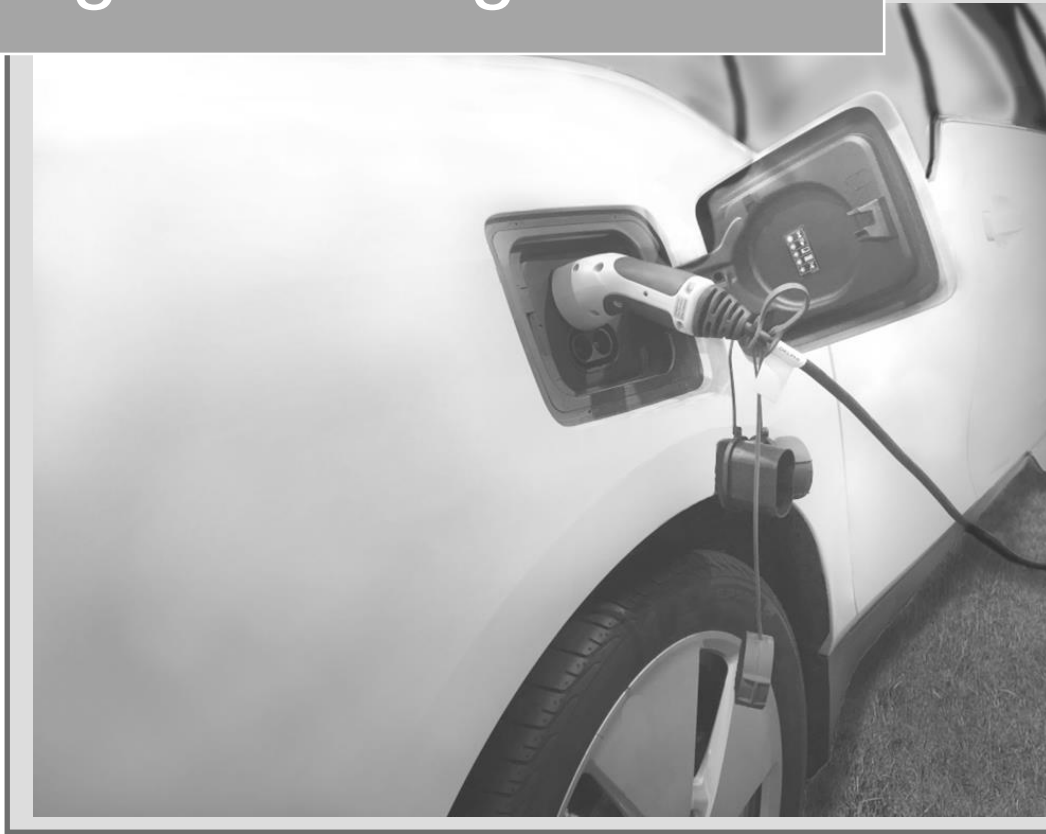


Bestimmung des Ladebedarfs für Elektrofahrzeuge im Alltagsverkehr



Masterarbeit

Nicole Böttcher



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Technische
Universität
Berlin



Bestimmung des Ladebedarfs für Elektrofahrzeuge im Alltagsverkehr

2016

2., überarbeitete Fassung

Masterarbeit

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

Technische Universität Berlin

Bearbeiterin:	Nicole Böttcher
Studiengang:	Planung und Betrieb im Verkehrswesen
Matrikel-Nr.:	██████
Erstgutachter:	Prof. Dr. Kai Nagel, TU Berlin
Zweitgutachter:	Dr. Tobias Kuhnimhof, DLR

Impressum

Deckblattbild: © Böttcher

Gestaltung und Bearbeitung der Dokumentation: Böttcher, Nicole

© Böttcher, TU Berlin/ Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik 2016

Zitierhinweis

Aus dem Dokument sollte in folgender Weise zitiert werden:

Böttcher, N.: Bestimmung des Ladebedarfs für Elektrofahrzeuge im Alltagsverkehr; Masterarbeit; Technische Universität Berlin; 2., überarbeitete Fassung 2016

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	iii
TABELLENVERZEICHNIS	iv
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	v
VORBEMERKUNG	vi
ABSTRACT	vii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zur Elektromobilität	3
2.1 Elektrische Antriebskonzepte	3
2.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur	6
2.2.1 Konzepte zum Laden	6
2.2.2 Systemansätze zum konduktiven Laden	7
2.2.3 Ladeinfrastruktur nach Art der Zugänglichkeit	10
2.3 Marktentwicklung	11
3 Ermittlung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr	14
3.1 Teil A: Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs	15
3.1.1 Modellaufbau	15
3.1.2 Datengrundlage	17
3.1.2.1 Daten zur Fahrzeugnutzung	18
3.1.2.2 Standortinformationen	19
3.1.2.3 Fahrzeugnutzungstypen	21
3.1.3 Annahmen	22
3.1.3.1 Szenarioübergreifende Annahmen	22
3.1.3.2 Szenariospezifische Annahmen	24
3.1.4 Modellauswertung	26
3.2 Teil B: Alternatives Hochrechnungsmodell	28
3.2.1 Modellaufbau	29
3.2.2 Modellauswertung	31
3.2.3 Hochrechnung der Nachfragedaten	35

3.2.3.1	Bestandsentwicklung von privat genutzten Pkw.....	35
3.2.3.2	Vorgehensweise der Hochrechnung.....	36
4	Modellgestützte Analyse des Ladebedarfs.....	38
4.1	Auswahl des Basisszenarios	38
4.2	Ladebedarf von Elektrofahrzeugen	40
4.2.1	Anzahl der Ladevorgänge.....	41
4.2.2	Stand- und Ladedauern	42
4.3	Alternative Hochrechnung der Nachfragedaten	44
4.3.1	Zeitliche Verteilung des ruhenden Verkehrs	45
4.3.2	Standorte von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf	47
4.3.3	Standortspezifische Ganglinien der Parkraumnachfrage	49
4.4	Zusammenfassung zentraler Ergebnisse.....	54
5	Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs	56
5.1	Vom Ladebedarf zum Ladeinfrastrukturbedarf	56
5.2	Diskussion der Ergebnisse	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	62
6.1	Zusammenfassung der Arbeit.....	62
6.2	Kritische Betrachtung und Ausblick.....	63
7	Anhang.....	66
	LITERATUR.....	viii

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Übersicht elektrischer Antriebskonzepte	4
Abbildung 2-2:	Übersicht über Systemansätze zum Laden von Elektrofahrzeugen	8
Abbildung 2-3:	Elektrofahrzeugbestand in Deutschland – Trendentwicklung und Ziele....	12
Abbildung 3-1:	Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs	17
Abbildung 3-2:	Algorithmus zur Erzeugung von Ladeprofilen.....	27
Abbildung 3-3:	Alternatives Hochrechnungsmodell.....	30
Abbildung 3-4:	Algorithmus zur zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse	34
Abbildung 4-1:	Monatliche EV-Neuzulassungen.....	39
Abbildung 4-2:	Kumulierte monatliche EV-Neuzulassungen und Trendentwicklung.....	40
Abbildung 4-3:	Stand- und Ladedauern nach Ladeart und Aufenthaltsort.....	43
Abbildung 4-4:	Tagesgang der gesamten Parkraumnachfrage	46
Abbildung 4-5:	Wochengang der gesamten Parkraumnachfrage	47
Abbildung 4-6:	Verteilung der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf nach Aufenthaltsorten im Wochenverlauf	48
Abbildung 4-7:	Tagesgang der Parkraumnachfrage am Wohnort	50
Abbildung 4-8:	Tagesgang der Parkraumnachfrage am Arbeitsplatz	51
Abbildung 4-9:	Tagesgang der Parkraumnachfrage an Einkaufsorten	52
Abbildung 4-10:	Tagesgang der Parkraumnachfrage an sonstigen Orten.....	53
Abbildung 7-1:	Programmstruktur – Datenimport aus dem Projekt LADEN2020.....	66
Abbildung 7-2:	Programmstruktur – LI Bedarfsmodell aus dem Projekt LADEN2020	67
Abbildung 7-3:	Programmstruktur – Zusatzmodul Masterarbeit	68

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1:	Zuordnung von Standorten nach der Art der Zugänglichkeit	20
Tabelle 3-2:	Verteilung von Elektrofahrzeugen auf Fahrzeugnutzungstypen	22
Tabelle 3-3:	Reichweitzuladung pro Stunde Ladezeit	24
Tabelle 3-4:	Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen	25
Tabelle 4-1:	Anzahl der Ladevorgänge im Basisszenario	42
Tabelle 5-1:	Stellplatzbelegung von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf im Basisszenario	57
Tabelle 5-2:	Maximale Anzahl gleichzeitig parkender Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf im Basisszenario	58

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Einheitszeichen: Ampere
BEV	Battery electric vehicle, reines batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCS	Combined Charging System, in Europa empfohlener DC-Stecker
CHAdeMO	CHARge de Move, japanischer Vorschlag für einen DC-Stecker
CO ₂	Kohlendioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
et al.	lateinisch für: und andere (Personen)
EV	Electric vehicle, Elektrofahrzeug
FCEV	Fuel cell electric vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug
HEV	Hybrid electric vehicle, Hybridfahrzeug
ICE	Internal combustion engine, Verbrennungskraftmaschine
IEC	International Electrotechnical Commission, deutsch: Internationale Elektrotechnische Kommission
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
km	Einheitszeichen: Kilometer
kW	Einheitszeichen: Kilowatt
Lkw	Lastkraftwagen
max	maximal
MiD	Mobilität in Deutschland
min	minimal
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
n	Stichprobenumfang
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle, am Stromnetz aufladbares Hybridfahrzeug
Pkw	Personenkraftwagen
R	Bezeichnung für eine Programmiersprache
REEV	Range extended electric vehicle, am Stromnetz aufladbares Elektrofahrzeug mit einer Vorrichtung zur Reichweitenverlängerung
SOC	State of Charge, Kennwert für den Ladezustand von Akkumulatoren

VORBEMERKUNG

Die Arbeit basiert auf einer R-gestützten Auswertung und Aufbereitung von Mobilitätsdaten. Die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung relevanten R-Dateien (Skript-Dateien und Daten-Dateien) sind in einem separaten Workspace (R-Projekt)¹ gespeichert. Das R-Projekt ist als digitaler Anhang dieser Arbeit auf der beigefügten CD enthalten. Eine Darstellung der Programmstruktur inklusive der Abgrenzung zwischen den Auswertungen im Rahmen des Projekts LADEN2020 und den in Eigenleistung erbrachten Auswertungen ist dem Anhang zu entnehmen (Kapitel 7).

¹ Siehe R-Projekt-Datei „LI Bedarfsmodell.Rproj“.

ABSTRACT

Diese Masterarbeit stellt ein Verfahren zur Ermittlung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen im Alltagsverkehr dar. Dabei basiert die Arbeit auf ein Modell, das am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Mit diesem Modell lässt sich der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen aus den Nutzungsprofilen konventioneller Fahrzeuge abschätzen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, ein alternatives Hochrechnungsverfahren für die Bestimmung des Ladebedarfs zu erarbeiten. Dazu wurden sowohl die Ganglinien der Ladenachfrage für Elektrofahrzeuge als auch die Ganglinien der Parkraumnachfrage für alle privat genutzten Personenkraftwagen in Deutschland nach Standorttypen ermittelt und für ein Szenario zur Fahrzeugbestandsentwicklung hochgerechnet. Auf dieser Grundlage konnten wesentliche Erkenntnisse zum Aufbau einer nachfragegerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland für das Jahr 2020 gewonnen werden. Im Ergebnis wird deutlich, dass Ladevorgänge im Alltagsverkehr zukünftig überwiegend im privaten Raum und in den Nachtstunden stattfinden werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass aufgrund der langen Standzeiten an den Zielorten der Aufbau von Schnellladepunkten für den Alltagsverkehr nicht zwingend erforderlich ist.

1 Einleitung

Die Bundesregierung strebt das Ziel an, dass im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren sollen (vgl. Die Bundesregierung 2009: 18). Die konsequente Einführung der Elektromobilität wird im Energiekonzept der Bundesregierung zur Umsetzung der *Energiewende* als ein bedeutender Bestandteil für einen zukunftsfähigen Verkehr identifiziert (vgl. BMWi 2014: 119). Durch die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs soll zum einen die Abhängigkeit Deutschlands von Erdölimporten vermindert werden, zum anderen sollen Klimaschutzziele zur Reduzierung globaler Kohlendioxid- und lokaler Schadstoffmissionen erreicht werden (vgl. BMWi 2014: 117 ff.).

Ein nennenswertes Marktwachstum ist trotz der politischen Willenserklärung jedoch nicht zu verzeichnen: Zu Jahresbeginn waren nur rund 29.600 Elektrofahrzeuge mit einer externen Auflademöglichkeit ausgestattet (vgl. ZSW 2015). Zum Vergleich: In Deutschland sind nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamtes etwa 44,4 Millionen Personenkraftwagen (Pkw) zugelassen (vgl. KBA 2015 a).

Eine ausreichend dimensionierte Ladeinfrastruktur stellt eine wichtige Voraussetzung für die Ausbreitung der Elektromobilität dar und ist somit wesentlich für einen erfolgreichen Markthochlauf. In Deutschland existieren bisher nahezu 2.500 Ladestationen mit mehr als 5.500 öffentlich zugänglichen Ladepunkten (BDEW 2015 a, Stand: September 2015). Offen bleiben die Fragen, wie viel Ladeinfrastruktur welcher Art und an welchen Standorten benötigt wird, um den Ladebedarf von Elektrofahrzeugen zukünftig decken zu können.

Trotz der Prämisse von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 gibt es aus heutiger Sicht erhebliche Unsicherheiten, welche die Nachfrage nach Ladeinfrastruktur beeinflussen. Das betrifft zum Beispiel die Verteilung des Bestands an Elektrofahrzeugen auf die unterschiedlichen elektrischen Antriebsarten. Dies könnte ein Grund dafür sein, warum das Europäische Parlament in der Richtlinie über den „Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ die Mitgliedsstaaten auffordert, öffentlich zugängliche Ladepunkte mit einem „angemessenen Abdeckungsgrad“ (EC 2014: 4) zu errichten, statt genaue Zielvorgaben zu formulieren. Als Richtwert für eine angemessene Anzahl an Ladepunkten wird mindestens ein Ladepunkt je zehn Fahrzeuge angegeben (vgl. ebenda).

Vor diesem Hintergrund wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ein Forschungsprojekt in Auftrag gegeben, in dem eine Strategie zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland erarbeitet werden soll (vgl. DLR 2015). Daraus resultiert das Projekt LADEN2020, das vom

Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bearbeitet wird (vgl. ebenda). Im Rahmen dieses Projekts wurde vom DLR – Institut für Verkehrsforschung ein Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr entwickelt (vgl. Anderson et al. 2015). Hierbei wurde der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen im Alltagsverkehr für sechs verschiedene Szenarien bestimmt (vgl. ebenda). Auf Grundlage der ermittelten Nachfrage für eine Million Elektrofahrzeuge wurde anschließend für jedes Szenario die notwendige Anzahl an Ladepunkten für einen bedarfsgerechten Infrastrukturaufbau abgeleitet (vgl. ebenda).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines alternativen Hochrechnungsmodells zur Ermittlung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen im Alltagsverkehr. Dabei basiert die Modellierung des Ladebedarfs auf den Erkenntnissen aus dem Projekt LADEN2020. Ausgehend von der Zielsetzung von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland wird im Folgenden den Fragen nachgegangen, wie viel Ladeinfrastruktur welcher Art und an welchen Standorten im Jahr 2020 benötigt wird. Im Vordergrund steht hierbei die Identifikation von zeitlichen Nachfrageschwerpunkten für das Laden von Elektrofahrzeugen. Die Ergebnisse werden zudem differenziert nach Standorten ausgewiesen.

Die Arbeit gliedert sich, neben Einleitung und Zusammenfassung, in vier Hauptkapitel. Ausgehend von der zentralen Frage der Arbeit gibt *Kapitel 2* zunächst eine grundlegende Einführung zu den elektrischen Antriebskonzepten und den verfügbaren Ladekonzepten. Nach der Betrachtung der technischen und räumlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur wird die Marktentwicklung erörtert. Anschließend wird in *Kapitel 3* die Methodik zur Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr vorgestellt. Dieses Kapitel ist in zwei Teile untergliedert: In *Teil A* wird zum einen das Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs von Anderson et al. vorgestellt. Zum anderen gibt das Kapitel einen Überblick über die wichtigsten szenarioübergreifenden und szenariospezifischen Annahmen. Daran anknüpfend wird in *Teil B* die Modellerweiterung, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, beschrieben. In *Kapitel 4* werden die Ergebnisse aus den zeitscheiben- und zieltypenfeinen Hochrechnungen der Ladebedarfe dargestellt. Daran anknüpfend wird in *Kapitel 5* auf der Grundlage der Ergebnisse, die aus der Analyse des Ladebedarfs hervorgehen, ein Ansatz zur Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs vorgestellt. Abschließend folgt in der *Zusammenfassung (Kapitel 6)* eine kritische Auseinandersetzung mit der modellgestützten Analyse des Ladebedarfs im Alltagsverkehr.

2 Grundlagen zur Elektromobilität

Der Begriff „Elektromobilität“ steht im Rahmen dieser Arbeit für die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs auf Basis vollständig oder teilweise batterieelektrisch betriebener Straßenfahrzeuge mit Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz. Hierbei handelt es sich allgemein um Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie Zweiräder (z. B. Elektroroller und Elektrofahrräder) und Leichtfahrzeuge (vgl. Die Bundesregierung 2009: 6). Die vorliegende Arbeit spezialisiert sich jedoch auf die Untersuchung von Pkw mit elektrischen Antrieben. Diese Festlegung basiert auf dem Regierungsprogramm Elektromobilität der Bundesregierung, das sich in besonderem Maße auf die Forschung und Entwicklung von elektrisch betriebenen Pkw konzentriert (vgl. Die Bundesregierung 2009: 18 ff.). Dabei liegt der Schwerpunkt dieser Forschung auf Pkw in privater Nutzung, die mit einem Anteil von 95 Prozent² aller Pkw entscheidend für den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen sind.

Im Folgenden werden zunächst die aktuell vorherrschenden Antriebskonzepte batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge thematisiert (Abschnitt 2.1). Zudem werden im Rahmen dieses Kapitels Ausgestaltungsmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur (Abschnitt 2.2) und die möglichen Entwicklungspfade des Marktes für Elektromobilität (Abschnitt 2.3) aufgezeigt. Die nachfolgenden Ausführungen gehen aus einer umfassenden Literaturrecherche hervor.

2.1 Elektrische Antriebskonzepte

Ausgehend von konventionellen Fahrzeugen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren (ICE) sind unterschiedliche Varianten elektrischer Antriebskonzepte denkbar. Dazu zählen Hybridfahrzeuge, Plug-in-Hybride, Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung, rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (vgl. NPE 2012: 7). Ein Überblick über die genannten Konzepte mit den gängigen Abkürzungen und englischsprachigen Bedeutungen ist der Abbildung 2-1 zu entnehmen. Dazu sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Begriffe Akkumulator, abgekürzt Akku, und Batterie im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet werden³. Vor dem Hintergrund der Zielstellung, den Ladebedarf von Elektrofahrzeugen zu ermitteln, stehen am Stromnetz aufladbare

2 Eigene Berechnungen (vgl. Abschnitt 3.2.3.1).

3 In der deutschen Sprache bezeichnen Akkus und Batterien zwei unterschiedliche Speichersysteme: Während Akkus wieder am Stromnetz aufgeladen werden können, sind Batterien nach einmaliger Entladung als Energiespeicher unbrauchbar. Im angelsächsischen Sprachraum wird diese Unterscheidung hingegen nicht vorgenommen. Im Themenkomplex zur Elektromobilität hat sich daher aus der englischsprachigen Bezeichnung „battery electric vehicle“ die deutschsprachige Bezeichnung „batterieelektrisches Fahrzeug“ durchgesetzt (vgl. Karle 2015: 75).

Antriebskonzepte im Fokus der Betrachtung. Im Folgenden werden die unterschiedlichen elektrischen Antriebskonzepte vorgestellt.

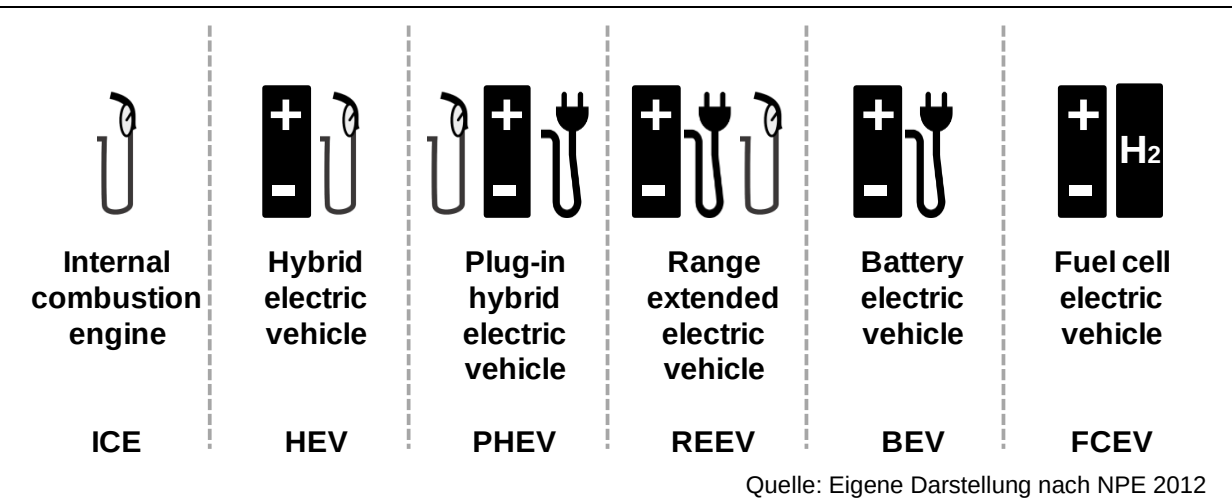


Abbildung 2-1: Übersicht elektrischer Antriebskonzepte

Hybridfahrzeuge (HEV) sind Fahrzeuge, die neben dem Verbrennungsmotor über einen Elektromotor zur Unterstützung des Fahrantriebs verfügen. Somit bleibt der Kraftstoff grundlegende Energiequelle. Der Elektromotor wird im Wesentlichen dazu genutzt, die ineffizienten Zustände eines verbrennungsmotorischen Fahrzeugs zu umgehen. So kann der batterieelektrische Antrieb beim Anfahren unterstützen, da dieser bereits bei kleinsten Drehzahlen hohe Drehmomente erzeugt (vgl. Karle 2015: 29). Darüber hinaus bietet die Verwendung eines Elektromotors die Möglichkeit der Rekuperation, d. h. der Rückgewinnung von Bremsenergie (vgl. ebenda). Da bei einem HEV die Energiebereitstellung ausschließlich über die Kraftstoffaufnahme an der Tankstelle erfolgt, sind HEV nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung.

Bei *Plug-in-Hybriden (PHEV)* handelt es sich um Hybridfahrzeuge, deren Batterien zusätzlich über eine Ladeschnittstelle am Fahrzeug extern über das Stromnetz aufgeladen werden können. Die Notwendigkeit einer externen Ladung ergibt sich durch den Einsatz von Batterien mit größerer Kapazität, bei denen eine rein fahrzeuginterne Ladung nicht zweckmäßig ist (vgl. Karle 2015: 32). Durch den Einsatz größerer Batterien können alltägliche Strecken vollelektrisch und damit ohne lokalen Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) zurückgelegt werden (vgl. Karle 2015: 127 ff.). Dennoch sind durch den verbrennungsmotorischen Antrieb höhere Reichweiten möglich. Der Kraftstoffverbrauch und der CO₂-Ausstoß hängen dabei unmittelbar von den Streckendistanzen und der verfügbaren Ladeinfrastruktur ab (vgl. Kley 2011: 56 f.). Die Verbrauchs- und Emissionswerte von PHEV entsprechen denen konventioneller Fahrzeuge, sofern aufgrund fehlender Infrastruktur keine Möglichkeit zur Beladung besteht (vgl. ebenda). Im Gegensatz dazu benötigen PHEV keinen

Kraftstoff und emittieren somit lokal kein CO₂, sofern sie durch regelmäßige Ladung nicht außerhalb der elektrischen Reichweite gefahren werden (vgl. ebenda).

REEV ist eine Abkürzung für *Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung*. Reichweitenverlängerer (englisch: Range Extender) werden in Elektrofahrzeugen zusätzlich zur Batterie eingebaut, um die Reichweite zu vergrößern. Dazu wird in der Regel ein kleiner Verbrennungsmotor genutzt, der bei Bedarf mittels eines Generators Strom zum Wiederaufladen der Batterie erzeugt (vgl. Karle 2015: 28 f.). Neben Verbrennungsmotoren existieren seltener verbreitete Range Extender Technologien, wie die Brennstoffzelle und die Mikrogasturbine (vgl. Ferrari et al. 2012: 9 f.).

Da Fahrzeuge mit Range Extender mit zwei unterschiedlichen Antriebstechnologien ausgestattet sind, zählen diese zu den Hybridfahrzeugen (vgl. Karle 2015: 28 f.). Anders als bei HEV und PHEV wird der Verbrennungsmotor jedoch nicht für den direkten Antrieb des Fahrzeugs genutzt, sondern zur Stromerzeugung für das Nachladen der Batterie während der Fahrt (vgl. ebenda). Dennoch können bei einem Elektrofahrzeug mit Range Extender, ebenso wie bei einem PHEV, sowohl die Batterie über das Stromnetz wiederaufgeladen als auch der Kraftstoffbehälter über eine Betankung aufgefüllt werden.

Eingesetzt wird diese Technik beispielsweise beim BMW i3 mit Range Extender (vgl. BMW AG 2015). Laut Herstellerangaben vergrößert sich die Reichweite durch den Range Extender im Vergleich zur rein elektrisch betriebenen Fahrzeugversion um bis zu 150 km (vgl. ebenda). Im deutschen Fahrzeugmarkt sind REEV allerdings noch sehr selten vertreten (vgl. Frost & Sullivan 2013). Laut Frost & Sullivan wird das Angebot bis zum Jahr 2018 weltweit voraussichtlich auf 14 Fahrzeugmodelle anwachsen (vgl. ebenda). Aufgrund der kaum verfügbaren Informationen zu den zukünftigen Modellen werden REEV in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) sind Fahrzeuge mit einem rein elektrischen Antrieb. Dabei wird die Antriebsenergie vollständig über eine extern aufladbare Batterie im Fahrzeug zugeführt. Rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge zeichnen sich insbesondere durch einen geringen Energieverbrauch, infolge ihres hohen Wirkungsgrades von rund 90 Prozent und der Möglichkeit zur Rekuperation⁴, aus (vgl. Karle 2015: 26 f.). Durch den Verzicht auf einen doppelten Antriebsstrang wiegen die Nachteile von Elektrofahrzeugen hinsichtlich geringer Reichweiten und langer Ladezeiten allerdings schwerer als bei kombinierten Antriebstechnologien (vgl. IFEU 2015).

Ein weiteres elektrisches Antriebskonzept bietet das *Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)*. Bei diesem wird der Elektromotor, in der Regel über den Energieträger Wasserstoff und den Energiewandler Brennstoffzelle, mit elektrischer Energie versorgt (vgl. e-mobil BW 2015:

4 Zur Definition siehe Abschnitt 2.1: Hybridfahrzeuge.

8 f.). Dabei reagiert der Wasserstoff in der Brennstoffzelle mit Sauerstoff, sodass aus der chemischen Energie von Wasserstoff elektrische Energie erzeugt wird (vgl. IFEU 2015). Da Brennstoffzellenfahrzeuge die Energie somit nicht aus dem Stromnetz beziehen, kommt dieser Antriebstechnologie in den weiteren Ausführungen keine Bedeutung zu.

2.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur

Dieser Abschnitt befasst sich mit den möglichen Ausgestaltungsoptionen von Ladeinfrastruktur. Im Wesentlichen kann Ladeinfrastruktur nach der Art der Energieversorgung und nach der Art der Zugänglichkeit von Einrichtungen zur Energieversorgung differenziert werden (vgl. Kley 2011: 7). Vor diesem Hintergrund stellt Abschnitt 2.2.1 die verschiedenen verfügbaren Ladekonzepte vor. Darauf aufbauend werden, anhand des Konzepts der kabelgebundenen Ladung, die für diese Arbeit grundlegenden Begriffe zur technischen Ausgestaltung von Versorgungseinrichtungen definiert (Abschnitt 2.2.2). Abschließend werden in Abschnitt 2.2.3 die Auswirkungen auf die Gestaltung von Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit vom Aufstellort untersucht.

2.2.1 Konzepte zum Laden

Die Beladung von Batterien kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Dies spiegelt sich in den bereits bestehenden Ladekonzepten wieder (siehe Abbildung 2-2). Im Folgenden soll nunmehr erläutert werden, welche unterschiedlichen Konzepte zur Energieübertragung existieren, aktuell Verwendung finden und für die zukünftige Umsetzung priorisiert werden.

In den meisten Konzepten ist die Batterie fest im Elektrofahrzeug eingebaut und wird über eine externe Einrichtung zur Energieversorgung geladen (vgl. Karle 2015: 100 f.). Dazu wird das Fahrzeug entweder *kabelgebunden* oder *kabellos* an die externe Lademöglichkeit angeschlossen. Als Energiespeicher haben sich dabei, aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichte, Lithium-Ionen-Batterien durchgesetzt (vgl. Karle 2015: 76). Bei der kabelgebundenen Variante wird eine physische Verbindung zwischen Ladepunkt und Fahrzeug zur Übertragung von elektrischer Energie hergestellt. Dieser erste Systemansatz, der allgemein auch als *konduktive* Ladung bekannt ist, wird derzeit in Deutschland mit höchster Priorität verfolgt (vgl. NPE 2014 b: 69 f.). Die kabellose Ladetechnik funktioniert hingegen berührungslos über eine *induktive* Energieübertragung (vgl. Karle 2015: 100 f.). Das induktive Laden ist als Ladetechnologie für Elektrofahrzeuge in Deutschland gegenwärtig nicht kommerziell verfügbar (vgl. NPE 2013: 17). Aus diesem Grund werden stationäre, induktive Ladetechniken mit geringen Ladeleistungen erst in zweiter Priorität in Betracht gezogen (vgl. NPE 2014 b: 69 f.).

Zusätzlich dazu wird an einer weiteren Option einer fest im Fahrzeug installierten Batterie geforscht. Das Ziel ist es, durch die Verwendung von Redox-Flow-Batterien ein System zu entwickeln, bei dem entladene Elektrolytflüssigkeit an einer Tankstelle gegen geladene ausgetauscht werden kann (vgl. Reinke 2014: 5). Da derzeit verfügbare Technologien mit *Elektrolytwechsel* eine geringe Energiekapazität aufweisen, sind diese aktuell für den Einsatz im Elektrofahrzeug nicht geeignet (vgl. ebenda).

Ein grundverschiedenes Konzept stellt der *Batteriewechsel* dar⁵. Dabei wird die leere Batterie an einer Wechselstation aus dem Fahrzeug entnommen und in wenigen Minuten gegen eine vollständig geladene Batterie ausgetauscht (vgl. Karle 2015: 101). Nach Karle kommt dieses Konzept aufgrund erforderlicher Standards bezüglich der Batterie und der Batteriebefestigung im Fahrzeug nicht als flächendeckende Lösung in Betracht (vgl. ebenda).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass neben dem kabelgebundenen Laden auch andere Konzepte, wie das induktive Laden, der Batteriewechsel sowie der Elektrolytwechsel für das Laden von Elektrofahrzeugen praktikabel erscheinen. Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand ist allerdings davon auszugehen, dass die kabelgebundene Ladung aufgrund der leichten technischen Umsetzbarkeit bis zum Jahr 2020 vorherrschend sein wird. Die anderen benannten Ladekonzepte werden daher im Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.2.2 Systemansätze zum konduktiven Laden

Die technischen Ausgestaltungsmöglichkeiten für das kabelgebundene Laden sind in Abbildung 2-2 detailliert aufgeführt. In dem Organigramm werden ausgehend von der höchsten Ebene Ausgestaltungsoptionen von Ladekonzepten, Ladeverfahren, Ladesteckvorrichtungen, Netzanschlüsse sowie Ladeströme (bzw. Ladeleistungen) dargestellt.

Zur Differenzierung der technischen Ausgestaltungsmöglichkeiten zum kabelgebundenen Laden sei an dieser Stelle auf die internationale Normung verwiesen: Die wesentlichen Standards, unter anderem die Definition der Ladebetriebsarten, gehen dabei aus der Normreihe ICE 61851 „Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge“ hervor. Die für die kabelgebundene Energieübertragung zwischen Elektrofahrzeug und Ladepunkt notwendigen Steckvorrichtungen werden in der Normreihe ICE 62196 beschrieben.

⁵ Das Konzept des Batteriewechsels ist vor allem durch das Unternehmen Better Place bekannt, das allerdings mit diesem Geschäftsmodell im Jahr 2013 gescheitert sind (vgl. Beeton/Mayer 2015: 72).

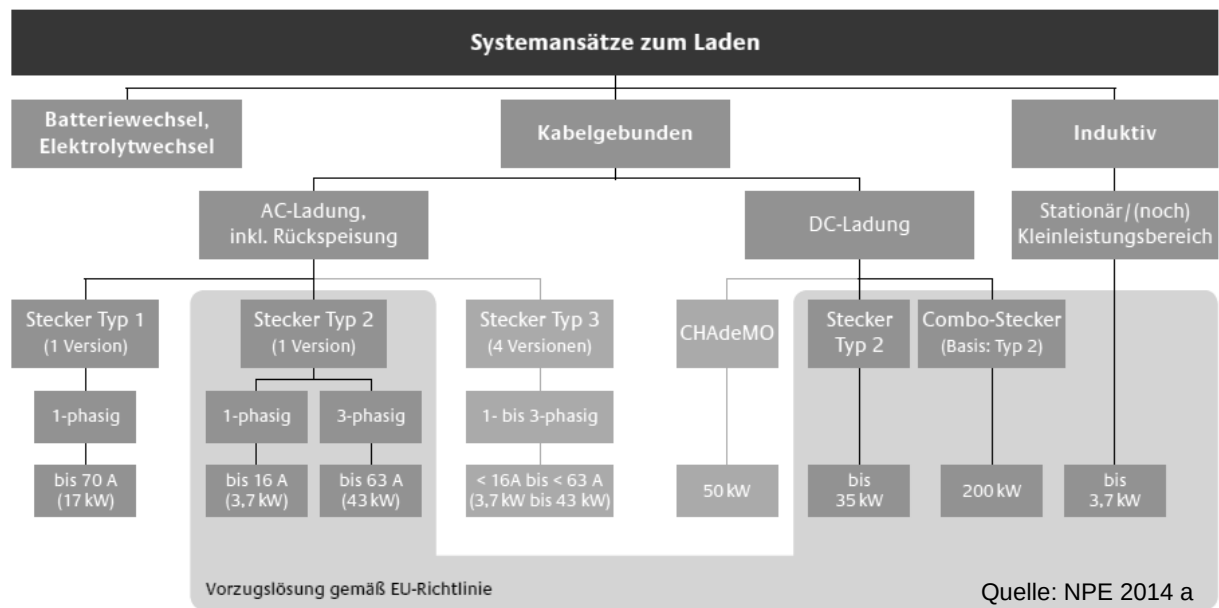


Abbildung 2-2: Übersicht über Systemansätze zum Laden von Elektrofahrzeugen

Zur Erhöhung der Verständlichkeit der weiteren Ausführungen dieser Arbeit werden nachfolgend die zwei grundsätzlichen Ladeverfahren (AC- und DC-Ladung) erläutert. Darauf aufbauend wird erklärt, wie die verschiedenen Ladeleistungen festgelegt werden und welche Ladedauern sich daraus ergeben. Als Voraussetzung zum Verständnis dieser technischen Ausgestaltungsoptionen gilt die Abgrenzung der Begriffe „Ladepunkt“ und „Ladestation“, die daher im Vorfeld vorgenommen wird.

Eine Ladestation ist eine Einrichtung zur Energieversorgung von Elektrofahrzeugen. Im Wesentlichen existieren zwei Ausführungen von Ladestationen: Ist eine Ladestation stehend montiert, handelt es sich um eine Ladesäule; wandmontierte Ladestationen werden hingegen als Wallboxen bezeichnet (vgl. NPE 2013: 14). Dagegen stellt ein Ladepunkt den netzseitigen Anschlusspunkt dar. Dabei kann es sich sowohl um eine Steckvorrichtung als auch um ein an der Ladestation fest installiertes Ladekabel handeln. Eine Ladestation kann über einen oder mehrere Ladepunkte verfügen, wobei je Ladepunkt immer nur ein Fahrzeug gleichzeitig angeschlossen werden kann (vgl. ebenda).

Die Ladeverfahren AC- und DC-Laden werden nach den technischen Stromarten Wechselstrom (englisch: alternating current) und Gleichstrom (englisch: direct current) unterteilt. Während im Stromnetz Wechselstrom fließt, können Fahrzeugbatterien nur mit Gleichstrom geladen werden (vgl. NPE 2013: 17). Aus diesem Grund ist zur Beladung von Batterien ein Gerät zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom (Gleichrichter) erforderlich (vgl. ebenda). Dabei wird beim Wechselstromladen ein Ladegerät im Fahrzeug und beim Gleichstromladen ein Ladegerät in der DC-Ladestation verwendet (vgl. ebenda).

In Abbildung 2-2 sind in der untersten Ebene des Organigramms die Ladeleistungen in Kilowatt (kW) dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass AC-Laden ein breites

Spektrum von niedrigen Ladeleistungen von maximal 3,7 kW bis zu höheren Ladeleistungen von maximal 43 kW abdeckt. Für niedrige Ladeleistungen stellt der reguläre einphasige Haushaltsanschluss mit einer maximalen Ladeleistung von 3,7 kW die Basislösung dar (vgl. NPE 2013: 40). Es können höhere Ladeleistungen erreicht werden, wenn eine AC-Ladestation mit einem dreiphasigen Anschluss ausgestattet ist. In Abhängigkeit vom Ladestrom sind folgende Ladeleistungen möglich: 11,1 kW (16 A), 22,2 kW (32 A) oder 43,5 kW (63 A) (vgl. MENNEKES 2011; NPE 2013: 40).

Noch höhere Ladeleistungen können durch den Einsatz von DC-Ladestationen erreicht werden (siehe Abbildung 2-2). Die maximal möglichen Ladeleistungen hängen dabei im Wesentlichen von den technischen Grenzen der eingesetzten Steckvorrichtungen zur Energieübertragung ab. Als Stecker für DC-Laden werden aktuell der japanische Standard CHAdeMO⁶, das im europäischen Raum empfohlene Combined-Charging-System (CCS oder kurz Combo-Stecker) sowie der Tesla Supercharger verwendet (vgl. The Mobility House 2015).

Zur Klassifizierung der Ladeverfahren nach den verschiedenen Ladeleistungen sind die Begriffe *Normalladen* und *Schnellladen* allgemein verbreitet. Nach dem Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität wird unter dem Begriff Normalladen „AC- oder DC-Laden mit Leistungen bis zu 22 kW“ (NPE 2014 b: 37) verstanden. In Abgrenzung hierzu wird der Begriff Schnellladen als „AC- oder DC-Laden mit Leistungen von mehr als 22 kW“ (ebenda) definiert. Aufgrund des bis Ende des Jahres 2013 fehlenden Angebots an AC- und DC-Schnellladelösungen hat sich für die Variante der AC-Ladung mit bis zu 22 kW auch der Begriff der *Semi-Schnellladung* herausgebildet (vgl. BDEW 2015 b; e-mobil BW 2013: 16). In Abgrenzung zu den Ladeverfahren (AC- und DC-Laden) werden Normal- und Schnellladen im Folgenden unter dem Begriff *Ladeart* zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird die folgende Differenzierung vorgenommen:

- Normalladen: AC-Laden mit Leistungen bis zu 11,1 kW
- Semi-Schnellladen: AC-Laden mit einer Leistung von 22,2 kW
- Schnellladen: AC- sowie DC-Laden mit mehr als 22,2 kW

Für die beschriebenen Ladearten ergeben sich in der Praxis folgende typische Ladedauern: Für Normalladungen mit niedrigen Ladeleistungen kann die Ladedauer je nach Ladeleistung und Batteriekapazität zwischen drei und 16 Stunden liegen (vgl. e-mobil BW 2013: 16). Für eine Batteriekapazität von 24 Kilowattstunden (kWh) ist bei einer Ladeleistung von 3,7 kW beispielsweise von einer achtstündigen Ladezeit auszugehen (vgl. Karle 2015: 95 f.). Für Schnellladungen werden derzeit hauptsächlich DC-Ladestationen von 50,0 kW mit einer

6 CHAdeMO steht kurz für CHArge de Move (vgl. NPE 2014 b: 90).

Ladezeit von etwa 30 Minuten eingesetzt (vgl. ebenda). Allerdings kann beim Schnellladen aufgrund der starken Wärmeentwicklung und der damit verbundenen Schädigung der Batterie keine Vollladung auf 100 Prozent SOC erfolgen. SOC gibt dabei den Ladezustand (englisch: State of Charge) bezogen auf die Gesamtkapazität der Batterie an (vgl. Rahimzei et al. 2015: 14). Um die Lebensdauer der Batterie – also die Anzahl der Batterieladezyklen – zu erhöhen, ist die Aufladung beim Schnellladen auf maximal 80 Prozent SOC beschränkt (vgl. NPE 2011: 37).

2.2.3 Ladeinfrastruktur nach Art der Zugänglichkeit

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, benötigen technisch praktikable Ladeverfahren im Verhältnis zur Betankung konventioneller Fahrzeuge längere Ladezeiten. Im Idealfall sollten Elektrofahrzeuge daher dort geladen werden, wo sie ohnehin parken. Dies schließt das Laden an regelmäßigen Orten (vor allem zu Hause oder am Arbeitsplatz) genauso ein wie das Laden an Standorten, an denen ein Fahrzeug gelegentlich abgestellt wird (z. B. am Supermarkt). Es stellt sich somit die Frage, an welchen Standorten Ladeinfrastruktur besonders einfach und möglichst kostengünstig errichtet werden kann. Im Folgenden werden daher die Möglichkeiten der Stromversorgung von Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit vom Aufstellort untersucht. Im Allgemeinen werden private, halböffentliche und öffentliche Aufstellorte für Ladeinfrastruktur unterschieden (vgl. NPE 2014 a: 46).

Private Ladeinfrastruktur befindet sich auf Flächen in privatem Eigentum, zu denen der Zugang nur mit Erlaubnis des Eigentümers möglich ist (vgl. NPE 2013: 48 f.). Als Standort für private Infrastruktur kommt in erster Linie ein privater Stellplatz am Wohnort (z. B. eine Garage) infrage, an dem das Fahrzeug über einen Hausanschluss geladen werden kann. Darüber hinaus können dieser Kategorie auch Stellplätze am Arbeitsplatz (z. B. Firmenparkplätze oder Betriebshöfe) zugeordnet werden, sofern der Zugang auf Fahrzeuge von Mitarbeitern oder Flottenfahrzeuge beschränkt ist. Aus der technischen Perspektive sind Ladung und Abrechnung über einen Hausanschluss bzw. Anschluss beim Arbeitgeber verhältnismäßig einfach zu realisieren (vgl. Kley 2011: 14). Jedoch ist die nutzbare Ladeleistung durch die Absicherung des Anschlusses auf eine bestimmte Maximallast begrenzt. Für private Ladeinfrastruktur liegt die obere Leistungsgrenze daher bei maximal 22,2 kW (vgl. MENNEKES 2011).

Halböffentliche Ladeinfrastruktur ist an öffentlich zugänglichen Stellplätzen privater Eigentümer vorhanden (vgl. Reinke 2014: 39). Beispiele für halböffentliche Standorte sind Parkhäuser und Tiefgaragen privater Betreiber sowie Supermarktparkplätze. An diesen Orten befinden sich bereits häufig Stromanschlüsse, sodass Ladeinfrastruktur im halböffentlichen Bereich genauso wie im privaten Bereich über den bestehenden Anschluss in das Stromnetz eingebunden werden kann (vgl. Kley 2011: 14). Ladeinfrastruktur auf

halböffentlichen Stellplätzen kann sowohl ohne Nutzungseinschränkung als auch zugangsbeschränkt für bestimmte Nutzergruppen (z. B. Kunden) oder zeitlich begrenzt (z. B. durch eine Schranke) zur Verfügung gestellt werden (vgl. NOW 2014: 10).

Als *öffentliche Ladeinfrastruktur* werden Ladestationen im öffentlichen Raum bezeichnet (vgl. Reinke 2014: 39). Ladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich ist in der Regel diskriminierungsfrei nutzbar und kann damit grundsätzlich als allgemein zugänglich betrachten werden. Neben dem Straßenrand zählen hierzu auch öffentliche Parkplätze, wie zum Beispiel an Flughäfen und Bahnhöfen. Hinsichtlich des Zugangs von öffentlichen Stellplätzen ergeben sich einige Sonderfälle, bei denen bestimmte Stellplätze für einzelne Nutzer(-gruppen) vorbehalten sind (vgl. ebenda). Beispiele dafür sind Stellplätze für Lieferanten, Behinderte oder Carsharing-Fahrzeuge (vgl. NOW 2014: 10). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Sonderfälle der Nutzung öffentlicher Stellplätze allerdings ausgeklammert. Im öffentlichen Raum sind häufig noch keine Netzanschlüsse vorhanden, weshalb öffentliche Ladeinfrastruktur in der Regel von Energieversorgern und Netzbetreibern neu errichtet werden muss (vgl. NPE 2013: 48 f.). Zudem werden höhere Anforderungen an öffentliche Ladeinfrastruktur in Bezug auf Erkennbarkeit, Nutzbarkeit, Ausstattung, Abrechnung und Schutz vor Missbrauch und Vandalismus gestellt (vgl. Kley 2011: 14).

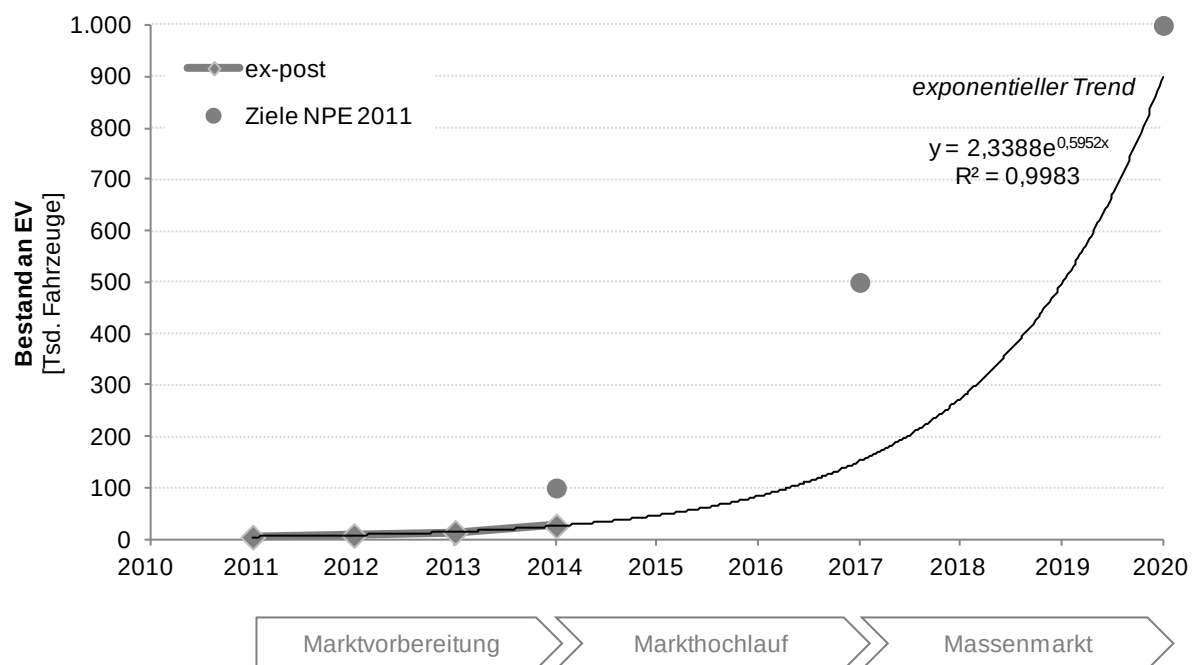
Mit dem Aufbau und der Installation von öffentlicher Ladeinfrastruktur sind damit wesentlich größere Herausforderungen verbunden. Allerdings können mit der Möglichkeit des Aufbaus von (Semi-)Schnellladestationen auch wesentlich kürzere Ladezeiten erreicht werden (vgl. ebenda).

2.3 Marktentwicklung

Ausgehend von der Grundidee Deutschland zu einem Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln, hat die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) eine Zielkurve der Marktentwicklung zwischen den Jahren 2010 und 2020 erstellt (vgl. Abbildung 2-3). Darin werden drei Phasen der Marktentwicklung mit den jeweiligen Zielsetzungen für den Bestand an Elektrofahrzeugen beschrieben. Auf der Grundlage des Zweiten Berichts der NPE zur Entwicklung der Elektromobilität werden nachfolgend die Ziele der Marktentwicklung beschrieben (vgl. NPE 2011: 31 f.): Die erste Phase wird als Marktvorbereitung bezeichnet. Der Bestand an Elektrofahrzeugen sollte zum Ende dieser Phase, die für die Jahre 2010 bis 2014 angesetzt war, 100.000 Fahrzeuge umfassen. Für die Jahre 2015 bis 2017 wird die Phase des Markthochlaufs angestrebt. Als weiterer Meilenstein in der Bestandentwicklung von Elektrofahrzeugen sollen zum Ende der zweiten Phase 500.000 Fahrzeuge in Deutschland zugelassen sein. Daran anschließend wird ein

einsetzender Massenmarkt mit kommerziell tragfähigen Geschäftsmodellen erwartet, sodass im Jahr 2020 die Zielmarke von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland erreicht wird.

Der tatsächliche Bestand an Pkw mit extern aufladbarem elektrischen Antrieb befindet sich im Vergleich zum ersten Meilenstein der NPE mit rund 26.000 Fahrzeugen auf einem deutlich niedrigeren Niveau (vgl. BDEW 2015 b, Stand: 01.01.2015). Auf Basis des aktuellen Wissenstandes zum Bestand an Elektrofahrzeugen des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)⁷ lässt sich jedoch ein exponentieller Trend erkennen (siehe Abbildung 2-3): Für das Jahr 2020 kann nach eigenen Berechnungen ein Bestand von rund 900.000 Elektrofahrzeugen mit externer Auflademöglichkeit erreicht werden. Zum Ende der Markthochlaufphase im Jahr 2017 ist demnach ein Bestand von etwa 150.000 Pkw zu erwarten.



Quelle: Eigene Darstellung nach BDEW 2015 b und NPE 2011

Abbildung 2-3: Elektrofahrzeugbestand in Deutschland – Trendentwicklung und Ziele

Wie sich der Bestand an Elektrofahrzeugen tatsächlich entwickeln wird, hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Wesentliche externe Einflussfaktoren sind Entwicklungen von Rohöl-, Strom- und Batteriepreisen (vgl. Plötz et al. 2013: 20 ff.). Darüber hinaus können marktinterne Faktoren, wie das Angebot an Elektrofahrzeugmodellen und die Mehrpreisbereitschaft von potenziellen Kunden, hemmend oder fördernd wirken (vgl. Plötz et al. 2013: 93 ff.). Unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren hat das Fraunhofer Institut

⁷ PHEV wurden bis Januar 2012 vollständig und bis Januar 2013 teilweise als gewöhnliche Hybridfahrzeuge gemeldet und im Zentralen Fahrzeugregister eingetragen. Aufgrund dieser statistischen Unsicherheit entfällt nach KBA die gesonderte Ausweisung von PHEV in den amtlichen Statistiken zu den Neuzulassungen bis 2012 und grundsätzlich zum Fahrzeugbestand (vgl. KBA 2015 c).

für System- und Innovationsforschung (ISI) drei mögliche Szenarien für den Markthochlauf von Elektromobilität erstellt. Demzufolge werden im Jahr 2020 im mittleren Szenario 400.000 bis 700.000 Elektrofahrzeuge im Bestand erwartet (vgl. Plötz et al. 2013: 118 f.). Dagegen wären im ungünstigsten Fall 50.000 und im besten Fall 1,4 Millionen Elektrofahrzeuge denkbar (vgl. ebenda).

3 Ermittlung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr

Zur Ermittlung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen ist eine umfassende Analyse von Fahr- und Ladeprofilen notwendig. Aktuelle Erkenntnisse zum Einsatz von Elektrofahrzeugen in Deutschland ergeben sich zumeist aus Begleitforschungen zu den Schaufenstern und Modellregionen oder im Rahmen von Flottenversuchen (u. a. Graf et al. 2015, Vogt/Bongard 2015, Krems et al. 2011). Darüber hinaus haben Frenzel et al. (2015) erstmals eine deutschlandweite Befragung der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen durchgeführt. Diese Studien zielen vorrangig darauf ab, die Motive und Hemmnisse beim Kauf von Elektrofahrzeugen sowie das Nutzerverhalten von Test- bzw. Erstnutzern zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können allerdings nur begrenzt die Anforderungen an die in Zukunft benötigte Ladeinfrastruktur abbilden. Grund dafür ist vor allem der ungewisse und veränderliche Charakter von Einflussfaktoren, welche die Marktentwicklung in den kommenden Jahren beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.3). Zudem gilt es bei der Bewertung von Ladeinfrastruktur aus der Nutzerperspektive, psychologische Aspekte zu berücksichtigen. Demnach ist die Forderung nach öffentlicher Ladeinfrastruktur seitens der Nutzer zum großen Teil wegen der Reichweitenangst und weniger durch die tatsächliche Notwendigkeit begründet (vgl. Franke/Krems 2013).

Aufgrund der fehlenden Datenbasis zu typischen Nutzungsmustern von Elektrofahrzeugen, haben Anderson et al. (2015) ein Modell entwickelt, mit dem sich der Ladebedarf im Alltagsverkehr aus Fahrzeugnutzungsprofilen konventioneller Pkw abschätzen lässt. Dazu wird für jedes Fahrzeug ermittelt, an welchen Standorten geladen werden muss, um mit einem Elektrofahrzeug (BEV / PHEV) die Tageskilometer zurücklegen zu können. Im Ergebnis können für jedes Fahrzeug in Abhängigkeit der Antriebsart die Ladevorgänge pro Tag an bestimmten Standorten beziffert werden. Darauf aufbauend erfolgt die Hochrechnung der Ladebedarfe für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland. Dafür haben Anderson et al. (2015) verschiedene Fahrzeugbestandsszenarien aufgestellt. Auf Basis dieser Szenarien ermitteln sie die totalen Lade- und Standdauern von Elektrofahrzeugen und damit den kumulierten Ladebedarf im Alltagsverkehr differenziert nach Standorten.

Ausgehend von der Frage *„Wie viele Ladevorgänge ergeben sich bei einer Million Elektrofahrzeuge in Deutschland an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020?“* wird das von Anderson et al. (2015) entwickelte Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr als Grundlage dieser Arbeit gewählt.

Darauf aufbauend wird der dargestellte Lösungsansatz durch folgende Fragestellungen ergänzt: „*Wie viele Fahrzeuge konzentrieren sich an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 zu bestimmten Uhrzeiten an bestimmten Standorten? Und welcher Anteil aller Fahrzeuge hat einen Ladebedarf?*“ Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird im Rahmen dieser Arbeit ein alternatives Hochrechnungsmodell entwickelt. Dabei werden zunächst für die Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen die Standdauern zeitscheibenfein, d. h. im Tages- und Wochengang, für bestimmte Standorte ausgewiesen. Analog dazu werden die Standvorgänge von allen privat genutzten Fahrzeugen im Bestand (d. h. Elektrofahrzeuge zuzüglich konventioneller Fahrzeuge) ermittelt. Anschließend werden die Stand- und Ladevorgänge für den im Jahr 2020 erwarteten Fahrzeugbestand hochgerechnet. Durch den Vergleich dieser beiden Hochrechnungen kann schließlich der Anteil der Fahrzeuge mit Ladebedarf bestimmt werden, der sich zu einer bestimmten Uhrzeit an einem bestimmten Standort konzentriert.

Um das methodische Vorgehen so transparent wie möglich darzustellen, wird dieses Kapitel in zwei Teile gegliedert. In *Teil A* wird das Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs von Anderson et al. (2015) ausführlich vorgestellt und erläutert. Darauf aufbauend werden in *Teil B* die Modifikationen und Erweiterungen des Modells im Rahmen dieser Arbeit beschrieben.

3.1 Teil A: Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs

Im Folgenden wird das Modell von Anderson et al. (2015) zur Ermittlung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr vorgestellt. Um den Einblick in die Modellierung zu erleichtern, wird zunächst der Modellaufbau beschrieben (Abschnitt 3.1.1). Der Fokus der Modellierung liegt dabei auf der Analyse aktueller Mobilitätsdaten aus Deutschland. Der nächste Unterabschnitt befasst sich daher mit der Beschreibung der Datengrundlage zur Nutzung von Mobilitätsdaten konventioneller Fahrzeuge (Abschnitt 3.1.2). Anschließend werden die wichtigsten Annahmen vorgestellt, die der Modellierung zugrunde liegen (Abschnitt 3.1.3). Darüber hinaus gibt dieser Abschnitt einen Überblick über verschiedene Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen. Abschließend werden in Abschnitt 3.1.4 die Grundlagen der Modellauswertung dargestellt und erläutert.

3.1.1 Modellaufbau

In dem von Anderson et al. (2015) implementierten Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr werden auf Basis aktuell verfügbarer Mobilitätsdaten *Fahrzeugnutzungsprofile* erzeugt. Den Daten zur realen Fahrzeugnutzung werden darauffolgend passende *Ladeprofile* zugeordnet. Für die anschließende *Hochrechnung* des

Ladebedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge berücksichtigen Anderson et al. (2015) unterschiedlich denkbare Entwicklungspfade des Fahrzeugbestands. Hierzu leiten die Autoren argumentativ sechs alternative *Szenarien* ab. Eine Übersicht über das methodische Vorgehen stellt Abbildung 3-2 dar. Die Analyse von Mobilitätsdaten zur Nutzung konventioneller Fahrzeuge stützt sich dabei auf drei wichtige Hintergrundannahmen:

Erstens wird sich die Elektromobilität im Straßenverkehr bis zum Jahr 2020 zu einem Massenmarkt entwickeln (vgl. Anderson et al. 2015: 6). Diese Annahme begründet sich in dem zu erwartenden Anstieg an Neuzulassungen von Pkw mit Elektroantrieb, um das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland bis zum Jahr 2020 zu erreichen (vgl. Anderson et al. 2015: 3). Solch eine hohe Marktdurchdringung in den nächsten fünf Jahren erfordert aber auch, dass Elektrofahrzeuge von der breiten Masse („Early Majority“) und nicht nur von Erstnutzern – sogenannten „Early Adoptern“ – gekauft werden (vgl. ebenda). Aus diesem Grund wird angenommen, dass Nutzungsmuster konventioneller Fahrzeuge auch für Elektrofahrzeuge gelten (vgl. ebenda).

Zweitens sollten Elektrofahrzeuge aufgrund der längeren Ladezeiten möglichst an den Orten geladen werden, an denen die Fahrzeuge im Alltagsverkehr ohnehin parken (vgl. Anderson et al. 2015: 6). Dies schließt das Laden an regelmäßigen Orten (z. B. am Arbeitsplatz) genauso ein wie das Laden an Standorten, an denen ein Fahrzeug gelegentlich abgestellt wird, wie z. B. beim Einkaufen (vgl. Anderson et al. 2015: 4).

Drittens wird angenommen, dass Elektrofahrzeugnutzer das Mobilitätsverhalten grundsätzlich beibehalten (vgl. Anderson et al. 2015: 6). Allerdings wird davon ausgegangen, dass Elektrofahrzeugnutzer Ziele mit vorhandener Lademöglichkeit präferieren und deshalb eine geringfügig abweichende Zielwahl vornehmen (vgl. Anderson et al. 2015: 4).

Unter den gegebenen Annahmen kann das Modell von Anderson et al. (2015) dazu genutzt werden, auf Basis aktueller Fahrzeugnutzungen realer Pkw den Ladebedarf für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland zu bestimmen. Darauf aufbauend können Aussagen zu einem bedarfsgerechten Infrastrukturaufbau für den Alltagsverkehr getroffen werden. Im Vordergrund der Betrachtung stehen dabei die Nutzung und der Betrieb von Elektrofahrzeugen in Privathaushalten (vgl. Anderson et al. 2015: 4). Im Modell nicht berücksichtigt werden hingegen Ladebedarfe im Fernverkehr (vgl. ebenda). Diese werden im Projekt LADEN2020 aufgrund der unterschiedlichen Pkw-Nutzungsmuster separat betrachtet (vgl. DLR 2015; KIT 2015).

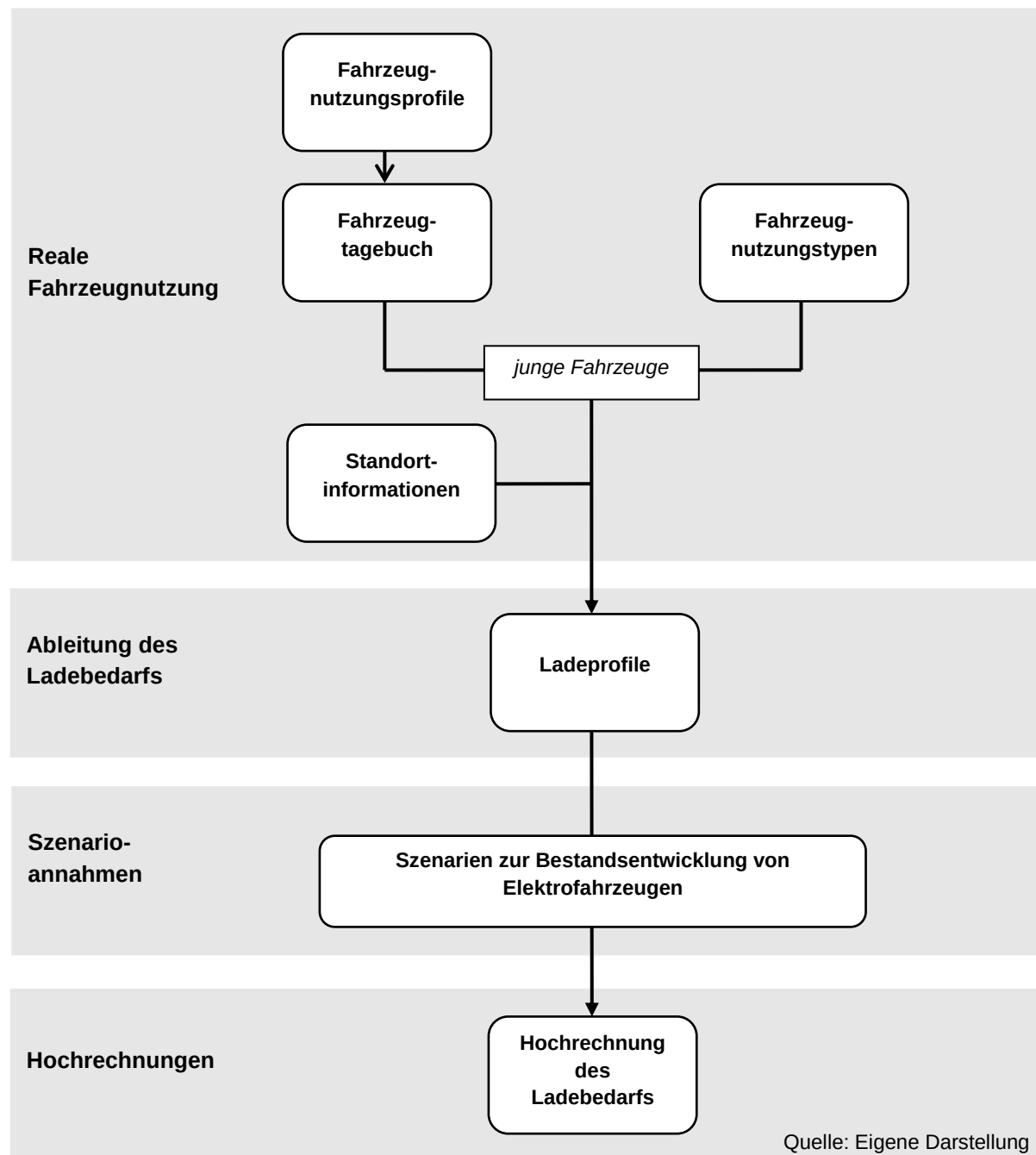


Abbildung 3-1: Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs

3.1.2 Datengrundlage

Die Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr für eine Million Elektrofahrzeuge erfolgt auf Basis aktuell verfügbarer Mobilitätsdaten zur Nutzung konventioneller Pkw. Hierbei sind insbesondere Informationen zur Fahrt und zum Parkvorgang des Fahrzeugs nötig. Hinsichtlich der Fahrt sind Informationen zu Wegelänge, Wegezweck sowie Abfahrts- und Ankunftszeit relevant (Abschnitt 3.1.2.1). Ein Wegezweck gibt in diesem Zusammenhang Aufschluss darüber, für welche Aktivität eine Fahrt mit einem Pkw durchgeführt wurde. Bei Parkvorgängen sollte vor allem der Standort genau definiert sein (Abschnitt 3.1.2.2).

Im Hinblick auf die Hochrechnung des Ladebedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge ergibt sich zudem die Frage, welche konventionellen Fahrzeuge bis 2020 durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden. Diese Frage wird im Modell durch die Einführung von *Fahrzeugnutzungstypen* beantwortet (vgl. Anderson et al. 2015: 12). Abschnitt 3.1.2.3 beschäftigt sich daher mit der Definition von Fahrzeugnutzungstypen.

3.1.2.1 Daten zur Fahrzeugnutzung

Die Auswertung von *Fahrzeugnutzungsprofilen* im Alltagsverkehr erfolgt auf Basis der anonymisierten Daten aus der bundesweit neuesten Erhebung „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD 2008)⁸. Der Datensatz aus den Erhebungsjahren 2008 und 2009 umfasst einen Stichprobenumfang von 34.601 Fahrzeugen, 193.290 Wegen und 36.182 Reisen (vgl. Follmer et al. 2010 a: 1). Dabei wurde das Mobilitätsverhalten an einem Stichtag von 60.713 Personen aus 25.922 Privathaushalten erfasst (vgl. ebenda).

In der Summe besteht der MiD-Datensatz somit aus fünf Teildatensätzen, von denen jeder für sich eine eigene Auswertungsebene repräsentiert (vgl. Follmer et al. 2010 b: 5 f.): Im Fahrzeugdatensatz werden Angaben von bis zu drei in einem Haushalt vorhandenen Pkw bereitgestellt. Daneben umfasst der Wegedatensatz Angaben von bis zu zwölf Wegen, die von einer Person an einem Stichtag berichtet wurden. Der Reisedatensatz stellt für jede Person Angaben von bis zu drei Reisen mit Übernachtung in den letzten drei Monaten vor der Stichtagerhebung zur Verfügung. Zusätzlich werden im Personendatensatz neben Personenmerkmalen, wie Alter und Geschlecht, auch Angaben zur Nutzung und Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln zu jeder befragten Person erfasst. Darüber hinaus sind im Haushaltsdatensatz Angaben zu den Haushaltsmitgliedern und zum Besitz von Verkehrsmitteln enthalten.

Der MiD-Datensatz beinhaltet demnach Angaben zu allen von einer Person an einem Stichtag genutzten Verkehrsmittel. Neben den Wegen, die als Fahrzeugführer durchgeführt wurden, werden beispielsweise auch die Wege angegeben, die als Pkw-Mitfahrer, zu Fuß, mit dem Fahrrad, mit dem öffentlichen Verkehr oder mit anderen Kraftfahrzeugen zurückgelegt wurden (vgl. Follmer et al. 2010 a: 17).

Die Fahrzeugnutzungsprofile realer Pkw werden schließlich durch die Verknüpfung des Fahrzeug- und des Wegedatensatzes aus der MiD 2008 erzeugt und in einem *Fahrzeugtagebuch* zusammengefasst. Dieses Fahrzeugtagebuch bildet die Grundlage sämtlicher Berechnungen, auf denen das Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs im Alltagsverkehr und ebenso die Modellerweiterung (siehe Abschnitt 3.2) aufbauen. Ein

⁸ Der Datenzugang erfolgte über den Datensatz „Mobilität in Deutschland 2008“, der vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bereitgestellt wird und über die Clearingstelle Verkehr im DLR zu beziehen ist (vgl. infas/DLR 2010).

Fahrzeugnutzungsprofil enthält dabei alle Wege und Parkvorgänge, die von einem Pkw an einem Tag durchgeführt werden. Doppelte Wege, die sich aus der Fahrzeugnutzung als Fahrer bzw. Mitfahrer ergeben, werden gelöscht. Wege werden dabei im Wesentlichen über den Start- und Endzeitpunkt einer Fahrt, die Wegelänge und den Wegezweck definiert. Parkvorgänge ergeben sich aus den Ankunfts- und Abfahrzeiten von Fahrten. Da es sich bei der MiD um eine Stichtagserhebung handelt, ist die letzte Ankunftszeit der Fahrzeuge am Vortag nicht bekannt. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Ankunftszeit der letzten Fahrt am Stichtag auch der Ankunftszeit am Vortag und somit dem Beginn des ersten Parkvorgangs entspricht. Der Standort eines Parkvorgangs lässt sich grundsätzlich aus dem Wegezweck der vorherigen Fahrt ableiten (vgl. Abschnitt 3.1.2.2).

Bei einigen wenigen Fahrten konnte ein Fehler bei der Angabe von Start- und Endzeiten identifiziert werden. Hier liegt das Fahrtenende zeitlich vor dem Start der betreffenden Fahrt⁹. Solche Unstimmigkeiten lassen sich zumeist auf Fehler beim Berichten oder beim Digitalisieren der Daten zurückführen. Da die Auswertung am Ende auf der Basis sinnvoller Fahrzeugnutzungsprofile erfolgen soll, wurden Profile mit derart fehlerhaften Fahrten aus dem Fahrzeugtagebuch entfernt. Die bereinigte Stichprobe umfasst somit Fahrzeugnutzungsprofile von insgesamt 34.396 Fahrzeugen¹⁰.

Um die Nutzungsmuster von Elektrofahrzeugen so genau wie möglich aus den Fahrzeugnutzungsprofilen realer Pkw ableiten zu können, wurde das Fahrzeugtagebuch anschließend auf *junge Fahrzeuge* mit ihren charakteristischen Nutzungseigenschaften reduziert (vgl. Anderson et al. 2015: 5). Die Beschränkung des Fahrzeugalters ergibt sich aus dem aktuell marginalen Marktanteil von Elektrofahrzeugen in Deutschland und der Erwartung, dass der Markthochlauf in den kommenden fünf Jahren eintreten wird (vgl. Abschnitte 2.3 und Abschnitt 3.1.1). Daher werden zur Abschätzung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen nur Fahrzeugnutzungsprofile von konventionellen Fahrzeugen bis zum Alter von sechs Jahren (n = 16.419 Fahrzeuge) ausgewertet (vgl. Anderson et al. 2015: 5).

3.1.2.2 Standortinformationen

Das Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs konzentriert sich auf Ladevorgänge an Standorten, an denen Fahrzeuge im Alltagsverkehr ohnehin stehen. Der Aufenthaltsort eines Fahrzeuges lässt sich in den allermeisten Fällen aus dem *Ziel* der Fahrt ableiten. Die Information zum Ziel einer Fahrt ist in der MiD 2008 enthalten und ergibt sich aus dem Wegezweck der Fahrt. Demzufolge wurden für die Modellierung des Ladebedarfs die Aufenthaltsorte *zu Hause*, *am Arbeitsplatz* und *beim Einkauf* auf Basis der allgemeinen

⁹ Auswertung im Rahmen des Projekts LADEN2020
(siehe dazu R-Skript-Datei „Generierung Fzg Tagebuch Datensatz.R“).

¹⁰ Eigene Auswertung (siehe dazu R-Skript-Datei „Hochrechnung_alle FZ.R“).

Wege Zwecke aus der MiD 2008 kategorisiert. Alle weiteren Wege Zwecke wurden zur Kategorie *sonstige Orte* zusammengefasst. Die letzte Kategorie repräsentiert zum überwiegenden Teil Aufenthaltsorte an Freizeitaktivitäten¹¹. Im Folgenden werden die Begriffe *Aufenthaltsort*, *Zielort* und *Wege Zweck* synonym verwendet.

Nicht eindeutig bestimmbar ist dagegen der Standort des ersten Parkvorgangs im Nutzungsprofil eines Fahrzeugs. Gleiches gilt für Fahrzeuge ohne Fahrten am Stichtag. Für diese Fälle wurde zunächst festgelegt, dass die Parkvorgänge zu Hause stattfinden¹².

Als zusätzliche Standortinformation lässt sich aus der MiD 2008 die Stellplatzverfügbarkeit für den Wohnort ableiten. Für die anderen Aufenthaltsorte sind im Datensatz der MiD 2008 hingegen keine Stellplatzinformationen enthalten. Diese sind jedoch im Hinblick auf die Energieversorgung von Elektrofahrzeugen an den entsprechenden Ladeorten von Bedeutung. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts LADEN2020 zur Ergänzung der Stellplatzinformationen auf Daten der Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010) zurückgegriffen. Mit Hilfe dieser Daten wurde die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der ein Fahrzeug auf einem bestimmten Stellplatztyp geparkt wird. Anschließend wurden die Stellplatztypen differenziert nach den zuvor definierten Wege Zwecken in Zugangsmöglichkeiten eingeteilt (siehe Tabelle 3-1). Im Ergebnis können Park- und Lademöglichkeiten nach der Art der Zugänglichkeit in *private*, *halböffentliche* und *öffentliche* Standorte unterschieden werden. Die Klassifikation der Aufenthaltsorte nach der Art der Zugänglichkeit (z. B. Wohnort privat, Wohnort öffentlich) wird im Folgenden als *Zieltyp* bezeichnet.

Tabelle 3-1: Zuordnung von Standorten nach der Art der Zugänglichkeit

	öffentlicher Straßenraum	Parkhaus, Tiefgarage	Betriebsgelände	Privatgelände
Wohnort	öffentlich	privat	privat	privat
Arbeitsplatz	öffentlich	halb- öffentlich	privat	privat
Einkauf	öffentlich	halb- öffentlich	halb- öffentlich	halb- öffentlich
Sonstiges	öffentlich	halb- öffentlich	privat	privat

(vgl. Anderson et al. 2015: 8)

Es existiert jedoch eine Ausnahme, bei der einem Fahrzeug kein genauer Aufenthaltsort zugeordnet werden konnte: Dies ist der Fall, wenn ein Fahrzeug die Fahrt unterbrechen

11 Der Anteil an Freizeitwegen in der Kategorie „sonstige Orte“ liegt bei ca. 42 Prozent (eigene Berechnungen).

12 Auswertung im Rahmen des Projekts LADEN2020

(siehe dazu R-Skript-Datei „Generierung Fzg Tagebuch Datensatz.R“).

muss, weil die verfügbare Reichweite nicht ausreicht, um das Ziel zu erreichen. Im Resultat wird die betreffende Fahrt für einen Schnellladevorgang unterbrochen, sobald die Reichweite aufgebraucht ist. Da der Aufenthaltsort einer Fahrtunterbrechung unbekannt ist, werden solche Ladevorgänge im Folgenden nach der entsprechenden Ladeart als „*schnell*“ bezeichnet. Schnellladungen zum Zweck einer Zwischenladung können sowohl in halböffentlichen als auch in öffentlichen Bereichen stattfinden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

3.1.2.3 Fahrzeugnutzungstypen

Hemmende Faktoren für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen sind vor allem die begrenzte Reichweite und die höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen gleicher Größe (vgl. Anderson et al. 2015: 12). Eine entscheidende Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen ist daher ein möglichst geringer Einsatz im Fernverkehr bei gleichzeitig hoher Jahresfahrleistung (vgl. ebenda).

Aus diesem Grund haben Anderson et al. privat genutzte, junge Pkw auf Basis der Jahreskilometer und der Regelmäßigkeit des Fernverkehrseinsatzes in *Fahrzeugnutzungstypen* eingeteilt (siehe Tabelle 3-2). Während die jährliche Fahrleistung¹³ der Pkw in der MiD 2008 enthalten ist, können aus dem Datensatz jedoch keine Schlüsse zum Einsatz der Fahrzeuge im Fernverkehr abgeleitet werden (vgl. Anderson et al. 2015: 12). Der Fernverkehrseinsatz wird daher über eine Wahrscheinlichkeit geschätzt (vgl. ebenda). Diese Schätzung basiert auf Daten des Deutschen Mobilitätspanels und dem Modell CUMILE¹⁴, das vom KIT entwickelt wurde (vgl. ebenda).

Zur Hochrechnung des Ladebedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge haben Anderson et al. die Verteilung der Fahrzeuge auf die Nutzungstypen mit einer leichten Verschiebung zu einer hohen Jahresfahrleistung und einem unregelmäßigen Einsatz im Fernverkehr angepasst. Die daraus resultierende Verteilung für das Jahr 2020 kann Tabelle 3-2 entnommen werden. In den jeweils nachstehenden Klammern ist zum Vergleich die Verteilung der jungen Fahrzeuge auf die Fahrzeugnutzungstypen im Jahr 2008 aufgeführt.

13 Bezüglich der Jahresfahrleistung wurde folgende Klassifizierung vorgenommen: Eine geringe Jahresfahrleistung gilt bis unter 10.000 Jahreskilometer, eine mittlere bis unter 20.000 Jahreskilometer und eine hohe ab 20.000 Jahreskilometer (vgl. Anderson et al. 2015: 12).

14 CUMILE ist eine Abkürzung für „Car Usage Model Integrating Long Distance Events“ (vgl. Weiss et al. 2014).

Tabelle 3-2: Verteilung von Elektrofahrzeugen auf Fahrzeugnutzungstypen

Die Werte in Klammern entsprechen der originalen Verteilung der Fahrzeuge aus dem Datensatz der MiD 2008. Unter 10.000 km/Jahr entsprechen geringen, unter 20.000 km/Jahr mittleren und ab 20.000 km/Jahr hohen Jahresfahrleistungen.

	kein regelmäßiger Einsatz im Fernverkehr	regelmäßiger Einsatz im Fernverkehr
geringe Jahresfahrleistung	26 % (26 %)	0 % (0 %)
mittlere Jahresfahrleistung	26 % (23 %)	13 % (16 %)
hohe Jahresfahrleistung	8 % (2 %)	27 % (34 %)

(vgl. Anderson et al. 2015: 12)

3.1.3 Annahmen

Für die Ableitung von Ladebedarfen im Alltagsverkehr werden Kenntnisse zu individuellen Ladeprofilen von potenziellen Elektrofahrzeugen benötigt. Ladepprofile lassen sich aus der Lademöglichkeit vor Ort über die dort verfügbare Ladeleistung und eine ausreichende Standzeit ableiten. Einflussfaktoren auf die Wahl eines Ladeprofiles sind neben der Lademöglichkeit vor Ort auch die Stellplatzverfügbarkeit am Standort (privat, halböffentlich und öffentlich) sowie die Eigenschaften und Verteilungen verschiedener Antriebstechnologien (BEV / PHEV).

Aufgrund des veränderlichen Charakters dieser Einflussfaktoren wird im Projekt LADEN2020 zur Ermittlung von robusten Infrastrukturlösungen die Methodik der Szenariotechnik verwendet (vgl. DLR 2015). Der Ansatz der Szenariotechnik besteht im Wesentlichen darin, fundierte Annahmen über wichtige Einflussfaktoren aufzustellen und diese dann mit Hilfe des implementierten Algorithmus zu konsistenten Zukunftsbildern zu bündeln (vgl. ebenda). Dafür wurden einerseits Annahmen getroffen, die für alle Szenarien gleichermaßen gelten (vgl. Anderson et al. 2015: 7). Diese werden im Folgenden als *szenarioübergreifende Annahmen* bezeichnet und im Abschnitt 3.1.3.1 dargestellt. Andererseits wurden *szenariospezifische Annahmen* festgelegt (Abschnitt 3.1.3.2), die als Voraussetzung für die Definition von sechs alternativen Szenarien zur Entwicklung des Bestands von Elektrofahrzeugen dienen (vgl. Anderson et al. 2015: 8 f.). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die nachfolgend beschriebenen Annahmen vollständig anhand von Vorarbeiten und Literaturrecherchen im Rahmen des Projekts LADEN2020 bestimmt wurden.

3.1.3.1 Szenarioübergreifende Annahmen

Grundsätzlich nehmen Anderson et al. an, dass bis zum Jahr 2020 zwei am Stromnetz aufladbare Antriebsarten auf dem Fahrzeugmarkt angeboten werden (vgl. Anderson et al.

2015: 7 f.): Das sind zum einen rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) und zum anderen am Stromnetz aufladbare Hybridfahrzeuge (PHEV). Weiterhin werden bei der Ermittlung des Ladebedarfs in Abgrenzung zum Fernverkehr Einzelfahrstrecken auf 150 km limitiert (vgl. ebenda).

Zu den Eigenschaften elektrischer Fahrzeuge werden die folgende Grundannahmen getroffen (vgl. Anderson et al. 2015: 7)¹⁵:

- Die elektrische Reichweite von BEV beträgt im Mittel 150 km. Für PHEV wird eine durchschnittliche elektrische Reichweite von 50 km angesetzt.
- Fahrzeuge, die nicht zu Hause geladen werden können, beginnen den Tag mit der halben elektrischen Reichweite.
- Fahrzeuge, die nicht zu Hause geladen werden können, erreichen nach Ende des aktuellen Tages in 50 km die nächste gute Lademöglichkeit.
- Bei PHEV wird eine Reichweitenvergrößerung von 25 km durch die Nutzung des Verbrennungsmotors akzeptiert, um den nächsten optimalen Ladepunkt (zu Hause oder am Arbeitsplatz) zu erreichen.

Zusätzlich zu den fahrzeugseitigen Annahmen haben Anderson et al. Annahmen zur verfügbaren Ladeinfrastruktur, differenziert nach Zieltypen, definiert. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen Normal- und (Semi-) Schnellladen (vgl. Anderson et al. 2015: 7): Demzufolge werden Ladeleistungen von 3,7 kW und 11,1 kW als Normalladen und Ladeleistungen von 22,2 kW und 50,0 kW als (Semi-) Schnellladen bezeichnet. Die Annahmen zur Ladeinfrastruktur lauten wie folgt (vgl. Anderson et al. 2015: 7 ff.):

- Auf dem privaten Stellplatz zu Hause wird mit einer Leistung von 3,7 kW geladen. An allen anderen Standorten wird von einer maximalen Ladeleistung von 11,1 kW ausgegangen, sofern die Standdauer für eine Normalladung ausreicht. Ist die Standdauer für einen Normalladevorgang zu gering, wird überprüft, ob die Standdauer für einen Schnellladevorgang mit 22,2 kW genügt.
- Die Mindeststandzeit für einen Normalladevorgang beträgt 30 Minuten. Für einen Schnellladevorgang am Zielort muss mindestens eine Standzeit von 20 Minuten gewährleistet sein.
- BEV unterbrechen längere Fahrten für Schnellladevorgänge, wenn die Reichweite nicht ausreicht, um den nächsten Zielort zu erreichen. Bei einer Fahrtunterbrechung zum Zweck einer Zwischenladung wird mit einer Ladeleistung von 50,0 kW geladen. PHEV unterbrechen längere Fahrten hingegen nicht für Schnellladungen. Ist die

15 Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die Annahmen gleichermaßen auf BEV und PHEV.

elektrische Reichweite aufgebraucht, schaltet das Antriebssystem auf den Verbrennungsmotor um.

Weiterhin haben Anderson et al. Annahmen darüber aufgestellt, welche Streckendistanz einer einstündigen Aufladung entspricht (siehe Tabelle 3-3). Die Reichweitzuladung wird dabei differenziert nach der am Ladeort verfügbaren Ladeleistung und der Antriebsart angegeben. Während bei Normalladevorgängen eine Reichweitzuladung von bis zu 100 Prozent SOC möglich ist, erfolgt bei Schnellladungen eine Reichweitzuladung bis maximal 80 Prozent SOC.¹⁶

Tabelle 3-3: Reichweitzuladung pro Stunde Ladezeit

Ladeart	Ladeleistung	Antriebsart	Annahme
Normalladen	3,7 kW	BEV	19,5 km
		PHEV	19,1 km
	11,1 kW	BEV	48,2 km
		PHEV	47,1 km
(Semi-) Schnelladen	22,2 kW	BEV / PHEV	95,0 km
	50,0 kW	BEV	215,0 km

(vgl. Anderson et al. 2015: 7)

3.1.3.2 Szenariospezifische Annahmen

Ausgehend von dem Ziel der Bundesregierung, dass im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren sollen, lassen sich verschiedene Szenarien für den Ladebedarf von Elektrofahrzeugen im Alltagsverkehr berechnen. Die Studie von Anderson et al. (2015) weist dabei sechs Szenarien aus, die sich aus der Kombination der folgenden drei Faktoren ergeben: dem Anteil unterschiedlicher elektrischer Antriebsarten (BEV / PHEV) in der Fahrzeugflotte, der Lademöglichkeit am Wohnort in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit eines privaten Stellplatzes und der Verfügbarkeit von öffentlicher Ladeinfrastruktur am Zielort (siehe Tabelle 3-4). Um mögliche Zukunftsbilder zu generieren, werden von Anderson et al. folgende Ausprägungen dieser Faktoren vorgegeben (vgl. Anderson et al. 2015: 8 f.):

- Zur Abschätzung, welchen Einfluss die Zusammensetzung der Elektrofahrzeugflotte auf den Ladebedarf hat, untersuchen Anderson et al. zwei alternative Verteilungen der Antriebsarten: einerseits wird ein mehrheitlicher BEV- und andererseits ein mehrheitlicher PHEV-Anteil angenommen. Die jeweils vorherrschende Antriebsart wird mit einem Anteil von zwei Dritteln festgesetzt.
- Anderson et al. nehmen an, dass jede Person, die über einen privaten Stellplatz auf dem eigenen Grundstück verfügt, zu Hause laden kann. Vor diesem Hintergrund

¹⁶ Zur Definition von SOC siehe Abschnitt 2.2.3.

sollen die Auswirkungen unterschiedlich hoher Stellplatzverfügbarkeiten aufgezeigt werden. Hierzu wird zum einen angenommen, dass nur diejenigen Personen ein Elektrofahrzeug kaufen, die auch über einen privaten Stellplatz am Wohnort verfügen. Demnach können am Wohnort sämtliche Elektrofahrzeuge privat geladen werden. Zum anderen wird der Fall betrachtet, dass jede Person ein Elektrofahrzeug besitzen kann – unabhängig davon, ob ein privater Stellplatz am Wohnort zur Verfügung steht oder nicht. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2.2 erwähnt wurde, lässt sich aus der MiD 2008 die Stellplatzverfügbarkeit für den Wohnort ableiten. Demzufolge parken 73 Prozent der Fahrzeuge auf einem Privatgelände und können damit auch am Wohnort geladen werden.

- Anderson et al. vermuten, dass sich die Verfügbarkeit von öffentlicher Ladeinfrastruktur an bestimmten Zielorten entscheidend auf den Ladebedarf im Alltagsverkehr auswirkt. Einen besonders großen Einfluss auf den Ladebedarf erwarten die Autoren durch die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur am Straßenrand in Wohngebieten für Personen, die am Wohnort über keinen privaten Stellplatz verfügen. Aus diesem Grund betrachten Anderson et al. folgende zwei Varianten: Es ist grundsätzlich Ladeinfrastruktur am Straßenrand vorhanden und an bestimmten Zielorten ist keine Ladeinfrastruktur am Straßenrand vorhanden. Für die zweite Annahme wurde festgelegt, dass weder am Wohnort noch am Arbeitsplatz am Straßenrand geladen werden kann (vgl. Anderson et al. 2015: 10). Die Möglichkeit zum Laden am Straßenrand beim Einkauf und an sonstigen Wegezwecken ist jedoch weiterhin gegeben.

Tabelle 3-4: Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen

Szenario	Fahrzeugflotte	Lademöglichkeit am Wohnort	Ladeinfrastruktur am Straßenrand
Nr. 1	2/3 BEV, 1/3 PHEV	100 %	Nein
Nr. 2	1/3 BEV, 2/3 PHEV	100 %	Nein
Nr. 3	2/3 BEV, 1/3 PHEV	73 %	Nein
Nr. 4	1/3 BEV, 2/3 PHEV	73 %	Nein
Nr. 5	2/3 BEV, 1/3 PHEV	73 %	Ja
Nr. 6	1/3 BEV, 2/3 PHEV	73 %	Ja

(vgl. Anderson et al. 2015: 9)

Aus der Kombination der Faktoren und ihren Ausprägungen lassen sich insgesamt acht Szenarien erstellen (vgl. Anderson et al. 2015: 9). Allerdings ist davon auszugehen, dass kein Bedarf an einer öffentlichen Ladeinfrastruktur in Wohngebieten besteht, wenn am Wohnort für alle Fahrzeuge eine private Lademöglichkeit verfügbar ist (vgl. ebenda). Daher

wurde die Kombination dieser zwei Ausprägungen von Anderson et al. nicht in Betracht gezogen und die entsprechenden Szenarien aus der Tabelle 3-4 entfernt.

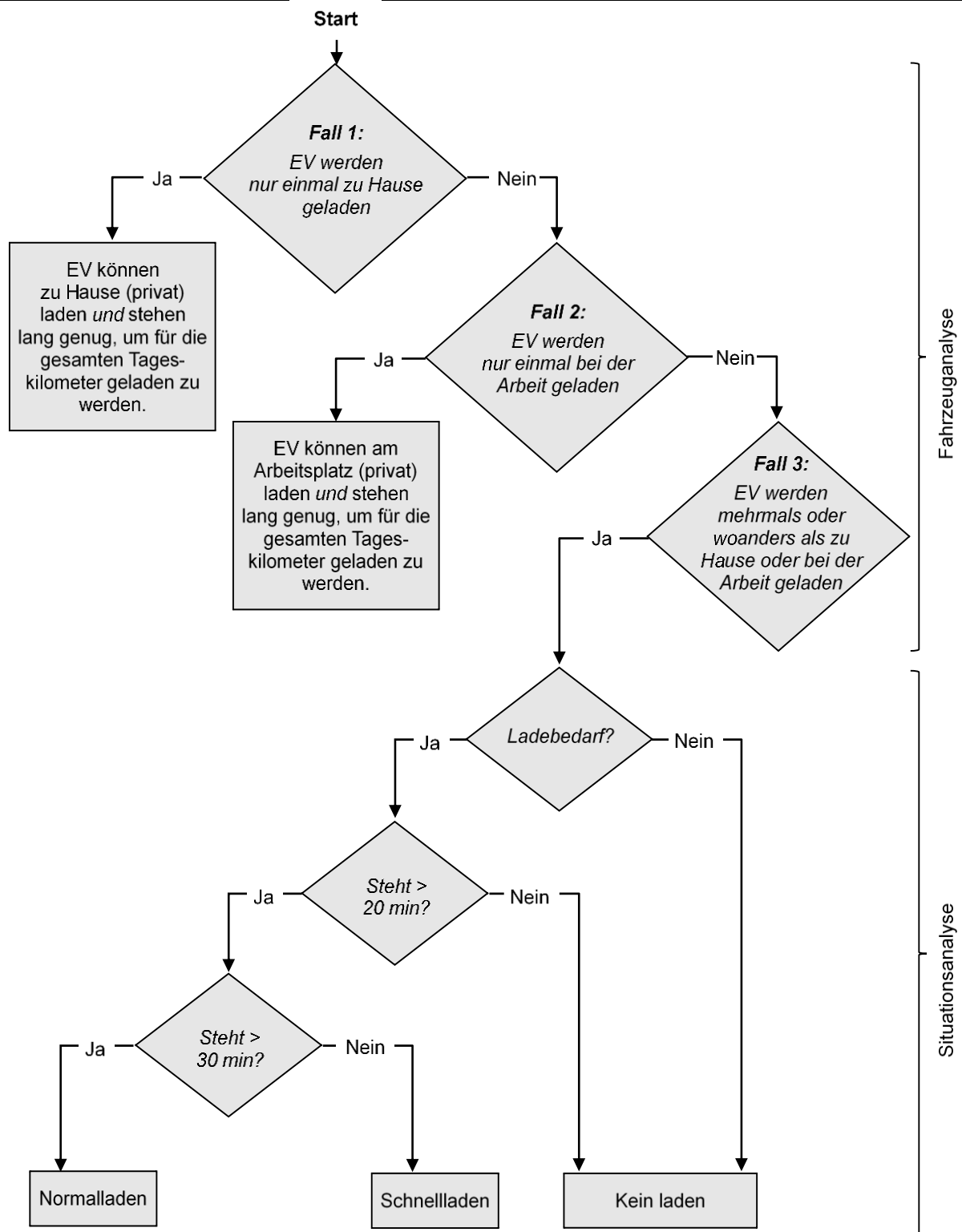
3.1.4 Modellauswertung

Wie in Abschnitt 3.1.2.1 beschrieben, wird die Studie Mobilität in Deutschland 2008 für die Modellierung von Fahrzeugnutzungsprofilen herangezogen. Unter der Annahme, dass jeder privat genutzte konventionelle Pkw bis zu einem Alter von sechs Jahren ein Elektrofahrzeug repräsentiert, lässt sich aus den Fahrzeugnutzungsprofilen der Ladebedarf pro Fahrzeug und Tag ermitteln. Hierzu wurden von Anderson et al. vier Auswertevarianten für jedes Fahrzeug festgelegt, die sich aus der Kombination von Antriebsart (Abschnitt 3.1.3.1) und Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur in Wohngebieten und am Arbeitsplatz (Abschnitt 3.1.3.2) ergeben (vgl. Anderson et al. 2015: 9 f.). Demnach wurden für jedes Tagesfahrzeugnutzungsprofil die folgenden vier hypothetischen Situationen simuliert:

1. Das Fahrzeug ist ein BEV und kann am Straßenrand, zu Hause und am Arbeitsplatz laden.
2. Das Fahrzeug ist ein BEV und hat keine Möglichkeit am Straßenrand, zu Hause und am Arbeitsplatz zu laden.
3. Das Fahrzeug ist ein PHEV und kann am Straßenrand, zu Hause und am Arbeitsplatz laden.
4. Das Fahrzeug ist ein PHEV und hat keine Möglichkeit am Straßenrand, zu Hause und am Arbeitsplatz zu laden.

Der Abschätzung des Ladebedarfs liegt ein Algorithmus zugrunde, welcher jedem Fahrzeug zur jeweiligen Auswertevariante passende Ladeprofile zuordnet. Einen Überblick über die einzelnen Modellierungsschritte gibt Abbildung 3-2. Demnach wird als Erstes überprüft, ob der komplette Strombedarf für das Tagesfahrzeugnutzungsprofil durch das Laden zu Hause (Fall 1) oder am Arbeitsplatz (Fall 2) gedeckt werden kann. Fahrzeuge, die zu Hause oder am Arbeitsplatz lang genug stehen, um ausreichend Energie für die gesamten Tageskilometer zu laden, haben einen oder weniger Ladevorgänge. Weniger Ladevorgänge ergeben sich, wenn die Standzeiten ausreichen, um ein ganzzahliges Vielfaches der Tageskilometer aufzuladen¹⁷.

¹⁷ Auswertung im Rahmen des Projekts LADEN2020
(siehe dazu R-Skript-Dateien zur Auswertung der Varianten 1 bis 4).



Quelle: Eigene Darstellung nach Anderson et al. 2015

Abbildung 3-2: Algorithmus zur Erzeugung von Ladeprofilen

Für Fahrzeuge, die mehr als einmal am Tag oder woanders als zu Hause oder am Arbeitsplatz laden müssen, werden die Lademöglichkeiten im Tagesverlauf analysiert (Fall 3). Ein Ladevorgang ergibt sich dabei einerseits aus dem situativen Ladebedarf und andererseits aus der Standzeit am aktuellen Standort (siehe Abbildung 3-2). Ein Fahrzeug hat dann einen Ladebedarf, wenn die verbleibende Reichweite kleiner ist als die Fahrstrecke

zur nächsten Lademöglichkeit zu Hause oder am Arbeitsplatz (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Während bei BEV die verbleibende Reichweite der Batteriereichweite entspricht, ergibt sich die verbleibende Reichweite bei PHEV aus der Batteriereichweite zuzüglich einer Reichweitenvergrößerung von 25 km (vgl. ebenda). Trifft diese Bedingung zu und das Fahrzeug hat einen Ladebedarf, wird bei der nächsten Gelegenheit unabhängig vom Wegezweck bei ausreichender Standzeit nachgeladen. Wie viel Reichweite zugeladen wird, ist abhängig von der Antriebsart, der Standzeit und dem Ladeort mit den ortsspezifischen Annahmen zu den Ladepunkttypen (vgl. Abschnitt 3.1.3.1, insbesondere Tabelle 3-3). Ergibt sich diese Gelegenheit bis zum Aufbrauchen der verbleibenden Reichweite nicht, wird bei BEV die Fahrt für einen Schnellladevorgang unterbrochen; PHEV setzen die Fahrt hingegen verbrennungsmotorisch fort (vgl. ebenda).

Ein einzelner Ladevorgang ist definiert durch den Wegezweck, die Zugangsmöglichkeit, die Ladeart (schnell / normal), die Tageszeit sowie die Ladedauer (vgl. Anderson et al. 2015: 12). Unter Berücksichtigung der verschiedenen Auswertevarianten lässt sich des Weiteren die Anzahl der Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag bestimmen. In Summe resultiert hieraus der Ladebedarf im Alltagsverkehr für die 16.419 jungen Fahrzeuge aus dem MiD-Datensatz (vgl. Abschnitt 3.1.3.1).

Im Anschluss daran wird der Ladebedarf für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland an einem durchschnittlichen Tag hochgerechnet. Dazu wird zunächst für jedes Szenario zum Elektrofahrzeugbestand (siehe Tabelle 3-4) die Soll-Verteilung für den Eckwert von einer Million Elektrofahrzeugen differenziert nach den Fahrzeugnutzungstypen (siehe Tabelle 3-2) berechnet. Anschließend wird die Ist-Verteilung der Fahrzeuge in der MiD 2008 differenziert nach den zutreffenden Auswertevarianten und den Fahrzeugnutzungstypen ermittelt. Aus der Hochrechnung der MiD-Stichprobe auf die Soll-Verteilung lassen sich daraufhin für jedes Szenario die Ladevorgänge sowie die Lade- und Standdauern differenziert nach der Art der Zugänglichkeit (privat, halböffentlich, öffentlich) und dem Wegezweck (am Wohnort, am Arbeitsplatz, beim Einkauf, sonstige Orte) bestimmen (vgl. Anderson et al. 2015: 13).¹⁸

3.2 Teil B: Alternatives Hochrechnungsmodell

In diesem Kapitel wird zunächst die Modellerweiterung des in Teil A erläuterten Modellansatzes vorgestellt (Abschnitt 3.2.1). Darauf aufbauend werden die maßgebenden Modellierungsschritte zur zeitscheibenfeinen Auswertung der Nachfragedaten aufgezeigt (Abschnitt 3.2.2). Anschließend wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte alternative Hochrechnungsvariante näher erläutert. Dazu werden sowohl die Grundlagen als auch das Vorgehen zur Hochrechnung beschrieben (Abschnitt 3.2.3).

18 Für eine genaue Beschreibung des Vorgehens bei der Hochrechnung siehe Abschnitt 3.2.3.2.

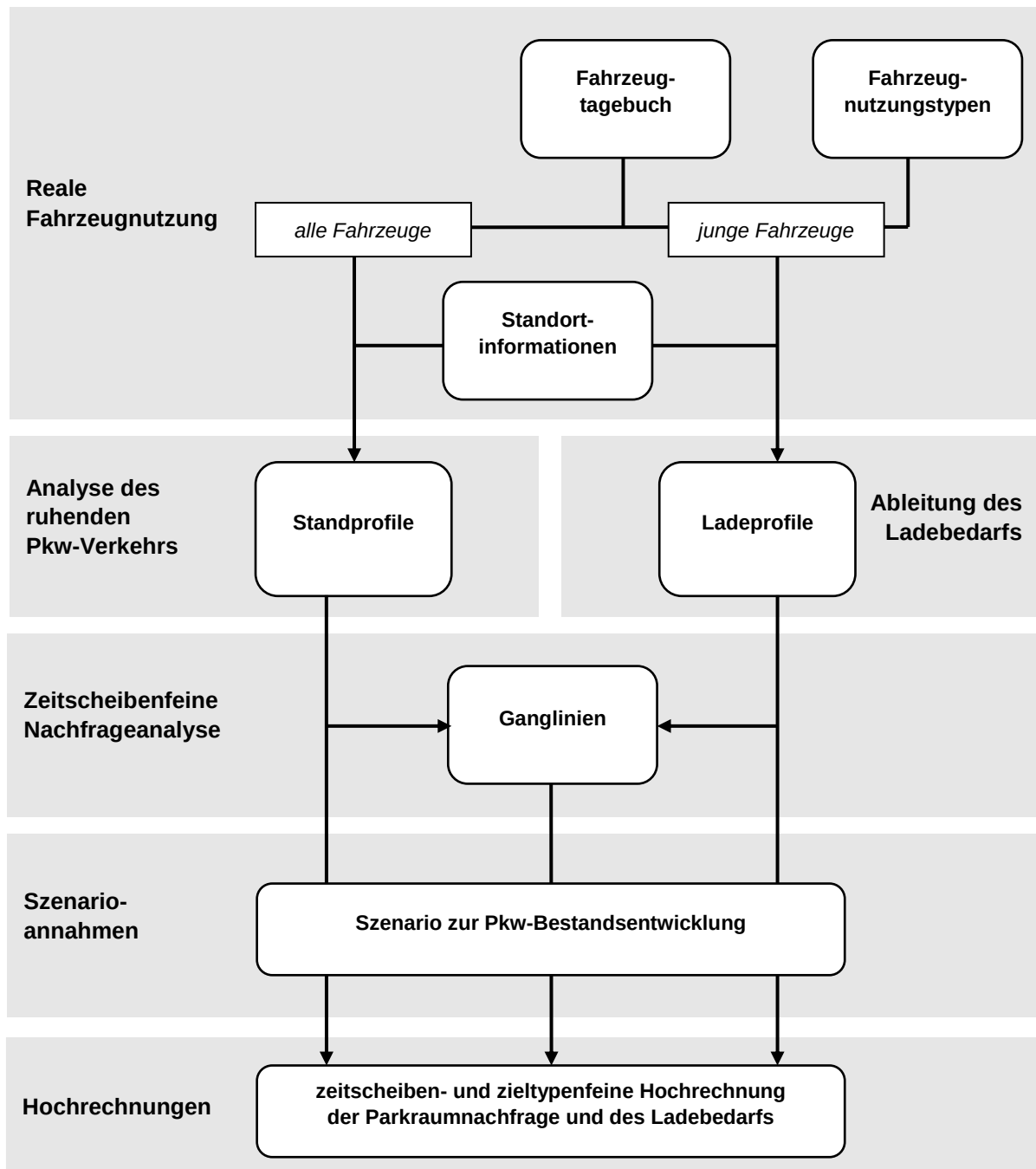
3.2.1 Modellaufbau

Die Modellerweiterung hat zum Ziel, zeitliche Nachfrageschwerpunkte für das Laden von Elektrofahrzeugen zieltypenfein zu identifizieren. Dazu wird neben der Ermittlung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen die *Parkraumnachfrage* für alle Pkw in Privathaushalten für das Jahr 2020 beschrieben und quantifiziert. Durch den Vergleich dieser beiden Hochrechnungen soll schließlich der Anteil der Fahrzeuge mit Ladebedarf ausgewiesen werden, der sich zu einer bestimmten Uhrzeit an einem bestimmten Standort konzentriert.

Zum Erreichen des Ziels ist es zunächst erforderlich, die Standvorgänge und Standdauern von *allen Fahrzeugen* – also auch der Fahrzeuge mit einem Alter von mehr als 6 Jahren – für die verschiedenen Wegezwecke und Zugangsmöglichkeiten der Standorte zu berechnen. Zu diesem Zweck werden die *Fahrzeugnutzungsprofile*, die sich aus den Wege- und Fahrzeugdaten der MiD 2008 ergeben, zu einem *Fahrzeugtagebuch* aggregiert in *Standprofile* überführt.

Ein wesentlicher Bestandteil der Analyse der Parkraumnachfrage besteht zudem darin, die zeitliche Verteilung von Zufluss und Abfluss von Fahrzeugen an bestimmten Standorten zu betrachten. Die Berechnungen zum ruhenden Pkw-Verkehr werden daher unter der Verwendung von Zeitscheiben verfeinert. Als Ergebnis lässt sich somit die Anzahl an Fahrzeugen feststellen, die sich an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 in bestimmten Zeitintervallen an bestimmten Standorten befinden. Zusätzlich ist eine weitere Differenzierung nach Wochentagen möglich. Demnach können aus der zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse sowohl *Tages-* als auch *Wochenganglinien* erzeugt werden. Analog dazu wird die zeitliche Verteilung von Zufluss und Abfluss von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf mittels Ganglinien analysiert.

Anschließend folgen die *Hochrechnung des Ladebedarfs* für eine Million Elektrofahrzeuge sowie die *Hochrechnung der Parkraumnachfrage* für alle privat genutzten Pkw im Bestand. Abbildung 3-3 dient der Veranschaulichung des alternativen Hochrechnungsmodells.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-3: Alternatives Hochrechnungsmodell

3.2.2 Modellauswertung

Die wesentlichen Ergänzungen im Rahmen dieser Arbeit bestehen darin, neben den örtlichen auch die zeitlichen Nachfrageschwerpunkte für das Laden von Elektrofahrzeugen zu analysieren und mit der gesamten Parkraumnachfrage zu vergleichen. Die Datenauswertung und -aufbereitung wurde mit der Programmiersprache R ¹⁹ durchgeführt. Als grafische Benutzeroberfläche wurde RStudio²⁰ verwendet.

Den Kern der zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse bildet ein Algorithmus, der einen Tag in gleichmäßige Zeitabschnitte einteilt und für jedes Intervall den Anteil der Fahrzeuge ausgibt, die während dieser Zeit parken.²¹ Die Grundlage hierfür bilden die Standprofile von allen Pkw und die Ladeprofile der relativ neuen Pkw, die in der MiD 2008 enthalten sind (siehe Abbildung 3-3). Die Standprofile von allen Fahrzeugen lassen sich unmittelbar aus dem Fahrzeugtagebuch ableiten (vgl. Abschnitt 3.1.2.1). Die Ladeprofile der relativ neuen Pkw ergeben sich hingegen aus dem Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs (vgl. Abschnitt 3.1.4). Für die zeitscheibenfeine Analyse des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen werden demnach sämtliche Standvorgänge betrachtet, die einen Ladevorgang enthalten. Das Aufladen findet in der Regel dann statt, wenn ein Fahrzeug einen Energiebedarf hat und die Standzeit an einem Standort für einen Ladevorgang geeignet ist.

Zur Erzeugung von Ganglinien werden die generierten Stand- und Ladeprofile zunächst aufbereitet, sodass diese innerhalb der 24 Stunden des Stichtages liegen.²² Die Überarbeitung betrifft demzufolge die ersten Standzeiten, die am Vortag beginnen und die letzten Fahrten, die am Folgetag enden. Dabei wird der Beginn der ersten Standzeiten auf den Tagesbeginn festgelegt. Diejenigen Fahrten die bis zum Folgetag andauern, werden am Tagesende abgeschnitten.

Die Standprofile von allen Pkw werden anschließend durch eine letzte Standzeit ergänzt, sofern mindestens eine Fahrt am Stichtag durchgeführt wird und die letzte Fahrt bereits vor Mitternacht endet. Die letzte Standzeit beschreibt demzufolge den Zeitraum zwischen der letzten Ankunftszeit am Stichtag und dem Ende des Stichtages.²³

Für die Ladeprofile von Elektrofahrzeugen ist die Ergänzung einer letzten Standzeit nicht erforderlich, da nur diejenigen Parkvorgänge enthalten sind, bei denen das Fahrzeug einen Ladebedarf hat. Allerdings müssen bei den ersten Parkvorgängen, die am Vortag beginnen,

19 Der Download von R ist über folgende URL möglich: <https://cran.r-project.org/>.

20 Der Download von RStudio ist über folgende URL möglich: <https://www.rstudio.com/>.

21 Eigene Auswertungen (siehe dazu R-Skript-Dateien „Generierung Ladezeiten für Ganglinien_EV.R“ und „Generierung Standzeiten für Ganglinien_alle Fz.R“).

22 Eigene Auswertungen (siehe dazu R-Skript-Dateien „Aufbereitung Ladevorgänge_EV.R“ und „Aufbereitung Standvorgänge_alle Fz.R“).

23 Eigene Auswertung (siehe dazu die R-Skript-Datei „Generierung Fzg Tagebuch_alle Fz.R“).

die Standzeiten den jeweiligen Tagen zugeordnet werden. Das bedeutet, dass für den Anteil des Parkvorgangs am Vortag, die Stichtagsvariable angepasst wird.

Zusätzlich dazu müssen die Ladeprofile von BEV um diejenigen Ladevorgänge erweitert werden, bei denen die Fahrt für eine schnelle Zwischenladung unterbrochen werden muss, um das nächste Ziel erreichen zu können. Da für eine Fahrt nur die Abfahrtszeit an der Quelle und Ankunftszeit am Ziel bekannt sind, muss im Fall einer Zwischenladung zunächst der Ladebeginn rechnerisch ermittelt werden. Dazu wird die mittlere Geschwindigkeit mittels Division von Wegkilometern durch die Fahrtdauer bestimmt. Anschließend wird die Fahrzeit bis zu dem Zeitpunkt berechnet, an dem ein Halt zum Laden des Fahrzeugs unvermeidbar ist, weil die Reichweite vollständig aufgebraucht ist. Der Beginn des Ladevorgangs ergibt sich demnach aus der Summe der Abfahrtszeit und der Fahrzeit bis keine Reichweite mehr vorhanden ist. Das Ende des Ladevorgangs ergibt sich schließlich aus der Ladedauer. In einigen Fällen ist ein weiterer Schnellladevorgang erforderlich, um den Zielort erreichen zu können. In diesen Fällen wird angenommen, dass die Entfernung zwischen den beiden Schnellladevorgängen 80 Prozent der maximalen Reichweite von BEV – also 120 km – entspricht (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Der Beginn und das Ende des zweiten Schnellladevorgangs lassen sich anschließend analog zum beschriebenen Vorgehen berechnen. Grundsätzlich wird bei Zwischenladungen während einer Fahrt angenommen, dass der Ladevorgang und der Parkvorgang identisch sind, d. h. die Parkdauer der Dauer der Zwischenladung entspricht.²⁴

Das grundlegende Struktogramm zur zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Für die Auswertung sind die folgenden Eingangsgrößen relevant:

start_int:	Tagesbeginn [min]
end_int:	Tagesende [min]
int:	Zeitintervall [min]
START _p :	Beginn des Parkvorgangs [min]
END _p :	Ende des Parkvorgangs [min]
START _{P,N} :	Rest (Modulo) aus der Division der Summe zwischen dem Beginn des Parkvorgangs und der Intervalllänge geteilt durch die Intervalllänge [-], d. h. $START_{P,N} = (START_p + int) \bmod int$

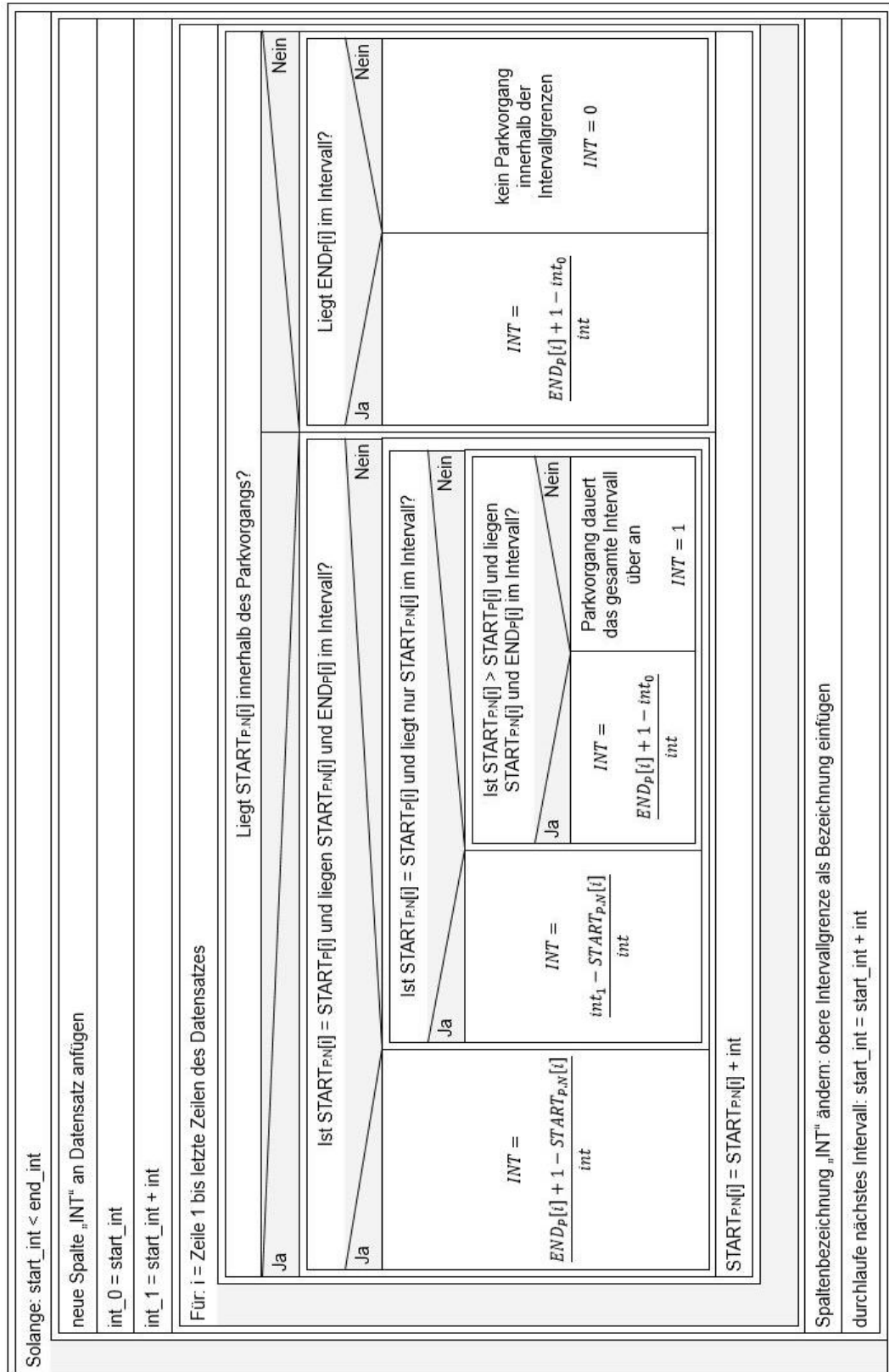
24 Eigene Auswertung (siehe dazu die R-Skript-Datei „Mikrodatei Ladevorgänge.R“).

Die Tagesgrenzen und das Intervall werden dabei als Makrovariablen²⁵ eingefügt. Das Intervall lässt sich somit jederzeit verfeinern oder vergrößern. Allerdings gilt es zu beachten, dass sich mit höherer Genauigkeit auch die Rechenzeit erheblich erhöht.²⁶

Wie aus Abbildung 3-4 hervorgeht, wird solange eine neue Spalte „INT“ an den Datensatz angefügt, bis ein ganzzahliges Vielfaches der Intervalllänge das Tagesende überschreitet. Für jede Spalte „INT“ wird mittels einer Schleife zeilenweise überprüft, welcher Anteil des Zeitintervalls für einen Parkvorgang genutzt wird. Zur Überprüfung dient die Hilfsvariable $START_{P,N}$, die mittels Modulo den Rest aus der Summe zwischen dem Beginn des Parkvorgangs und der Intervalllänge geteilt durch die Intervalllänge zurückgibt (vgl. Ligges 2009: 10). Diese Hilfsvariable wird jeweils am Ende der Schleife um die Intervalllänge erweitert. Dadurch kann bei jedem Schleifendurchlauf überprüft werden, ob $START_{P,N}$ zwischen dem Beginn und dem Ende des Parkvorgangs liegt und ob $START_{P,N}$ sogar mit dem Beginn des Parkvorgangs übereinstimmt. Durch den weiteren Vergleich mit dem Ende des Parkvorgangs lässt sich somit der Anteil der Zeit in einem gegebenen Zeitintervall bestimmen, der zum Parken des Pkw genutzt wird. Da jedem Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt höchstens ein Parkvorgang zugeordnet werden kann, entspricht die Summe aller Anteile pro Spalte der Anzahl der parkenden Fahrzeuge pro Zeitintervall.

25 Als Makrovariablen werden Eingangsgrößen bezeichnet, die im gesamten Programm durch die Eingabe des Variablennamens verwendet werden können. Die Werte dieser global verwendeten Variablen werden in einer separaten R-Skript-Datei definiert (siehe dazu „Macrovariablen.R“).

26 Die Einstellungen im R-Projekt auf der beigefügten CD entsprechen einem 15-Minuten-Intervall. Für die Erstellung eines Datensatzes mit einem 15-Minuten-Intervall gilt zu beachten, dass in R-Studio maximal 100 Spalten angezeigt werden können.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-4: Algorithmus zur zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse

3.2.3 Hochrechnung der Nachfragedaten

Um die Ergebnisse aus der eigenen Datenauswertung mit denen von Anderson et al. (2015) vergleichen zu können, basiert die Hochrechnung des Ladebedarfs auf den Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen (vgl. Abschnitt 3.1.3.2, Tabelle 3-4). Außerdem behalten die szenarioübergreifenden Annahmen weiterhin ihre Gültigkeit (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Der Eckwert für die Hochrechnung des Ladebedarfs ergibt sich aus der Zielsetzung von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland.

Für den Vergleich der Hochrechnung mit der gesamten Parkraumnachfrage ist es zunächst erforderlich, die Anzahl der voraussichtlich im Jahr 2020 privat genutzten Pkw zu ermitteln. Die Bestimmung des Eckwerts ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels (Abschnitt 3.2.3.1). Daran anschließend wird das Vorgehen bei der Hochrechnung der Nachfragedaten näher beschrieben (Abschnitt 3.2.3.2).

3.2.3.1 Bestandsentwicklung von privat genutzten Pkw

Die Hochrechnung der Parkraumnachfrage auf der Grundlage der MiD-Daten erfordert eine Abschätzung der Bestandsentwicklung von allen privat genutzten Pkw für das Jahr 2020. Eine gute Annäherung gibt hierbei die Shell-Studie zu Pkw-Szenarien bis 2040 (vgl. Adolf et al. 2015). Darin wird auf Basis der Pkw-Statistiken des KBA die Entwicklung des Pkw-Bestands bis zum Jahr 2040 beschrieben. Ausgehend vom Gesamtbestand für das Jahr 2012 mit 43,4 Millionen Fahrzeugen prognostizieren die Autoren einen Anstieg auf etwa 45,2 Millionen Fahrzeuge zwischen den Jahren 2020 und 2025; anschließend wird bis 2014 ein Rückgang auf rund 42,7 Millionen Fahrzeuge erwartet (vgl. Adolf et al. 2015: 34). Demnach zeichnet sich zwischen den Jahren 2020 und 2025 ein „Peak Car“²⁷ ab (vgl. ebenda).

Die Pkw-Bestandsprognose für das Jahr 2020 mit insgesamt 45,2 Millionen Fahrzeugen stellt im Folgenden die Grundlage für die Abschätzung des Eckwertes zur Hochrechnung der Parkraumnachfrage dar. Bei der Ermittlung des Sollwertes ist dabei Folgendes zu beachten: Während sich die Prognose der Shell-Studie auf den gesamten Pkw-Bestand stützt, werden in der Studie Mobilität in Deutschland durch die Befragung privater Haushalte nur die privat genutzten Pkw erfasst.

Demnach werden in der Bestandsstatistik des KBA Fahrzeuge nach Art der Zulassung angegeben. Im Jahr 2014 verteilen sich die Pkw im Bestand wie folgt auf die Haltergruppen: Vom Gesamtbestand wurden rund 39,8 Millionen Fahrzeuge privat und weitere 4,6 Millionen

²⁷ In Anlehnung an den Begriff „Peak Oil“, mit dem das Maximum der weltweiten Ölförderung bezeichnet wird, spiegelt der Ausdruck „Peak Car“ das Maximum in der gesamten Pkw-Flotte in Deutschland wider (vgl. Adolf et al. 2015: 41).

Fahrzeuge gewerblich zugelassen (vgl. KBA 2015 d). In der MiD werden Pkw hingegen nach der Art der Nutzung unterschieden. Dabei können Pkw unabhängig von der Zulassungsart rein privat, privat und dienstlich oder rein dienstlich genutzt werden. Die Stichprobe der MiD enthält allerdings nur Fahrzeuge mit privater Nutzung. Das bedeutet, dass rein dienstlich genutzte Fahrzeuge nicht in der Stichprobe inbegriffen sind – privat und dienstlich genutzte Pkw hingegen schon.

Zur Abschätzung des Anteils privat genutzter Pkw am Gesamtbestand werden die Tankbuchdaten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP) der Jahre 2002 bis 2014 analysiert.²⁸ Demzufolge liegt der Anteil der Pkw in Privathaushalten bei rund 95 Prozent. Zum Vergleich der Ergebnisse wird eine Analyse zur steuerrechtlichen Behandlung von Firmenwagen in Deutschland herangezogen. Nach Diekmann et al. (2011: 32) liegt der Anteil an privat mitgenutzten Dienstwagen in Deutschland bei ungefähr 2,5 Millionen Fahrzeugen. Diese Größenordnung stimmt mit der ermittelten Verteilung von privat genutzten Pkw mit privater und gewerblicher Zulassung aus der Pkw-Stichprobe des MOP überein. Daraus ergibt sich für die Hochrechnung der Parkraumnachfrage im Jahr 2020 ein Sollwert von 42,9 Millionen Pkw.

3.2.3.2 Vorgehensweise der Hochrechnung

Die Hochrechnung der MiD-Daten ist ein wesentlicher Bestandteil der Datenaufbereitung. Ein Ziel der Hochrechnung besteht darin, auf Basis der MiD-Stichprobe auf das Vorkommen relevanter Merkmale zum Ladebedarf (d. h. Anzahl und Dauer von Ladevorgängen) in der zukünftigen Grundgesamtheit im Jahr 2020 zu schließen. Dabei wird die Hochrechnung des Ladebedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge vorgenommen.

Ein weiteres Ziel ist es, örtliche und zeitliche Nachfrageschwerpunkte für das Laden von Elektrofahrzeugen zu identifizieren. Dazu wird aus dem Datensatz zur Erzeugung von Ganglinien die zeitliche Verteilung von Zufluss und Abfluss von Elektrofahrzeugen an bestimmten Standorten hochgerechnet. Daneben ist es erforderlich, auch die zeitscheibenfeine Parkraumnachfrage von allen privat genutzten Pkw – d. h. von Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen zusammen – im Jahr 2020 zu ermitteln. Als Eckwert für die Hochrechnung der Parkraumnachfrage dient die prognostizierte Anzahl von 42,9 Millionen Pkw in Privathaushalten (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Durch den Vergleich dieser beiden Hochrechnungen kann schließlich bestimmt werden, welcher Anteil der

²⁸ Die Grundlage dieser Berechnung bilden die anonymisierten Daten der Erhebung „Deutsches Mobilitätspanel (MOP)“ der Jahre 2002 bis 2014. Die Auswertung der Tankbuchdaten wurde im Rahmen des Projekts LADEN2020 durchgeführt. Der Datenzugang erfolgte über die Datensätze „Deutsches Mobilitätspanel“, die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bereitgestellt werden und über die Clearingstelle Verkehr im DLR zu beziehen sind.

Fahrzeuge sich zu bestimmten Zeiten an bestimmten Standorten konzentriert und wie viele dieser Fahrzeuge elektrische Energie zur Weiterfahrt benötigen.²⁹

Um von der Anzahl der Fälle in der Stichprobe auf die Anzahl der Fälle in der Grundgesamtheit schließen zu können, ist es zunächst notwendig die Ist-Verteilung der Stichprobe zu ermitteln und zu gewichten. Zur Hochrechnung des Ladebedarfs wird die Ist-Verteilung der Fahrzeuge mit Ladebedarf, differenziert nach dem Fahrzeugnutzungstyp und nach den Auswertevarianten entsprechend dem Basisszenario, angegeben. Zur Hochrechnung der Parkraumnachfrage wird die Stichprobe der privat genutzten Pkw zunächst mit dem Gewichtungsfaktor für Haushalte aus dem MiD-Autodatenatz (*a_gew*) multipliziert. Dadurch ist gewährleistet, dass die prozentuale Verteilung der relevanten Merkmale in der Stichprobe der Verteilung in der Grundgesamtheit aus dem Erhebungsjahr entspricht (vgl. Follmer et al. 2010 c: 33). Anschließend wird die Stichprobe hinsichtlich der zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse um die Variable „*Wochentag*“ ergänzt und die Ist-Verteilung differenziert nach den Wochentagen ausgegeben.

Weiterhin ist es notwendig, die Soll-Verteilung der Fahrzeuge für das Jahr 2020 zu bestimmen. Für die Hochrechnung des Ladebedarfs ergibt sich die Soll-Verteilung aus dem Eckwert von einer Million Elektrofahrzeugen, der Flottenverteilung im Szenario und der Verteilung nach Fahrzeugnutzungstypen. Für die Hochrechnung der Parkraumnachfrage wird angenommen, dass an jedem Wochentag gleichermaßen 42,9 Millionen privat genutzte Pkw zum Fahrzeugbestand gehören. Aus der Soll-Verteilung dividiert durch die Ist-Verteilung lässt sich schließlich ein Extrapolationsfaktor bestimmen, der multipliziert mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor den Hochrechnungsfaktor ergibt.

Durch eine differenzierte Betrachtung nach Wochentagen ist es zudem möglich, die Verteilung von Stand- und Ladevorgängen im Wochengang auszuweisen. Bei der Hochrechnung der zeitlichen Verteilung gilt es zu beachten, dass es sich bei den hochgerechneten Werten um die Ergebnisse für einen fiktiven, über die Wochentage und das Jahr hinweg gemittelten Durchschnittstag handelt (vgl. Follmer et al. 2010 b: 27). Um nun die Anzahl stehender Fahrzeuge nach Wochentagen berechnen zu können, muss das für den einzelnen Wochentag hochgerechnete Ergebnis mit dem Faktor sieben multipliziert werden (vgl. ebenda). Aus dem Durchschnitt über die Wochentage lässt sich wiederum die Anzahl stehender Pkw an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 berechnen und im Tagesgang darstellen.

²⁹ Eigene Auswertungen (siehe dazu die R-Skript-Dateien „Hochrechnungen_EV.R“ und „Hochrechnungen_alle Fz.R“).

4 Modellgestützte Analyse des Ladebedarfs

Die Hochrechnungen im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft für ein Szenario zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 (im Folgenden bezeichnet als „*Basisszenario*“) durchgeführt. Welches der Szenarien der Modellrechnung zugrunde liegt, wird in Abschnitt 4.1 dargestellt. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Hochrechnung des Ladebedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge erläutert (Abschnitt 4.2). Daran anknüpfend werden die Ergebnisse aus der zeitlichen Nachfrageanalyse und die daraus resultierenden Ladebedarfskurven vorgestellt (Abschnitt 4.3). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse schließt das Kapitel ab (Abschnitt 4.4).

4.1 Auswahl des Basisszenarios

Die Grundlage für die Hochrechnung des Ladebedarfs von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland bildet das Szenario mit den nachfolgenden Ausprägungen³⁰:

- 73 Prozent der Fahrzeuge können zu Hause auf dem eigenen Grundstück geladen werden.
- Es existiert keine Möglichkeit, Fahrzeuge zu Hause und am Arbeitsplatz am Straßenrand zu laden.
- PHEV dominieren zu zwei Dritteln den Bestand an Elektrofahrzeugen.

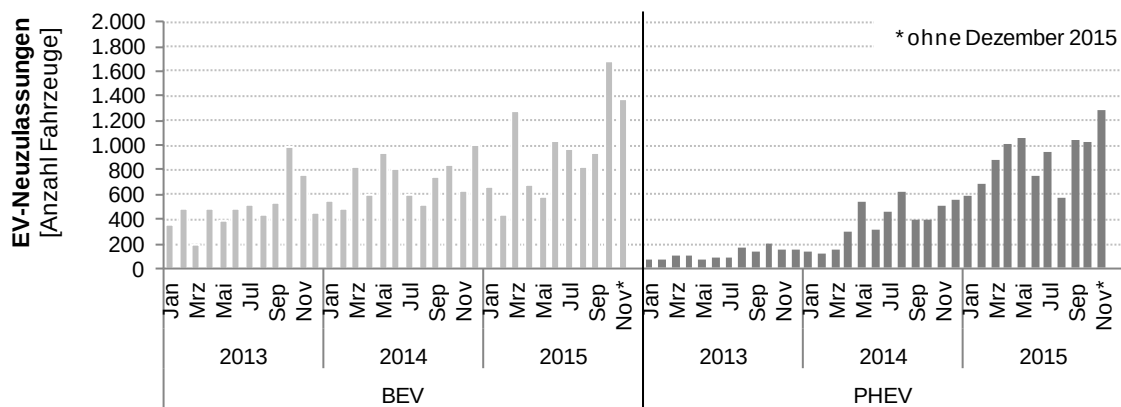
Aus den Annahmen geht hervor, dass für etwa ein Viertel der Elektrofahrzeuge keine Möglichkeit besteht, auf einem privaten Stellplatz am Wohnort des Besitzers geladen zu werden. Zusätzlich dazu wird die Einschränkung getroffen, dass Elektrofahrzeuge weder zu Hause noch am Arbeitsplatz am Straßenrand im öffentlichen Raum geladen werden können. Demzufolge begründet sich die Auswahl der ersten zwei Szenarioausprägungen darin, dass sie zusammengekommen die aus der Nutzerperspektive ungünstigsten infrastrukturellen Rahmenbedingungen abbilden.

Die Auswahl eines PHEV-dominierten Szenarios begründet sich auf der aktuellen Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen. Da PHEV in den amtlichen Statistiken zu den Neuzulassungen erst seit Januar 2013 gesondert ausgewiesen werden, werden die Jahre 2013 bis 2015 als Betrachtungszeitraum gewählt (vgl. KBA 2015 c). Demnach werden pro Jahr rund drei Millionen Fahrzeuge zugelassen, wobei die Gesamtzahl der Neuzulassungen in den letzten drei Jahren stagnierte (vgl. KBA 2015 b). Dabei wächst der Anteil von

³⁰ Die Szenarioausprägungen für die Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen werden in Abschnitt 3.1.3.2 aufgeführt. Das ausgewählte Szenario entspricht dem Szenario mit der Nummer 4.

Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) stetig. Mit einem Anteil von 0,28 Prozent an den jährlichen Neuzulassungen dominieren BEV derzeit den Markt für Elektrofahrzeuge (vgl. KBA 2015 b, Stand: 01.01.2015). Im Vergleich dazu liegt der Anteil von PHEV bei 0,15 Prozent (vgl. ebenda).

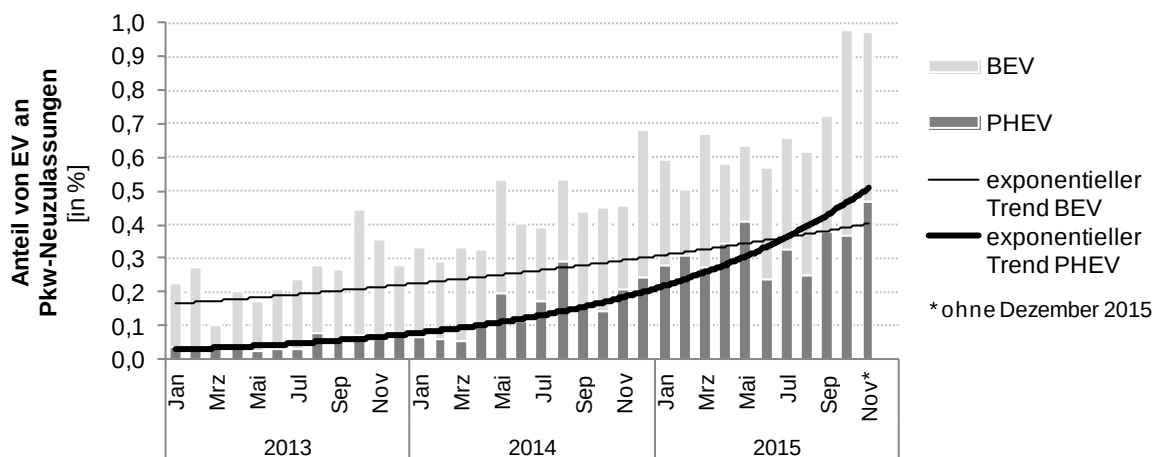
Abbildung 4-1 stellt die Anzahl monatlicher Neuzulassungen von BEV und PHEV im Vergleich dar. Während eines Jahres schwankt die Anzahl an Neuzulassungen im Normalfall. So folgt auf die verkaufsstarken Monate im Frühjahr üblicherweise ein ferienbedingter Rückgang der Neuzulassungen im Sommer (vgl. Diez 2006: 23). In den Herbstmonaten steigt die Anzahl an Neuzulassungen wieder, bevor die Nachfrage im Winter häufig auf die jährlichen Tiefstände zurückgeht (vgl. ebenda). Anders stellt sich das bei den Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen dar: Während die Anzahl an Neuzulassungen in den Sommermonaten ebenfalls tendenziell zurückgeht, bleibt die Anzahl in den Wintermonaten auf einem höheren Niveau (siehe Abbildung 4-1). Dies lässt sich vor allem bei den Neuzulassungen von PHEV erkennen. Der bisher höchste Wert an neu zugelassenen Elektrofahrzeugen wurde im Oktober 2015 erreicht: In diesem Monat wurden mehr als 2.700 Elektrofahrzeuge zugelassen, davon etwa 60 Prozent BEV (vgl. KBA 2015 b).



Quelle: Eigene Darstellung nach KBA 2015 b

Abbildung 4-1: Monatliche EV-Neuzulassungen

Um die saisonalen Schwankungen auszublenden, wird für die Anzahl der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen der globale Verlauf der Zeitreihe getrennt für BEV und PHEV bestimmt. Damit ergeben sich in Abbildung 4-2 zwei unterschiedliche exponentielle Trendfunktionen. Daraus geht hervor, dass die Wachstumskurve von PHEV steiler verläuft als die von BEV. Das bedeutet, dass die Anzahl neu zugelassener PHEV im Vergleich zu BEV rasanter steigt. Somit wird bei fortlaufendem Trend der PHEV-Anteil an den Neuzulassungen in den kommenden Jahren überwiegen. Im Zeitraum von Januar 2015 bis November 2015 wird in der kumulierten Betrachtung der Neuzulassungen beider Antriebsarten bereits annähernd ein eins-zu-eins Verhältnis erreicht (siehe Abbildung 4-2).



Quelle: Eigene Darstellung nach KBA 2015 b

Abbildung 4-2: Kumulierte monatliche EV-Neuzulassungen und Trendentwicklung

Der Bestand an Pkw mit elektrischem Antrieb befindet sich derzeit mit rund 26.000 Fahrzeugen im Vergleich zu anderen Antriebsarten auf einem niedrigen Niveau (vgl. BDEW 2015 b; vgl. KBA 2015 a). Um das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland bis zum Jahr 2020 erreichen zu können, ist eine jährliche Zuwachsrate des Bestands von etwa 85 Prozent³¹ notwendig. Es ist anzunehmen, dass sich die Bestandsflotte an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020, als Folge fehlender Verschrottung durch die Markteinführung, aus relativ jungen Fahrzeugen zusammensetzen wird. Infolgedessen kann davon ausgegangen werden, dass sich der Bestand beinahe eins-zu-eins um die jährlichen Neuzulassungen erhöhen wird. Aus diesem Grund wird sich auch die Verteilung der elektrischen Antriebsarten im Bestand hin zu einem mehrheitlichen PHEV-Anteil entwickeln. Mit Bezug auf die Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen wird der PHEV-Anteil daher auf zwei Drittel des angestrebten Bestands von einer Million Elektrofahrzeugen festgesetzt (vgl. Abschnitt 3.1.3.2, Tabelle 3-4).

4.2 Ladebedarf von Elektrofahrzeugen

Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die sich aus der Simulation des Modells zur Bestimmung des Ladebedarfs ergeben (vgl. Abschnitt 3.1). Dazu werden die Ladeprofile entsprechend den zum Basisszenario passenden Auswertevarianten herausgefiltert (vgl. Abschnitt 3.1.4). Durch die anschließende Hochrechnung der Elektrofahrzeugflotte auf eine Million Pkw können in Abhängigkeit der vor Ort bereitgestellten Ladeleistungen sowohl die Anzahl der Ladevorgänge (Abschnitt 4.2.1) als auch die Lade- und Standdauern (Abschnitt 4.2.2) von Elektrofahrzeugen bestimmt werden.

³¹ Eigene Berechnungen nach BDEW 2015 b.

4.2.1 Anzahl der Ladevorgänge

Für das Basisszenario können folgende Aussagen zum Ladebedarf von Elektrofahrzeugen an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 getroffen werden³²:

- Mehr als ein Drittel der Elektrofahrzeuge werden nicht bewegt und haben somit keinen Ladebedarf.
- Der Strombedarf für die gesamten Tageskilometer kann für etwa 40 Prozent der Elektrofahrzeuge durch einmaliges Laden auf einem privaten Stellplatz am Wohnort gedeckt werden.
- Nur etwa drei Prozent der Fahrzeuge werden einmal am Tag auf einem privaten Stellplatz am Arbeitsplatz geladen und verfügen damit über ausreichend Reichweite für die gesamten Tageskilometer.
- Etwa 20 Prozent der Fahrzeuge werden mehrmals oder woanders als auf einem privaten Stellplatz zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen.

Fahrzeuge, die ausreichend lange auf einem privaten Stellplatz zu Hause oder am Arbeitsplatz stehen, um die Batterie für die gesamten Tageskilometer aufzufüllen, haben einen oder weniger Ladevorgänge. Weniger Ladevorgänge ergeben sich, wenn mit der verfügbaren elektrischen Reichweite längere Strecken als die benötigten Tageskilometer zurückgelegt werden können. Demzufolge müssen Fahrzeuge mit weniger als einem Ladevorgang am Tag nicht täglich an das Stromnetz angeschlossen werden.

In Tabelle 4-1 ist die Anzahl der Ladevorgänge im Basisszenario aufgeführt. Dabei wird die örtliche Nachfrage getrennt nach der Zugänglichkeit von Stellplätzen, der Ladeart sowie den verfügbaren Ladeleistungen ausgewiesen. Normalladevorgänge werden zusätzlich nach den jeweiligen Aufenthaltsorten unterschieden. Von der Betrachtung ausgeschlossen werden aus logischen Gründen Ladevorgänge am Wohnort im halböffentlichen Raum und beim Einkauf im privaten Raum (vgl. Abschnitt 3.1.2.2, Tabelle 3-1). Weiterhin ergibt sich in Wohnnähe und am Arbeitsplatz im öffentlichen Raum kein Ladebedarf, da an diesen Aufenthaltsorten unter den Annahmen des Basisszenarios keine Ladeinfrastruktur am Straßenrand zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 4.1).

Bei einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland ergeben sich im Basisszenario rund 463.000 Ladevorgänge an einem durchschnittlichen Tag. Davon lassen sich nahezu 60 Prozent mit einer geringen Ladeleistung von 3,7 kW zu Hause auf einem privaten Stellplatz realisieren. Weitere fast 20 Prozent der Ladevorgänge finden auf privaten Stellplätzen am Arbeitsplatz und an sonstigen Aufenthaltsorten statt. Demzufolge werden Elektrofahrzeuge

³² Die Ergebnisse kongruieren mit denen von Anderson et al. (2015) für das Szenario mit der Nummer 4 (1/3 BEV, 2/3 PHEV, 73 Prozent privates Parken zu Hause, kein Laden am Straßenrand).

zu mehr als 20 Prozent öffentlich zugänglich geladen. Dabei steht etwa jedes zehnte Fahrzeug weniger als 30 Minuten im öffentlichen oder halböffentlichen Raum, woraus ein Semi-Schnellladevorgang mit 22,2 kW Ladeleistung resultiert.³³ Des Weiteren verursachen BEV mit einem Anteil von einem Drittel an der gesamten Elektrofahrzeugflotte rund 6.000 Zwischenladungen mit hohen Ladeleistungen von 50,0 kW, weil die verfügbare elektrische Reichweite bereits vor dem Erreichen des Zielortes aufgebraucht ist. Zusammengenommen machen (Semi-)Schnellladungen mit rund drei Prozent jedoch einen geringen Anteil an den Ladevorgängen aus.

Tabelle 4-1: Anzahl der Ladevorgänge im Basisszenario

Ladeart	Aufenthaltort	Ladeleistung	Anzahl der Ladevorgänge nach Art der Zugänglichkeit		
			privat	halböffentlich	öffentlich
normal	Wohnort	3,7 kW (AC)	271.000	0	0
	Arbeitsplatz	11,1 kW (AC)	48.000	8.000	0
	Einkauf	11,1 kW (AC)	0	20.000	7.000
	Sonstiges	11,1 kW (AC)	42.000	8.000	43.000
		Summe	361.000	36.000	51.000
(semi-) schnell	/	22,2 kW (AC)		10.000	
	/	50,0 kW (DC)		6.000	
		Summe		15.000	

(Eigene Berechnung, auf Tausend gerundete Werte)

4.2.2 Stand- und Ladedauern

Die benötigte Zeit zum Wiederaufladen der Batterie wird im Wesentlichen durch die Batteriekapazität von Elektrofahrzeugen, die am Ladeort verfügbare Ladeleistung und den fahrzeugseitigen Ladeanschluss bestimmt. Die Batteriekapazität für Elektrofahrzeuge ist durch die Abschätzung der elektrischen Reichweite definiert (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Demzufolge wird für BEV eine elektrische Reichweite von 150 km und für PHEV von 50 km angenommen.³⁴ Da im Modell kein Reichweitenpuffer berücksichtigt wird, besteht die Möglichkeit einer Entladung bis auf eine Restkapazität der Batterie von null Prozent mit anschließender Aufladung bis zur maximalen Ladekapazität. Während bei Normalladungen eine Reichweitzuladung bis zur maximalen Batteriekapazität möglich ist, werden Ladevorgänge bei höheren Anschlussleistungen bereits bei 80 Prozent SOC beendet.³⁵ Unter der Voraussetzung, dass Elektrofahrzeuge die am Ladeort bereitgestellte elektrische

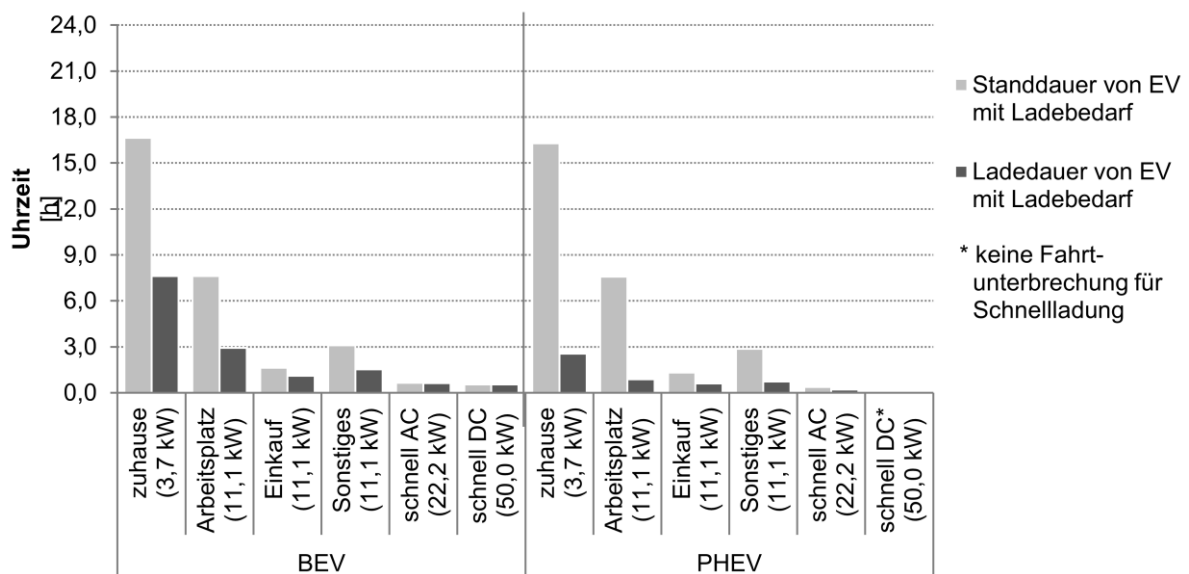
³³ Die Zeitgrenze ergibt sich aus den szenarioübergreifenden Annahmen (siehe Abschnitt 3.1.3.1).

³⁴ Der Energiegehalt der Batterie lässt sich aus der elektrischen Reichweite und der Reichweitzuladung pro Stunde ableiten (vgl. Tabelle 3-3). Für BEV mit 150 km Reichweite wird demnach eine 22 kWh-Batterie und für PHEV mit 50 km elektrischer Reichweite eine 7,5 kWh-Batterie verwendet (eigene Berechnungen).

³⁵ Zur Definition von SOC siehe Abschnitt 2.2.3.

Leistung unterstützen, lässt sich für jeden Ladevorgang die Zeit für die Reichweitzuladung bestimmen. Entsprechend der am Ladeort verfügbaren Anschlussleistung wird solange elektrische Reichweite zugeladen, wie der Anschluss an das Stromnetz besteht oder bis die maximal mögliche Ladekapazität erreicht ist.

Abbildung 4-3 stellt die mittleren Stand- und Ladedauern für Elektrofahrzeugen mit heutigen Mobilitätsgewohnheiten dar. Dabei werden Stand- und Ladezeiten getrennt nach den Antriebsarten und den vor Ort bereitgestellten Ladeleistungen angegeben. Während Stand- und Ladedauern bei Normalladungen nach dem Aufenthaltsort differenziert werden, wird bei Schnellladungen zwischen den zwei möglichen Ladeverfahren unterschieden.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4-3: Stand- und Ladedauern nach Ladeart und Aufenthaltsort

Aus Abbildung 4-3 geht hervor, dass Elektrofahrzeuge im Basisszenario im Mittel 16,5 Stunden am Wohnort, 7,5 h am Arbeitsplatz, 1,5 h beim Einkauf und 3,0 h an sonstigen Orten stehen. Für Schnellladungen ergeben sich Standzeiten von etwa einer halben Stunde. Es fällt auf, dass PHEV mit Ladebedarf tendenziell kürzere Standzeiten aufweisen als BEV mit Ladebedarf. Die mittleren Abweichungen betragen 14 bis 22 Minuten – mit Ausnahme von Standvorgängen am Arbeitsplatz, die nahezu identisch sind. Zudem weisen PHEV keine Standzeiten an DC-Ladestationen auf, da bei diesem Antriebskonzept Fahrten nicht für Zwischenladungen unterbrochen werden (vgl. Abschnitt 3.1.3.1).

Für BEV ergeben sich folgende durchschnittliche Ladedauern: Bei einer Ladeleistung von 3,7 kW werden zu Hause auf privaten Stellplätzen 7,5 h zum Aufladen benötigt.³⁶ Obwohl die verfügbaren Ladeleistungen an allen anderen Aufenthaltsorten 11,1 kW betragen, ergeben

³⁶ Im Basisszenario werden sämtliche Ladevorgänge am Wohnort im privaten Raum durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

sich große Unterschiede zwischen den mittleren Ladedauern. Demnach laden BEV am Arbeitsplatz etwa 3,0 h, jedoch nur 1,0 h an Einkaufsorten und 1,5 h an sonstigen Orten. Mit höheren Anschlussleistungen reduziert sich die Ladezeit auf etwas mehr als eine halbe Stunde. Dabei beträgt der mittlere Zeitunterschied zwischen DC-Laden mit 50,0 kW und Semi-Schnellladen mit 22,2 kW gerade einmal fünf Minuten. Für Reichweitzuladungen am Wohnort und am Arbeitsplatz werden nahezu die maximal möglichen Ladezeiten zum vollständigen Befüllen von BEV benötigt. Lange Standzeiten an den jeweiligen Zielorten ermöglichen es jedoch, BEV selbst an Anschlüssen mit niedrigen Ladeleistungen ausreichend aufzuladen (siehe Abbildung 4-3).

Im Vergleich dazu lassen sich PHEV in einer kürzeren Zeit wieder aufladen. Dies ergibt sich im Wesentlichen aus der vergleichsweise geringen Batteriekapazität. Besteht die Möglichkeit, zu Hause privat zu laden, können PHEV in weniger als drei Stunden vollständig geladen werden. Mit einem dreiphasigen Anschluss und höherem Ladestrom reduziert sich diese Zeit auf etwa eine Stunde für 11,1 kW und weniger als eine halbe Stunde für 22,2 kW. Wie in Abbildung 4-3 zu erkennen ist, entsprechen die mittleren Ladezeiten nahezu der Zeit für einen vollständigen Ladezyklus. Im Gegensatz zu BEV ergeben sich bei gleicher Ladeleistung (11,1 kW) an unterschiedlichen Aufenthaltsorten nur geringfügige Abweichungen zwischen den mittleren Ladedauern.

Besonders auffällig ist in Abbildung 4-3 die Diskrepanz zwischen den mittleren Stand- und Ladedauern von Elektrofahrzeugen. Insbesondere PHEV stehen wesentlich länger an Zielorten als für das Aufladen der Fahrzeuge erforderlich wäre: Beispielsweise parken PHEV mit Ladebedarf bis zu sechsmal länger auf Stellplätzen zu Hause und mehr als das Achtfache länger auf Stellplätzen am Arbeitsplatz.

4.3 Alternative Hochrechnung der Nachfragedaten

In den bisherigen Analysen wurde die zeitliche Verteilung von parkenden Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf nicht berücksichtigt. Um neben der örtlichen auch die zeitliche Verteilung bestimmen zu können, wird die Simulation unter Verwendung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmus zur zeitscheibenfeinen Nachfrageanalyse durchlaufen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Anhand der dadurch erzeugten Ganglinien kann durch entsprechende Hochrechnungen ermittelt werden, wie viele Elektrofahrzeuge, die an bestimmten Standorten parken, an einem durchschnittlichen Tag zu bestimmten Uhrzeiten Strom zum Laden benötigen (vgl. Abschnitt 3.2.3). Für die verschiedenen Standorte lässt sich darüber hinaus, unter Einbeziehung der Parkraumnachfrage für alle privat genutzten Pkw im Bestand, der Anteil der Fahrzeuge mit Ladebedarf bestimmen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aufgezeigt, die aus dem beschriebenen Hochrechnungsmodell hervorgehen. Dazu wird für jedes 15-Minuten-Zeitintervall³⁷ der Anteil des ruhenden Pkw-Verkehrs am Gesamtbestand privat genutzter Pkw berechnet. Anschließend wird der Anteil parkender Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf an der Parkraumnachfrage aller privat genutzten Pkw im Bestand ermittelt. Die Verteilung der Parkraumnachfrage sowie der daraus resultierende Anteil an Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf werden daraufhin sowohl im Tages- als auch im Wochenverlauf dargestellt und miteinander verglichen (Abschnitt 4.3.1). Anschließend wird aufgezeigt, an welchen Standorten sich Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf zu unterschiedlichen Tageszeiten an unterschiedlichen Wochentagen konzentrieren (Abschnitt 4.3.2). Daraufhin wird der Anteil von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf am ruhenden Pkw-Verkehr differenziert nach der standortspezifischen Parkraumnachfrage ausgewiesen (Abschnitt 4.3.3).

4.3.1 Zeitliche Verteilung des ruhenden Verkehrs

Insgesamt zeigt sich eine relativ gleichmäßige Parkraumnachfrage des Pkw-Verkehrs über die Zeit (siehe Abbildung 4-4). Dabei überwiegt der Anteil des ruhenden Pkw-Verkehrs mit über 90 Prozent am Gesamtbestand von 42,9 Millionen privat genutzten Pkw deutlich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass nur maximal sieben Prozent der Fahrzeuge, bezogen auf ein Zeitintervall, gleichzeitig auf deutschen Straßen fahren. Die Belastung des Straßennetzes mit nahezu drei Millionen privat genutzten Pkw ist in der Zeit von 17:00 Uhr bis 17:15 Uhr am höchsten. Insgesamt ist die Parkraumnachfrage nachts höher als tagsüber.

Der Anteil der Fahrzeuge mit Strombedarf an der gesamten Parkraumnachfrage liegt für eine Million Elektrofahrzeuge im Basisszenario zwischen 0,3 Prozent tagsüber und 0,6 Prozent nachts. Infolgedessen ist die Anzahl an Fahrzeugen, die während eines Parkvorgangs geladen werden, in den Nachtstunden zwischen 22:15 Uhr und 5:45 Uhr am höchsten. Die Ladebedarfskurve erreicht unmittelbar nach Mitternacht mit einer Anzahl von rund 255.000 Fahrzeugen das Maximum. Über den Tag sinkt die Ladebedarfskurve auf ein Minimum von etwa 133.000 Elektrofahrzeugen ab. Dabei ist die Nachfrage am frühen Nachmittag zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr am geringsten.

Der Verlauf der Ladebedarfskurve aus der gesamten Parkraumnachfrage wird im Wesentlichen durch Ladevorgänge auf privaten Stellplätzen am Wohnort bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.1). Dies zeigt auch der Vergleich mit der zeitlichen Verteilung von Fahrzeugen mit Ladebedarf, die zu Hause im privaten Raum parken (vgl. Abschnitt 4.3.3, Abbildung 4-7). Demnach ähnelt die Ladebedarfskurve von allen parkenden Elektrofahrzeugen der U-förmigen Verteilung von Pkw, die während eines Parkvorgangs am Wohnort geladen

37 Die Auswertungen basieren auf eine Einteilung in 15-Minuten-Intervalle (vgl. Abschnitt 3.2.2).

werden. Folglich ist die Nachfrage in den Abend- und Nachtstunden bedeutend höher als am Tage. Dabei ergibt sich der Verlauf in den Nachtstunden zwischen 22:30 Uhr und 5:00 Uhr zu über 99 Prozent aus der Anzahl am Wohnort parkender Pkw mit Strombedarf. Tagsüber verteilen sich die parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf hingegen verstärkt auf die verschiedenen Standorte (vgl. Abschnitt 4.3.2).

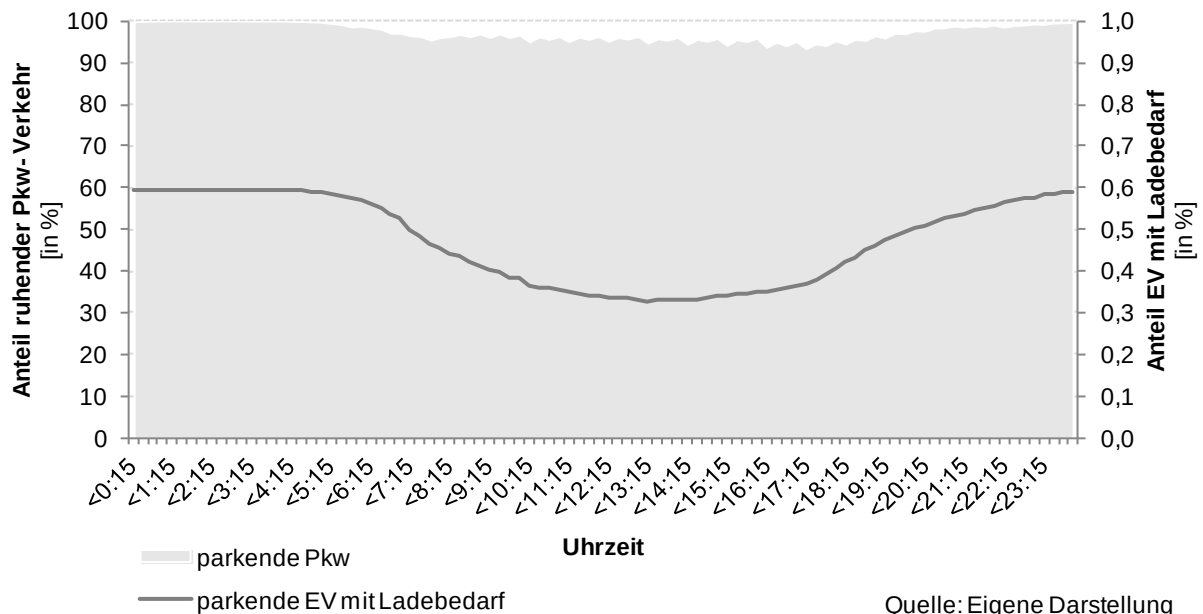


Abbildung 4-4: Tagesgang der gesamten Parkraumnachfrage

Aus dem Ergebnisbericht der MiD 2008 geht hervor, dass sich der Tagesgang des Verkehrs im Wochenverlauf unterscheidet (vgl. Follmer et al. 2010 a: 133 ff.). Demzufolge weisen Wochenendtage ein deutlich von den Wochentagen Montag bis Freitag abweichendes Profil auf (vgl. ebenda): Im Vergleich zum Wochenende zeichnen sich die Wochentage Montag bis Freitag durch ein höheres Verkehrsaufkommen aus. Demgegenüber sind für Wochenendtage höhere Entfernungen, eine höhere Verkehrsleistung und höhere Wegezeiten kennzeichnend. Das unterschiedliche Mobilitätsverhalten wirkt sich dabei wesentlich auf die Parkraumnachfrage und den Verlauf der Ladebedarfskurve von parkenden Pkw aus (siehe Abbildung 4-5).

Demzufolge ist die Parkraumnachfrage an allen Wochentagen nachts höher als tagsüber, wobei nachts in dem Zeitraum zwischen 23:00 Uhr und 5:00 Uhr nahezu 100 Prozent der privat genutzten Pkw stehen. Tagsüber können folgende charakteristische Verläufe der Parkraumnachfrage festgehalten werden: Bezogen auf ein 15-Minuten-Intervall befinden sich maximal 8,5 Prozent der privat genutzten Pkw zeitgleich auf deutschen Straßen. An den Wochentagen Montag bis Donnerstag lassen sich je zwei Tagesspitzen erkennen, in denen der Anteil des fließenden Verkehrs deutlich zunimmt. Eine gut sichtbare Morgenspitze verläuft zwischen 7:00 Uhr und 8:00 Uhr. Am Nachmittag wird im Zeitraum zwischen

14:00 Uhr und 19:00 Uhr eine anhaltende Spitze erreicht. Im Vergleich zu den anderen Wochentagen sind die Spitzen am Freitag weniger deutlich ausgeprägt. Dafür ist der Parkraum tagsüber gleichmäßiger belegt. An den Wochenendtagen ist der Anteil des ruhenden Verkehrs, aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens, über längere Tageszeiträume hinweg deutlich höher als an den anderen Wochentagen. Am Samstag fällt die vergleichsweise hohe Parkraumnachfrage in den Abendstunden auf. Dagegen befindet sich die Parkraumnachfrage am Sonntag konstant auf einem höheren Niveau.

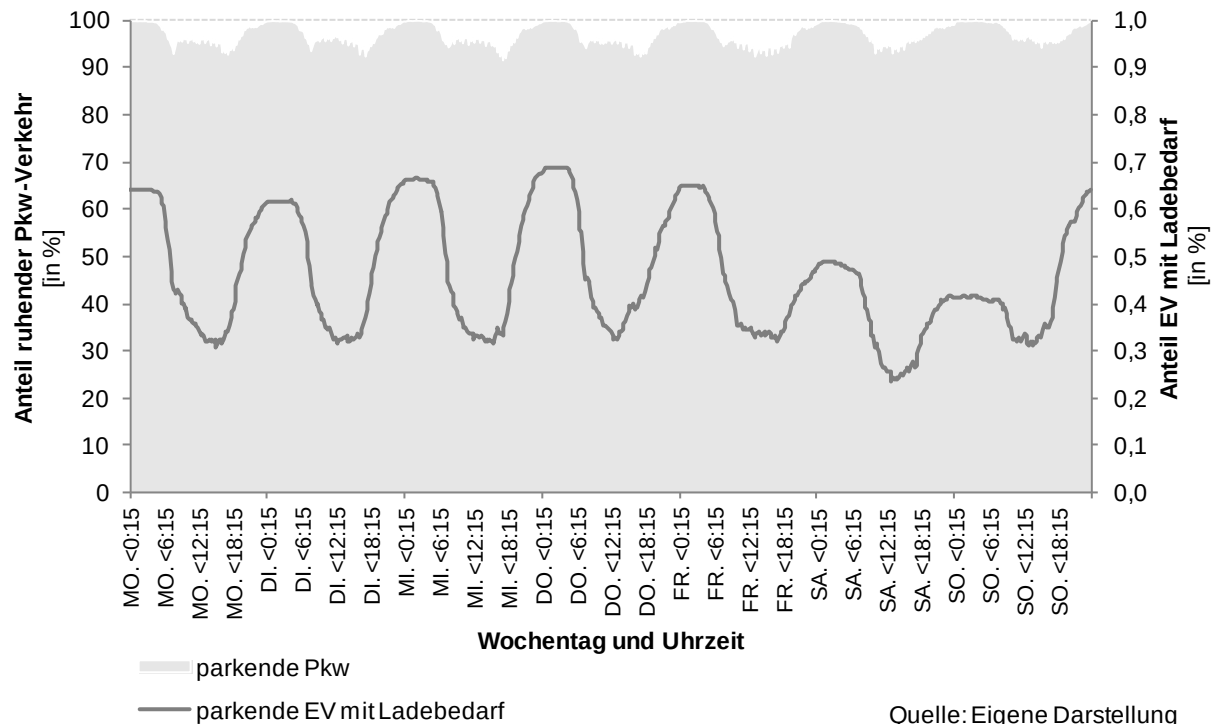


Abbildung 4-5: Wochengang der gesamten Parkraumnachfrage

Im Vergleich zum Tagesgang des Ladebedarfs fällt bei der Betrachtung des Wochenverlaufs insbesondere die geringere Nachfrage am Wochenende auf (siehe Abbildung 4-5). Erhebliche Abweichungen treten in den Nächten von Freitag bis Sonntag sowie tagsüber am Samstag auf. An den anderen Wochentagen liegt der Anteil der Elektrofahrzeuge mit Strombedarf am ruhenden Pkw-Verkehr zwischen 0,3 Prozent tagsüber und nahezu 0,7 Prozent nachts. Dabei ist die Nachfrage in der Nacht von Mittwoch zu Donnerstag mit nahezu 300.000 parkenden Elektrofahrzeugen am größten. Dagegen ist die Nachfrage am Samstagvormittag am geringsten. In diesem Zeitraum haben etwa 100.000 parkende Pkw einen Ladebedarf.

4.3.2 Standorte von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf

Während in den Nachtstunden zwischen 22:30 Uhr und 5:00 Uhr fast ausschließlich am Wohnort parkende Pkw einen Ladebedarf haben, verteilen sich die parkenden

Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf hingegen tagsüber auf verschiedene Standorte (vgl. Abschnitt 4.3.1). Aus diesem Grund wird im Folgenden aufgezeigt, welcher Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf zu unterschiedlichen Tageszeiten an unterschiedlichen Wochentagen auf bestimmte Aufenthaltsorte entfällt (siehe Abbildung 4-6).

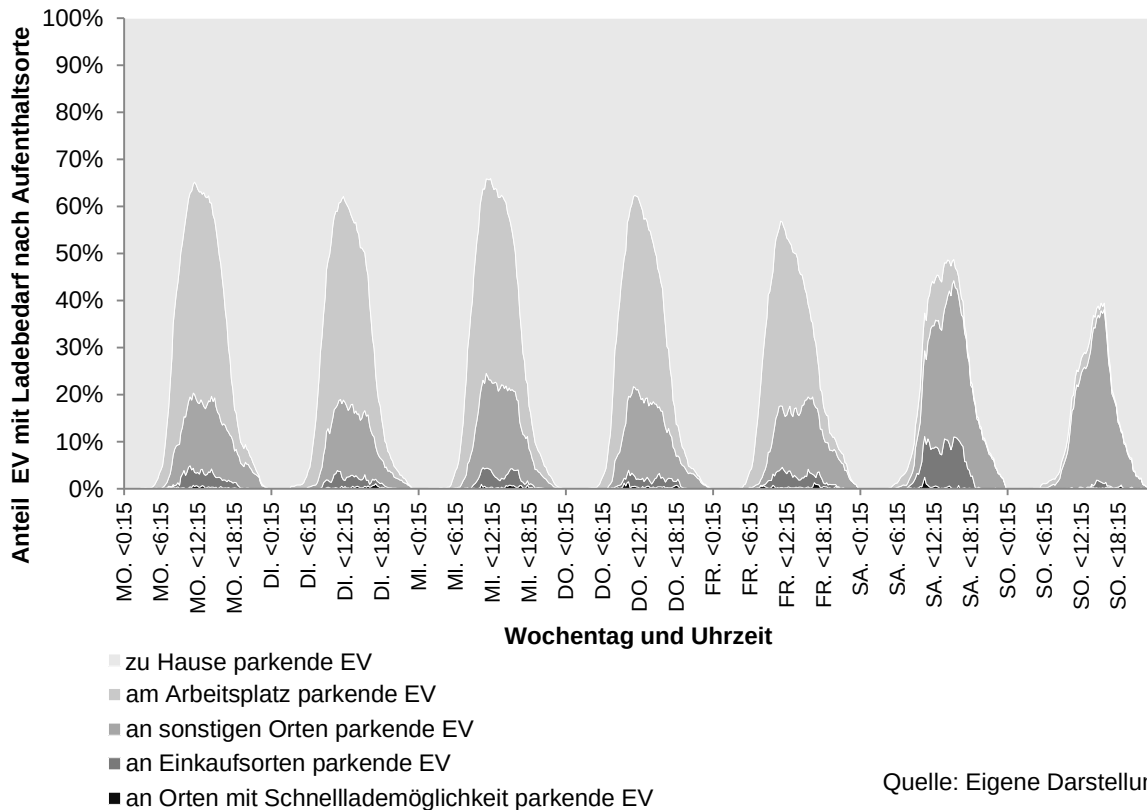


Abbildung 4-6: Verteilung der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf nach Aufenthaltsorten im Wochenverlauf

An den *Wochentagen Montag bis Freitag* verringert sich der Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge, die am Wohnort laden, von bis zu 100 Prozent nachts auf minimal 35 Prozent zur Mittagszeit. Dieser Rückgang resultiert im Wesentlichen daraus, dass in der Zeit zwischen 5:30 Uhr bis 21:30 Uhr Fahrzeuge vermehrt am Arbeitsplatz parken (vgl. Abschnitt 4.3.3, Abbildung 4-8). Der Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge, die am Arbeitsplatz laden, steigt bis zum Mittag auf bis zu 45 Prozent an. Zusammengenommen verteilen sich zu jeder Tageszeit mehr als 80 Prozent der stehenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf auf die Standorte Wohnung und Arbeitsplatz. Die Anzahl der parkenden Pkw mit einem Ladebedarf am Tage wird zudem wesentlich durch Elektrofahrzeuge bestimmt, die an sonstigen Orten, wie beispielsweise an Freizeitaktivitäten, geladen werden. Der Anteil liegt dabei im Zeitraum zwischen 10:00 Uhr und 17:00 Uhr relativ konstant zwischen 15 und 20 Prozent. Ein vergleichsweise geringer Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf verteilt sich hingegen auf Einkaufsorte. Dabei ergeben sich zwei Nachfragespitzen, die zwischen 10:15 Uhr und 12:45 Uhr sowie zwischen 14:30 Uhr und

18:00 Uhr liegen. Diese Spitzen sind in der Darstellung der gesamten Parkraumnachfrage an Einkaufsorten gut zu erkennen (vgl. Abschnitt 4.3.3, Abbildung 4-9). Während der Vormittagsspitze verteilen sich maximal bis zu vier Prozent der Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf auf Einkaufsorte.

An den *Wochenendtagen* ergibt sich eine grundsätzlich andere Verteilung der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf auf die verschiedenen Standorte. Demzufolge stehen auch *samstags* tagsüber mehr als die Hälfte dieser Pkw am Wohnort. Dafür reduziert sich der Anteil der am Arbeitsplatz ladenden Pkw auf maximal zehn Prozent. Kumuliert betrachtet ergibt sich im Vergleich zu den Wochentagen Montag bis Freitag ein verminderter Anteil von 80 Prozent auf bis zu 55 Prozent im Zeitraum zwischen 10:00 Uhr und 18:30 Uhr. Stattdessen ist eine deutliche Verlagerung der Parkraumnachfrage von Fahrzeugen mit Ladebedarf hin zu Einkaufsorten und sonstigen Orten zu erkennen. Im Zeitraum zwischen 10:30 Uhr und 17:00 Uhr verteilen sich etwa zehn Prozent der Pkw auf Einkaufsorte. Der Anteil der an sonstigen Orten stehenden Pkw steigt in den Nachmittagsstunden auf mehr als 30 Prozent an und bleibt auch in den Abendstunden bis 20:30 mit über zehn Prozent auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Darüber hinaus verteilen sich am Samstagvormittag in der Zeit von 10:00 Uhr bis 10:30 Uhr für ein einziges Mal im Wochenverlauf mehr als ein Prozent der ladenden Elektrofahrzeuge auf Orte, die über eine Möglichkeit zum Schnellladen verfügen. Im Vergleich dazu ist der *Sonntag* fast ausschließlich durch Parkvorgänge am Wohnort und an sonstigen Orten gekennzeichnet. Sonntags stehen zu jeder Tageszeit mehr als zwei Drittel der Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf auf einem privaten Stellplatz am Wohnort. Zur Nachfrage am Nachmittag addieren sich mit einem Anteil von maximal 35 Prozent vor allem Parkvorgänge an sonstigen Orten. Am Arbeitsplatz stehen in der Zeit zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr hingegen nur maximal drei Prozent der Elektrofahrzeuge. Über das Jahr gemittelt haben Elektrofahrzeuge am Sonntag nahezu keinen Strombedarf an Einkaufsorten.

4.3.3 Standortspezifische Ganglinien der Parkraumnachfrage

Je nach der Aktivität am Zielort sind die Häufigkeitsverteilungen und Standdauern parkender Fahrzeuge sehr verschieden. Insbesondere wohnort- und arbeitsplatznahe Stellplätze werden über mehrere Stunden am Tag von einem Fahrzeug belegt (vgl. Abschnitt 4.2.2). Auf Basis der aktuellen Fahrzeugnutzung und der Pkw-Bestandsentwicklung bis zum Jahr 2020 wird daher für jeden Wegezweck die Anzahl der parkenden Fahrzeuge am Zielort bestimmt. Aus dem Zufluss und Abfluss von Fahrzeugen können schließlich Belegungsganglinien für die verschiedenen Standorte erstellt werden.

Anschließend wird für die jeweiligen Standorte der Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf bestimmt. Eine Differenzierung des Ladebedarfs nach der Art der Ladung

(normal / schnell) wird nicht vorgenommen. Demzufolge werden Fahrtunterbrechungen zur Zwischenladung an DC-Ladestationen der Aktivität des Zielortes zugeordnet. Im Alltagsverkehr sind DC-Schnellladungen mit einem Anteil von rund einem Prozent jedoch kaum von Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Parkraumnachfrage am Wohnort

In Wohnortnähe können Pkw sowohl im privaten als auch im öffentlichen Raum geparkt werden. Insgesamt stehen in den Nachtstunden zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr mehr als 90 Prozent der privat genutzten Pkw am Wohnort. Am Tage sinkt der Anteil bis 10:00 Uhr rasant auf minimal 65 Prozent ab und steigt ab dem Mittag allmählich wieder auf das nächtliche Maximum an. In Bezug auf die gesamte Parkraumnachfrage an Wohnorten verteilen sich parkende Pkw zu einem Anteil von 70 Prozent auf den privaten Raum.

Unter der Annahme des Basisszenarios, dass in Wohngebieten im öffentlichen Straßenraum keine Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht, können Fahrzeuge am Wohnort nur auf privaten Stellplätzen geladen werden (vgl. Abschnitt 4.1). Infolgedessen wird in Abbildung 4-7 der Anteil der Fahrzeuge bestimmt, die während eines Parkvorgangs auf einem privaten Stellplatz zu Hause laden. Demzufolge haben in den Nachtstunden zwischen 22:30 Uhr und 5:00 Uhr rund 0,9 Prozent und am Tage minimal 0,3 Prozent der Fahrzeuge, die im privaten Raum parken, einen Ladebedarf. Dabei hat an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 etwa ein Viertel aller Elektrofahrzeuge nachts einen Ladebedarf.

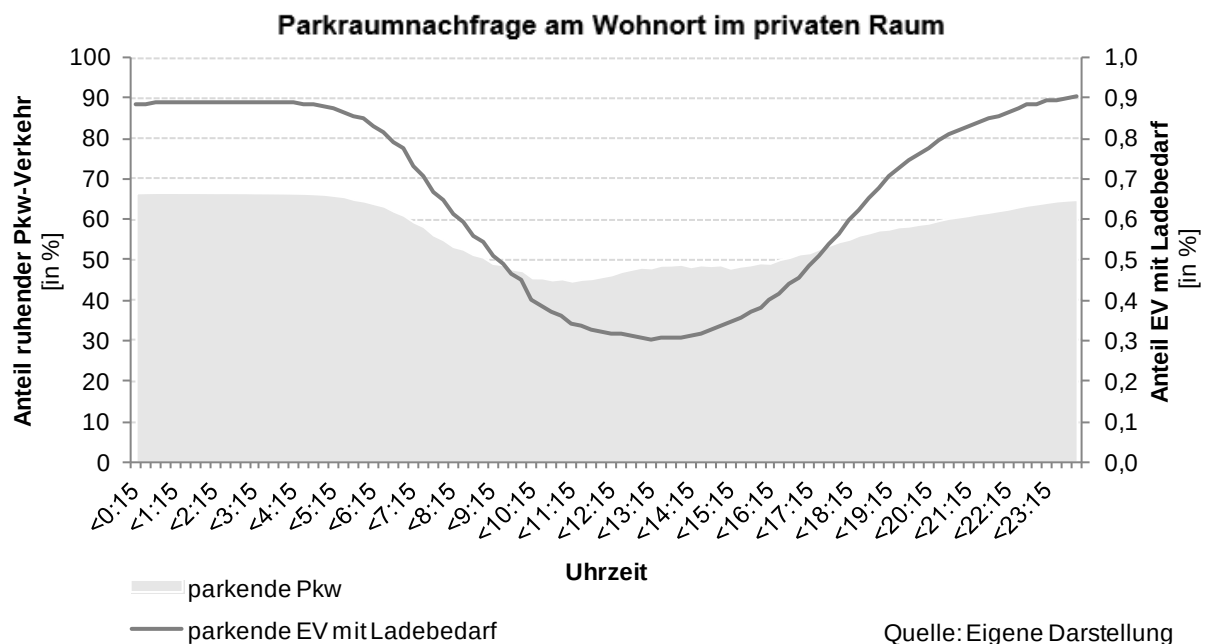


Abbildung 4-7: Tagesgang der Parkraumnachfrage am Wohnort

Parkraumnachfrage am Arbeitsplatz

Pkw in privater Nutzung werden überwiegend zwischen 5:30 Uhr und 21:30 Uhr am Arbeitsplatz geparkt. Dabei steigt der Anteil des ruhenden Pkw-Verkehrs zwischen 6:30 Uhr und 9:00 Uhr rasant auf etwa 20 Prozent an. Gegen Mittag sinkt die Nachfrage nach Pkw-Standflächen in Nähe zur Arbeitsstätte allmählich wieder ab. Privat genutzte Pkw, die am Arbeitsplatz stehen, befinden sich zu drei Vierteln im privaten Raum (z. B. auf einem Betriebsgelände). Die restlichen Pkw verteilen sich zu gleichen Teilen auf halböffentliche Stellplätze (z. B. in einem Parkhaus in Arbeitsplatznähe) und auf Parkstände im öffentlichen Straßenraum.

In Abbildung 4-8 wird der Anteil des ruhenden Verkehrs am Arbeitsplatz jedoch ohne den im öffentlichen Raum befindlichen Pkw ausgewiesen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Basisszenario auch für den öffentlichen Straßenraum in Arbeitsplatznähe keine Ladeinfrastruktur vorgesehen ist (vgl. Abschnitt 4.1). Demzufolge ergibt sich der Anteil der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf aus dem ruhenden Verkehr im privaten und halböffentlichen Raum. Im Ergebnis verteilt sich die Tagesnachfrage am Arbeitsplatz gleichmäßig über einen Zeitraum von 16 Stunden und liegt zwischen 0,6 und 0,7 Prozent. Demnach haben von einer Million Elektrofahrzeugen zur Nachfragespitze zwischen 10:00 Uhr und 12:00 Uhr etwa 46.000 Pkw einen Ladebedarf am Arbeitsplatz.

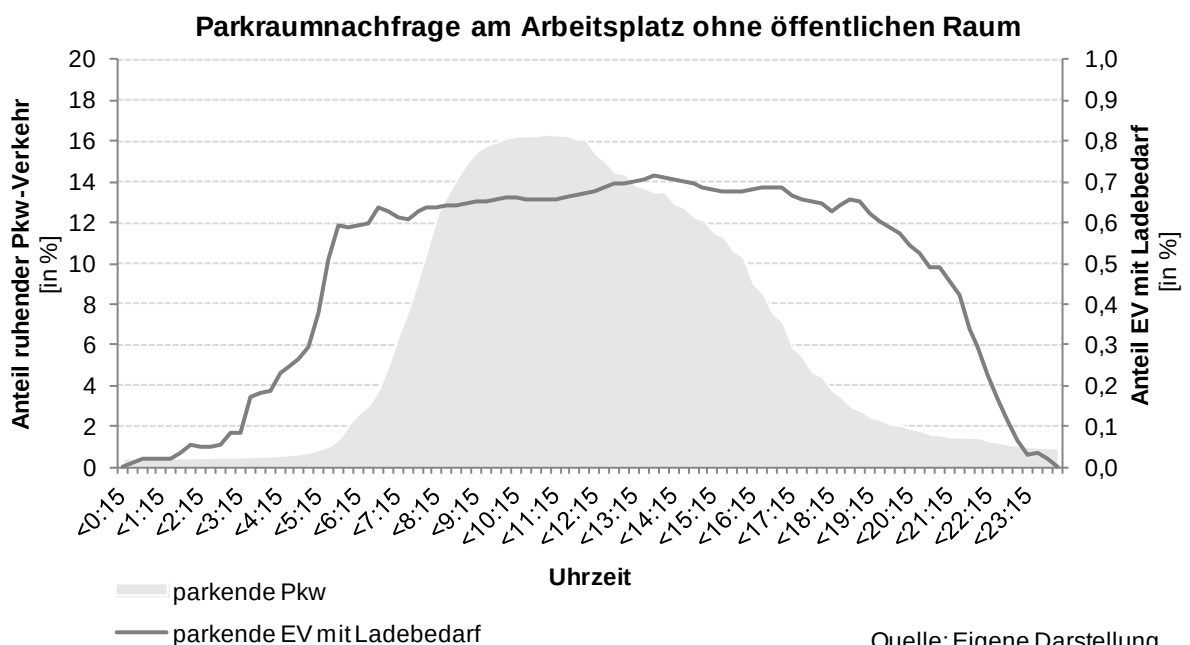


Abbildung 4-8: Tagesgang der Parkraumnachfrage am Arbeitsplatz

Parkraumnachfrage an Einkaufsorten

Da Einkaufsstätten für Kunden erreichbar sein müssen, werden Parkmöglichkeiten an Einkaufsorten dem öffentlich zugänglichen Raum zugeordnet. Dabei verteilen sich parkende Pkw zu einem Anteil von 70 Prozent auf den halböffentlichen Raum. Das Einkaufen wird im Tagesverlauf in zwei „Schüben“ durchgeführt (vgl. Follmer et al. 2010 a: 135). Daraus resultieren für den ruhenden Pkw-Verkehr an Einkaufsstätten zwei Nachfragespitzen (siehe Abbildung 4-9): Die Spitze am Vormittag erreicht zwischen 10:15 Uhr und 12:00 Uhr einen Anteil von etwa drei Prozent. Die Spitze am Nachmittag liegt zwischen 15:00 Uhr und 17:30 Uhr, wobei der Anteil mit rund zwei Prozent etwas geringer ausfällt.

Im Zeitraum zwischen 6:30 Uhr und 22:00 Uhr stehen an Einkaufsorten Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf. Im Gegensatz zur gesamten Parkraumnachfrage privat genutzter Pkw an Einkaufsorten ist der Anteil parkender Elektrofahrzeuge, die während des Einkaufs geladen werden, nachmittags tendenziell höher als am Vormittag. Mit einem Anteil von nahezu 0,5 Prozent wird der maximale Ladebedarf zwischen 13:30 Uhr und 16:30 Uhr erreicht. Von einer Million Elektrofahrzeugen betrifft dies zu den Nachfragespitzen 4.000 und 6.000 Fahrzeuge.

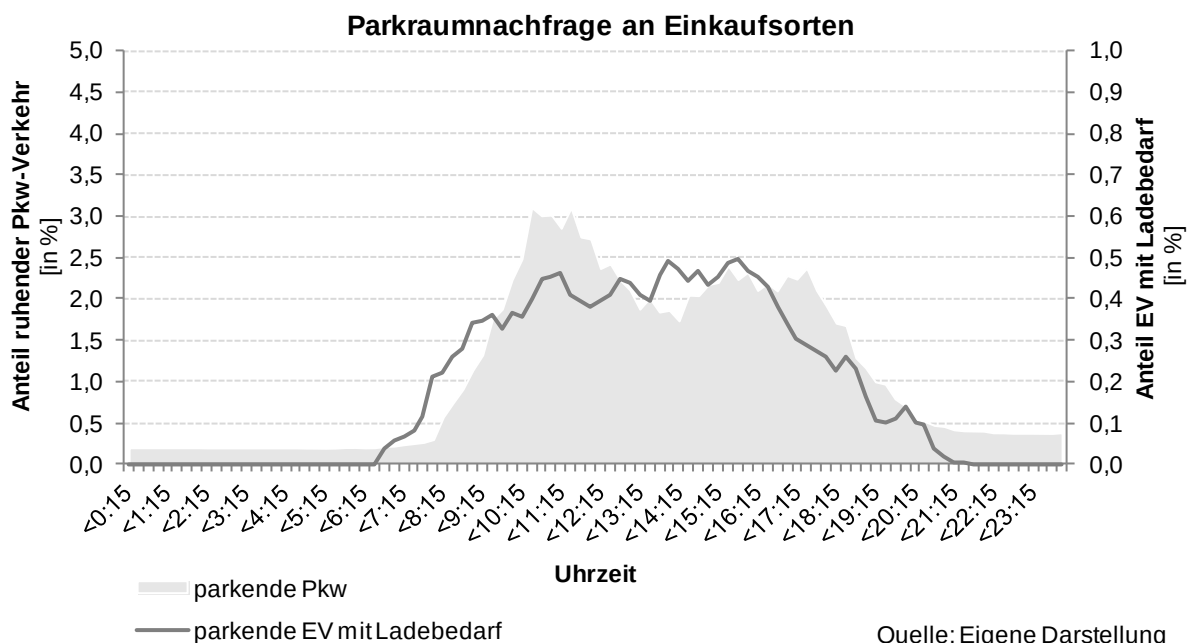


Abbildung 4-9: Tagesgang der Parkraumnachfrage an Einkaufsorten

Parkraumnachfrage an sonstigen Orten

An sonstigen Orten stehen etwa zehn Prozent der Pkw in privater Nutzung auf einem Stellplatz im halböffentlichen Raum. Die restlichen Pkw verteilen sich zu gleichen Teilen auf den privaten und öffentlichen Raum.

In den Nachtstunden bis 7:00 Uhr beträgt der Anteil des ruhenden Pkw-Verkehrs an sonstigen Orten nahezu vier Prozent (vgl. Abbildung 4-10). Dieser vergleichsweise hohe Anteil lässt sich dadurch erklären, dass den sonstigen Wegezwecken auch mehrtägige Ausflüge (bis zu vier Tagen) und Urlaube (ab fünf Tagen) zugeordnet werden (vgl. Follmer et al. 2010 d: 3). Auch am Tage befindet sich ein wesentlicher Anteil an privat genutzten Pkw auf sonstigen Standflächen (z. B. an Freizeitaktivitäten). Der Anteil liegt ab 10:30 Uhr für einen Zeitraum von elf Stunden zwischen neun und zwölf Prozent. Dabei ist die Nachfrage am Nachmittag zwischen 15:00 Uhr und 17:00 Uhr am höchsten. Am Abend bleibt die Parkraumnachfrage bis 21:00 Uhr auf einem konstanten Niveau von etwa zehn Prozent. Anschließend sinkt der Anteil des ruhenden Verkehrs an sonstigen Orten wieder auf die nächtliche Nachfrage ab.

Während die Parkraumnachfrage an sonstigen Orten nachmittags und abends am höchsten ist, wird der Anteil an Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf über die Mittagszeit zwischen 10:30 Uhr und 15:00 Uhr maximal. Dabei steigt der Anteil ab 8:00 Uhr rasant auf nahezu 0,7 Prozent an und flacht anschließend wieder allmählich ab. Somit weicht die zeitliche Verteilung von parkenden Elektrofahrzeugen, die an sonstigen Orten laden, bedeutend von der Nachfrage privat genutzter Pkw ab. Dies hat zur Folge, dass die absolute Nachfrage im Zeitraum zwischen 10:00 Uhr und 17:00 Uhr relativ konstant bleibt. Die maximale Anzahl von rund 30.000 parkenden Pkw, die einen Strombedarf an sonstigen Orten haben, wird am Nachmittag zwischen 14:30 Uhr und 16:00 Uhr erreicht.

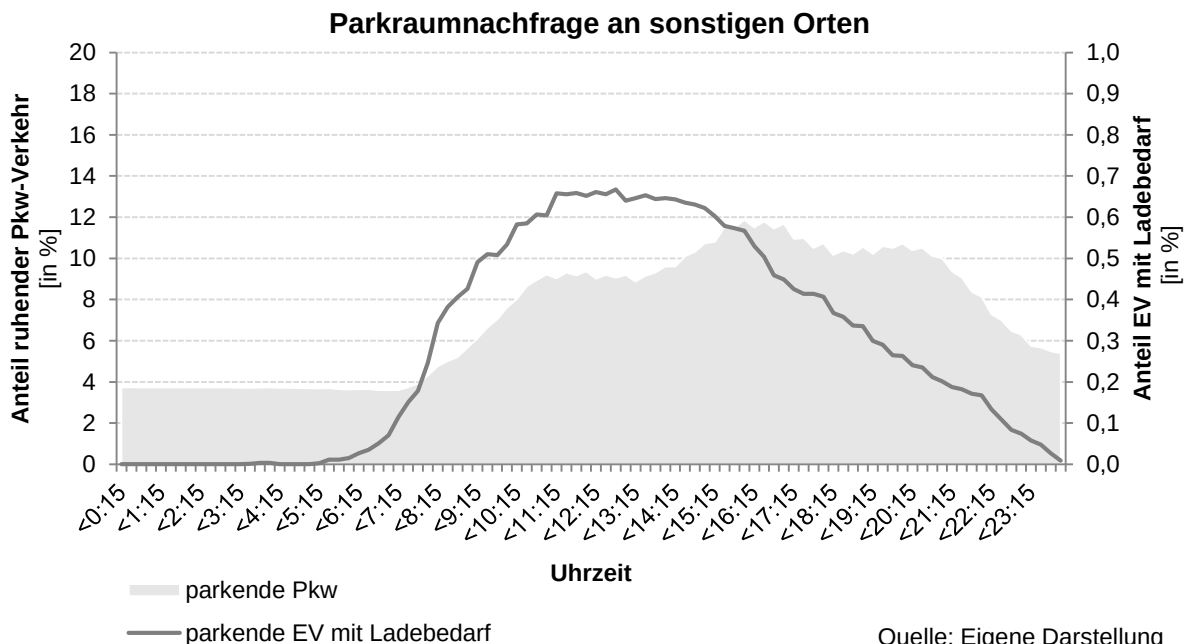


Abbildung 4-10: Tagesgang der Parkraumnachfrage an sonstigen Orten

4.4 Zusammenfassung zentraler Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen wiederholt dargestellt. Darauf aufbauend werden die zentralen Erkenntnisse aus der modellgestützten Analyse des Ladebedarfs für das ausgewählte Basisszenario zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 aufgezeigt. Dabei konnten die Ergebnisse zur ersten Fragestellung aus der Anwendung des Modells zur Bestimmung des Ladebedarfs und die Ergebnisse zur zweiten Fragestellung aus dem alternativen Hochrechnungsmodell gewonnen werden.

Fragestellung 1: *Wie viele Ladevorgänge ergeben sich bei einer Million Elektrofahrzeuge in Deutschland an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020?*

- *Anzahl an Ladevorgängen:* Bei einer Million Elektrofahrzeugen ergeben sich im Basisszenario insgesamt ca. 463.000 Ladevorgänge. Die Anzahl der Ladevorgänge kann differenziert nach der Ladeart, dem Aufenthaltsort sowie der verfügbaren Anschlussleistung am Ladeort ausgewiesen werden. Demzufolge kann die überwiegende Anzahl an Ladevorgängen durch Normalladungen mit Anschlussleistungen bis maximal 11,1 kW realisiert werden. DC-Schnellladungen haben im Alltagsverkehr hingegen keine Bedeutung. Dagegen findet mehr als die Hälfte der Ladevorgänge auf einem privaten Stellplatz am Wohnort statt.

Fragestellung 2: *Wie viele Fahrzeuge konzentrieren sich an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 zu bestimmten Uhrzeiten an bestimmten Standorten? Und welcher Anteil aller parkenden Fahrzeuge hat einen Ladebedarf?*

- *Anteil der parkenden Fahrzeuge mit Ladebedarf:* Der Anteil von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf am ruhenden Verkehr ist nachts höher als tagsüber und liegt an einem durchschnittlichen Tag zwischen 0,3 und 0,6 Prozent. Während in den Nachtstunden fast ausschließlich zu Hause parkende Pkw einen Ladebedarf haben, verteilen sich Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf tagsüber auf verschiedene Standorte. Die Verteilung der Nachfrage unterscheidet sich dabei wesentlich zwischen den Wochentagen Montag bis Freitag und den Wochenendtagen. Die Ergebnisse werden differenziert nach den Standorten Wohnort, Arbeitsplatz, Einkaufsorte und sonstige Orte ausgewiesen.

Darüber hinaus konnten die folgenden Erkenntnisse zur Anzahl an Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf und den Stand- und Ladedauern von Elektrofahrzeugen gewonnen werden:

- *Anzahl an Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf:* Mehr als ein Drittel der Elektrofahrzeuge werden an einem durchschnittlichen Tag nicht bewegt und haben somit keinen Ladebedarf. Dagegen wird nur etwa jedes fünfte Elektrofahrzeug

mehrmals am Tag oder woanders als auf einem privaten Stellplatz in der Nähe des Wohnortes oder des Arbeitsplatzes geladen.

- *Stand- und Ladedauern:* Aufgrund der geringeren Batteriekapazität können PHEV im Vergleich zu BEV in kürzerer Zeit aufgeladen werden. Dadurch stehen PHEV mit Ladebedarf im Mittel wesentlich länger an Zielorten als für das Aufladen der Fahrzeuge erforderlich wäre. Trotz der längeren Ladezeiten können selbst BEV, aufgrund der langen Standzeiten an Zielorten (vor allem am Wohnort und am Arbeitsplatz), ausreichend lange geladen werden.

5 Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs

Im Folgenden wird für das berechnete Basisszenario ein Ansatz aufgezeigt, wie aus der Analyse des Ladebedarfs der Ladeinfrastrukturbedarf abgeschätzt werden könnte (Abschnitt 5.1). Daran anschließend werden die im Rahmen dieser Arbeit getroffenen Überlegungen im Kontext der aktuell diskutierten Ansätze und Abschätzungen zum Ladeinfrastrukturaufbau betrachtet (Abschnitt 5.2).

5.1 Vom Ladebedarf zum Ladeinfrastrukturbedarf

Ladeinfrastruktur kann im Wesentlichen nach der Art der Versorgungseinrichtung und nach der Art der Zugänglichkeit von Einrichtungen zur Energieversorgung unterschieden werden. Ausgehend von den derzeit nutzbaren Ladeinfrastrukturkonzepten stehen Nutzern von Elektrofahrzeugen bis 2020 kabelgebundene Ladesysteme zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.2.1). Ladeinfrastruktur kann dabei an verschiedenen Standorten aufgebaut werden, welche sich nach der Art der Zugänglichkeit in drei Bereiche (privat, halböffentlich und öffentlich) einteilen lassen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die benötigte Ladezeit zum Aufladen der Fahrzeugbatterie wird dabei wesentlich von dem am jeweiligen Standort bereitgestellten Ladestrom bestimmt (vgl. Abschnitt 3.1.3.1, Tabelle 3-3).

Darauf aufbauend wurden für die verschiedenen Aufstellorte von Ladeinfrastruktur aus den standortspezifischen Ganglinien der Parkraumnachfrage und des Ladebedarfs zeitliche Nachfrageschwerpunkte für das Laden von Elektrofahrzeugen ermittelt (vgl. Abschnitt 4.3.3). Diese Analyse liefert zentrale Informationen darüber, welcher Anteil der Pkw-Standflächen zum Aufladen von Elektrofahrzeugen genutzt wird. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zur Stellplatzbelegung von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf an einem durchschnittlichen Tag im Jahr 2020 werden in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Dabei werden die Ergebnisse differenziert nach dem Aufenthaltsort von parkenden Fahrzeugen ausgewiesen.

Die Ergebnisse sind dabei wie folgt zu interpretieren: Zur Nachfragespitze haben beispielsweise 0,7 Prozent aller parkenden Pkw am Arbeitsplatz einen Ladebedarf. Daraus resultiert, dass auf einem von 140 Pkw-Standflächen am Arbeitsplatz ein Elektrofahrzeug parkt, dessen Energiegehalt eine Aufladung erfordert.

Tabelle 5-1: Stellplatzbelegung von Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf im Basisszenario

Aufenthaltsort	maximaler Anteil von EV mit Ladebedarf an der Parkraumnachfrage am Standort	maximale Anzahl der zum Laden von EV genutzten Pkw-Standflächen*
Wohnort	0,9	1 je 110 Stellplätze
Arbeitsplatz	0,7	1 je 140 Stellplätze
Einkauf	0,5	1 je 200 Stellplätze
Sonstiges	0,7	1 je 140 Stellplätze

(Eigene Berechnung, auf Zehner gerundete Werte)

Für Schwerpunkte des ruhenden Verkehrs, wie an Bahnhöfen, Flughäfen, Hotels, Großfirmen oder Messegeländen, lässt sich daraus eine sinnvolle Empfehlung zum Ladeinfrastrukturaufbau nach den standortspezifischen Stellplatzbelegungen ableiten. Für kleinere Parkplätze sowie den öffentlichen Straßenraum können hingegen keine ausreichenden Erkenntnisse gewonnen werden.

Aus dieser Problematik heraus wurde für Normalladungen die maximale Anzahl von zeitgleich parkenden Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf bestimmt (siehe Tabelle 5-2). Dabei wird die standortspezifische Parkraumnachfrage getrennt nach der Zugänglichkeit von Stellplätzen sowie den am Ladeort bereitgestellten Ladeleistungen ausgewiesen. (Semi-) Schnellladungen wurden von der Betrachtung ausgeschlossen, da diese im Alltagsverkehr unbedeutend sind (vgl. Abschnitt 4.4). Für Normalladungen kann angenommen werden, dass die Nutzungswahrscheinlichkeiten von Ladeinfrastruktur nach der Art der Zugänglichkeit den Stellplatzwahrscheinlichkeiten entsprechen (vgl. Abschnitt 3.1.2.2). Dies kann darauf begründet werden, dass für das Basisszenario die Ladeleistungen an einem bestimmten Aufenthaltsort bei Normalladungen für alle Zugangsbereiche gleichermaßen gelten (vgl. Abschnitt 3.1.3.1).

Auf der Grundlage dieser Auswertung lässt sich für jeden der Standorte ein Verhältnis zwischen der Anzahl von parkenden Elektrofahrzeugen mit Ladebedarf und der Anzahl der Ladevorgänge am Tag (vgl. Abschnitt 4.2.1, Tabelle 4-1) berechnen. Aus diesem Verhältnis kann eine Aussage zur wahrscheinlichen Belegung des Stellplatzes getroffen werden. Wenn also die Anzahl der parkenden Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf im Zeitintervall zu einem hohen Anteil mit der Anzahl der täglichen Ladevorgänge übereinstimmt, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein Ladepunkt bereits belegt ist.

Tabelle 5-2: Maximale Anzahl gleichzeitig parkender Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf im Basisszenario

Ladeart	Aufenthaltort	Ladeleistung	maximale Anzahl zeitgleich parkender EV mit Ladebedarf nach Art der Zugänglichkeit		
			privat	halböffentlich	öffentlich
normal	Wohnort	3,7 kW (AC)	255.000	0	0
	Arbeitsplatz	11,1 kW (AC)	40.000	6.000	0
	Einkauf	11,1 kW (AC)	0	4.200	1.600
	Sonstiges	11,1 kW (AC)	13.000	2.500	13.000

(Eigene Berechnung, auf Tausend gerundete Werte für eine Million Elektrofahrzeuge)

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel haben viele Faktoren eine Auswirkung auf die Bedarfsermittlung und Beurteilung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Demzufolge hängt der Infrastrukturausbau unter anderem von der Entwicklung der Elektrofahrzeugflotte und den technischen Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur selbst ab. Aufgrund des veränderlichen Charakters dieser und weiterer Einflussfaktoren stellt vor allem die nachfragegerechte Abschätzung der Ladeinfrastruktur im öffentlich zugänglichen Raum eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund wird in Deutschland neben der bedarfsgerechten Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs vor allem der Ansatz der Bereitstellung einer flächendeckenden Grundinfrastruktur diskutiert (vgl. NPE 2014, Anderson et al. 2015, Beckers et al. 2015, Funke et al. 2015). Nachfolgend werden die methodischen Ansätze und die darauf aufbauenden infrastrukturellen Abschätzungen vorgestellt. Dabei wird zunächst die Infrastrukturanalyse von Anderson et al. (2015) vertiefend dargelegt.

Anderson et al. (2015)

Ausgehend von der Analyse von Fahr- und Ladeprofilen von Elektrofahrzeugen wurde der Ladebedarf für den Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen und unterschiedlichen Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen hochgerechnet (vgl. Abschnitt 3.1.4). Dabei wurden für jedes Szenario die totalen Lade- und Standdauern differenziert nach den Zugangsbereichen (privat, halböffentlich, öffentlich) ermittelt (vgl. Anderson et al. 2015: 13). Um aus der Analyse des Ladebedarfs Rückschlüsse auf den Infrastrukturbedarf ziehen zu können, wurde die Nutzungsrate von Ladeinfrastruktur als eine Funktion aus den totalen Standdauern und der Anzahl der Ladepunkte definiert (vgl. Anderson et al. 2015: 14). Dazu wurde die Versorgungsqualität von Ladeinfrastruktur mittels Angebotskurven definiert (vgl. Anderson et al. 2015: 15 f.). Damit lässt sich die Auslastung

von Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit der mittleren Entfernung zum nächsten freien Ladepunkt und damit für unterschiedliche Komfortniveaus bestimmen (vgl. ebenda).

Aus der Hochrechnung der Ladebedarfe nach den Szenarien zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten (vgl. Anderson et al. 2015: 17 f.): Erstens erhöht sich der Ladeinfrastrukturbedarf bedeutend, wenn öffentliche Ladeinfrastruktur in Wohngebieten bereitgestellt wird. Zweitens verringert sich die Anzahl an Ladepunkten insbesondere dann, wenn ein hoher Anteil an Elektrofahrzeugen zu Hause auf einem privaten Stellplatz geladen werden kann. Drittens erhöht sich der Ladeinfrastrukturbedarf leicht, wenn der PHEV-Anteil in der gesamten Elektrofahrzeugflotte vergrößert wird. Viertens erhöht sich die Anzahl an Ladepunkten deutlich, wenn eine verringerte Distanz zum nächsten verfügbaren Ladepunkt angeboten wird. Die resultierende Anzahl an benötigten Ladepunkten liegt je nach Szenario zwischen 13.300 und 161.700 Ladepunkten (vgl. Anderson et al. 2015: 9).

Nationale Plattform Elektromobilität (2014)

Die NPE verfolgt einen nachfrageorientierten Ansatz zur Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs, wonach der Infrastrukturaufbau in Abhängigkeit der Nachfrage, also dem Fahrzeugbestand, ermittelt wird (vgl. NPE 2011: 36 f.). Dabei wird für den nachfrageorientierten Ansatz eine Überdimensionierung der Infrastruktur empfohlen, um der Reichweitenangst potenzieller Kunden zu begegnen (vgl. ebenda). Für eine Million Elektrofahrzeuge ergeben sich für den öffentlich zugänglichen Raum die folgenden Infrastrukturabschätzungen (vgl. NPE 2014 a: 46): Im öffentlichen Raum sollen demnach rund 70.000 und im halböffentlichen Raum rund 110.000 Normalladepunkte errichtet werden. Zudem wird die für den Fernverkehr benötigte Schnellladeinfrastruktur mit ca. 7.100 Schnellladepunkten abgeschätzt.

Funke et al. (2015)

Funke et al. (2015) vergleichen in ihren Abschätzungen zum Ladeinfrastrukturbedarf zwei unterschiedliche Ansätze miteinander. Dabei wurde einerseits eine geographische Abschätzung in Abhängigkeit der Raumtypen und der maximalen Entfernungen zwischen zwei Ladepunkten vorgenommen (vgl. Funke et al. 2015: 80). Andererseits wurde ein nachfrageorientierter Ansatz gewählt, bei dem zum einen der Ladeinfrastrukturbedarf von Elektrofahrzeugnutzern ohne privaten Stellplatz am Wohnort und zum anderen der Ladeinfrastrukturbedarf für Zwischenladungen auf langen Strecken untersucht wurde (vgl. Funke et al. 2015: 75). Aus dem Vergleich der Ansätze geht hervor, dass sich die Abschätzungen des Ladeinfrastrukturbedarfs deutlich voneinander unterscheiden. Als Ergebnis konnte für den Markthochlauf auf eine Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 festgestellt werden, dass ein nachfrageorientierter Aufbau von Ladeinfrastruktur eine

geringere Anzahl an Ladepunkten erfordern würde, als aus dem geographischen Ansatz einer maximalen Flächenabdeckung hervorgeht (vgl. Funke et al. 2015: 82). Demnach wären nach dem geographischen Ansatz ca. 100.000 und nach dem nachfrageorientierten Ansatz ca. 34.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte erforderlich (vgl. ebenda).

Beckers et al. (2015)

Beckers et al. differenzieren in ihrer Arbeit drei unterschiedliche Angebotskonzepte für die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen. Demnach können die folgenden Konzepte angeboten werden (vgl. Beckers et al. 2015: 1): eine „Tankstellen-Ladeinfrastruktur“, eine „regelmäßig nutzbare Ladeinfrastruktur“ und eine „nebenbei nutzbare Ladeinfrastruktur“. In den Ausführungen stellen Beckers et al. (2015: 4 ff.) heraus, dass für einen erfolgreichen Markthochlauf der Aufbau einer flächendeckenden Grundinfrastruktur und insbesondere eines flächendeckenden Schnellladenetzes erforderlich ist. Daraufhin wurde die Größenordnung einer Tankstellen-Infrastruktur, d. h. einer flächendeckenden Schnellladeinfrastruktur, durch die Verwendung eines geographischen Ansatzes für unterschiedliche Szenarien berechnet (vgl. Beckers et al.: 13 f.). Demzufolge wären in Deutschland zwischen 3.200 und 12.900 Schnellladepunkte erforderlich (vgl. Beckers et al.: 5).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Abschätzungen von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur teilweise starke Unterschiede hinsichtlich der Ladeart (schnell / normal) und der räumlichen Verteilung aufweisen.

Um die Attraktivität von Elektromobilität für potenzielle Nutzer zu steigern, sollte eine flächendeckende Schnellladeinfrastruktur im Fernverkehr aufgebaut werden. Dagegen konnte durch die Analyse des Ladebedarfs aus den Fahrzeugnutzungsprofilen konventioneller Pkw gezeigt werden, dass der Aufbau von Schnellladepunkten im Alltagsverkehr nicht zwingend erforderlich ist. Stattdessen sind die Standzeiten an Zielorten lang genug, sodass Elektrofahrzeuge auch mit geringen Ladeleistungen vollständig aufgeladen werden können. Trotzdem sollte auch im Alltagsverkehr eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur angeboten werden, um für potenzielle Nutzer, die über keinen privaten Stellplatz am Wohnort verfügen, den Zugang zur Elektromobilität zu gewährleisten. Aus den genannten Gründen ist für den Ladeinfrastrukturbedarf ein nachfrageorientierter Ansatz zu bevorzugen.

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Ansatz liefert bereits Erkenntnisse darüber, welcher Anteil an Pkw-Standflächen an Schwerpunkten des ruhenden Verkehrs mit einem Ladepunkt ausgestattet sein sollte. Darüber hinaus können Aussagen zur Belegung von Pkw-Standflächen nach Aufenthaltsorten und Zugangsbereichen getroffen werden. Als

Erweiterung des vorgestellten Ansatzes könnte die Infrastrukturabschätzung aus den standortspezifischen Belegungsdaten, mit Hilfe der von Anderson et al. (2015) aufgestellten Funktion zur Auslastung von Ladeinfrastruktur, vorgenommen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden sowohl das Vorgehen der Arbeit als auch die zentralen Erkenntnisse zum Ladebedarf im Alltagsverkehr zusammengefasst (Abschnitt 6.1). Daran anschließend wird eine differenzierte Betrachtung des modellgestützten Vorgehens vorgenommen und ein Ausblick auf die weitere Optimierung der Analysemethode gegeben (Abschnitt 6.2).

6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, den Ladebedarf von einer Million privat genutzten Elektrofahrzeugen im Alltagsverkehr zu bestimmen. Dazu wurden zunächst die existierenden elektrischen Antriebskonzepte sowie die derzeit verfügbaren Ladeinfrastrukturkonzepte vorgestellt. Daran anknüpfend wurde die aktuelle Marktentwicklung erläutert und hinsichtlich der Zielerreichung von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland bewertet. Anschließend wurde eine Methodik beschrieben, auf deren Grundlage der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen, ausgehend von den Nutzungsprofilen konventioneller Pkw, ermittelt werden kann. Dabei handelt es sich um das Modell zur Bestimmung des Ladebedarfs von Anderson et al. (2015). Aufbauend auf diesem Modell wurde ein alternatives Hochrechnungsmodell entwickelt, mit dem zusätzlich zum Ladebedarf von Elektrofahrzeugen auch die Parkraumnachfrage von allen privat genutzten Pkw im Bestand ermittelt werden kann. Bei der Entwicklung des alternativen Hochrechnungsverfahrens stand die Identifikation von zeitlichen Nachfrageschwerpunkten im Vordergrund. Daran anknüpfend wurden die Ergebnisse dargestellt, die einerseits aus der Anwendung des Modells zur Bestimmung des Ladebedarfs und andererseits aus dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten alternativen Hochrechnungsverfahren gewonnen werden konnten. Die Ergebnisse wurden dabei beispielhaft für ein Szenario zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 berechnet. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden abschließend Erkenntnisse zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur abgeleitet.

Zusammengefasst konnten aus der Analyse des Ladebedarfs die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Aus der Herleitung des Basisszenarios zur Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen konnte gezeigt werden, dass sich in der Markthochlaufphase vorwiegend PHEV durchsetzen werden.
- Ladevorgänge im Alltagsverkehr finden insbesondere im privaten Raum statt.
- Ladungen können zum überwiegenden Anteil mit geringeren Ladeleistungen bis 11,1 kW durchgeführt werden.

- DC-Schnellladungen haben im Alltagsverkehr keine Bedeutung.
- Der Anteil parkender Fahrzeuge mit Ladebedarf ist nachts höher als tagsüber.
- Während in den Nachtstunden fast ausschließlich am Wohnort parkende Pkw einen Ladebedarf haben, verteilen sich Elektrofahrzeuge mit Ladebedarf tagsüber auf unterschiedliche Standorte.
- Die Verteilung der Parkraumnachfrage von Fahrzeugen mit Strombedarf unterscheidet sich wesentlich zwischen den Wochentagen Montag bis Freitag und den Wochenendtagen.

Diese Analyse bildet die Grundlage zur Abschätzung eines nachfragegerechten Ladeinfrastrukturbedarfs im Alltagsverkehr, bezogen auf die Zielsetzung der Bundesregierung von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland.

6.2 Kritische Betrachtung und Ausblick

Mit dem entwickelten Modell können aus der heutigen Fahrzeugnutzung Ladeprofile einer zukünftigen Elektrofahrzeugflotte bestimmt werden. Davon ausgehend ist eine standortspezifische Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs für eine Million Elektrofahrzeuge möglich. Durch die nachfolgenden Ausführungen werden zum einen die Einflüsse der geltenden Annahmen thematisiert. Zum anderen sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie das alternative Hochrechnungsmodell im Hinblick auf die Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs optimiert werden könnte.

Annahmen zur Marktentwicklung

Die Ergebnisse zum Ladebedarf und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zum Ladeinfrastrukturbedarf sind sensitiv gegenüber Entwicklungen im Fahrzeugmarkt (z. B. der angenommenen Flottenverteilung, der Batteriegröße und der elektrischen Reichweite). Dies soll das folgende Beispiel verdeutlichen: Werden hauptsächlich Fahrzeuge mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor eingesetzt (z. B. PHEV), muss die Ladeinfrastruktur nicht auf die Reichweitenängste der Nutzer ausgelegt sein. Bei längeren Fahrten wird dann einfach der Verbrennungsmotor eingesetzt. Demzufolge ist der Aufbau einer Schnellladeinfrastruktur nicht zwingend erforderlich. Demgegenüber sollte der elektrische Fahranteil von PHEV möglichst hoch sein, um die Einsparpotenziale bezüglich des Kraftstoffverbrauchs und des lokalen CO₂-Ausstoßes optimal ausschöpfen zu können (vgl. Abschnitt 2.1). Aufgrund der geringeren verfügbaren elektrischen Reichweite ergibt sich im Vergleich zu BEV jedoch ein höherer Ladebedarf an Orten, an denen die Fahrzeuge im Alltagsverkehr ohnehin parken (vgl. Abschnitt 5.2). Vor dem Hintergrund der Reduzierung des Schadstoffausstoßes ergibt sich daraus in der Summe ein höherer Bedarf an Ladeinfrastruktur (vgl. ebenda).

Ändern sich hingegen gewisse Einflussfaktoren in Bezug auf die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen, kann die modellgestützte Analyse des Ladebedarfs über die Änderung der Makrovariablen ohne großen Aufwand angepasst werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Eine solche Anpassung könnte beispielsweise die Definition der elektrischen Reichweite betreffen (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Diese wäre erforderlich, sofern sich andere elektrische Antriebskonzepte mit höheren Reichweiten (z. B. REEV, vgl. Abschnitt 2.1) auf dem Fahrzeugmarkt durchsetzen oder in den kommenden Fahrzeugmodellen Batterien mit einer höheren Speicherkapazität verbaut werden.

Annahmen zum Nutzungsverhalten

Bei der Ladeprofilermittlung wird das Nutzungsverhalten konventioneller Fahrzeuge weitestgehend auf Elektrofahrzeuge übertragen. Im Hinblick auf die vergleichsweise geringeren Reichweiten, die längeren Ladedauern sowie die höheren Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen sind allerdings abweichende Nutzungsmuster denkbar. Aufgrund dieser Kaufhemmnisse ist damit zu rechnen, dass Elektrofahrzeuge, aufgrund der technischen Innovation und der Umweltaspekte, anfangs nur für bestimmte Nutzertypen attraktiv sind. Infolgedessen ist zu erwarten, dass Elektrofahrzeuge vorerst als Zweitwagen genutzt werden. Lange Wegstrecken, die eine Fahrtunterbrechung für eine länger dauernde Zwischenladung zur Folge haben, könnten dadurch gemieden werden. Im Modell wurde dieses Problem durch die Definition von Fahrzeugnutzungstypen adressiert (vgl. Abschnitt 3.1.2.3). Demzufolge werden im Modell Fahrzeuge mit geringerem Fernverkehrseinsatz bei gleichzeitig hoher Jahresfahrleistung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit durch ein Elektrofahrzeug ersetzt (vgl. ebenda). Zur Verifizierung dieser Verteilung sind Daten zur Nutzung von Elektrofahrzeugen durch die neuen Nutzertypen („Early Majority“) erforderlich. Erkenntnisse können beispielsweise aus künftigen Begleitforschungen zu den Schaufensterprojekten und Modellregionen gewonnen werden.

Annahmen zur Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur

Das Basisszenario setzt voraus, dass jede Person, die über einen privaten Stellplatz auf dem eigenen Grundstück verfügt, zu Hause laden kann (vgl. Abschnitt 4.1). Dabei wird nicht unterschieden, ob es sich um ein Einfamilien- oder ein Mehrfamilienhaus handelt. Während davon ausgegangen werden kann, dass an einem Großteil der Einfamilienhäuser mit einem Stellplatz auf dem eigenen Grundstück (z. B. Carport oder Garage) relativ problemlos ein Ladepunkt eingerichtet werden kann, ist die Situation bei Mehrfamilienhäusern nicht eindeutig. Es ist anzunehmen, dass die Errichtung eines Ladepunktes zu einem Großteil von der Bereitschaft des Vermieters abhängt. In der praktischen Umsetzung können vor allem rechtliche Rahmenbedingungen Hemmnisse darstellen. Im Modell sollte daher die Verfügbarkeit von privaten Stellplätzen mit Lademöglichkeit am Wohnort differenziert nach

Raumtypen (z. B. in Agglomerationsräume, verstädterte und ländliche Räume) ausgewiesen werden. Aus der räumlichen Analyse heraus sollte zudem der Frage nachgegangen werden, ob die Errichtung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur in Wohngebieten – insbesondere im urbanen Raum – erforderlich ist, um die Zahl der potenziellen Nutzer zu erweitern.

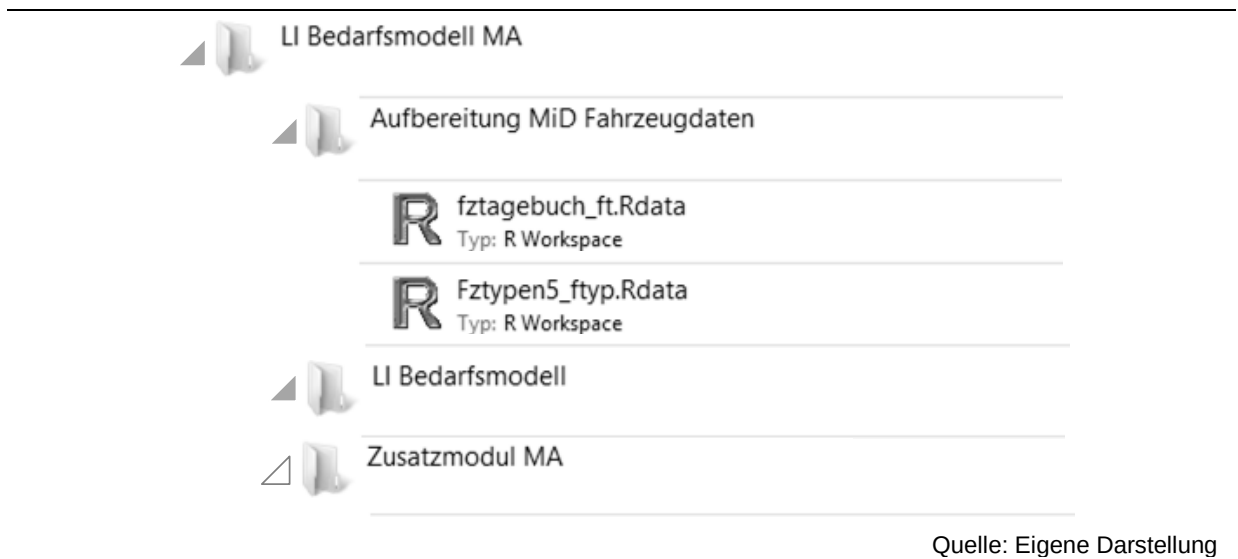
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in den bisherigen Überlegungen fahrzeugseitige Ausstattungsvarianten, wie z. B. die Möglichkeit zum DC-Schnellladen, nicht berücksichtigt worden sind. Je nach der Ladefähigkeit von Elektrofahrzeugen sind die verschiedenen infrastrukturellen Ausgestaltungsmöglichkeiten, wie z. B. von Ladeverfahren und Ladeströmen, unterschiedlich attraktiv. Hinsichtlich eines bedarfsgerechten Aufbaus von Ladeinfrastruktur erscheint es jedoch notwendig, die Nutzbarkeit und Attraktivität verschiedener Ladepunkttypen in Abhängigkeit der technischen Ausstattung von Fahrzeugen zu untersuchen.

Möglichkeiten der Modellerweiterung zur Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs

Um die Frage zu beantworten, wie viel Ladeinfrastruktur für einen bedarfsgerechten Aufbau erforderlich ist, sind zusätzliche Informationen über die Parkplatzangebotsstrukturen mit den hochgerechneten Ladebedarfen zu verknüpfen. Dies ist jedoch problematisch, da kaum deutschlandweite Daten zu Parkgewohnheiten und Angebotsstrukturen zur Verfügung stehen. Allerdings muss beim Neubau von Gebäuden nach den Bauordnungen der Bundesländer sowie den daraus abgeleiteten kommunalen Satzungen eine gewisse Zahl von Abstellmöglichkeiten für Pkw auf dem Grundstück oder in der Nähe nachgewiesen werden (vgl. FGSV 2005: 12). Die Anzahl von Pkw-Standflächen wird beispielsweise in Abhängigkeit der Wohneinheiten im Wohnhaus oder der Nutzfläche von Bürogebäuden bestimmt (vgl. FSGV 2005: 72 f.). Orientierungswerte für den objektbezogenen Stellplatzbedarf sind in den „Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs (EAR05)“ (FSGV 2005) enthalten.

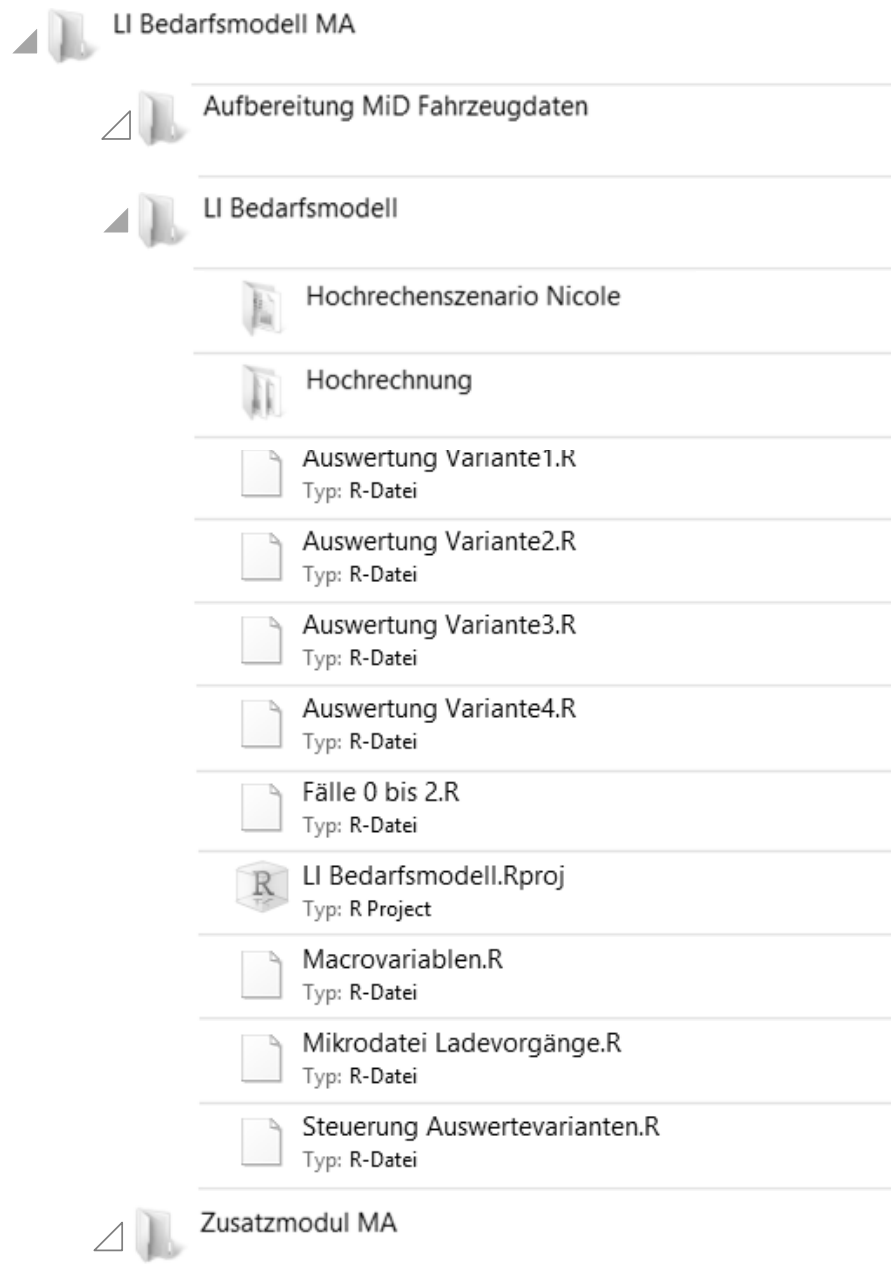
Durch den alternativen Hochrechenansatz könnten in Zukunft auf ähnliche Weise Richtwerte für die Ausstattung von Pkw-Standflächen mit Ladeinfrastruktur gegeben werden. In Bezug auf die Abschätzung des regionalen Parkraumangebots und der daraus resultierenden Nachfrage, wäre dazu eine weitere Differenzierung des Hochrechnungsmodells nach Raumtypen erforderlich. Offensichtlich erscheint die Möglichkeit, die Hochrechnungen mittels des aktuell verfügbaren MiD-Datensatzes nach Raumtypen auszdifferenzieren. Allerdings gilt es dabei zu beachten, dass sich die Raumtypisierung auf die Wohnadresse bezieht, das Ziel eines Weges jedoch auch in einem davon abweichenden Raumtyp liegen kann. Aus diesem Grund müsste zunächst eine Raumtypenkorrektur vorgenommen werden.

7 Anhang



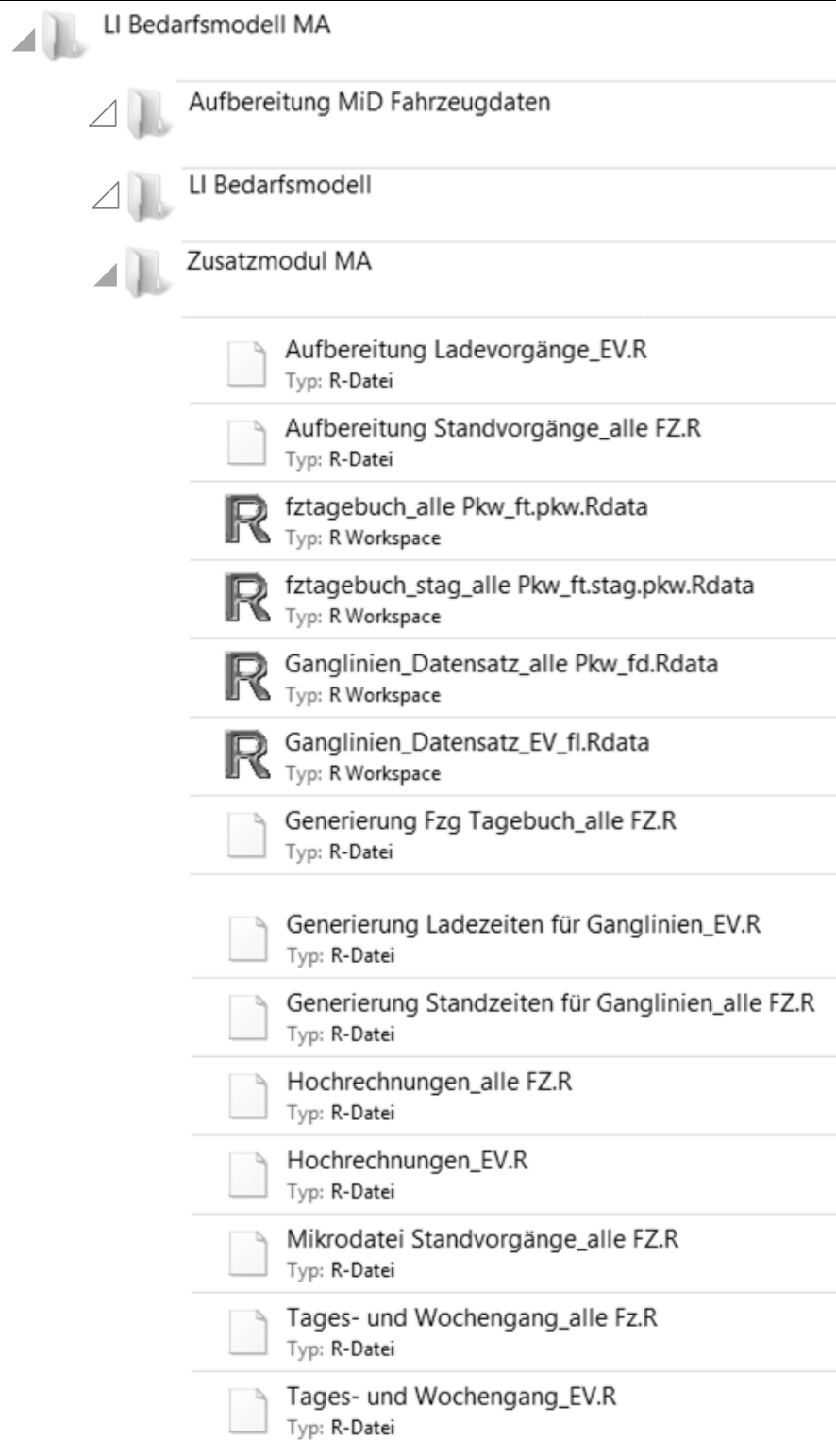
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7-1: Programmstruktur – Datenimport aus dem Projekt LADEN2020



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7-2: Programmstruktur – LI Bedarfsmodell aus dem Projekt LADEN2020



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7-3: Programmstruktur – Zusatzmodul Masterarbeit

LITERATUR

- Adolf, J., C. Balzer, S. Rommerskirchen und N. Anders et al.** (2015): Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität. Hamburg: Shell Deutschland Oil. URL: <http://www.shell.de/aboutshell/media-centre/annual-reports-and-publications/shell-pkwszenarien.html> (abgerufen am 18.12.2015)
- Anderson, J. E., N. Böttcher und T. Kuhnimhof** (2015): *An Approach to Determine Charging Infrastructure for One Million Electric Vehicles in Germany*. Conference Proceedings, Transportation Research Board 2016, Washington D.C., US, 22 Seiten.
- BDEW** (2015 a): *BDEW-Erhebung Elektromobilität*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). Presseinformation vom 23.09.2015. URL: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-erhebung-elektromobilitaet-de> (abgerufen am 18.12.2015)
- BDEW** (2015 b): *BDEW-Erhebung Elektromobilität: Zuwachs bei öffentlichen Lademöglichkeiten*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). Presseinformation vom 10.04.2015. URL: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-erhebung-elektromobilitaet-zuwachs-bei-oeffentlichen-lademoeeglichkeiten-de?open&ccm=900030> (abgerufen am 28.07.2015)
- Beckers, T., F. Gizzi, T. Kreft und J. Hildebrandt** (2015): *Effiziente Bereitstellung der (öffentlich zugänglichen) Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität in Deutschland – Ökonomische Grundlagen, kurze Beurteilung des Status quo und zentrale Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der europäischen Richtlinie 2014/94/EU*. Papier für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des Auftrags „Analysen für die Entwicklung der nationalen Infrastrukturpläne CNG, LNG, Wasserstoff und elektrische Ladestationen für den Straßenverkehr in Deutschland“. URL: https://www.wip.tu-berlin.de/menue/forschung_projektepublikationen/publikationen_vortraege/ (abgerufen am 18.12.2015)
- Beeton, D. und G. Mayer** (2015): *Electric Vehicle Business Models. Global Perspectives*. Newcastle upon Tyne, GB und Berlin, DE: Springer International Publishing Switzerland.
- BMW AG** (2015): *Das Ziel im Blick. Und in Reichweite. Emissionsfreier Antrieb für urbane Mobilität*. URL: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/antrieb-reichweite.html>

- BMW** (2014): Die Energie der Zukunft. Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende - Langfassung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiewende/fortschrittsbericht,did=672424.html> (abgerufen am 18.12.2015)
- Die Bundesregierung** (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin: Die Bundesregierung. URL: https://www.bmbf.de/files/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf (abgerufen am 18.12.2015)
- Diekmann, L., E. Gerhards, S. Klinski, B. Meyer, S. Schmidt und M. Thöne** (2011): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. *FiFo-Berichte*, 13. Köln: Finanzwirtschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln. URL: <http://kups.ub.uni-koeln.de/5530/> (abgerufen am 18.12.2015)
- Diez, W.** (2006): *Automobil-Marketing: Navigationssystem für neue Absatzstrategien*. mi-Fachverlag, Redline GmbH, Landersberg am Lech, 2006.
- DLR** (2015): *LADEN 2020: Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020*. URL: <http://www.dlr.de/vf/>
- e-mobil BW** (2013): Systemanalyse BWe mobil 2013: IKT- und Energieinfrastruktur für innovative Mobilitätslösungen in Baden-Württemberg. Stuttgart, Germany: Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (e-mobil BW), Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). URL: <http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html> (abgerufen am 18.12.2015)
- e-mobil BW** (2015): Strukturstudie BWe mobil 2015: Elektromobilität in Baden-Württemberg. Stuttgart: Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (e-mobil BW), Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). URL: <http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html> (abgerufen am 18.12.2015)
- EC** (2014): Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094> (abgerufen am 18.12.2015)

- Ferrari, C., S. Offinger, M. Schier, M. Henke, U. Philipp, A. Wolany, F. Rinderknecht und S. Reichert** (2012): Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug - REXEL. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg. URL: [http://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/Abschlussbericht - REXEL - 2012-03-26.pdf](http://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/Abschlussbericht_-_REXEL_-_2012-03-26.pdf) (abgerufen am 18.12.2015)
- Follmer, R., D. Gruschwitz, B. Lenz und C. Nobis et al.** (2010 a): Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht. Bonn und Berlin: Institut für angewandte Sozialforschung (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE-Nr. 70.801/2006). URL: www.mobilitaet-in-deutschland.de (abgerufen am 18.12.2015)
- Follmer, R., D. Gruschwitz, C. Nobis und K. Köhler et al.** (2010 b): Mobilität in Deutschland 2008 - Nutzerhandbuch. Bonn und Berlin: Institut für angewandte Sozialforschung (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE-Nr. 70.801/2006). URL: www.mobilitaet-in-deutschland.de (abgerufen am 18.12.2015)
- Follmer, R., D. Gruschwitz, A. Schulz, C. Nobis und K. Köhler et al.** (2010 c): Mobilität in Deutschland 2008 - Methodenbericht. Bonn und Berlin: Institut für angewandte Sozialforschung (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE-Nr. 70.801/2006). URL: www.mobilitaet-in-deutschland.de (abgerufen am 18.12.2015)
- Follmer, R., D. Gruschwitz, C. Nobis und K. Köhler et al.** (2010 d): Mobilität in Deutschland 2008 - Codeplan Public Use File Wegedatensatz. Bonn und Berlin: Institut für angewandte Sozialforschung (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE-Nr. 70.801/2006). URL: www.mobilitaet-in-deutschland.de (abgerufen am 18.12.2015)
- Franke, T. und J. F. Krems** (2013): What drives range preferences in electric vehicle users? In: *Transport Policy* 30: S. 56-62.
- Frenzel, I., J. Jarass, S. Trommer und B. Lenz** (2015): Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). URL: <http://www.dlr.de/vf/> (abgerufen am 18.12.2015)
- Frost & Sullivan** (2013): *Markt für Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerer (eREVs) auf der Überholspur*. Frankfurt am Main: Frost & Sullivan. URL: <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=273741328> (abgerufen am 18.12.2015)

- Funke, S. Á., T. Gnann und P. Plötz** (2015): Addressing the Different Needs for Charging Infrastructure: An Analysis of Some Criteria for Charging Infrastructure Set-up. In: Leal Filho, W. und R. Kotter (Hg.): *E-Mobility in Europe*. Springer International Publishing, S. 73-90.
- Graf, R., D. Wehner, M. Held, S. Eckert, M. Faltenbacher, S. Weidner und O. Braune** (2015): Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen - Zwischenbericht. Korrigierte Version. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), hrsg. von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). URL: <http://starterset-elektromobilitaet.de/publikationen> (abgerufen am 18.12.2015)
- IFEU** (2015): *Fahrzeugkonzepte*. URL: <http://www.emobil-umwelt.de/index.php/te1>
- infas und DLR** (2010): Mobilität in Deutschland 2008 - Basisdatensatz. Institut für angewandte Sozialforschung (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Erhebung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). URL: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>. Datenbezug über <http://www.clearingstelle-verkehr.de>
- Karle, A.** (2015): *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag.
- KBA** (2015 a): Bestand an Pkw in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html (abgerufen am 18.12.2015)
- KBA** (2015 b): Monatliche Neuzulassungen. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html (abgerufen am 18.12.2015)
- KBA** (2015 c): Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen (Stand: Januar 2015). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/MethodischeErlaeuterungen/methodische_erlaeuterungen_node.html (abgerufen am 18.12.2015)
- KBA** (2015 d): Bestand an Pkw am 1. Januar 2015 nach privaten und gewerblichen Haltern. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html (abgerufen am 18.12.2015)
- KIT** (2015): *LADEN 2020: Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020*. URL: <https://www.ifv.kit.edu/>

- Kley, F.** (2011): *Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge: Entwicklung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens*. Karlsruhe, Univ., Diss., 2011. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. URL: <https://verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Ladeinfrastrukturen-f%C3%BCr-Elektrofahrzeuge/236385> (abgerufen am 18.12.2015)
- Krems, J. F., L. Bartholdt, P. Cocron, B. Dielmann, T. Franke, M. Henning, M. Ischebeck, K. Schleinitz und M. Žilytė-Lennertz** (2011): MINI E powered by Vattenfall V2.0. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Verbundprojekt: MINI E powerd by Vattenfall V2.0 (Abschlussbericht, Förderkennzeichen 16EM0070). Chemnitz: Technische Universität Chemnitz. URL: <https://www.tu-chemnitz.de/hsw/psychologie/professuren/allpsy1/E-Mobility/mini2.php> (abgerufen am 18.12.2015)
- Ligges, U.** (2009): *Programmieren mit R*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- MENNEKES** (2011): Ladearten. Kirchhundem: MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG. URL: <http://www.mennekes.de/index.php?id=ladearten> (abgerufen am 18.12.2015)
- NOW** (2014): Öffentliche Ladeinfrastruktur für Städte, Kommunen und Versorger. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), hrsg. von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). URL: <http://starterset-elektromobilitaet.de/publikationen> (abgerufen am 18.12.2015)
- NPE** (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), hrsg. von Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/> (abgerufen am 18.12.2015)
- NPE** (2012): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht). Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), hrsg. von Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/> (abgerufen am 18.12.2015)
- NPE** (2013): Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur. Berlin: Arbeitsgruppe 4 "Normung, Standardisierung und Zertifizierung" der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), hrsg. von Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/> (abgerufen am 18.12.2015)
- NPE** (2014 a): Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin, Germany: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), hrsg. von Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/> (abgerufen am 18.12.2015)

- NPE** (2014 b): Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität - Version 3.0. Berlin: Arbeitsgruppe 4 "Normung, Standardisierung und Zertifizierung" der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), hrsg. von Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/> (abgerufen am 18.12.2015)
- Plötz, P., T. Gnann, A. Kühn und M. Wietschel** (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge - Langfassung. Studie im Auftrag der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Karlsruhe: Fraunhofer - Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). URL: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/e/projekte/316741_Markthochlaufszszenarien-E-Fahrzeuge_Wi2014.php (abgerufen am 18.12.2015)
- Rahimzei, E., K. Sann und M. Vogel** (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car - Smart Grid - Smart Traffic. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Verband der Elektrotechnik (VDE). URL: <http://www.ikt-em.de/de/Downloads.php> (abgerufen am 18.12.2015)
- Reinke, J.** (2014): *Bereitstellung öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge : eine institutionenökonomische Analyse*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Diss. Edition ed. URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/index/index/docId/5609>
- The Mobility House** (2015): Ladekabelarten und Steckertypen. Zürich, CH: The Mobility House AG. URL: <http://mobilityhouse.com/de/ladekabelarten-und-steckertypen/> (abgerufen am 18.12.2015)
- Vogt, M. und S. Bongard** (2015): Treiber und Hemmnisse bei der Anschaffung von Elektroautos. Ergebnisse der Nutzerbefragung von elektromobilitätsinteressierten Personen im Rahmen der Begleit- und Wirkungsforschung. Frankfurt am Main: Deutsches Dialog Institut, hrsg. von Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW). URL: http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/dokumente/dokumente_der_begleit_und_wirkungsforschung/standard_seite_2.html (abgerufen am 18.12.2015)
- Weiss, C., B. Chlond, M. Heilig und P. Vortisch** (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. In: *Transportation Research Procedia* 1, 1: S. 133-141.
- ZSW** (2015): *Neue ZSW-Analyse: 320.000 Neuzulassungen im Jahr 2014 / Über 2 Milliarden Euro Umsatz für Zulieferer von Fahrzeug-Akkus* Stuttgart: Zentrum für Sonnenernergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Presseinformation vom 19.03.2015. URL: <http://www.zsw-bw.de/uploads/media/pi06-2015-ZSW-E-Mobilitaet.pdf> (abgerufen am 18.12.2015)