänglich und für die Simulation verfügbar sind.

4.5.1. Ladeverfahren

Für das Laden auf Kundenparkplätzen kommen verschiedene Quellen zu unterschiedlichen Schlüssen bezüglich der vorhandenen Anschlussleistung. Figenbaum (2018) geht von Ladepunkten mit 50 kW aus. Hacker et al. (2014) rechnen mit 22 kW im Straßenraum und in den Bereichen Einkauf und Freizeit. Die NPE (2018) erwartet in ihrer Übersicht zum Thema Ladeinfrastruktur 3,7 kW in Einkaufszentren und Parkhäusern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass zwei Drittel der Ladepunkte in *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* eine Anschlussleistung von 22 kW (AC) zur Verfügung stellen (Normalladen). Das übrige Drittel soll die Möglichkeit zum Schnellladen über Gleichstrom (DC) mit 50 kW bieten (Schnellladen).

4.5.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Authentifizierung und Autorisierung

Aus der allgemeinen Zugänglichkeit der Ladeinfrastruktur in diesem Bereich resultiert die Notwendigkeit der Authentifizierung des Benutzers. Diese erfolgt zusammen mit der Abrechnung des Ladevorgangs und nutzt dementsprechend das im folgenden Abschnitt für die Zukunft angenommene System.

Stromzähler und Abrechnungssystem

Um die entnommene Energiemenge eines Ladevorgangs quantifizieren und einem Fahrzeugnutzer zuordnen zu können, ist im öffentlichen Bereich ein in die Ladesäule integrierter Stromzähler und ein Abrechnungssystem notwendig. Wie auch beim *Arbeitgeber* könnte die Abrechnung hier per RFID-Karte erfolgen. Im Juni 2017 war das bereits an 57% und damit der Mehrheit der öffentlichen Ladesäulen möglich (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), 2017).¹ Der mit 34% zweitgrößte Anteil der Ladepunkte war mit dem System „Plug&Charge“ ausgestattet (BDEW, 2017). Über eine App konnte im Sommer 2017 laut BDEW (2017) an 31% der Ladesäulen abgerechnet werden. In 16% der Fälle war eine Abrechnung über sonstige Systeme, wie zum Beispiel per Kreditkarte oder SMS-Zahlung, möglich (BDEW, 2017).

Die Lösung „Plug&Charge“ setzt den ISO-Standard 15118 um (Soller, 2018). Dieser setzt den Austausch von Daten zwischen Elektrofahrzeug und Ladesäule über ein genormtes Kommunikationsprotokoll voraus (International Organization for Standardization, 2013). Dadurch werden u.a. die Authentifizierung, Autorisierung und Bezahlung über die Ladeschnittstelle ermöglicht (Mütlin, 2013).

Der Marktanteil von „Plug&Charge“ ist zwischen einer Erhebung im Dezember 2016 und der zuvor zitierten Erhebung (Juni 2017) deutlich gestiegen. Ende 2016 waren lediglich 16% mit „Plug&Charge“ ausgerüstet (Wiech, 2016). Da „Plug&Charge“ in der Handhabung am einfachsten ist und keine weiteren Komponenten zur Benutzung nötig sind, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen,

¹ Dabei konnte eine Ladesäule auch mit mehreren der genannten Abrechnungssysteme ausgerüstet sein.

dass sich die Authentifizierung und Abrechnung über „Plug&Charge“ in Zukunft durchsetzen und das System standardmäßig an öffentlichen Ladepunkten verfügbar sein wird. Da heutzutage aber vor allem Ladesäulen mit herstellerspezifischen Apps oder RFID-System zur Abrechnung auf dem Markt sind, werden für eine bessere Vergleichbarkeit im Bereich der *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* auch Ladesäulen mit RFID-System zur Berechnung der Investitionshöhen für Hardware herangezogen.

Schutz

Da die Infrastruktur in Räumen mit Zugang für die Allgemeinheit jeglicher Fremdeinwirkung ausgesetzt ist, bedarf es entsprechendem Schutz vor Vandalismus (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation et al., 2010). Unfälle oder starke Witterungsbedingungen stellen ebenfalls physische Gefahren dar (Proff et al., 2012). Die zur Berechnung der Investitionshöhe ausgewählten Ladesäulen verfügen demzufolge über höhere Standards als in den vorangehenden Bereichen in Bezug auf Sicherheit und Technik wie beispielsweise ein robustes Fundament und eine widerstandsfähige Ummantelung.

4.5.3. Investitionen

Investitionen in Hardware

Für die zwei Drittel der Ladesäulen in *Allgemein zugänglichen Einrichtungen*, die mit einer Anschlussleistung von 22 kW ausgestattet sein sollen, wird die Höhe der Investitionen in Hardware in dieser Arbeit mit 4.301,25 € angenommen. Dieser Wert ergibt sich einerseits aus der Ladesäule Premium 22 von Mennekes für 8.806,00 € (Mennekes, 2018h). Andererseits wird die Ladesäule eMC3 2P4418 von ABL für 8.399 € hinzugezogen (The Mobility House, 2018). Beide bieten jeweils 2 Ladepunkte mit 22 kW. Der Mittelwert dieser Daten wurde für die Berechnungen pro Ladepunkt in der Simulation dementsprechend halbiert.

Für die Ermittlung der Investitionshöhe für Schnellladestationen (50 kW DC) wird auf die Schätzungen der Nationalen Plattform Elektromobilität in ihrem Statusbericht zur Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland zurückgegriffen. Diese nehmen für die Netto-Kosten eines entsprechenden Ladepunktes im Jahr 2015 25.000,00 € an und prognostizieren einen Wert von 15.000,00 € für das Jahr 2020 (NPE, 2015). Hieraus ergibt sich bei einer

Mehrwertsteuer von 19%¹ ein Bruttowert von 25.470,86 € pro Ladepunkt in der Mitte des Jahres 2018, welcher für die Berechnungen in der Simulation zugrunde liegt.

Sonstige Investitionen

Die Höhe der „Sonstigen Investitionen“ für Ladesäulen an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* wird für die Simulation mit 2.975,00 € für eine Anschlussleistung von 11 kW bzw. 11.900,00 € bei 22 kW beziffert. Der Einfachheit halber werden dabei die Zahlen der NPE (2015) für öffentliche Ladeinfrastruktur unter der Annahme übernommen, dass Parkplätze von beispielsweise Supermärkten oder Sportzentren in keiner Weise zugangsbeschränkt, sondern öffentlich zugänglich sind, auch wenn die jeweiligen Grundstücke in privater Hand liegen. Demnach gelten die gleichen Anschlussbedingungen wie für Ladesäulen im öffentlichen Bereich.

4.6. Öffentlicher Bereich: Nahverkehrsraum

Nutzer von Elektrofahrzeugen, die weder die Möglichkeit haben, ihr Fahrzeug über Nacht an einem ihrem Wohnraum zugehörigen Parkplatz, noch tagsüber beim *Arbeitgeber* zu laden, sind auf Alternativen im öffentlichen Bereich angewiesen. In diesem Unterkapitel geht es dabei um die Infrastruktur im Bereich des Nahverkehrs am Straßenrand und in Reichweite des Wohnsitzes der Nutzer, dem sogenannten *Nahverkehrsraum*.

4.6.1. Ladeverfahren

Hacker et al. (2014) kommen in ihrer Studie zu der Annahme, dass im Straßenraum im Jahr 2050 Ladesäulen mit 22 kW Anschlussleistung stehen werden. Jochem et al. (2016) setzen ebenfalls 22 kW oder sogar 43 kW an. Andere Untersuchungen gehen von 11 bis 22 kW aus (NPE, 2018).

Für diese Arbeit wird analog zu den Ladepunkten auf den Parkplätzen *Allgemein zugänglicher Einrichtungen* davon ausgegangen, dass zwei Drittel der Ladesäulen mit einem 22 kW-AC-Anschluss und ein Drittel mit 50 kW (DC) ausgestattet sein werden.

¹ Deutscher Bundestag (2017)

4.6.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Die Voraussetzungen für die Benutzung von Ladeinfrastruktur im *Nahverkehrsraum* sind identisch mit den Anforderungen für Ladesäulen in *Allgemein zugänglichen Einrichtungen*. Diese sind im Kapitel 4.5.2 spezifiziert.

4.6.3. Investitionen

Die Investitionen für Ladesäulen im *Nahverkehrsraum* entsprechen ebenfalls den in Kapitel 4.5.3 vorgestellten Daten für *Allgemein zugängliche Einrichtungen*.

4.7. Öffentlicher Bereich: *Fernverkehrsraum*

Zur Gewährleistung der Machbarkeit von Langstreckenfahrten ist zusätzlich zu den bislang vorgestellten Standorten von Ladesäulen eine Infrastruktur im Fernverkehr notwendig. Jochem et al. (2016) gehen davon aus, dass hauptsächlich Schnellladestationen zum Laden auf weiten Strecken genutzt werden.

4.7.1. Ladeverfahren

Entlang von Autobahnen gelten besondere Bedingungen an das Laden von Elektrofahrzeugen. Um lange Wartezeiten zu vermeiden, geht Figenbaum (2018) von Schnellladestationen mit 50 kW (DC) im Fernverkehr aus. Gleichzeitig erwähnt er die Möglichkeit der Installation von Ultra-Schnellladestationen mit 150 bis 350 kW für die Langstrecke. Diese könnten nach Figenbaum (2018) in Zeiten hoher Nachfrage ihre Ladeleistung auf 50 bis 75 kW reduzieren und dafür statt nur einem Ladepunkt mehrere mit entsprechend geringerer Anschlussleistung bereitstellen. Die NPE (2018) erwartet an Autobahnraststätten sowohl Ladesäulen mit 50 kW als auch solche mit 150 kW, hält aber auch Ladestationen mit 350kW für möglich. Der Autobahnraststätten- und Tankstellenbetreiber Tank und Rast, der laut eigener Aussage das größte Schnellladenetz in Deutschland aus 50 kW- und 150 kW-Schnellladestationen aufgebaut hat, setzt zusammen mit seinem Kooperationspartner IONITY¹ auf Schnellladestationen mit bis zu 350 kW (Autobahn Tank & Rast Gruppe, 2017).

¹ IONITY geht aus dem Zusammenschluss der wesentlichen Automobilherstellern Deutschlands hervor (IONITY, 2018).

Im Rahmen dieser Arbeit wird vereinfachend die Annahme getroffen, dass Autohöfe und Raststätten entlang der Autobahnen in Deutschland mit Ladesäulen einer Anschlussleistung von 50 kW (DC) ausgestattet sein werden. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass Ladestationen an der Autobahn zusätzlich auch die Möglichkeit zur Normalladung (AC) bieten, welche für die Berechnungen dieser Arbeit jedoch nicht genutzt werden soll.

4.7.2. Funktionalitäten der Ladesäulen

Auch auf der Autobahn gelten wie im *Nahverkehrsraum* die gleichen Anforderungen bezüglich der Funktionalitäten der Ladeinfrastruktur wie für Ladepunkte in *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* (siehe Kapitel 4.5.2).

4.7.3. Investitionen

Für die Höhe der Investitionen in Hardware und für den Anschluss der Ladesäulen im *Fernverkehrsraum* werden die in Kapitel 4.5.3 für eine 50 kW-DC-Ladesäule vorgestellten Werte angenommen, die auf den Schätzungen der NPE basieren.

5. Simulation der Ladeinfrastruktur bei 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland

Zur Berechnung der Anzahl der Ladepunkte im Jahr 2050 und der entsprechenden Höhe der Investitionen ist es notwendig, im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Annahmen in Bezug auf die möglichen Entwicklungen der kommenden Jahre zu treffen. Diese können für die Simulation zum Teil pauschal angenommen werden. In anderen Fällen ist der Entwicklungsverlauf ungewiss, sodass die Möglichkeit der Anpassung ausgewählter Parameter im MATLAB Programm und in der späteren Auswertung in Microsoft Excel sowie die Berechnung verschiedener Szenarien sinnvoll erscheint. Im Folgenden werden daher nicht nur allgemeine Annahmen vorgestellt, sondern gegebenenfalls auch die Unterscheidung in zwei Entwicklungsszenarien vorgenommen. Das „Best-Case-Szenario“ geht dabei insgesamt von einem hohen technischen Entwicklungsgrad und einer starken Degression der Investitionshöhen aus. Im „Worst-Case-Szenario“ sind diese Faktoren zurückhaltender gewählt. Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht über alle variablen Parameter mit den für die beiden Szenarien angenommenen Werten, die im vorliegenden Kapitel erörtert werden.

Tabelle 4: Variable Parameter im Best- und Worst-Case-Szenario

Programm	Bezeichnung	Typ	Best-Case-Szenario	Worst-Case-Szenario
MATLAB	Gesamtzahl Fahrzeuge	Faktor	0,95	1
	Realverbrauch	Faktor	1,2	1,4
	Elektrischer Verbrauch	Faktor	0,9	1
	Batteriekapazität	Faktor	1,5	1,2
	Gesamtzahl Fahrzeuge	Faktor	0,95	1
	Ladewirkungsgrad	Wert	90%	80%
	Excel	Anteil Parkplätze im <i>Privaten Parkraum</i> an der Gesamtzahl der Parkplätzen von Haushalten	Anteil	35%
Degressionsfaktor x		Faktor	0,045	0,038
Amortisationszeit in Jahren		Anzahl	10	10
Anzahl Ladepunkte im Fernverkehrsraum		Faktor	20.000	35.000

In Unterkapitel 5.1 werden die für den Personenverkehr relevanten Einflussfaktoren mit den jeweils zugrundeliegenden Annahmen, gegebenenfalls aufgeschlüsselt für Best- und Worst-Case-Szenario, beschrieben. Auf dieser Grundlage kann in Kapitel 5.2 die Vorgehensweise zur Auswertung der Daten aus den Kapiteln 2.1 („Daten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP)“) und 3

(„Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw“) unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Kapitel 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) erläutert und die für diese Arbeit vorgenommenen Implementierungen im MATLAB Programm dargelegt werden. Die für die Umsetzungen und Anpassungen im Programm spezifischen, getroffenen Annahmen werden hier ebenfalls erklärt. Es folgt die Beschreibung der anschließenden Auswertung mithilfe von Microsoft Excel.

5.1. Grundlegende Annahmen für relevante Einflussfaktoren auf den Personenverkehr

Die für diese Arbeit getroffenen Annahmen werden im Folgenden thematisch in die Unterkapitel „Mobilitätsverhalten der Nutzer“, „Technische Entwicklungen“ und „Ökonomische und politische Entwicklungen“ gegliedert.

5.1.1. Mobilitätsverhalten der Nutzer

Auf Basis des Mobilitätsverhaltens der deutschen Bevölkerung kann analysiert werden, welche Ladeinfrastruktur für einen hundertprozentigen Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge an den Pkw im privaten Verkehrssektor nötig ist. Blanck et al. (2017) kommen in ihrem Abschlussbericht zur Studie „Mobiles Baden-Württemberg“ zu dem Schluss, dass die Entwicklungstrends bezüglich der Alltagsmobilität von jüngeren und älteren Menschen gegenläufig sind. Die jüngere Altersgruppe distanziert sich zunehmend von einem Auto als Statussymbol, wandert verstärkt in urbane Gebiete mit guter Anbindung öffentlicher Verkehrsmittel zu und sieht aufgrund von Anpassungen im Lebensweg (wie z.B. längeren Ausbildungszeiten und späterer Familiengründung) und Veränderungen der sozioökonomischen Bedingungen weniger die Möglichkeit oder Notwendigkeit eines eigenen Autos (Blanck et al., 2017). Währenddessen nimmt die Motorisierungsrate der Älteren insbesondere bei Frauen zu (Blanck et al., 2017). In dieser Gruppe hat das Auto noch einen höheren Stellenwert und der Abschied von diesem ist stark mit dem Ende einer Lebensphase und der Verschlechterung von Lebensqualität verknüpft. Insgesamt halten Blanck et al. (2017) aber fest, dass die Pkw-Nutzung stark von den Trends der Siedlungsentwicklung abhängt. Kommt es wieder zu einer stärkeren Suburbanisierung, könnte demnach die Mobilität mit dem Auto wieder steigen (Blanck et al., 2017).

Hacker et al. (2014) sehen weniger altersabhängige Unterschiede im Mobilitätsverhalten der verschiedenen Nutzergruppen im Jahr 2050 als die vorherige Quelle. Dafür sehen sie einen starken Trend zur Nutzung von öffentlichem Verkehr und Carsharing, und gehen davon aus, dass der Besitz von Fahrzeugen in Zukunft nur noch im Freizeitbereich die Regel sein wird (Hacker et al., 2014). Gleichzeitig nehmen Hacker et al. (2014) einen starken Bevölkerungsrückgang in der ländlichen Region an und vermuten, dass der Trend zur Urbanisierung weiter anhält.

Gesamtzahl der Fahrzeuge

Für die Simulation der Ladeinfrastruktur im Jahr 2050 ist vor allem die Gesamtanzahl der Fahrzeuge interessant, da diese direkte Auswirkungen auf die Anzahl der Ladepunkte hat. Für die Berechnung der Ladepunkte in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl wird daher ein Faktor zur Veränderung der *Gesamtanzahl Fahrzeuge* in MATLAB eingeführt. Prognosen zur Entwicklung des Pkw-Bestands pro 1.000 Einwohner in Deutschland sagen voraus, dass dieser bis zum Jahr 2025 ansteigen und danach wieder sinken wird (Adolf und Rommerskirchen, 2014). Nach eigenen Berechnungen auf Basis dieser Quelle liegt der Wert im Jahr 2050 bei 508,7 Pkw je 1.000 Einwohner. Schätzungen zur Einwohnerzahl Deutschlands gehen davon aus, dass diese bis zum Jahr 2050 auf 76,421 Millionen sinken wird (Statistisches Bundesamt, 2018b). Hierdurch kann ein Faktor zur Entwicklung der Anzahl der privaten Pkw bis zum Jahr 2050 in Deutschland ermittelt werden, welcher bei 0,96¹ liegt. Für das Best-Case-Szenario nimmt der Faktor demnach den Wert 0,95 an, sodass sich die Anzahl der Fahrzeuge leicht verringert. Für das Negativszenario wird von der heutigen Situation (Faktor 1) ausgegangen.

Des Weiteren sind die Entwicklungen der Urbanisierung für die Kalkulation der Ladesäulen im *Privaten* und *Geteilten Parkraum* und für den *öffentlichen Nahverkehrsraum* von wesentlicher Bedeutung, da von der Wohnsituation der Bevölkerung die Parksituation der Fahrzeuge abhängt (siehe Kapitel 3.2 („Park- und Wohnsituation“)). Hierauf basiert die Unterscheidung des Standortes „Zu Hause“ in die verschiedenen Bereiche, von der letztlich auch die Anzahl der Ladepunkte je Bereich und die Höhe der Investitionen für die

¹ Eigenen Berechnungen

Ladesäulen abhängt. Da der Zusammenhang zwischen Wohn- und Parksituation nicht präzise festgestellt werden konnte, wird die Verteilung und Gewichtung der Haushalte bezüglich ihrer Lage zwar im MATLAB Programm ebenfalls durch entsprechende Gewichtungsfaktoren ermöglicht, die beiden für diese Arbeit berechneten Szenarien basieren diesbezüglich aber auf dem Status Quo, der durch die MOP Daten hervorgeht.

Anzahl der Parkplätze im *Privaten Parkraum*

Wie in Kapitel 3.2 („Park- und Wohnsituation“) erklärt, können Veränderungen der Wohnsituation der deutschen Bevölkerung und die damit einhergehenden, etwaigen Auswirkungen auf die Parkplatzanzahl in der Simulation nur indirekt modelliert werden. Dies erfolgt durch die Angabe eines Anteils der privaten Stellplätze, die im *Privaten Parkraum* liegen, an der Gesamtzahl der Stellplätze von Haushalten. Die restlichen, privaten Parkplätze liegen dementsprechend in *Geteiltem Parkraum*. Dabei kann sich daran orientiert werden, wie die Verteilung der Wohngebäude mit nur einer Wohnung (31%) im Vergleich zu Wohngebäuden mit zwei oder mehr Wohnungen (69%) im Jahr 2014 aussah (Statistisches Bundesamt, 2018a). Da Ladesäulen im *Privaten Parkraum* preiswerter als im *Geteilten Parkraum* sind, wird für die Modellierung des Best-Case-Szenarios von einem Anteil von 35% *Parkplätze im Privaten Parkraum an der Gesamtzahl der Parkplätze von Haushalten* ausgegangen, im Worst-Case-Szenario werden nur 25% angenommen.

5.1.2. Technische Entwicklungen

Die Zeitspanne bis zum Jahr 2050 bietet großes Potential für technische Neuerungen und wesentliche Veränderungen in der Mobilität im Vergleich zu heutigen Maßstäben. Zur Analyse der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge ist daher eine Konkretisierung notwendig, die grundlegende Annahmen bezüglich aufkommender Technologien erfordert. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden, wobei der Fokus dabei weniger auf den technischen Umsetzungen als auf den möglichen Auswirkungen für die Ladeinfrastruktur liegt.

Vehicle-to-Grid (V2G, „Fahrzeug-zum-Netz“)

Eine zentrale Rolle beim Anschluss von Elektrofahrzeugen an eine Ladesäule spielt die Tatsache, dass hierdurch bidirektionales Laden ermöglicht wird. Die Integration des Fahrzeugs ins Stromnetz lässt dabei nicht nur das

herkömmliche Laden der Batterie zu, sondern bietet die Option zur Nutzung des Fahrzeugs als Energiespeicher und zur Bereitstellung von Energie in Zeiten hoher Nachfrage bei geringem Angebot (Guille, 2009). Insbesondere für die Integration Erneuerbarer Energien ist diese Fähigkeit spannend, da Schwankungen im Netz aufgrund der volatilen Einspeisung von beispielsweise Wind- und Sonnenenergie so ausgeglichen werden könnten. Gleichzeitig ist es möglich, dass durch das Anbieten von Energie sogar ein finanzieller Vorteil für die Fahrzeugbesitzer entsteht. Auf diese Weise könnte V2G einen großen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende leisten.

Da die Simulation von etwaigen Veränderungen im Mobilitätsverhalten aufgrund von V2G im MATLAB Programm im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich ist, wird die Technologie an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt. Zugleich liegt die Annahme nahe, dass V2G ohnehin nur bei langen Standzeiten an privaten Ladepunkten oder im Bereich der Infrastruktur beim *Arbeitgeber*, eingesetzt wird, da das Parken an öffentlich zugänglichen Ladesäulen vermutlich teurer als der durch die Bereitstellung von Flexibilität erwirtschaftete Gewinn sein wird. Daher wird davon ausgegangen, dass V2G keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Anzahl der Ladepunkte hat, da dementsprechend keine zusätzlichen Lademöglichkeiten errichtet werden müssen.

Ladevorgang via Induktives Laden

Eine alternative Technologie zum konduktiven Laden ist die kontaktlose Übertragung elektrischer Energie, das sogenannte induktive Laden. Dabei wird die Batterie des Elektrofahrzeugs durch Induktion kabellos geladen, wodurch sich Vorteile bezüglich Sicherheit und Komfort des Ladevorgangs ergeben (Wu et al., 2011). Nachteilig sind die hohen Kosten des Systems, das Wegfallen der Rückspeisefähigkeit des Fahrzeugs ins Netz (siehe „Vehicle-to-Grid (V2G, „Fahrzeug-zum-Netz“) und die hohen Übertragungsverluste (Schraven et al., 2010). Aufgrund der wesentlichen Mehrkosten im Vergleich zum konduktiven Laden gehen Schraven et al. (2010) nicht vom Aufbau einer flächendeckenden, parallelen Ladeinfrastruktur aus und vermuten den Einsatz der Technologie lediglich in speziellen Fällen. Für diese Arbeit wird die Möglichkeit des induktiven Ladens daher nicht weiter berücksichtigt.

Ladevorgang via Batteriewechsel

Des Weiteren ist der Austausch der entladenen Fahrzeugbatterie anstelle der Wiederaufladung denkbar (Mak et al., 2013). Dies bringt den Vorteil mit sich, dass der zeitintensive Ladevorgang der Batterie unabhängig vom Fahrzeug stattfinden und der Austausch ähnlich lange dauern kann, wie die Wartezeit für die Tankfüllung eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugs, wodurch sich das Reichweitenproblem von BEVs lösen könnte (Mak et al., 2013). Gleichzeitig erfordert dieses System die Standardisierung der Fahrzeugbatterien und einen hohen Bestand an Batterien in jeder Wechselstation, weswegen es somit höchstes für Fahrzeugflotten praktikabel ist (Wan et al., 2015). Auch die NPE (2013) geht nicht davon aus, dass sich das Batteriewechselsystem für den Personenverkehr in Deutschland durchsetzen wird, weshalb das Konzept für diese Arbeit nicht in Betracht gezogen wird.

Realverbrauch der Elektrofahrzeuge in der IIP-Datenbank versus Herstellerangaben

Der elektrische Verbrauch der in der der Datenbank des IIP aufgeführten Fahrzeuge (siehe Tabelle 1) stammt aus den Angaben der jeweiligen Hersteller (Heinz, 2018). Dieser kann in der Simulation durch den Faktor *Realverbrauch* angepasst werden, mithilfe dessen durch Multiplikation mit der Herstellerangabe der tatsächliche Verbrauch des Fahrzeugs nach heutigem Stand berechnet wird. Für das Best-Case-Szenario nimmt der Parameter den Wert 1,2 an, im Worst-Case-Szenario den Faktor 1,5.

Elektrischer Verbrauch

Durch technische Entwicklungen im Fahrzeugantrieb ist eine Veränderung des durchschnittlichen elektrischen Verbrauchs von BEVs bis zum Jahr 2050 denkbar. Sinkt beispielsweise der Verbrauch, erhöht sich die Reichweite des Fahrzeugs bei gleichbleibender Batteriekapazität. Im Abgrenzung zum Abschnitt „Realverbrauch der Elektrofahrzeuge in der IIP-Datenbank versus Herstellerangaben“ ist mit dem Faktor *Elektrischer Verbrauch* also die Berechnung des zukünftigen Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen möglich.

Hülsmann et al. (2014) gehen von einer Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs von durchschnittlich 18,6 kWh/100 km im Jahr 2010 zu 11,9

kWh/100 km im Jahr 2050 aus, was einer Senkung um den Faktor 0,64 innerhalb von 40 Jahren entspricht.

Für das Best-Case-Szenario wird in dieser Arbeit angenommen, dass der elektrische Verbrauch im Vergleich zum heutigen Stand um 10% sinkt. Daher hat der Parameter den Wert 0,9. Da private Pkw nach den aktuellen Trends aber nicht nur sparsamer, sondern auch größer und schwerer werden, und damit mehr Energie zum Antrieb brauchen, wird im Worst-Case-Szenario angenommen, dass diese gegenläufigen Effekte sich ausgleichen, und folglich der Faktor den Wert 1 annimmt.

Batteriekapazität

Die Batteriekapazität ist eines der wesentlichen Forschungsgebiete im Bereich Elektromobilität und ausschlaggebend für die Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Hohe Batteriekapazitäten reduzieren die notwendigen Ladevorgänge auf Langstreckenfahrten und tragen so zur Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei. Hülsmann et al. (2014) beziffern die Batteriekapazität eines durchschnittlichen BEVs nach heutigem Stand mit 27,9 kWh und schätzen für das Jahr 2050 einen Wert von 47,5 kWh, was einer Erhöhung um den Faktor 1,7 entspricht. In Anlehnung daran wird für die Veränderung der *Batteriekapazität* zwischen den Jahren 2018 und 2050 in dieser Arbeit der Faktor 1,5 im besten Fall angenommen. Das Worst-Case-Szenario wird mithilfe des Wertes 1,2 simuliert.

Gesamtladewirkungsgrad

Hacker et al. (2014) gehen in ihrer Studie „eMobil 2050“ von einem Ladewirkungsgrad von 90% für das Jahr 2050 aus. Dabei meinen sie die Reduktion der Anschlussleistung durch Verluste bei der Spannungsumwandlung und Erhaltungsladungen, welche ausschlaggebend für die tatsächliche Ladeleistung des Akkumulators ist. Steen u. a. (2012) ermitteln eine Ladeeffizienz von 88%, die sie nicht weiter spezifizieren. Für den *Gesamtladewirkungsgrad* (siehe Kapitel 4.1.3 („Anschlussleistung, effektive Ladeleistung und Gesamtladewirkungsgrad“)) von Best- bzw. Worst-Case-Szenario wird in dieser Arbeit ein Wert von 90% bzw. 80% angenommen.

State Of Charge (SOC, „Ladezustand“) bei langen Standzeiten

Die Verringerung der entnehmbaren Kapazität einer Batterie ohne angeschlossenen Verbraucher wird als Selbstentladung bezeichnet (Kohlmeyer et al., 2012). Für die gesamte Arbeit wird die Selbstentladung der Fahrzeugbatterien während langer Standzeiten vernachlässigt.

Energieversorgung und Netzausbau

Die Integration von Ladeinfrastruktur in das Verteilnetz setzt eine entsprechende Energieversorgung voraus. Das ungesteuerte und im kritischen Fall gleichzeitige Laden von Elektrofahrzeugen kann einen starken Einschnitt in die Energieversorgung bedeuten. Zum Einen können Lastspitzen entstehen, welche zu starken Spannungsschwankungen führen (Nobis und Fischhaber, 2015). Zum Anderen kann es zu Schiefasten im Netz kommen (NPE, 2015).

Für diese Arbeit wird unterstellt, dass stets ausreichend Energie zum Laden der Elektrofahrzeuge vorhanden ist. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 notwendige Veränderungen für die Vorbereitung auf die Elektromobilität getroffen werden und eine entsprechende Umsetzung des Netzausbaus erfolgt. Diese werden für die Kalkulation der Höhe der Gesamtinvestitionen für Ladeinfrastruktur in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Außerdem wird die Annahme getroffen, dass ein entsprechender Stromanschluss für die Installation von Ladesäulen an jedem Standort vorhanden ist und die Investitionen für den Netzanschluss (siehe Kapitel 4.1.4 Abschnitt „Sonstige Investitionen“) somit lediglich die Aufwendungen für den elektrischen Anschluss der Ladesäule beinhalten.

Bauliche Maßnahmen

Grundsätzlich wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass in jedem Bereich genügend Platz, wie beispielsweise ausreichend Abstand zu Fahrrad- oder Fußwegen, für den Aufbau von Ladeinfrastruktur vorhanden ist.

5.1.3. Ökonomische und politische Entwicklungen

Degression der Investitionshöhen für Ladesäulen

In Kapitel 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) wurden die aktuellen Zahlen für die Höhe der Investitionen für Ladeinfrastruktur vorgestellt. Diese bilden die Grundlage für die Berechnung der Investitionshöhen für die

verschiedenen Ladesäulentypen im Jahr 2050. Dabei wird angenommen, dass die Preise für Hardware aufgrund von Skaleneffekten bei stark steigenden Stückzahlen in den kommenden Jahren sinken werden, während dieser Effekt bei den „Sonstigen Investitionen“ nicht zu erwarten ist und die Höhe der Investitionen hierfür auf dem heutigen Niveau bleibt.

Für die Verringerung der Hardwareinvestitionen wird zur Berechnung in dieser Arbeit eine Exponentialfunktion mit der Form $K(t_2) = K(t_1) * e^{-x*(t_2-t_1)}$ angenommen, welche in diesem Fall der Rechnung

$$\text{Hardwareinvestitionen}(t_2) = \text{Hardwareinvestitionen}(t_1) * e^{-x*(t_2-t_1)}$$

entspricht. Dabei wird für t_1 die Mitte des Jahres 2018, also der Wert 2018,5, und für t_2 der Anfang des Jahres 2050 eingesetzt. Die Hardwarekosten von Mitte 2018 für den jeweiligen Ladesäulentyp können dabei den Analysen aus Kapitel 4 entnommen werden. Entscheidend für die Stärke der Degression und somit für die Höhe der Investitionen im Jahr 2050 ist der Wert des Faktors x . Zur Ermittlung dieses Wertes wurde in dieser Arbeit auf die Annahmen der NPE (2015) zurückgegriffen. Wie schon in Kapitel 4.1.4 (Abschnitt „Investition in Hardware“) erörtert, werden hier Zahlen für die Netto-Kosten für Ladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich im Jahr 2015 und Prognosen für das Jahr 2020 vorgestellt. Nach Anwendung der obigen Formel auf diese Werte kann je nach Ladesäulentyp ein Degressionsfaktor zwischen 0,044 und 0,06 festgestellt werden. Je größer dieser Wert, desto stärker die Degression und umso geringer die daraus ermittelte Höhe der Investitionen.

Für die Simulation ist es möglich, den *Degressionsfaktor* x für jeden der sechs Anforderungsbereiche aus Kapitel 4 separat oder pauschal festzulegen. Für das Best-Case-Szenario wird dieser Wert pauschal mit 0,045 definiert. Dafür kann an dieser Stelle zur Einschätzung der Degression vorweggenommen werden, dass die Höhe der Hardwareinvestitionen für eine 3,7 kW-Ladesäule im privaten Bereich im besten Fall von den in Kapitel 4.2.3 (Abschnitt „Investition in Hardware“) vorgestellten 733,33 € auf 177,70 € für das Jahr 2050 fällt, wie die folgende Abbildung zeigt.

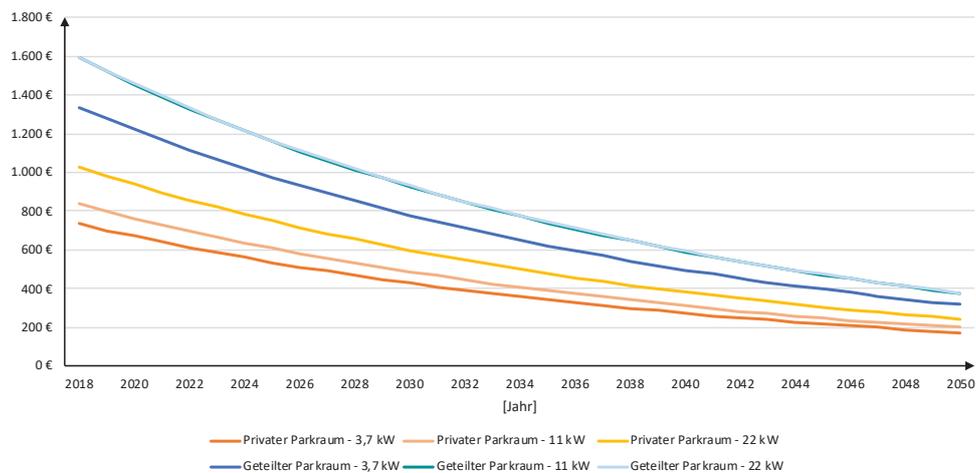


Abbildung 3: Investitionen in Hardware (private Bereiche) - Best-Case-Szenario

Für das Worst-Case-Szenario wird 0,038 als Degressionsfaktor angenommen, wodurch der Preis der genannten Ladesäule im Jahr 2050 bei 221,54 € liegt (siehe Abbildung 4).

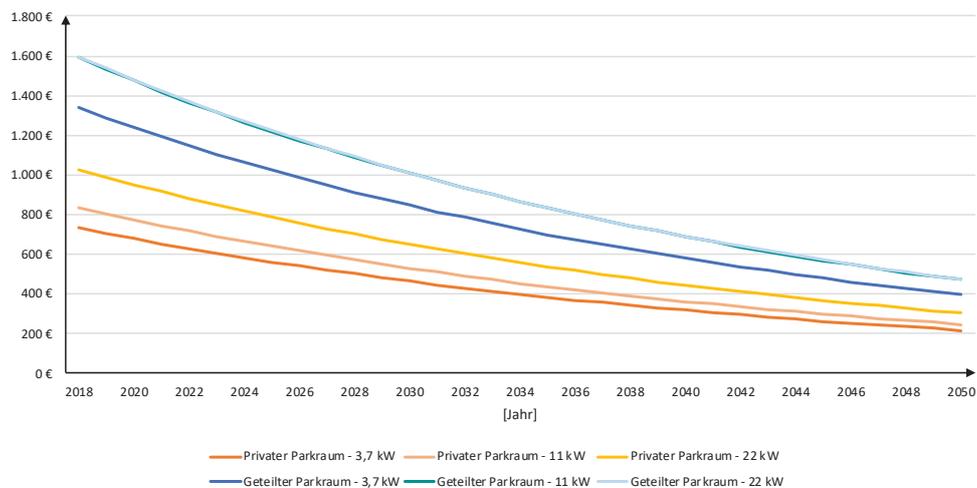


Abbildung 4: Investitionen in Hardware (private Bereiche) - Worst-Case-Szenario

Anbieter von Ladeinfrastruktur und Gebühren für die Nutzung

Die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur bringt wesentliche Veränderungen in der Wertschöpfungskette der Energieversorgung mit sich (Proff et al., 2012). In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Ladesäulen im häuslichen Bereich (*Privater* und *Geteilter Parkraum*) vom Fahrzeugnutzer käuflich erworben werden. Die Höhe der Investitionen für die Ladesäule eines Fahrzeugs entspricht also dem durch die Berechnungen im vorherigen Abschnitt ermittelten Betrag. Wie in Kapitel 4.4 („Halb-öffentlicher Bereich: *Arbeitgeber*“) erläutert, wird für diese Arbeit außerdem die Annahme getroffen, dass Arbeitgeber und Hotels für die Ladeinfrastruktur auf ihren Parkplätzen aufkommen und demnach für den Einzelnen keine direkten Kosten für deren Nutzung entstehen.

Im öffentlichen *Nah-* und *Fernverkehrsraum* und an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* ist zunächst unklar, wer in den Aufbau von Ladeinfrastruktur investiert. Denkbare Akteure wären an dieser Stelle Bund, Länder und Kommunen sowie Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreiber oder Drittanbieter. Hacker et al. (2014) gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2050 die Verkehrsinfrastruktur vollständig von Nutzern finanziert wird. In Anlehnung daran wird in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass es schlussendlich unwesentlich ist, welche Institution die Infrastruktur bereitstellt, da die dafür notwendigen Investitionen ohnehin über Gebühren auf die Nutzer entsprechend ihrer Inanspruchnahme der Ladesäulen umgelegt werden. Dabei wird zur besseren Vergleichbarkeit für beide Entwicklungsszenarien von einer *Amortisationszeit* der Investitionen von 10 Jahren ausgegangen. Diese ist im MATLAB Programm für weitere Simulationen flexibel einstellbar.

An dieser Stelle sei außerdem darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Arbeit lediglich die Höhe der Investitionen in die Infrastruktur berechnet werden. Kosten für beispielsweise den zum Laden zur Verfügung gestellten Strom oder die Wartung der Infrastruktur werden nicht berücksichtigt.

Veränderungen der Rechtslage

Wie schon im Kapitel 4.3 erläutert, sind für den Aufbau von Ladeinfrastruktur im *Geteilten Parkraum* Anpassungen im deutschen Miet- und Eigentumsrecht erforderlich. Proff et al. (2012) weisen außerdem daraufhin, dass ebenfalls Veränderungen des Denkmalschutzes im Baurecht notwendig sind. Für

diese Arbeit wird davon ausgegangen, dass alle notwendigen Anpassungen der Gesetzeslage bis zum Jahr 2050 umgesetzt sind.

5.2. Analyse und Auswertung der Mobilitätsdaten

Auf Basis der Mobilitätsdaten des Deutschen Mobilitätspanels (Kapitel 2.1), der in Kapitel 3 („Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw“) und 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) erarbeiteten Grundlagen und der in 5.1 getroffenen Annahmen kann das MATLAB Programm des IIP für eine Simulation der Ladeinfrastruktur im Jahr 2050 angepasst (Kapitel 5.2.1 und 5.2.2) und neue Implementierungen (Kapitel 5.2.3) hinzugefügt werden. Anschließend ist eine Auswertung mithilfe von Microsoft Excel möglich (Kapitel 5.2.4), aus welcher zusammen mit den Hochrechnungen für die Ladeinfrastruktur im *Fernverkehrsraum* (Kapitel 5.2.5) die Anzahl der Ladepunkte im Jahr 2050 und die entsprechenden Investitionshöhen hervorgehen (Kapitel 5.2.6). Unter Einbeziehung der Ausnutzung der Ladesäulen wird im Anschluss eine Berechnung der Nutzungsgebühren für den einzelnen Nutzer durchgeführt (Kapitel 5.2.7).

5.2.1. Anpassung der Datenaufbereitung im MATLAB Programm

Zur Vorbereitung auf die Modifizierung und Anpassung der Ladeprofile im MATLAB Programm (Kapitel 5.2.2 und 5.2.3), welche das Kernstück dieser Arbeit bilden, sind einige Veränderungen der vorhandenen Implementierungen im MATLAB Programm (Module 1 bis 3) notwendig. Die wichtigsten werden im Folgenden kurz erörtert. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die Module des in dieser Arbeit auf Basis der bestehenden Module entwickelten MATLAB Programms.

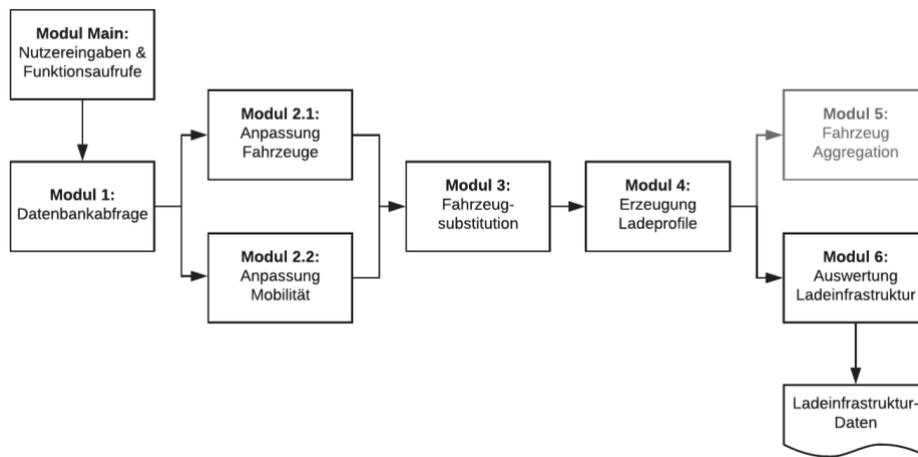


Abbildung 5: Übersicht über die Module des in dieser Arbeit auf Basis der bestehenden Module entwickelten MATLAB Programms (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Heinz, 2018))¹

Modul Main

Wie in 2.2 („Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge“) erläutert, koordiniert das Main Modul die Aufrufe der anderen Module und übergibt dabei notwendige Variablen für den Funktionsaufruf. Der Block Modul 2_1 muss dabei um die Eingabemöglichkeit der Faktoren zur Berechnung der Veränderung der Anzahl der Fahrzeuge je nach Wohnsituation der Nutzer im Jahr 2050 (siehe Abschnitt „Gesamtzahl der Fahrzeuge“ in Kapitel 5.1.1) ergänzt werden.

Im Block Modul 3 sind mehrere Anpassungen notwendig. Zum Einen wird der Wert des Realverbrauchs (`c_realverb`) an die im Abschnitt „Realverbrauch der Elektrofahrzeuge in der IIP-Datenbank versus

¹Modul 2_2 wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht verändert, wird aber zum Programmablauf benötigt, und ist daher leicht ausgegraut. Modul 5 wurde auskommentiert. Für die Simulation von Ladeinfrastruktur waren die Erstellung eines 6. Moduls und Anpassungen in den übrigen Modulen erforderlich.

Herstellerangaben“ getroffenen Annahmen je nach Szenario angeglichen. Zum Anderen wird der Faktor `phev_batterie` auf 1 gesetzt, sodass die Batteriekapazität der im MATLAB Programm als PHEV modellierten Fahrzeuge der von reinen BEVs entspricht. Auf diese Weise werden alle Fahrzeuge mit den Konfigurationen eines BEVs simuliert, wobei davon ausgegangen wird, dass bei Reichweitenproblemen nachgeladen wird. Die notwendige Zeit zum Laden wird dabei für die Modellierung der Fahrzeugprofile vernachlässigt (siehe auch „Auswahl der Ladestrategie: Maximal- und Minimalstrategie“). Des Weiteren werden zwei Faktoren zur Simulation der Entwicklung von Batteriekapazität und elektrischem Verbrauch eingeführt und mit den für Best- und Worst-Case-Szenario angenommenen Werten belegt (siehe „Batteriekapazität“ und „Elektrischer Verbrauch“).

Zur Abbildung der in Kapitel 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) festgelegten Ladeleistungen werden im Block `Modul 4` einige Änderungen vorgenommen. Als Erstes wird ein Array `ladenB` eingeführt, welches für jeden Standort aus den MOP-Daten mithilfe einer Booleschen Variable speichert, ob das Laden an diesem Ort prinzipiell möglich ist. Ebenfalls neu ist die Variable `ladenW`, welche den Gesamtladewirkungsgrad je nach Szenario enthält (siehe Kapitel 5.1.2 „Gesamtladewirkungsgrad“). Die Angabe der Ladeleistung wird in das Modul `mod4_Ladeprofile` ausgegliedert.

Der Block `Modul 5` wird auskommentiert, da das Modul `mod5_Aggregation` für diese Arbeit nicht relevant und der Funktionsaufruf überflüssig ist.

Neu ist der Block `Modul 6`, welcher den Aufruf der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Funktion `mod6_Auswertung` enthält.

Modul `mod1_DB`

Wie schon im Kapitel 3.2.1 (Abschnitt „Parksituation“) vorweggenommen, wird die SQL-Abfrage auf die Daten des MOP in der Datenbank des IIP in `mod1_DB` angepasst, sodass nun zusätzlich auch die Anzahl der vorhandenen privaten Parkplätze je Haushalt vorliegt.

Modul mod2_1_Fzganpassung

Im Block Nutzerverhalten des Moduls mod2_1_Fzganpassung wird zur Berücksichtigung der Veränderungen der Fahrzeuganzahl je nach Wohnlage und der Gesamtanzahl bis zum Jahr 2050 mit den Eingaben aus Main (siehe „Modul Main“) die Funktion faktor_gew implementiert, welche den Faktor zur Anpassung des in den MOP-Daten für jeden Haushalt gegebenen Gewichtungsfaktors (tblFzg.GEWHHWO) für jedes Fahrzeug bestimmt. Im Anschluss wird dieser Gewichtungsfaktor mit faktor_gew multipliziert, sodass tblFzg.GEWHHWO im weiteren Verlauf für jedes Fahrzeug den Annahmen aus Kapitel 5.1.1 (Abschnitt „Gesamtzahl der Fahrzeuge“) entspricht. Die Gesamtzahl der Fahrzeuge je nach Szenario ergibt sich durch die Summe tblFzg.GEWHHWO über alle Fahrzeuge in der Tabelle tblFzg hinweg.

Neu eingeführt wird mit dieser Arbeit der Block Zuweisung Pkw zu Stellplatz. Hierin wird in Abhängigkeit der im Haushalt vorhandenen Anzahl an Fahrzeugen und Stellplätzen eine Zuweisung der vorhandenen Stellplätze zu Fahrzeugen nach absteigender Fahrleistung der Fahrzeuge im Haushalt durchgeführt (tblFzg.PP = 1 für Fahrzeuge mit Stellplatz bzw. tblFzg.PP = 0 für Fahrzeuge ohne Stellplatz).

Modul mod2_2_Wegeanpassung

In diesem Modul werden keine Änderungen vorgenommen.

Modul mod3_Fzgsubstitution

Dieses Modul wird um den Block Tägl. Energiebedarf und Ladeklassen ergänzt. Darin wird der durchschnittliche tägliche Energiebedarf aller Fahrzeuge mit zugewiesenem Stellplatz auf Basis der Schätzungen der befragten Fahrzeugnutzer für die im Befragungszeitraum gefahrene Gesamtstrecke für jedes Fahrzeug mit eigenem Parkplatz ermittelt (Variable tblFzg.KMpTAGPP, in Abgrenzung zu tblFzg.KMpTAG für alle Fahrzeuge). Auf diese Weise kann der durchschnittliche tägliche Energiebedarf für jedes dieser Fahrzeuge berechnet werden (tblFzg.elVERBpTagPP).

In den Kapiteln 4.2.1 und 4.3.1 wurde für die Simulation des *Privaten* und *Geteilten Parkraums* im Jahr 2050 festgehalten, dass 33% aller Stellplätze mit einer Ladeleistung von 3,7 kW ausgestattet sind. Die Hälfte der Ladesäulen bietet

11 kW, während an den restlichen 17% der Parkplätze mit 22 kW geladen werden kann. Für die eindeutige Zuteilung dieser Ladeleistungen zu Fahrzeugen mit eigenem Stellplatz, werden die Fahrzeuge auf Basis des oben vorgestellten Energiebedarfs in Ladeklassen eingeteilt. Hierzu wird zunächst das 33%-Perzentil des täglichen Energiebedarfs aller Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz ermittelt. Analog erfolgt die Berechnung des 83%-Perzentils ($33\% + 50\% = 83\%$). Diese Perzentile bilden die Grenzen für die Einteilung der Ladeleistungen in Abhängigkeit des Energiebedarfs eines Fahrzeugs. In einer zusätzlichen Spalte LADEKLASSE in `tblFzg` wird schließlich die am Stellplatz vorhandene Ladeleistung für jedes Fahrzeug festgehalten, welche später im Modul `mod4_Ladeprofile` verwendet wird. Befindet sich der Energiebedarf des Fahrzeugs im unteren Drittel aller Fahrzeuge, wird eine Ladeleistung von 3,7 kW eingetragen. Bewegt sich der Energiebedarf zwischen den Werten der beiden Perzentile, wird dem Fahrzeug eine Ladeleistung von 11 kW zugeteilt. Ist der Energiebedarf größer als das 83%-Perzentil, wird die Ladesäule des Fahrzeugs in der Simulation mit 22 kW ausgestattet. Somit laden letztlich Fahrzeuge, die wenig genutzt werden, mit einer geringen Ladeleistung, während Vielfahrern Ladesäulen mit hohen Ladeleistungen zur Verfügung stehen. Ist kein privater Stellplatz vorhanden, wird für die Ladeklasse der Wert 0 eingetragen.

5.2.2. Modifizierung der Ladeprofile im MATLAB Programm

Wie in Kapitel 2.2 („Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge“) erklärt, werden im vierten Modul des MATLAB Programms die Mobilitäts- und Ladeprofile für die Fahrzeuge der MOP-Befragung erstellt. Für die Simulation der Ladeinfrastruktur im Jahr 2050 nach den Spezifikationen in dieser Arbeit waren hier grundlegende Änderungen notwendig. Diese werden im Folgenden erläutert. An dieser Stelle sei festgehalten, dass Heinz die Fahrzeugprofile für eine Intervallgröße von 10 Minuten erstellt (Heinz, 2018). Dieser Wert wird für die vorliegende Arbeit übernommen.

Ermittlung der verfügbaren Ladeleistung an der Ladestation

Das Modul `mod4_Ladeprofile` wird in dieser Arbeit um die aus `Main` ausgegliederte Festlegung der Ladeleistung ergänzt. Die verfügbare Anschlussleistung einer Ladesäule wird darin zur Ermittlung der tatsächlichen

Ladeleistung mit dem neu eingeführten Gesamtladewirkungsgrad `ladenW` (siehe Abschnitt „Modul Main“) multipliziert. Daraus ergibt sich die tatsächliche, verfügbare Ladeleistung, mit der ein Fahrzeug geladen werden kann.

Das für diese Arbeit implementierte Array `ladenL` beinhaltet die Funktionen zur Ermittlung der verfügbaren Ladeleistung in Abhängigkeit des Standortes eines Fahrzeugs gemäß der für die verschiedenen Anforderungsbereiche vorgestellten Ladeverfahren. Die Höhe der Ladeleistung für die Standortcodierungen 1,3,4,5 und 9 („Arbeit“, „Ausbildungsstätte“, „Einkauf“, „Freizeit“ und „Hotel“) wird mithilfe einer Zufallsfunktion berechnet. Die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Ladeleistungen ergeben sich dabei aus den in Kapitel 4 („Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) festgehaltenen Anteilen für die unterschiedlichen Ladeleistungen¹. Für den Standort 7 werden Fahrzeuge mit und ohne eigenem Stellplatz unterschieden. Ist kein eigener Stellplatz vorhanden, so richtet sich die Ladeleistung nach dem spezifizierten Ladeverfahren für den *Nahverkehrsraum* und wird ebenfalls per Zufallsfunktion berechnet. Fahrzeugen mit eigenem Stellplatz wird die zuvor eindeutig ermittelte, vorhandene Anschlussleistung (siehe Modul `mod3_Fzgsubstitution`) fix zugewiesen.

Die von Heinz (2018) erstellten Mobilitätsprofile basieren auf den Wegedaten der MOP-Erhebung (siehe auch Kapitel 2.2 „Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge“). Mithilfe der Start- und Zielstandorte jedes Weges kann durch Aufrufen von `ladenL` im Block Teil 1: Berechne verbrauchte Energie durch gefahrene Strecken festgelegt werden, welche Anschlussleistung vor und nach einer Fahrt verfügbar ist. Dieser Wert wird schließlich für jeden Weg in `tblWege.LADELEISTUNG` gespeichert.

Im Block Teil 2: Berechne Energieverbrauch und verfügbare Energie je Intervall wird aus den Wegen in `tblWege` für jedes Fahrzeug ein Fahrzeugprofil (`profileBEV`) erstellt, welches die Wege

¹ Ladesäulen am Standort 1 („Arbeit“) sind bspw. in je 50% der Fälle mit einer Anschlussleistung von 11 kW bzw. 22 kW ausgestattet. Mithilfe der MATLAB-Funktion `randsrc(1,1,[11,22;0.5,0.5])` wird einem Weg, der am Standort 1 endet, mit einer Wahrscheinlichkeit von je 50% eine Anschlussleistung von 11 kW oder 22 kW zugeordnet.

dieses Fahrzeugs protokolliert und unter Berücksichtigung der Intervallgröße in Main in einer Tabelle aufschlüsselt (siehe Kapitel 2.2 Abschnitt „Berechnung der Ladeprofile“). Dabei wird u.a. jedem Intervall die verfügbare Anschlussleistung an der Ladestation des aktuellen Standortes des Fahrzeugs zugewiesen ($\max. \text{verfügbare Ladeleistung}_{\text{Ladestation}}$). Aufgrund der zuvor vorgenommenen Änderungen kann dies nun dynamisch geschehen, was die Abbildung der komplexen Struktur der verschiedenen Ladeverfahren der Anforderungsbereiche ermöglicht.

Auswahl der Ladestrategie: Maximal- und Minimalstrategie

Im dritten Block des Moduls führt Heinz (2018), wie in Kapitel 2.2 („Das MATLAB Programm des IIP zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge“) erläutert, eine Maximal- und eine Minimalstrategie zum Laden von Elektrofahrzeugen ein. In der Maximalstrategie lädt ein Fahrzeug, sobald es am Zielort ankommt, während es in der Minimalstrategie so spät wie möglich vor der nächsten Abfahrt lädt.

Da für diese Arbeit prinzipiell unerheblich ist, wann ein Fahrzeug innerhalb seiner Standzeit lädt, sondern für die Simulation der Ladeinfrastruktur analysiert werden muss, ob es lädt und somit die Verfügbarkeit einer Ladesäule voraussetzt, ist die Art der Ladestrategie an dieser Stelle nebensächlich. Daher wird zur Modifizierung die weniger komplexe Maximalstrategie ausgewählt und im Folgenden angepasst.¹

Annahmen für Ladevorgänge

Für die Erstellung der Ladeprofile in Teil 3: Ergänze Ladestrategien (siehe Abschnitt „Berechnung der Ladeprofile“ in Kapitel 2.2) werden in dieser Arbeit für eine sinnvolle Simulation der Ladeinfrastruktur verschiedene Annahmen getroffen, unter welchen Bedingungen ein Ladevorgang stattfinden soll. Daher sind Anpassungen des Blocks Maximalstrategie (BEV) nötig. Darin werden die zuvor erstellten Mobilitätsprotokolle für jedes

¹ Heinz (2018) zeigt in seiner Arbeit, dass das Lastverschiebepotential zur Vermeidung von Netzengpässen in Minimal- und Maximalstrategie ähnlich hoch ist. Insbesondere beim Laden nachts zu Hause, besteht großes Potential. Für die Anzahl der Ladepunkt hat dies aber keinerlei Bedeutung, da Nutzer nachts nicht umparken wird und die Ladesäule ohnehin die ganze Nacht über belegt ist.

Fahrzeug u.a. um die tatsächliche Ladeleistung (Variable `Ladeleistung_Maximalstrategie` in Abgrenzung zu `max.verfügbare Ladeleistung_Ladestation`) ergänzt.

Während Heinz (2018) hierbei die verfügbare Ladeleistung unter Berücksichtigung des Ladezustands der Batterie (siehe 4.1.3 „Anschlussleistung, effektive Ladeleistung und Gesamtladewirkungsgrad“) direkt auf die tatsächliche Ladeleistung überträgt und ein Fahrzeug lädt, sobald der SOC geringer als 99,9% ist, wird die vorhandene Anschlussleistung in dieser Arbeit außerdem mit dem Gesamtladewirkungsgrad multipliziert und die folgende, grundlegende Annahme getroffen:

1. *Fahrzeuge werden nach einem Ladevorgang nicht umgeparkt, um Ladesäulen freizugeben.*

Um das Mobilitätsverhalten der Befragten nicht zu beeinflussen, wird davon ausgegangen, dass kein Nutzer seine Aktivitäten (wie z.B. Meetings beim Arbeitgeber, Tennistraining im Bereich Freizeit, Schlaf) unterbricht, um sein zuvor ladendes Fahrzeug nach Abschluss eines Ladevorgangs umzuparken. Somit nehmen sowohl ladende als auch ehemals ladende und danach nur parkende Fahrzeuge Parkplätze mit Ladesäulen ein, welche dann als belegt gelten.¹ Dadurch erhöht sich insbesondere bei langen Standzeiten die Anzahl notwendiger Ladesäulen. In einer zusätzlichen Spalte `Ladeparken` in den Mobilitätsprotokollen (`profileBEV`) der Fahrzeuge wird für jedes Intervall gespeichert, ob ein Fahrzeug gerade einen Ladepunkt belegt (`Ladeparken = 1`) oder nicht (`Ladeparken = 0`).

Zur Reduktion der notwendigen Ladeinfrastruktur werden daher basierend auf dieser Annahme bei der Ermittlung der tatsächlichen Ladeleistung zusätzlich folgende Bedingungen geprüft:

¹ Die zugehörigen Intervalle in `profileBEV` heißen „aktiv“ (siehe Kapitel 5.2.7 „Abschätzung der Nutzungsgebühren für den einzelnen Nutzer in Microsoft Excel“).

2. *Der Ladevorgang soll zur Vermeidung vieler kurzer Ladevorgänge nur aktiviert werden, wenn der SOC des Fahrzeugs beim Ankommen am Zielort weniger als 80% beträgt.*

Da der SOC eines Fahrzeugs prinzipiell nach jeder Fahrt bei weniger als 99,9% liegt, kann beobachtet werden, dass Fahrzeuge grundsätzlich immer nach Beenden einer Fahrt geladen werden, sofern dies die Infrastruktur am jeweiligen Standort ermöglicht. Dabei handelt es sich meist um sehr kurze Ladevorgänge, da der zuvor zurückgelegte Weg nur wenig Energie beanspruchte. Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahme hat dies insbesondere für die Standorte „Arbeit“ und „Zu Hause“ zur Folge, dass Ladesäulen sehr lang belegt sind, ohne dass an ihnen geladen wird. Um diese unnötige Blockierung zu umgehen, werden kurze Ladevorgänge durch Setzen der neu eingeführten Variable `ladevorgang` auf 0 (falls SOC größer 80%) unterbunden. Ausgenommen hiervon sind Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz beim Ankommen am Standort 7 („Zu Hause“).

3. *Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz sollen nur beim Arbeitgeber laden, falls ihr SOC beim Ankommen geringer als 50% ist.*

Auf diese Weise soll die Anzahl der notwendigen Ladesäulen beim *Arbeitgeber* so gering wie möglich gehalten und die Ausnutzung von privaten Ladesäulen gesteigert werden. Daher wird die `Ladeleistung_Maximalstrategie` für alle Intervalle, in denen das Fahrzeug bei den Standorten 1 oder 3 („Arbeit“ oder „Ausbildungsstätte“) ankommt, dort steht oder von dort wegfährt auf den Wert 0 gesetzt, falls der SOC in dem jeweiligen Intervall größer als 50% ist.

4. *Fahrzeuge ohne eigenen Stellplatz sollen so wenig wie möglich im Nahverkehrsraum laden, wenn die nächste Fahrt zum Arbeitgeber geht.¹*

Dies erhöht die Ausnutzung der Ladesäulen beim *Arbeitgeber* und senkt die notwendige Anzahl an Ladesäulen im *Nahverkehrsraum*, da hier sonst insbesondere nachts Fahrzeuge an Ladesäulen parken ohne zu laden.

¹ Die Auswirkungen dieser Restriktion werden in Tabelle 5 sichtbar: Während das Maximum der sonntags am Standort „Zu Hause“ ohne Parkplatz ladeparkenden Fahrzeuge ist sehr gering, während diese Zahl freitags sehr hoch ist. Diese Verteilung stellte sich nach der Implementierung von Bedingung 4 ein. Fahrzeuge ohne eigenen Stellplatz müssen am Freitag beim Arbeitgeber fürs Wochenende „vorladen“, während sie sonntags nicht mehr laden, da die nächste Fahrt der Weg zum Arbeitgeber am Montag ist.

Hierfür wird ermittelt, ob ein Fahrzeug ohne Stellplatz mit einem SOC größer 50% am Standort 7 („Zu Hause“) ankommt, die nächste Fahrt im Fahrzeugprofil zu den Standorten 1 oder 3 („Arbeit“ oder „Ausbildungsstätte“) geht, der SOC durch den Energieverbrauch auf dieser Fahrt nicht unter 20% sinken wird und durch die Standzeit beim *Arbeitgeber* wieder auf mindestens 80% steigen kann. Ist dies der Fall, wird die `Ladeleistung_Maximalstrategie` auf 0 gesetzt.

Die Modifizierungen im Block `Maximalstrategie` (PHEV) verlaufen analog, werden aber nur für die Lauffähigkeit des Programms benötigt und nicht ausgewertet.

5.2.3. Auswertung der Ladeprofile im MATLAB Programm

Zur Auswertung der zuvor angepassten Ladeprofile und Durchführung weiterer Analysen wird im Zuge dieser Arbeit das Modul `6 mod6_Auswertung` neu eingeführt. Hierbei wird stets die Gewichtung eines Fahrzeugs berücksichtigt, sodass die Ergebnisse die Gesamtheit der privaten Pkw in Deutschland abbilden (siehe Kapitel 5.2.1 Abschnitt „Modul `mod2_1_Fzganpassung`“).

Block 1: Anzahl der Ladepunkte im *Privaten und Geteilten Parkraum*

Im ersten Block des Moduls wird gezählt, wie viele der Fahrzeuge in `tblFzg` über einen eigenen Stellplatz verfügen. Dabei wird außerdem die Gesamtanzahl der Fahrzeuge ermittelt. Hierauf basieren die in Kapitel 3.2.1 („Parksituation“) vorweggenommenen Ergebnisse zur allgemeinen Parksituation.

Block 2: Anzahl der Ladepunkte beim *Arbeitgeber*, an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* und Ausnutzung der Ladepunkte im *Privaten und Geteilten Parkraum*

Zur Analyse der Ladeinfrastruktur werden im zweiten Block für jeden möglichen Standort drei verschiedene Zählervariablen eingeführt. Zunächst wird zur Berechnung der Anzahl der notwendigen Ladepunkte beim *Arbeitgeber*, an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* für jedes Intervall der durchschnittlichen Befragungswoche¹ gezählt, wie viele Fahrzeuge gleichzeitig einen Ladepunkt an dem jeweiligen Standort belegen (vergleiche

¹ Heinz ermittelt aus dem gesamten Befragungszeitraum für jedes Fahrzeug das Mobilitätsprofil einer durchschnittlichen Woche (siehe auch Kapitel 2.2 Abschnitt „Berechnung der Ladeprofile“).

„Annahmen für Ladevorgänge“).¹ Dies erfolgt mithilfe der Variable Ladeparken im Mobilitätsprofil der Fahrzeuge. Dabei wird für die spätere Berechnung der Nutzungsgebühren für die Standorte 4 und 5 („Einkauf“ und „Freizeit“), und bei Fahrzeugen ohne eigenen Stellplatz auch 7 („Zu Hause“), zusätzlich eine Unterscheidung zwischen Normal- und Schnellladen anhand der genutzten Ladeleistung vorgenommen. Danach wird jeweils das Maximum für jeden Wochentag ermittelt. Tabelle 5 zeigt beispielhaft für das Best-Case-Szenario, wie sich diese Maxima an den verschiedenen Standorten unterscheiden und über die Woche verändern. Zur Analyse der Ausnutzung der mit Lademöglichkeiten ausgestatteten Parkplätze und zur Vorbereitung für die Berechnung der Nutzungsgebühren an den Standorten 4, 5 und 7 wird außerdem analog der Durchschnitt jedes Wochentags erfasst.

Tabelle 5: Maximum der gleichzeitig ladeparkenden Fahrzeuge je Wochentag und Standort und Maximum und Durchschnitt einer Woche je Standort²

	"Arbeit"	"Ausbildungs- stätte"	"Einkauf"	"Freizeit"	"Zu Hause" (ohne Stellplatz - gesamt)	"Zu Hause" (ohne Stellplatz - Normalladen)	"Zu Hause" (ohne Stellplatz - Schnellladen)	"Hotel"
Montag	873.667	75.763	592.057	597.863	802.430	583.604	218.826	280.637
Dienstag	882.080	26.758	455.820	844.677	898.594	654.135	248.166	280.637
Mittwoch	957.024	10.842	315.289	703.566	609.926	444.373	257.740	334.509
Donnerstag	806.977	111.860	477.870	662.682	873.099	559.937	333.674	334.509
Freitag	1.129.810	19.372	499.104	692.887	1.343.645	909.559	456.504	452.373
Samstag	148.186	-	681.197	1.194.920	1.458.103	974.852	483.251	618.139
Sonntag	91.386	-	188.453	1.290.331	2.196.912	1.388.532	808.380	601.115
MAX	1.129.810	111.860	681.197	1.290.331	2.196.912	1.388.532	808.380	618.139
AVG	698.447	34.942	458.541	855.275	1.168.958	787.856	400.934	414.560

Zur Berechnung des Ausnutzungsfaktors der Ladepunkte selbst wird zudem gezählt, wie viele Fahrzeuge pro Intervall je Standort gleichzeitig laden (in Abgrenzung zum ladeparken wird hier geprüft, ob die Ladeleistung_Maximalstrategie größer 0 ist) und hieraus der Mittelwert für jeden Tag gebildet. Des Weiteren wird zur Berechnung der Ausnutzung der Parkplätze im *Privaten* und *Geteilten Parkraum* ein Zähler für parkende Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz am Standort 7 eingeführt, woraus auch hier der Tagesdurchschnitt ermittelt wird (AVG7mPP).

¹ Steht ein Fahrzeug innerhalb eines Intervalls an zwei verschiedenen Standorten, kann es an dieser Stelle zu Abweichungen in der Simulation kommen, da das Fahrzeug in dem Fall dem zweiten Standort zugeordnet wird, auch wenn es unter Umständen auch schon am ersten Standort geladen wurde.

² Der Standort „Zu Hause“ für Fahrzeuge mit Stellplatz (*Privater* und *Geteilter Parkraum*) wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da die Anzahl der Ladepunkte in diesen Bereichen unabhängig anders als für die Standorte der vorliegenden Tabelle über die Anzahl der Stellplätze ermittelt wird.

Block 3: Ergänze KMpTAG für Fahrzeuge ohne Tankbuch

Vorbereitend auf den vierten Block wird im dritten Block für Fahrzeuge ohne Tankbuch ($\text{tblFzg.KMpTAG}(\text{fzg}) == -10$ (Heinz, 2018)) auf Basis der in Modul 4 erstellten Mobilitätsprofile die durchschnittlichen Tageskilometer eines Fahrzeugs ermittelt. Dafür wird die in kumulierte, verbrauchte Energie einer Woche mit dem elektrischen Verbrauch des Fahrzeugs verrechnet und auf 7 Tage aufgeteilt.

Block 4: Ermittle Durchschnittskilometer aller Fahrzeuge

Auf Basis von Block 3 kann nun die durchschnittliche Tagesstrecke für private Pkw in Deutschland ermittelt werden (siehe Kapitel 3.1.1 Abschnitt „Verkehrsleistung“). Dabei wird außerdem abgefragt, ob ein Fahrzeug im Befragungszeitraum bewegt wurde, sodass zusätzlich die durchschnittliche, tägliche Verkehrsleistung der bewegten Fahrzeuge ermittelt werden kann.

Block 5: Zähle, wie oft SOC kleiner 20%

An dieser Stelle wird für jedes Fahrzeug analysiert, wie oft der SOC im Mobilitätsprofil unter 20% sinkt. Mangels zusätzlicher Informationen zur Art eines Weges in den MOP-Daten wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass dies eine Langstreckenfahrt im *Fernverkehrsraum* bedeutet, die zum Laden des Elektrofahrzeugs unterbrochen wird. Dies dient der Schätzung der Ausnutzung der Ladeinfrastruktur und der Nutzungsgebühren im Fernverkehr (siehe Kapitel 5.2.5). Dabei wird außerdem erfasst, welche Energiemenge im Fall eines notwendigen Zwischenladevorgangs zum Laden der Fahrzeugbatterie bis zu einem SOC von 70% fehlt. Auf diese Weise kann mithilfe der in Kapitel 4.7.1 getroffenen Annahme, dass an Ladestationen im Fernverkehrsbereich grundsätzlich eine Anschlussleistung von 50 kW vorhanden ist, unter Berücksichtigung des Gesamtladewirkungsgrades die Dauer des Zwischenladevorgangs geschätzt werden¹. Auf Basis dieser Wochenanalyse kann die Anzahl der Zwischenladevorgänge (problemsPerYear) und die Anzahl der Intervalle, in der die Ladeinfrastruktur genutzt wird ($\text{ladeIntervalleperYear}$), pro Jahr bestimmt werden.

¹ An dieser Stelle wird die von Heinz durchgeführte Modellierung der effektiven Ladeleistung in Abhängigkeit des SOC nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 4.1.3 „Anschlussleistung, effektive Ladeleistung und Gesamtladewirkungsgrad“).

5.2.4. Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur auf Basis der MOP-Daten in Microsoft Excel

Von den im vorherigen Kapitel unter Block 2 vorgestellten Mittelwerten und Maxima ausgehend werden in der Auswertung mithilfe von Microsoft Excel die jeweiligen Mittelwerte bzw. Maxima einer Woche berechnet (siehe Tabelle 5). Für die Standorte 1,3,4,5 und 9 („Arbeit“, „Ausbildungsstätte“, „Einkauf“, „Freizeit“ und „Hotel“) kann die Anzahl der notwendigen Ladepunkte durch die maximal gleichzeitig „ladeparkenden“ Fahrzeuge ermittelt werden. Die Anzahl der durchschnittlich gleichzeitig genutzten Ladepunkte ergibt sich durch den Mittelwert der pro Intervall ladenden Fahrzeuge. Die Anzahl der durchschnittlich gleichzeitig genutzten und mit Lademöglichkeiten ausgestatteten Parkplätze ergibt sich durch den Mittelwert der ladeparkenden Fahrzeuge pro Intervall.

Unter Angabe des Anteils der Parkplätze im *Privaten Raum* an der Gesamtzahl der Parkplätze von Haushalten (siehe Kapitel 5.1.1) und mithilfe der Variable $AVG7_{mPP}$ sind diese Berechnungen auch für den Standort 7 („Zu Hause“) möglich. Hier wird unterschieden zwischen dem *Privaten* und *Geteilten Parkraum* und dem *Nahverkehrsraum*.

An den Standorten 4 und 5 sowie am Standort 7 für Fahrzeuge ohne eigenen Parkplatz wird bei der Ermittlung der Werte zusätzlich zwischen Normal- und Schnellladen unterschieden, um später die Höhe der Nutzungsgebühren in Abhängigkeit der genutzten Ladeleistung berechnen zu können.

5.2.5. Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur im Fernverkehrsraum in Microsoft Excel

Die Berechnung der Ladeinfrastruktur im *Fernverkehrsraum* erfolgt auf Basis der in Kapitel 2.3 vorgestellten Daten.

Datengrundlage

Reuter-Oppermann et al. (2017) geben die Anzahl der Ladepunkte an Autobahnen bei einer Million Elektrofahrzeugen mit 6.560 an. Für sieben Millionen BEVs gehen sie von 10.282 Ladepunkten im Fernverkehr aus. Zur Hochrechnung dieser Zahlen für die Gesamtheit aller Fahrzeuge (100% BEV) wird in dieser Arbeit zur Modellierung des Wachstums eine Exponentialfunktion mit beschränktem Wachstum der Form $B(t) = S - S * \exp(-k * t)$ mit S als oberer Schranke und Wachstumsfaktor k zugrunde gelegt. Angepasst auf den

vorliegenden Fall berechnet sich die Anzahl der Ladepunkte in Abhängigkeit der Anzahl an Elektrofahrzeugen wie folgt:

$$\text{Anzahl Ladepunkte (Anzahl BEV)} = S - S * \exp(-k * \text{Anzahl BEV})$$

Durch Einsetzen der beiden oben genannten Werte und Auflösen des Gleichungssystems kann somit die obere Schranke S und der Wachstumsfaktor k berechnet werden. Die obere Schranke S entspricht dabei schon der Anzahl der Ladepunkte für 100% BEV ($\text{Anzahl Ladepunkte (Anzahl BEV}_{100\% \text{ BEV}}) = S$). Für die 41.747.231 privaten Pkw nach MOP¹ entsprechen dies 10.290,5 Schnellladesäulen.

Die Berechnungen von Graf (2017) simulieren bei vollständiger Substitution der heutigen Anzahl der privaten Pkw durch Elektrofahrzeuge 37.692 Schnellladesäulen entlang deutscher Autobahnen.

Annahmen für die Simulation

Für die Simulation der Ladeinfrastruktur im Fernverkehrsbereich wird in dieser Arbeit daher zwischen Best- und Worst-Case-Szenario unterschieden. Im besten Fall wird angenommen, dass 20.000 Ladepunkte notwendig sind. Für das Worst-Case-Szenario wird von 35.000 Lademöglichkeiten ausgegangen. Diese Variable gehört somit zu den variablen Parametern, die für die Auswertung in Microsoft Excel angepasst werden müssen (*Anzahl Ladepunkte im Fernverkehrsraum*).

Für die Erstellung der Ladeprofile kann die so ermittelte Infrastruktur im Fernverkehr allerdings nicht berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Nutzungsgebühren an Schnellladesäulen entlang der Autobahnen wird zwar die Ladedauer eines Zwischenladevorgangs geschätzt, die Mobilitätsprofile von Fahrzeugen, die auf Langstreckenfahrten zwischenladen müssten, werden allerdings nicht dementsprechend verändert. Sie basieren also weiterhin auf den Wegedaten des MOP und berücksichtigen keine Pause zum Laden im Fernverkehr.

¹ Hochrechnung aus MOP-Befragung Jahrgang 2015/2016

5.2.6. Berechnung der Ausnutzung der Ladeinfrastruktur und Kalkulation der Investitionshöhen in Microsoft Excel

Die wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben ermittelten Ladepunkte je Standort können nun auf die in Kapitel 4 vorgestellten Bereiche (siehe „Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur“) aufgeteilt werden. Nach den unter „Ladeverfahren“ in den Unterkapiteln vorgestellten anteiligen Ladeleistungen kann nun simuliert werden, wie viele Ladepunkte je Ladesäulentyp für die für 100% BEVs benötigte Ladeinfrastruktur vorhanden sein müssen¹. Unter Hinzunahme der ermittelten Höhe der Investitionen (siehe Kapitel 5.1.3 Abschnitt „Degression der Investitionshöhen für Ladesäulen“) je Ladesäulentyp für das Jahr 2050 kann somit die Gesamtsumme der Investitionen je Ladesäulentyp innerhalb eines Bereiches und insgesamt je Bereich kalkuliert werden.

Zur Berechnung der Ausnutzung der Ladeinfrastruktur wird zum Einen der Quotient aus der Anzahl der durchschnittlich gleichzeitig genutzten Ladepunkte (siehe Kapitel 5.2.4 „Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur auf Basis der MOP-Daten in Microsoft Excel“) und der Anzahl der Ladepunkte pro Bereich gebildet. Dies ergibt die Ausnutzung der Ladepunkte je Bereich. Der Quotient aus der Anzahl der durchschnittlich gleichzeitig belegten, mit Lademöglichkeiten ausgestatteten Parkplätze und der Anzahl der Ladepunkte beschreibt für jeden Bereich, zu wieviel Prozent ein Parkplatz mit zugehöriger Ladesäule belegt ist, berücksichtigt also „ladeparkende“ Fahrzeuge.

5.2.7. Abschätzung der Nutzungsgebühren für den einzelnen Nutzer in Microsoft Excel

Die Höhe der Investitionen pro Nutzer im *Privaten* und *Geteilten Parkraum* ergibt sich direkt aus der Anzahl der Fahrzeuge eines Nutzers, welche über einen eigenen Parkplatz verfügen, multipliziert mit den für das Jahr 2050 angenommenen Preisen pro Ladesäule je nach Bereich und Ladeverfahren² (siehe

¹ Beispiel: Im *Privaten Parkraum* bedarf es X Ladepunkte, welche zu 33%, 50% bzw. 17% mit einer Ladeleistung von 3,7 kW, 11 kW bzw. 22 kW ausgestattet sind. Daraus folgt, dass es $0,33 * X$ Ladepunkte mit 3,7 kW im *Privaten Parkraum* gibt.

² Verfügt bspw. ein Nutzer, der in einem Einfamilienhaus wohnt, über zwei PKW mit jeweils eigenem Stellplatz, die die Ladeklassen 3,7 kW bzw. 11 kW zugewiesen bekommen, berechnet sich die Gesamtsumme der Investitionen für diesen Nutzer aus der Höhe der Investitionen für je eine Ladesäule mit 3,7 kW bzw. 11 kW im *Privaten Parkraum*.

Kapitel 5.1.3 Abschnitt „Anbieter von Ladeinfrastruktur und Gebühren für die Nutzung“).

Für *Allgemein zugängliche Einrichtungen* und den *Nahverkehrsraum* wird jeweils die Nutzungsgebühr für ein „aktives“ Intervall in Abhängigkeit vom Ladeverfahren (Normal- oder Schnellladen) berechnet. Aktiv meint dabei, dass ein Fahrzeug in diesem Intervall einen Parkplatz mit Ladesäule belegt. Es ist also für den Nutzer unerheblich, ob sein Fahrzeug während der Standzeit lädt oder lediglich parkt (siehe Kapitel 5.2.2 Abschnitt „Annahmen für Ladevorgänge“). Für die Berechnung der Gebühren pro aktivem Intervall wird der Mittelwert der Anzahl der pro Tag maximal gleichzeitig ladeparkenden Fahrzeuge je Standort mit 7 Wochentagen und 52 Wochen multipliziert. Dies geschieht für diese beiden Bereiche mit Unterscheidung zwischen Normal- und Schnellladen. Daraus ergibt sich die Gesamtzahl der Intervalle im Jahr, in denen die Ladeinfrastruktur aktiv ist. Unter Berücksichtigung von Normal- bzw. Schnellladen und der in Kapitel 5.1.3 (Abschnitt „Anbieter von Ladeinfrastruktur und Gebühren für die Nutzung“) vorgestellten Amortisationszeit kann nun die Gesamtsumme der Investitionen in einem Bereich auf die Gesamtzahl aktiver Intervalle im Amortisationszeitraum aufgeteilt und so die Nutzungsgebühr pro aktivem Intervall berechnet werden.

Für die Schätzung der Nutzungsgebühren für Ladepunkte im *Fernverkehrsraum* wird, wie in Kapitel 5.2.3 Block 5 beschrieben, die Anzahl der aktiven Intervalle im Jahr ermittelt ($\text{ladeIntervalleperYear}$). Auf Basis dessen kann analog zum *Nahverkehrsraum* und den *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* die Nutzungsgebühr für Schnellladesäulen entlang der Autobahnen pro aktivem Intervall kalkuliert werden.

6. Ergebnisse

Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über die wichtigsten Erkenntnisse aus den Simulationen der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge im Jahr 2050 für das Best- und Worst-Case-Szenario. Die Ergebnisse im Einzelnen sind dem Anhang (Tabelle 7 bzw. Tabelle 9) zu entnehmen.

6.1. Quantitativer Bedarf für Ladeinfrastruktur

Best-Case-Szenario

Im besten Fall sind im Jahr 2050 zur Bereitstellung der Lademöglichkeiten für 100% Elektrofahrzeuge im privaten Verkehr ca. **37 Millionen Ladepunkte** notwendig. Mit rund 31 Millionen steht die überwiegende Mehrheit der Ladesäulen im häuslichen Bereich, während beim *Arbeitgeber*, an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* je rund 2 Millionen Ladepunkte erforderlich sind. Die Anzahl der Schnellladesäulen im *Fernverkehrsraum* ist mit 20.000 vergleichsweise gering.

In 2% bis 6% der Zeit wird die vorhandene Ladeinfrastruktur tatsächlich zum Laden genutzt¹. Wird die Zeit betrachtet, in der Fahrzeuge Ladepunkte zum Laden oder Parken in Anspruch nehmen, ist diese Kennzahl um einiges höher: Die privaten Stellplätze mit Ladesäulen sind zu 82% belegt, während dieser Wert für die Infrastruktur beim *Arbeitgeber*, an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* zwischen 25% und 40% liegt.

Worst-Case-Szenario

Für das Worst-Case-Szenario werden in der Simulation ca. **41 Millionen Ladepunkte** berechnet, deren Ausnutzung zwischen 3 % und 7 % liegt¹. Die Parkplätze mit Ladesäulen im privaten Bereich sind wie im Best-Case-Szenario zu 82% ausgenutzt, während die mit Lademöglichkeiten ausgestatteten Parkplätze in den Bereichen *Arbeitgeber*, an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* sind zu 21 bis 44 % ausgenutzt sind.

¹ Die Ausnutzung der Ladesäulen im Fernverkehrsbereich liegt bei 41% (Best-Case-Szenario) bzw. 37 % (Worst-Case-Szenario), was als nicht realistisch erachtet wird und der quellenübergreifenden Berechnung dieses Werts zurückzuführen ist (siehe Kapitel 7.1 Abschnitt „Quellenübergreifende Berechnung der Ladeinfrastruktur im *Fernverkehrsraum*“).

6.2. Investitionshöhe

Best-Case-Szenario

Die Höhe der gesamten Investitionen liegt im besten Fall bei ca. **80 Milliarden Euro**. Mit über 27 Milliarden Euro liegt der größte Anteil beim *Geteilten Parkraum*, die Ladeinfrastruktur in den Bereichen *Allgemein zugängliche Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* folgen mit jeweils rund 17 bzw. 19 Milliarden Euro. Die Ladesäulen im *Privaten Parkraum* kosten insgesamt ca. 13 Milliarden Euro, während die Investitionshöhe beim *Arbeitgeber* und im *Fernverkehrsraum* ca. 3 Milliarden bzw. 360 Millionen Euro beträgt.

Worst-Case-Szenario

Im Worst-Case-Szenario beträgt die Höhe der Investitionen insgesamt rund **107 Milliarden Euro**. Wieder ist der *Geteilte Parkraum* mit fast 36 Milliarden Euro am kostenintensivsten, gefolgt von den *Allgemein zugängliche Einrichtungen* mit 31 Milliarden Euro und dem *Nahverkehrsraum* mit gut 25 Milliarden Euro. Die Investitionshöhe für Ladeinfrastruktur im *Privaten Parkraum* liegt bei 10 Milliarden Euro, während der Bereich *Arbeitgeber* und der *Fernverkehrsraum* bei 4 Milliarden Euro bzw. 700 Millionen liegt.

6.3. Nutzungsgebühren

Best-Case-Szenario

Die Höhe der Investition in einen Ladepunkt für den *Privaten* oder *Geteilten Parkraum* liegt im besten Fall je nach Ladeleistung zwischen rund 1.180 € und 1.250 €. Die Nutzungsgebühren für das Laden oder Parken an einer Ladesäule im halb-öffentlichen oder öffentlichen Bereich liegen je nach Ladeleistung zwischen 0,02 € und 0,15 € für 10 Minuten.

Worst-Case-Szenario

Für das Worst-Case-Szenario werden in der Simulation Preise zwischen 1.200 € und 1.310 € pro Ladesäule im *Privaten* oder *Geteilten Parkraum* ermittelt. Die Höhe der Nutzungsgebühren für Ladesäulen im halböffentlichen und öffentlichen liegen hier bei 0,02 € bis 0,18 € pro 10 Minuten.

7. Evaluation

Im folgenden Kapitel wird die Plausibilität der beiden simulierten Szenarien und deren Ergebnisse geprüft. Die Kapitel 7.1 und 7.2 beschreiben zunächst im Zuge der Simulation aufgetretene Schwierigkeiten mit den zugrundeliegenden Daten bzw. der Aufstellung elementarer Annahmen. Im Anschluss werden die erarbeiteten Resultate betrachtet (7.3) und auf mögliche Verfeinerungen und Weiterentwicklungen der Simulation geblickt (7.4).

7.1. Datengrundlage

Zuordnung von Wegezweck zu Standort

In der MOP-Befragung geben Nutzer lediglich den Zweck einer Fahrt an. Anhand dessen wird in der Simulation eine Annahme über den Standort eines Fahrzeugs nach der Fahrt getroffen. Diese Zuordnung ist problematisch, da ein Fahrzeug mit dem Standort „Arbeitgeber“, „Freizeit“ oder „Einkauf“ nicht unbedingt auch auf einem Stellplatz in diesem Bereich parken muss. Es ist durchaus möglich, dass ein Nutzer sein Fahrzeug nach dem Weg zur Arbeit, zum Einkaufen oder zu einer Freizeitbeschäftigung trotzdem beispielsweise im öffentlichen *Nahverkehrsraum* abstellt.

Quellenübergreifende Berechnung der Ladeinfrastruktur im Fernverkehrsraum

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist eine Berechnung der Ladeinfrastruktur im Bereich des Fernverkehrs anhand der für die anderen Bereiche genutzten MOP-Daten nicht möglich, weswegen auf andere Quellen zurückgegriffen wird. Dabei kann es an dieser Stelle aufgrund der Inhomogenität der Daten zu Verzerrungen kommen. Insbesondere die vergleichsweise hohe Ausnutzung der Ladesäulen in diesem Bereich von beispielsweise 35% bzw. 37% im Best-Case- und Worst-Case-Szenario scheint hierauf zu beruhen.

Fehlen von geografischen Informationen in MOP-Daten

Für alle weiteren Bereiche wird die Anzahl der notwendigen Ladepunkte in dieser Arbeit anhand der maximal gleichzeitig ladenden Fahrzeuge an einem Standort berechnet. Dabei ist eine geografische Modellierung der Aufenthaltsorte anhand der MOP-Daten allerdings nicht möglich. Es kann nur festgestellt werden,

an welcher Institution sich ein Fahrzeug befindet. Daher kann es ebenfalls zu Abweichungen in der Simulation kommen.¹

Grundgesamtheit der Befragung

Die Simulation der Ladeinfrastruktur basiert auf 2114 Fahrzeugen aus der MOP-Befragung. Diese werden mithilfe von ebenfalls in den MOP-Daten vorliegenden Gewichtungsfaktoren auf die Gesamtzahl der privaten Pkw hochgerechnet. Daher ist keine feingranulare Auflösung der Aufenthaltsorte aller Fahrzeuge, und somit auch keine genaue Simulation der notwendigen Lademöglichkeiten realisierbar.²

7.2. Kritische Betrachtung getroffener Annahmen

In Folgenden werden zunächst Annahmen bezüglich des Programms in Frage gestellt. Im Laufe des Unterkapitels werden die Betrachtungen stets allgemeiner.

Einteilung von Fahrzeugen mit privatem Stellplatz zu Ladeklassen

In Kapitel 5.2.1 (Abschnitt „Modul mod3_Fzgs substitution“) werden alle Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz in Ladeklassen eingeteilt. Dabei wird auf die Variable `KMpWOCHE` zurückgegriffen, welche sich aus der Schätzung der Gesamtstrecke im Tankbuch eines Fahrzeugs ergibt. Fahrzeuge ohne Tankbuch bekommen daher an dieser Stelle keine Ladeklasse zugewiesen und werden somit wie Fahrzeuge ohne eigenen Stellplatz simuliert. Dadurch ist es möglich, dass sich die Anzahl der Ladepunkte im *Nahverkehrsraum* erhöht.

Durch die Einteilung in Ladeklassen kann es außerdem vorkommen, dass bei Haushalten mit mehr als einem Fahrzeug und Parkplatz unterschiedliche Ladeleistungen vorhanden sind. In der Simulation sind die Ladeleistungen für

¹ Es soll beispielsweise die Ladeinfrastruktur zwei identische Supermärkte in Stuttgart und in Karlsruhe simuliert werden. Nun gibt es in einem Intervall 40 ladeparkende Fahrzeuge am Standort „Einkaufen“. Demnach würden für die Supermärkte je 20 Ladepunkte berechnet. Tatsächlich könnte es aber sein, dass alle 40 Fahrzeuge in Karlsruhe stehen, denen nicht genügend Lademöglichkeiten bereitstehen würden.

² Dies wird besonders deutlich, wenn beispielsweise über 30 Minuten hinweg genau ein Fahrzeug an einem Standort steht (tritt auf für den Standort „Ausbildungsstätte“ am Wochenende), und dieses den Standort im nächsten Intervall verlässt. Hat dieses Fahrzeug beispielsweise einen Gewichtungsfaktor von 20.000 werden so für eine halbe Stunde 20.000 Fahrzeuge am genannten Standort simuliert, während nach der halben Stunde kein einziges Fahrzeug mehr dort steht. In der Realität würde man annehmen, dass die Anzahl der Fahrzeuge an dem Standort nach und nach abnimmt.

jedes Fahrzeug eindeutig festgelegt, während ein „Tauschen“ der Ladesäulen in der Realität möglich wäre.

Teilen von Ladepunkten an privaten Stellplätzen

Während in der Simulation jedes Fahrzeug mit eigenem Stellplatz mit einer Ladesäule ausgestattet wird, ist es in der Realität für einen Haushalt mit mehr als einem Fahrzeug und mindestens einem privaten Stellplatz möglich, dass sich mehrere Fahrzeuge einen Ladepunkt teilen, um die Investition in weitere Ladesäulen zu vermeiden und gleichzeitig keine kostenpflichtigen, öffentlichen Lademöglichkeiten nutzen zu müssen. Je nach Verkehrsleistung eines Fahrzeugs erscheint ein Umparken für gelegentliches Laden durchaus plausibel. Dies wird durch die Simulation nicht abgebildet.

In diesem Zusammenhang ist ebenfalls zu erwähnen, dass es Doppelladesäulen für den häuslichen Bereich auf dem Markt gibt, die in dieser Arbeit aber nicht berücksichtigt werden (z.B. ABL eMH3 Twin (ABL SURSUM, 2018b)).

Fehlende gesamtheitliche Betrachtung der Fahrzeugflotte

In dieser Arbeit wird zur Berechnung des quantitativen Bedarfs für Ladeinfrastruktur die Annahme getroffen, dass sich das Mobilitätsverhalten der Nutzer aufgrund der potentiell vorhandenen Lademöglichkeiten nicht verändert. Es besteht also nicht die Möglichkeit, den Zeitpunkt eines Ladevorgangs in Abhängigkeit der zu erwartenden Auslastung der Ladeinfrastruktur zu bestimmen. Dagegen könnten insbesondere im Bereich des Fernverkehrs und für kurze Ladevorgänge an Ladesäulen an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und im *Nahverkehrsraum* Informationen über den Ladezustand umliegender Fahrzeuge und deren Vorhaben zum Laden ausschlaggebend für die zeitliche Koordination von Ladevorgängen werden.¹ Durch die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander bzw. mit der Ladeinfrastruktur könnten so die Ladevorgänge des gesamten „Fahrzeugschwarms“ optimiert und die Anzahl benötigter Ladepunkte gering gehalten werden.

¹ Befindet sich ein Nutzer auf der Autobahn und weiß, dass die Ladestation der übernächsten Rastanlage belegt ist, wird er bei geringem Ladezustand in Erwägung ziehen, schon an der nächsten Rastanlage zu laden, auch wenn der SOC die Fahrt zur übernächsten erlauben würde.

100% BEV im privaten Verkehr

Neben rein batterieelektrischen Fahrzeugen gehören auch Plug-In-Hybride und Brennstoffzellenfahrzeuge zu den Fahrzeugen mit Alternativen Antriebstechnologien und können im Jahr 2050 einen wesentlichen Bestandteil des Mobilitätskonzepts Deutschlands ausmachen. Sie werden in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt.

Energieversorgung und Verteilnetze

Das Laden einer Vielzahl an Elektrofahrzeugen kann ohne Steuerung der Ladevorgänge bei starken Fluktuationen in der Energiebereitstellung durch den steigenden Anteil Erneuerbarer Energien zu Schwierigkeiten bei der Energieversorgung führen. Daher sind Energiemanagementsysteme zur Koordination der Ladevorgänge unumgänglich. Der Aufbau von Ladeinfrastruktur kann zudem einen Ausbau der Verteilnetze erfordern, sodass die Installation von Ladesäulen fallweise ökonomisch nicht sinnvoll sein kann.

7.3. Plausibilität der Ergebnisse

Horizont für den Aufbau der Ladeinfrastruktur: Zeitpunkt statt Zeitraum

Die Simulation berechnet die Anzahl der notwendigen Ladepunkte und die Investitionshöhen für das Jahr 2050. Dabei wird nicht berücksichtigt, wie sich die aktuell schon vorhandene Ladeinfrastruktur bis dahin verändert. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass Ende des Jahres 2049 die Gesamtheit aller Lademöglichkeiten installiert wird und vorher keine Infrastruktur vorhanden ist.

Trennschärfe und Konsistenz von Best- und Worst-Case-Szenario

Als eines der wichtigen Gütekriterien bei der Modellierung von Zukunftsszenarien nennen Kosow et al. (2008) die Unterschiedlichkeit der erarbeiteten Szenarien. Diese ist mit 37 Millionen im Best-Case-Szenario und rund 41 Millionen Ladepunkten im Worst-Case-Szenario bzw. 80 Milliarden und 107 Milliarden Euro für die Gesamtinvestitionshöhe gegeben.

Ein weiteres Kriterium ist die Konsistenz der Annahmen innerhalb eines Szenarios. Diese zeichnet sich durch die durchgehende Zurückhaltung bei den Annahmen zum Mobilitätsverhalten und den technischen und wirtschaftlichen Entwicklungen im Bereich Ladeinfrastruktur im Worst-Case-Szenario ab, während

das Best-Case-Szenario von großen Veränderungen im Mobilitätsbewusstsein der Bevölkerung und einem hohen Entwicklungsgrad im Bereich der Technik ausgeht.

Wechselwirkung zwischen Lademöglichkeiten und Mobilitätsverhalten

Um zu gewährleisten, dass sich die zur Simulation der Ladeinfrastruktur verwendeten Mobilitätsprofile durch die berechneten Lademöglichkeiten nicht verändern und die Simulation somit auf unzutreffenden Daten basiert, ist ein möglichst geringer Einfluss zwischen Infrastruktur und Mobilitätsverhalten notwendig.

Für den Aspekt des zeitlichen Ablaufs der Mobilitätsprofile ist dies bei Ladevorgängen insbesondere im *Fernverkehrsraum* aufgrund der unzureichenden Datengrundlage eindeutig nicht gegeben. Durch die Substitution aller privaten Pkw durch BEVs werden sich in der Realität Veränderungen in den Ladeprofilen aufgrund der Dauer für Zwischenladevorgänge entlang von Autobahnen ergeben (vergleiche Kapitel 5.2.5 Abschnitt „Annahmen für die Simulation“). Auch in allen anderen Bereichen ist es nicht möglich, Wartezeiten an Ladestationen zu modellieren, wodurch sich die Anzahl der notwendigen Ladepunkte erhöht.

Für die Wege in den Mobilitätsprofilen scheint allerdings der Einfluss der Ladeinfrastruktur gering zu sein, da die Nutzungsgebühren in den Bereichen der *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* und dem öffentlichen *Nah- und Fernverkehrsraum* in beiden Szenarien nicht signifikant voneinander abweichen. Daher werden Nutzer der Infrastruktur keine Umwege fahren, um in einem anderen Bereich günstiger laden zu können. Selbst für Nutzer von Fahrzeugen mit eigener Ladesäule lohnt sich ein solcher Umweg nicht, wenn man die Nutzungsgebühren mit dem verhältnismäßig hohen Strompreis vergleicht.¹ Eine

¹ Für einen 30-minütigen Ladevorgang bspw. an einer der Schnellladesäulen im *Fernverkehrsraum* wird bei einer Leistung von 50 kW eine Energiemenge von 25 kWh bezogen. Bei einem Strompreis von durchschnittlich 0,2986 € / kWh (ausgehend vom durchschnittlichen Haushaltsstrompreis im Jahr 2017 (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, 2017)) in allen Bereichen kostet dieser Ladevorgang rund 7,47 €. Die Nutzungsgebühr für die Infrastruktur fällt daher mit $3 * 0,10 \text{ €} / 10 \text{ Minuten} = 0,60 \text{ €}$ kaum ins Gewicht. Ein Laden im um 0,01 € / 10 Minuten günstigeren *Nahverkehrsraum* scheint nicht in Frage zu kommen. Viel entscheidender ist an dieser Stelle, wie sich der Strompreis bis 2050 an öffentlichen und privaten Ladesäulen entwickelt. Dieser wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt (Kapitel 5.1.3 Abschnitt „Anbieter von Ladeinfrastruktur und Gebühren für die Nutzung“). Ist der Strom an der privaten Ladesäule beispielsweise aufgrund einer eigenen PV-Anlage „kostenlos“, sind durchaus Änderungen im Mobilitätsverhalten solcher Nutzer denkbar.

Ausnahme bildet der Bereich *Arbeitgeber*, welcher separat zu betrachten ist, da die Nutzung von Ladeinfrastruktur hier gebührenfrei sein könnte (siehe Kapitel 4.4).

Höhe der Nutzungsgebühren für Normal- und Schnellladen

Ein Indiz für die Plausibilität der Ergebnisse könnte sein, dass in beiden Szenarien die Nutzungsgebühren für Normalladen an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* in der gleichen Größenordnung sind wie die im *Nahverkehrsraum*. Außerdem liegen sie jeweils unterhalb der Nutzungsgebühren beim Schnellladen. Die Gebühren für die Nutzung einer Schnellladesäule sind ebenfalls in den beiden genannten Bereichen vergleichbar und entsprechen den Nutzungsgebühren im *Fernverkehrsraum*.

7.4. Mögliche Weiterentwicklungen der Simulation

Annahmen für Ladevorgänge

Der nächste Schritt zur Verfeinerung der Simulation besteht aus der Formulierung weiterer Bedingungen für den Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs. Denkbar wären hierbei beliebige Modifizierungen der Annahmen für Ladevorgänge (Kapitel 5.2.2 „Annahmen für Ladevorgänge“) wie zum Beispiel die Restriktion, dass Fahrzeuge ohne eigenen Stellplatz auch an *Allgemein zugänglichen Einrichtungen* nur so wenig wie möglich laden sollen. Für Fahrzeuge mit eigenem Stellplatz könnte ebenfalls berechnet werden, ob ihr Ladezustand für die Fahrt zur nächsten Lademöglichkeit ausreicht, anstatt einen SOC von 50% als konstanten Wert festzulegen. Außerdem könnte die Bedingung auf alle weiteren Bereiche außer den *Privaten Parkraum* ausgeweitet werden.

Teilen von Ladepunkten im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich bei langen Standzeiten

Ähnlich wie im *Privaten* und *Geteilten Parkraum* wäre es auch im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich denkbar, dass das Teilen von Ladepunkten bei langen Standzeiten rentabel sein könnte. Hierfür könnte ein entsprechendes System entwickelt werden, welches den Anschluss mehrerer Fahrzeuge an nur einen Ladepunkt ermöglicht und durch sinnvolles Energiemanagement die sequentiellen Ladevorgänge der Fahrzeuge koordiniert. Aktuell widerspricht dies der Ladesäulenverordnung (BMW, 2015).

Mobilitätsverhalten und Park- und Wohnsituation

Weiterhin könnte der Zusammenhang von Park- und Wohnsituation sowie die Entwicklung der Bevölkerungszahlen in Abhängigkeit der Lage von Haushalten näher untersucht und auf dieser Basis die Entwicklung der Anzahl der Pkw in den verschiedenen Bereichen bis zum Jahr 2050 präziser abgeschätzt werden.

Außerdem könnte die Generierung von geografischen Daten innerhalb der Erhebungen zum Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung in Betracht gezogen werden.

8. Zusammenfassung

Abschließend wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf das Vorgehen zur Weiterentwicklung der Simulation der Ladeinfrastruktur im Jahr 2050 in Deutschland aufgeführt.

Ziel dieser Arbeit war es, den notwendigen Bedarf für Ladeinfrastruktur und die Höhe der Gesamtinvestitionen bei einer Quote von 100% Elektrofahrzeugen im privaten Verkehr im Jahr 2050 in Deutschland zu simulieren. Dafür wurden das heutige Mobilitätsverhalten von Nutzern privater Pkw analysiert und auf dieser Basis sechs Bereiche für die Standorte von Lademöglichkeiten im privaten, halböffentlichen und öffentlichen Raum identifiziert. Durch die Spezifikation von Anforderungen an die Ladeinfrastruktur und die Schätzung der Höhe der Investitionen pro Ladepunkt je Bereich konnten mithilfe von Annahmen für das Jahr 2050 Ergebnisse für ein Best- und ein Worst-Case-Szenario ermittelt werden.

Insgesamt kann mit einer Investitionshöhe in der Größenordnung von 80 bis 110 Milliarden Euro für den flächendeckenden Aufbau von rund 40 Millionen Ladepunkten gerechnet werden. Die Höhe der Investition im häuslichen Bereich liegt bei 1.200 € bis 1.300 € pro Ladesäule. Die Gebühren für die Nutzung (halb-) öffentlicher Ladeinfrastruktur liegen zwischen 0,02 € und 0,18 € für 10 Minuten.

Der Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität ist sicherlich eine der wichtigsten Thematiken bei der Umsetzung der Energie- und Verkehrswende und mitverantwortlich für den erfolgreichen Markthochlauf von Elektrofahrzeugen. Für diese Arbeit bleibt festzuhalten, dass der Status Quo des Wandels im Straßenverkehrssektor noch weit von einer nachhaltigen Mobilität entfernt ist. Die Datengrundlage zum Mobilitätsverhalten ist insbesondere unter geografischen Aspekten unzureichend, was die Abbildung des quantitativen Bedarfs für Ladepunkte erschwert. Durch Verfeinerung der Annahmen könnten ebenfalls präzisere Ergebnisse erreicht werden. Insgesamt gibt die Arbeit einen plausiblen Ausblick auf die Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im Jahr 2050 in Deutschland.

A Anhang

Tabelle 6: Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur – Details

Bereich	Privater Bereich: Privater Parkraum			Privater Bereich: Geteilter Parkraum			Halb-öffentlicher Bereich: Arbeitgeber	
	33% Typ 2	50% Typ 2	17% Typ 2	33% Typ 2	50% Typ 2	17% Typ 2	50% Typ 2	50% Typ 2
Anteil der jew. Ausführung	33%	50%	17%	33%	50%	17%	50%	50%
Stecker Typ	Typ 2	Typ 2	Typ 2	Typ 2	Typ 2	Typ 2	Typ 2	Typ 2
Anschluss	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Anschlussleistung (kW) für Simulation	3,7	11	22	3,7	11	22	11	22
Authentifizierung + Autorisierung	nein			RFID (App / Plug'n'Charge auch möglich)			RFID (App / Plug'n'Charge auch möglich)	
Stromzähler/ Abrechnungssystem	nein			nein			ja	
Schutz vor äußeren Einflüssen	nein			nein			nein	
Investitionen in Hardware (Stand Mitte 2018)	733 €	836 €	1.027 €	1.336 €	1.591 €	1.596 €	1.787 €	1.751 €
Sonstige Investitionen	1.000 €	1.000 €	1.000 €	1.000 €	1.000 €	1.000 €	1.200 €	1.200 €

Bereich	Halb-öffentlicher Bereich: Allgemein zugängliche Einrichtungen		Öffentlicher Bereich: Nahverkehrsraum		Öffentlicher Bereich: Fernverkehrsraum
	67% Typ 2	33% CCS & Typ 2	67% Typ 2	33% CCS & Typ 2	100% CCS & Typ 2
Anteil der jew. Ausführung	67%	33%	67%	33%	100%
Stecker Typ	Typ 2	CCS & Typ 2	Typ 2	CCS & Typ 2	CCS & Typ 2
Anschluss	AC	DC	AC	DC	DC
Anschlussleistung (kW) für Simulation	22	50	22	50	50
Authentifizierung + Autorisierung	RFID/App/ Plug'n'Charge		RFID/App/ Plug'n'Charge		RFID/App/ Plug'n'Charge
Stromzähler/ Abrechnungssystem	ja		ja		ja
Schutz vor äußeren Einflüssen	ja		ja		ja
Investitionen in Hardware (Stand Mitte 2018)	4.301 €	25.471 €	4.301 €	25.471 €	25.471 €
Sonstige Investitionen	2.975 €	11.900 €	2.975 €	11.900 €	11.900 €

Tabelle 7: Ergebnisse – Best-Case-Szenario (A)

Bereich	Privater Bereich: Privater Parkraum			Privater Bereich: Geteilter Parkraum			Halb-öffentlicher Bereich: Arbeitgeber		
Anschlussleistung (kW) für Simulation Anteil der Parkplätze	3,7 33%	11 50%	22 17%	3,7 33%	11 50%	22 17%	11 50%	22 50%	
1. Anzahl Ladepunkte und Ausnutzung									
Anzahl Ladepunkte									
Anzahl Ladepunkte im Bereich	10.927.175			20.293.325			1.859.808		
Anzahl Ladepunkte (im Bereich * Anteil HH)	3.605.968			5.463.587			1.857.620		
Ausnutzung Ladepunkte									
Anzahl (AVG) genutzte Ladepunkte	591.217			1.097.975			92.951		
Anzahl (AVG) genutzte Parkplätze mit Ladepunkte	8.908.802			16.544.919			539.489		
Ausnutzung Ladepunkte***	5%			5%			5%		
Ausnutzung der Parkplätze mit Ladepunkte***	82%			82%			29%		
2. Investitionshöhe									
Investitionskosten Ladepunkte									
Jahr 2018									
Investitionskosten gesamt	1.733 €			1.836 €			2.027 €		
Investitionskosten Hardware*	733,33 €			836,00 €			1.026,67 €		
Sonstige Investitionskosten**	1.000,00 €			1.000,00 €			1.000,00 €		
Jahr 2050									
Investitionskosten gesamt	1.178 €			1.203 €			1.249 €		
Investitionskosten Hardware*	177,70 €			202,58 €			248,78 €		
Sonstige Investitionskosten**	1.000,00 €			1.000,00 €			1.000,00 €		
Summe Investitionen	4.246.750.483 €			6.570.394.048 €			2.319.760.033 €		
Summe Investitionen im Bereich	13.136.904.564 €			13.136.904.564 €			13.136.904.564 €		
3. Nutzungsgebühren									
Bezahlung pro Nutzer									
Investitionshöhe gesamt (2050) pro Ladepunkt	1.178 €			1.203 €			1.249 €		
Bezahlung pro Nutzung									
Anzahl "aktiver" 10-min-Intervalle pro Jahr									
Summe Investitionshöhe im Bereich pro aktivem 10min-Intervall [€/10 min]	1.324 €			1.385 €			1.387 €		
Summe Investitionen im Bereich	8.864.806.638 €			14.057.681.697 €			4.783.861.282 €		
Summe Investitionen im Bereich	27.706.349.617 €			27.706.349.617 €			27.706.349.617 €		
Summe Investitionen im Bereich	1.633 €			1.633 €			1.633 €		
Summe Investitionen im Bereich	432,90 €			432,90 €			432,90 €		
Summe Investitionen im Bereich	1.200,00 €			1.200,00 €			1.200,00 €		
Summe Investitionen im Bereich	1.518.443.314 €			1.518.443.314 €			1.518.443.314 €		
Summe Investitionen im Bereich	3.028.962.400 €			3.028.962.400 €			3.028.962.400 €		

Tabelle 8: Ergebnisse – Best-Case-Szenario (B)

Bereich	Halb-öffentlicher Bereich: <i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>	Öffentlicher Bereich: <i>Nahverkehrsraum</i>	Öffentlicher Bereich: <i>Fernverkehrsraum</i>	Summe
Anschlussleistung (kW) für Simulation Anteil der Parkplätze	22 67%	22 67%	50 33%	50 100%
1. Anzahl Ladepunkte und Ausnutzung				
Anzahl Ladepunkte				
Anzahl Ladepunkte im Bereich	1.971.527	2.196.912	20.000	
Anzahl Ladepunkte (im Bereich * Anteil HH)	1.320.923	1.471.931	20.000	37.268.748
Ausnutzung Ladepunkte				
Anzahl (AVG) genutzte Ladepunkte	114.130	45.711		1.941.983
Anzahl (AVG) genutzte Parkplätze mit Ladepunkte	487.318	875.109		27.355.638
Ausnutzung Ladepunkte***	6%	2%	41%	
Ausnutzung der Parkplätze mit Ladepunkte***	25%	40%		
2. Investitionshöhe				
Investitionskosten Ladepunkte				
Jahr 2018				
Investitionskosten gesamt	7.276 €	7.276 €	37.371 €	37.371 €
Investitionskosten Hardware*	4.301,25 €	4.301,25 €	25.470,86 €	25.470,86 €
Sonstige Investitionskosten**	2.975,00 €	2.975,00 €	11.900,00 €	11.900,00 €
Jahr 2050				
Investitionskosten gesamt	4.017 €	4.017 €	18.072 €	18.072 €
Investitionskosten Hardware*	1.042,27 €	1.042,27 €	6.172,07 €	6.172,07 €
Sonstige Investitionskosten**	2.975,00 €	2.975,00 €	11.900,00 €	11.900,00 €
Summe Investitionen	5.306.511.671 €	5.913.152.447 €	13.101.911.928 €	361.441.490 €
Summe Investitionen im Bereich	17.064.275.263 €	19.015.064.374 €	361.441.490 €	80.312.997.710 €
3. Nutzungsgebühren				
Bezahlung pro Nutzer				
Investitionshöhe gesamt (2050) pro Ladepunkt				
Bezahlung pro Nutzung				
Anzahl "aktiver" 10-min-Intervalle pro Jahr	17.712.657,572	29.511.959,513	16.357.769,167	425.193,857
Summe Investitionshöhe im Bereich pro aktivem 10min-Intervall [€/10 min]	0,03 €	0,02 €	0,08 €	0,09 €

Tabelle 9: Ergebnisse – Worst-Case-Szenario (A)

Bereich	Privater Bereich: Privater Parkraum			Privater Bereich: Geteilter Parkraum			Halb-öffentlicher Bereich: Arbeitgeber		
Anschlussleistung (kW) für Simulation	3,7	11	22	3,7	11	22	11	22	
Anteil der Parkplätze	33%	50%	17%	33%	50%	17%	50%	50%	
1. Anzahl Ladepunkte und Ausnutzung									
Anzahl Ladepunkte									
Anzahl Ladepunkte im Bereich	8.215.921			24.647.763			2.357.452		
Anzahl Ladepunkte (im Bereich * Anteil HH)	2.711.254	4.107.960	1.396.707	8.133.762	12.323.881	4.190.120	1.178.726	1.178.726	
Ausnutzung Ladepunkte									
Anzahl (AVG) genutzte Ladepunkte	535.525			1.606.576			127.332		
Anzahl (AVG) genutzte Parkplätze mit Ladepunkte	6.698.348			20.095.043			714.444		
Ausnutzung Ladepunkte***	7%			7%			5%		
Ausnutzung der Parkplätze mit Ladepunkte***	82%			82%			30%		
2. Investitionshöhe									
Investitionskosten Ladepunkte									
Jahr 2018									
Investitionskosten gesamt	1.733 €	1.836 €	2.027 €	2.336 €	2.591 €	2.596 €	2.987 €	2.951 €	
Investitionskosten Hardware*	733,33 €	836,00 €	1.026,67 €	1.336,00 €	1.590,67 €	1.595,75 €	1.786,50 €	1.751,33 €	
Sonstige Investitionskosten**	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.200,00 €	1.200,00 €	
Jahr 2050									
Investitionskosten gesamt	1.222 €	1.253 €	1.310 €	1.404 €	1.481 €	1.482 €	1.740 €	1.729 €	
Investitionskosten Hardware*	221,54 €	252,55 €	310,16 €	403,60 €	480,54 €	482,07 €	539,70 €	529,08 €	
Sonstige Investitionskosten**	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.200,00 €	1.200,00 €	
Summe Investitionen	3.311.903.418 €	5.145.445.983 €	1.829.902.265 €	11.416.584.305 €	18.245.987.697 €	6.210.070.461 €	2.050.629.780 €	2.038.107.207 €	
Summe Investitionen im Bereich	10.287.251.666 €			35.872.642.463 €			4.088.736.987 €		
3. Nutzungsgebühren									
Bezahlung pro Nutzer									
Investitionshöhe gesamt (2050) pro Ladepunkt	1.222 €	1.253 €	1.310 €	1.404 €	1.481 €	1.482 €			
Bezahlung pro Nutzung									
Anzahl "aktiver" 10-min-Intervalle pro Jahr									
Summe Investitionshöhe im Bereich pro aktivem 10min-Intervall [€/10 min]									

Tabelle 10: Ergebnisse – Worst-Case-Szenario (B)

Bereich	Halb-öffentlicher Bereich: <i>Allgemein zugängliche Einrichtungen</i>	Öffentlicher Bereich: <i>Nahverkehrsraum</i>	Öffentlicher Bereich: <i>Fernverkehrsraum</i>	Summe
Anschlussleistung (kW) für Simulation Anteil der Parkplätze	22 67%	22 67%	50 100%	
1. Anzahl Ladepunkte und Ausnutzung				
Anzahl Ladepunkte				
Anzahl Ladepunkte im Bereich	3.276.255	2.729.237	35.000	
Anzahl Ladepunkte (im Bereich * Anteil HH)	2.195.091	1.828.589	35.000	41.261.628
Ausnutzung Ladepunkte				
Anzahl (AVG) genutzte Ladepunkte	207.624	69.734		2.546.792
Anzahl (AVG) genutzte Parkplätze mit Ladepunkte	697.108	1.203.087		29.408.029
Ausnutzung Ladepunkte***	6%	3%	37%	
Ausnutzung der Parkplätze mit Ladepunkte***	21%	44%		
2. Investitionshöhe				
Investitionskosten Ladepunkte				
Jahr 2018				
Investitionskosten gesamt	7.276 €	7.276 €	37.371 €	
Investitionskosten Hardware*	4.301,25 €	4.301,25 €	25.470,86 €	
Sonstige Investitionskosten**	2.975,00 €	2.975,00 €	11.900,00 €	
Jahr 2050				
Investitionskosten gesamt	4.274 €	4.274 €	19.595 €	
Investitionskosten Hardware*	1.299,40 €	1.299,40 €	7.694,72 €	
Sonstige Investitionskosten**	2.975,00 €	2.975,00 €	11.900,00 €	
Summe Investitionen	9.382.706,199 €	7.816.126,046 €	17.647.951,258 €	106.966.346,591 €
Summe Investitionen im Bereich	30.567.822.802 €	25.464.077.304 €	685.815.369 €	106.966.346.591 €
3. Nutzungsgebühren				
Bezahlung pro Nutzer				
Investitionshöhe gesamt (2050) pro Ladepunkt				
Bezahlung pro Nutzung				
Anzahl "aktiver" 10-min-Intervalle pro Jahr	24.575.008.708	42.953.331.184	20.107.679.103	
Summe Investitionshöhe im Bereich pro aktivem 10min-Intervall [€/10 min]	0,04 €	0,02 €	0,09 €	0,10 €

B Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flow Chart des MATLAB Programms zur Erstellung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge von Heinz.....	5
Abbildung 2: Kilometer pro Tag - alle Fahrzeuge.....	9
Abbildung 3: Investitionen in Hardware (private Bereiche) - Best-Case-Szenario.....	44
Abbildung 4: Investitionen in Hardware (private Bereiche) - Worst-Case-Szenario.....	44
Abbildung 5: Übersicht über die Module des in dieser Arbeit auf Basis der bestehenden Module entwickelten MATLAB Programms.....	47

C Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elektrofahrzeugmodelle in der Datenbank des IIP	6
Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Wegezweck, Standort und Anforderungsbereich	10
Tabelle 3: Übersicht über die Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur	13
Tabelle 4: Variable Parameter im Best- und Worst-Case-Szenario	35
Tabelle 5: Maximum der gleichzeitig ladeparkenden Fahrzeuge je Wochentag und Standort und Maximum und Durchschnitt einer Woche je Standort	56
Tabelle 6: Anforderungsbereiche für Ladeinfrastruktur – Details.....	72
Tabelle 7: Ergebnisse – Best-Case-Szenario (A).....	73
Tabelle 8: Ergebnisse – Best-Case-Szenario (B).....	74
Tabelle 9: Ergebnisse – Worst-Case-Szenario (A).....	75
Tabelle 10: Ergebnisse – Worst-Case-Szenario (B)	76

D Literaturverzeichnis

- ABL SURSUM, 2018a. Produktinformation RFIDM00. [online] <https://www.abl.de/produktsuche.php/de/show/detail-RFIDM00-Montageplatte/Bracket%20mit%20RFID-Benutzerkennung%20f%EF%BF%BD-eMH1> [01.07.2018].
- ABL SURSUM, 2018b. eMH3 Wallbox - ABL. [online] <https://www.abl.de/de/produkte/emobility/wallbox-emh3.php> [01.17.2018].
- Achim Kampker, Dirk Vallée, 2013. Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Springer, Heidelberg.
- Adolf, J., Rommerskirchen, S., 2014. Shell PKW-Szenarien bis 2040 - Zusammenfassung und Schlussfolgerung.
- Agsten, M., Marten, A.-K., Schlegel, S., Schwerdfeger, R., Westermann, D., 2011. PHEV and BEV Charge Management Strategies in Microgrids 7.
- Autobahn Tank & Rast Gruppe, 2017. Elektromobilität im Servicenetz von Tank & Rast [online]. <https://tank.rast.de/emobility.html> [13.07.2018].
- eStations, 2018b. Ladestecker in der Elektromobilität. [online] <https://www.e-stations.de/wissen/e-stecker> [10.07.2018].
- Bach, M., 2018b. Ladeleistungen von Elektrofahrzeugen. [online] <https://www.e-stations.de/wissen/ladeleistung> [10.07.2018].
- Becker, B., 2014. Interaktives Gebäude-Energiemanagement. KIT Scientific Publishing.
- Blanck, R., Hacker, F., Heyen, D.A., Zimmer, W., Deffner, J., Götz, K., Sunderer, G., Stieler, S., Cacilo, A., Ernst, T., 2017. Abschlussbericht der Studie Mobiles Badenwürttemberg - Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2016. Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2017. Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2015. Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile.
- Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, 2017. Monitoringbericht 2017.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), 2017. BDEW-Erhebung Ladeinfrastruktur - Stand Juni 2017. [online]

https://www.bdew.de/media/documents/PI_20171024_Anlage_Grafiken-Erhebung-Ladeinfrastruktur.pdf [12.06.2018].

Deutscher Bundestag, 2018. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Wohnungseigentumsgesetzes und des Bürgerlichen Gesetzbuchs zur Förderung der Barrierefreiheit und Elektromobilität.

Deutscher Bundestag, 2017. Umsatzsteuergesetz (UStG) - Vierter Abschnitt: Steuer und Vorsteuer - § 12 Steuersätze.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrsforschung, infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2010. Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht.

Dorresteijn, S., 2012. Herausforderungen der Ladeinfrastruktur-Branche. *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik* 129, 362–363.

Elektronik Zeit, 2017. Wallbox Ladestation zu Hause installieren - das sollten Sie beachten. [online] <https://www.elektronik-zeit.de/mobilitaet-der-zukunft/elektromobilitaet/ladesysteme/wallbox-elektroauto-ladestation-installation-und-anleitung-zu-hause/> [09.07.2018].

Entwistle, P., 2018. Auskunft Schnellladestationen IONITY.

ESL EnergieSpeicherLösungen GmbH, 2018. ICU Eve Mini Wallbox | 3,7 kW - 22 kW | mit Ladesteckdose | Plug & Charge oder RFID | mit Energiezähler. [online] <https://esl-shop.de/icu-eve-mini-wallbox-22kw-ladesteckdose-plug-charge-rfid-energiezaehler.html> [09.07.2018].

Europäisches Parlament, Europäischer Rat, 2014. Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates - vom 22. Oktober 2014 - über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.

Figenbaum, E., 2018. Electromobility status in Norway: Mastering Long Distances—the Last Hurdle to Mass Adoption. *TØI Report*. Nr. 1627/2018.

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), 2018. RFID: Radio Frequency Identification. [online] <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/net/tech/drahtlose-kommunikation/rfid.html> [10.06.2018].

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS), 2010. Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität.

Graf, F., 2017. Capacitated Fast Charging Infrastructure for the German Autobahn (Masterarbeit).

Guille, C., 2009. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation.

Hacker, F., Blanck, R., Hülsmann, F., Kasten, P., Loreck, C., Ludig, D.S., Mottschall, M., Zimmer, D.W., 2014. eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz.

Heinz, D., 2018. Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für

Elektrofahrzeuge in Deutschland (Bachelorarbeit).

Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., 2014. Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen.

Hoerstebroek, T., Hahn, A., 2012. Schema zur Ladeinfrastrukturbewertung für Elektromobilität. *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik - 2012 Tagungsband der MKWI 2012*.

Hülsmann, F., Mottschall, M., Hacker, F., Kasten, P., 2014. Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050.

Innogy, 2018. innogy Smartstore - eBox White inklusive eInstallation. [online]. <https://www.innogy.com/smartstore/EMobilityCatalog/eBox-white-inklusive-eInstallation-zid70011759> [10.07.2018].

International Organization for Standardization, 2013. ISO 15118-1:2013 - Road vehicles - Vehicle to grid communication interface. [online] <https://www.iso.org/standard/55365.html> [12.06.2018].

IONITY, 2018. IONITY - Wer wir sind [online] <http://www.ionity.eu/#werwirsind> [13.07.2018].

Jochem, P., Brendel, C., Reuter-Oppermann, M., Fichtner, W., Nickel, S., 2016. Optimizing the allocation of fast charging infrastructure along the German autobahn. *Journal of Business Economics*. 86, 513-535.

Karle, A., 2018. Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, 3., aktualisierte Auflage. ed. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.

Kemfert, C., Canzler, W., 2016. Die Energiewende in Deutschland: Kontroversen, Chancen und Herausforderungen. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung*, 85, 5–13.

Kloepfer, I., 2016. Voraussetzung für den Umstieg: Wie kommt der Strom ins E-Auto? *FAZ.NET*. [online] <http://www.faz.net/1.4246092> [07.07.2018].

Kohlmeyer, R., Petrikowski, F., Leuthold, S., Steingrübner, E., Jung, M., 2012. Ratgeber Umweltbundesamt - Batterien und Akkus: Ihre Fragen - Unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt [WWW Document]. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4414.pdf> (accessed 7.26.18).

Kosow, H., Gaßner, R., Erdmann, L., 2008. Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Werkstattbericht Nr. 103. *Berlin Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT)*.

Kraftfahrt-Bundesamt, 2018. Pressemitteilung Nr.6/2018 - Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2018. [Pressemitteilung] https://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2018/pm_06_18_bestand_01_18_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [20.05.2018].

Mak, H.-Y., Rong, Y., Shen, Z.-J.M., 2013. Infrastructure Planning for Electric Vehicles with

Battery Swapping. *Management Science*. 59, 1557–1575.

McCourt, M., 2018. Anschluss-/Installationskosten Ladesäule im privaten Bereich und auf Firmenparkplätzen.

Mennekes, 2018a. Über uns: Unternehmen: Elektromobilität. [online] <https://www.chargeupyourday.de/ueberuns/unternehmen/herkunft/> [08.06.2018].

Mennekes, 2018b. AMTRON® Start 3,7 C2. [online] <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Start-3-7-C2-000000060001c5c00001003a/> [01.07.2018].

Mennekes, 2018c. AMTRON® Start 11 C2. [online] <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Start-11-C2-000000060001c60d0001003a/> [01.07.2018].

Mennekes, 2018d. AMTRON® Start 22 C2 [WWW Document]. Charge Your Day. URL <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Start-22-C2-000000060001c65b0001003a/> [01.07.2018].

Mennekes, 2018e. AMTRON® Premium 3,7 C2 [WWW Document]. Charge Your Day. URL <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Premium-3-7-C2-000000060001c2840002003a/> [01.07.2018].

Mennekes, 2018f. AMTRON® Premium 11 C2 [WWW Document]. Charge Your Day. URL <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Premium-11-C2-000000060001cf950001003a/> [01.07.2018].

Mennekes, 2018g. AMTRON® Premium 22 C2. [online] <https://www.chargeupyourday.de/pd/amtron/AMTRON-Premium-22-C2-0000000600031b7e000f003a/> [10.07.2018].

Mennekes, 2018h. Ladesäule Premium 22. [online] <https://www.chargeupyourday.de/pd/saeule/Ladesaeule-Premium-22-00000003000313bb0004003a/> [01.07.2018]

Michaelis, J., Plötz, P., Wietschel, M., Gnann, T., 2012. Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plug-In Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug, in: Fichtner, W., Jochem, P., Poganietz, W.-R., Grunwald, A., *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen*.

Mock, D., 2018. Kostenabschätzung Schnellladesäule EVTEC AG.

Mütlin, M., 2013. Intelligentes Laden über ISO/IEC 15118 - Potentiale und Funktionsweise des Standards. *NEUE Mobilität - Das Magazin vom Bundesverband eMobilität*.

Nationale Plattform Elektromobilität, 2018. Ladeinfrastruktur. [online] <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/> [11.05.2018].

Nationale Plattform Elektromobilität, 2015. Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland

- Statusbericht und Handlungsempfehlungen.

Nationale Plattform Elektromobilität, 2013. Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur.

Neubauer, J., Wood, E., 2014. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. *Journal of Power Sources* 257, 12–20.

Nobis, P., Fischhaber, S., 2015. Belastung der Stromnetze durch Elektromobilität.

Nowosak, S., 2018. Ladestation zu Hause einrichten - So geht's – in 5 Schritten eigene Wallbox installieren. [online] <https://www.homeandsmart.de/ladestation-elektroauto-zuhause-installieren-wallbox-anschluss-daheim> [09.07.2018].

FOCUS Online, 2017. Elektroautos: Gericht fällt Urteil zum Stromanschluss. [online] https://www.focus.de/auto/elektroauto/eigentuemergemeinschaft-war-dagegen-kein-anspruch-auf-stromleitung-gericht-faellt-urteil-gegen-elektroautos_id_6438297.html [07.07.2018].

Pehnt, M., Höpfner, U., Merten, F., 2012. Elektromobilität und Erneuerbare Energien. *20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien*, 483-504. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.

Proff, H., Schönharting, J., Schramm, D., Ziegler, J., 2012. Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: betriebswirtschaftliche und technische Aspekte, Research. Springer Gabler, Wiesbaden.

Reuter-Oppermann, M., Funke, S., Jochem, P., Graf, F., 2017. How Many Fast Charging Stations Do We Need Along the German Highway Network? Presented at The 30th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition, p. 1.

Richter, J., Lindenberger, D.D., 2010. Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration.

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, 2018. Erstes Mittelspannungsnetz mit Gleichstrom in Aachen [online]. <http://www.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC/Das-Center/Aktuelle-Meldungen/~qkcc/Erstes-Mittelspannungsnetz-mit-Gleichstr/> [18.07.2018].

Schraven, S., Kley, F., Wietschel, M., 2010. Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. Interdisziplinäre Aspekte der Energiewirtschaft, 230-249. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).

Soller, G., 2018. Hsubject Plug & Charge vereinfacht das Laden dramatisch. *Vision Mobility*. [online] <https://www.vision-mobility.de/de/news/hsubject-plug-charge-vereinfacht-das-laden-dramatisch-1518.html> [12.06.2018].

Statistisches Bundesamt, 2018. Vorausberechneter Bevölkerungsstand: Deutschland, Stichtag, Varianten der Bevölkerungsvorausberechnung. [online] https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=8A69A19760EDE86272BC94ADAE941E2E.to_mcat_GO_1_2?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1531720876881&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=12421-0001&auswahltext=&werteabruf=starten [16.07.2018].

- Statistisches Bundesamt, 2018. Staat & Gesellschaft - Wohnen - Tabellen - Statistisches Bundesamt. [online] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/Tabellen/TabellenHaushaltsstrukturWohnungen.html;jsessionid=AB6AC60FEA9ECB646C0FC9534F4B7082.InternetLive1> [11.07.2018].
- Steen, D., Tuan, L.A., Carlson, O., Bertling, L., 2012. Assessment of Electric Vehicle Charging Scenarios Based on Demographical Data. *IEEE Transactions on Smart Grid* 3, 1457–1468.
- Suttner, M., 2015. Checkliste zur Abschätzung der Kosten für die Installation einer Ladestation für Ihr Elektroauto. [online] <http://www.mobilityhouse.com/de/checkliste-zur-kostenabschaetzung-fuer-die-installation-einer-ladestation/> [09.07.2018].
- The Mobility House, 2018. ABL Ladesäule eMC2 silber 2P4418 (2 x 22kW, Steckdose Typ 2, RFID, SIM). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/abl-emc2-socket-2p4418.html [10.07.2018].
- The Mobility House, 2017a. Ladekabelarten und Steckertypen für Elektroautos [online] <http://www.mobilityhouse.com/de/ladekabelarten-und-steckertypen/> [07.06.2018].
- The Mobility House, 2017b. Warum ABL, KEBA & ICU? [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/warum-ladestationshersteller/ [08.06.2018].
- The Mobility House, 2017c. ICU Ladestationen für Elektroautos. [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/icu-ladestationen.html [30.06.2018].
- The Mobility House, 2017d. KEBA Wallbox 98.112 KeContact P30 e-series (4,6kW, Steckdose Typ2). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/keba-kecontact-p30-98112.html [01.07.2018].
- The Mobility House, 2017e. ABL Wallbox eMH1 Basic mit Kabel EVSE824 (3,7kW, inkl. 5m Kabel Typ2). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/abl-wall-box-emh1-basic-with-cable-evsetmh037-3-7-kw-incl-5m-cable-type2-html.html [01.07.2018].
- The Mobility House, 2017f. ABL Wallbox eMH1 Basic mit Kabel EVSE803 (11kW, inkl. 7m Kabel Typ2). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/abl-wall-box-emh1-basic-with-cable-evsetmh110-11-kw-incl-7m-cable-type2-html.html?%20gclid=Cj0KCQjwpcLZBRcNARIsAMPBgF00IleHs4a6afSmis0KfTmMhUsZXjfwDQ5fZrNHQrwsdtWglyuO_waAllIEALw_wcB [01.07.2018].
- The Mobility House, 2017g. KEBA Wallbox 97.919 KeContact P30 c-series (22kW, inkl. 4m Kabel Typ2, Ethernet). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/keba-kecontact-p30-97919.html [01.07.2018].
- The Mobility House, 2017h. ABL Wallbox eMH1 Basic mit Kabel EVSE563 (22kW, inkl. 5m Kabel Typ2). [online]. https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/abl-wall-box-emh1-basic-with-cable-evse563-22-kw-incl-5m-cable-type2.html [01.07.2018].
- The Mobility House, 2017i. KEBA Wallbox 98.152 KeContact P30 b-series (22kW, inkl. 6m

- Kabel Typ2, RFID). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/keba-kecontact-p30-98152.html [09.07.2018].
- The Mobility House, 2017j. KEBA Wallbox 97.925 KeContact P30 c-series (22kW, inkl. 6m Kabel Typ2, Ethernet, RFID). [online] https://shop.mobilityhouse.com/de_de/ladestationen/keba-kecontact-p30-97925.html [10.07.2018].
- Tomforde, J., Bischoff, H., Kohs, A., Schamm, T., Kardjan, P.N., 2014. AUTOPLES — Neue Wege beim Parken und Laden von Elektrofahrzeugen. *ATZextra 19*, 38–43.
- Viehmann, S., 2017. Wo tanken die? Wie Winfried Kretschmann grünen Elektro-Populismus zerpflückt. *FOCUS Online*. [online] https://www.focus.de/auto/elektroauto/ministerpraesident-rastet-auf-parteitag-aus-wo-tanken-die-wie-winfried-kretschmann-gruenen-elektro-populismus-zerpflueckt_id_7278222.html [17.07.2018].
- Wan, Z., Sperling, D., Wang, Y., 2015. China's electric car frustrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 116–121.
- Weiss, C., Chlond, B., Heilig, M., Vortisch, P., 2014. Capturing the Usage of the German Car Fleet for a One Year Period to Evaluate the Suitability of Battery Electric Vehicles – A Model based Approach. *Transportation Research Procedia*, 1, 133–141.
- Wiech, H.G., 2016. BDEW-Erhebung Ladeinfrastruktur - Stand Dez. 2016.
- Wu, H.H., Gilchrist, A., Sealy, K., Israelsen, P., Muhs, J., 2011. A review on inductive charging for electric vehicles. *International Electric Machines Drives Conference (IEMDC) 2011 IEEE*. Presented at the 2011 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC), pp. 143–147.

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

- No. 33** Jann Weinand, Max Kleinebrahm, Russell McKenna, Kai Mainzer, Wolf Fichtner: Developing a three-stage heuristic to design geothermal-based district heating systems
- No. 32** Daniel Fehrenbach: Modellgestützte Optimierung des energetischen Eigenverbrauchs von Wohngebäuden bei sektor-gekoppelter Wärmeversorgung –Vorstellung des POPART-Modells
- No. 30** Daniel Heinz: Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland
- No. 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
- No. 28** Felix Hübner, Sven Möller, Frank Schultmann: Entwicklung eines Expertensystems für die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte
- No. 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
- No. 26** Jann Weinand, Russell McKenna, Wolf Fichtner: Developing a municipality typology for modelling decentralised energy systems
- No. 25** Felix Hübner, Tobias Hünlich, Florian Frost, Rebekka Volk, Frank Schultmann: Analyse des internationalen Marktes für den Rückbau kerntechnischer Anlagen: Stand und Ausblick
- No. 24** Hannes Schwarz, Lars Kotthoff, Holger Hoos, Wolf Fichtner, Valentin Bertsch: Using automated algorithm configuration to improve the optimization of decentralized energy systems modeled as large-scale, two-stage stochastic programs
- No. 23** Martin Hain, Hans Schermeyer, Marliese Uhrig-Homburg, Wolf Fichtner: An Electricity Price Modeling Framework for Renewable-Dominant Markets

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. 34, Februar 2019

ISSN 2196-7296

www.iip.kit.edu

www.kit.edu