

FFE

Kurzstudie

Elektromobilität

Modellierung für die Szenarientwicklung
des Netzentwicklungsplans

2019

Kurzstudie Elektromobilität

Modellierung für die Szenarientwicklung des
Netzentwicklungsplans

Herausgeber:

FFE Forschungsstelle für
Energiewirtschaft e.V.

Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0
info@ffe.de www.ffe.de

Abschlussbericht zum Projekt:

Kurzstudie Elektromobilität

Modellierung für die Szenarienentwicklung des Netzentwicklungsplans

Veröffentlicht am:

15.12.19

Bearbeiter/in:

Michael Ebner

Steffen Fattler

Kirstin Ganz

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

FfE-Auftragsnummer:

Trans02

Projektpartner:

TransnetBW GmbH

TenneT TSO GmbH

50Hertz Transmission GmbH

Amprion GmbH

ISBN:

978-3-941802-46-9

Inhalt

1	Ziel und Methodik	7
1.1	Privat zugelassene Pkw	7
1.2	Gewerblich zugelassene Pkw	8
1.3	Oberleitungshybrid-LKW (OH-Lkw) im Schwerlastverkehr.....	8
2	Regionalisierung des zukünftigen BEV-Bestands	10
2.1	Bestandsregionalisierung heute.....	10
2.2	Privater Nahverkehr.....	10
2.2.1	Private Garagen.....	10
2.2.2	Pendeldistanz und Streuung der Pendeldistanz.....	11
2.2.3	Leistung Photovoltaikanlagen.....	12
2.2.4	Wohnfläche.....	12
2.2.5	Mittleres Einkommen	12
2.2.6	Erstellung der Verteilschlüssel.....	12
2.3	Privater Fernverkehr	14
2.4	Gewerbliche Elektrofahrzeuge.....	15
3	Modellierung der Elektrofahrzeuglastgänge.....	16
3.1	Privater Verkehr	17
3.1.1	Privater Nahverkehr.....	18
3.1.2	Privater Fernverkehr.....	23
3.2	Gewerblicher Verkehr	24
3.3	Exkurs: Mögliche Integration der Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen in linearen Optimierungsmodellen	26
4	MATLAB®-Tool.....	29
5	Steckbriefe.....	31
6	Ergebnisse	35
6.1	Regionalisierung der ÜNB-Szenarien auf Bundesländer.....	35
6.2	Deutschlandweite Lastgänge für die verschiedenen Kategorien	38
7	Literatur	40
8	Anhang	42
8.1	Metastudie.....	42

1 Ziel und Methodik

Die zunehmende Durchdringung des deutschen Kraftverkehrs mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen wird mit zunehmenden Rückwirkungen auf das Stromnetz einhergehen. Um diesem Umstand auch bei der Netzausbauplanung Rechnung zu tragen, wird in der Szenarienentwicklung des Netzentwicklungsplans Strom (NEP Strom) 2021-2035 die regionale Verteilung und Modellierung von Lastgängen der Elektromobilität explizit berücksichtigt. Hierbei wird methodisch zwischen privaten Personenkraftwagen (Pkw) im Nah- von Fernverkehr, gewerblich genutzten Elektrofahrzeugen und Oberleitungshybrid-Lkw (OH-Lkw) unterschieden. Im NEP Strom werden drei Szenarien erstellt: A, B und C. Je nach Szenario werden die Anzahl an Elektrofahrzeugen, aber auch das Lademanagement, variiert. Die Anzahl an Elektrofahrzeugen steigt von Szenario A zu Szenario C hin an. Die Informationen zu den Szenarien sind im Szenariorahmen selbst dargestellt.

Bei steigenden Zahlen von Elektrofahrzeugen wird das Thema Lademanagement einen immer höheren Stellenwert einnehmen. So sind Elektrofahrzeuge nach §14a EnWG als steuerbare Verbrauchseinrichtung definiert, welche im Falle von Netzengpässen durch den Netzbetreiber abgeregelt werden können. Zudem ist davon auszugehen, dass das Ladeverhalten der Fahrzeuge zunehmend strompreisoptimiert bzw. angebotsabhängig gesteuert werden wird. Diesem Trend wird hier Rechnung getragen, indem die Elektrofahrzeuge als DSM-Prozess im Modell abgebildet werden und die Ladezeitpunkte entsprechend verschoben werden können. Der Grad der Flexibilität wird vom A bis zum C Szenario kontinuierlich erhöht.

1.1 Privat zugelassene Pkw

Zunächst wird die regionale Verteilung des Anstiegs von Elektrofahrzeugen, die privat oder halböffentlich geladen werden, über drei Phasen abgebildet, wobei nicht zwischen reinen Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybriden unterschieden wird. Bei den Phasen handelt es sich nicht um fixe Jahre, sondern um den „Reifegrad“ der Technologie. Dieses Vorgehen ermöglicht unabhängig von politischen Einflüssen etc. den Anstieg abzubilden. Diese Phasen sind jeweils durch unterschiedlich gewichtete charakteristische (z. B. Einkommen) und strukturelle Merkmale (z. B. Parkmöglichkeiten) definiert. Die erste Phase wird dabei im Folgenden als „Pionier-Phase“ bezeichnet und beschreibt den Zeitraum ausgehend vom heutigen Status-quo der Elektromobilität, der stark vom Fortschrittsgedanken und kapitaler Stärke der Fahrzeugkäufer geprägt ist, bis zum Erreichen von insgesamt 3 Mio. E-Pkw. Ab dann wird von der „Mainstream-Phase“ gesprochen. Es handelt sich hierbei um die Übergangsphase, in der die Einflüsse der Pionier-Phase langsam nachlassen. Diese ist von einem stärkeren Einfluss weniger finanzkräftiger Käufer geprägt und umfasst 5 Mio. E-Pkw. Die letzte „Standard-Phase“, für die angenommen wird, dass nahezu alle privaten Pkw in Deutschland durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden, wird für alle E-Pkw ab 8 Mio. (Pionier- plus Mainstream-Phase) angewendet und betrachtet nur noch strukturelle Parameter, da der Kauf eines Elektrofahrzeugs in dieser Phase nicht mehr von individuellen Präferenzen geprägt sein soll. Für alle drei Phasen erstellt die FfE ein Raster mit 100 m Gitterweite und einem Verteilschlüssel pro Zelle als Ergebnis der regionalisierten Parameter. Diese Verteilschlüssel sind definiert als Wert, der bestimmt, wie viele Elektrofahrzeuge bei Vorgabe einer entsprechenden Mantelzahl anteilig auf jede Rasterzelle verteilt werden. Diese Verteilschlüssel pro Zelle werden anschließend auf die Landkreisebene aggregiert und sind im finalen MATLAB®-Tool, das dem Auftraggeber mit Projektabschluss übergeben wird, hinterlegt. Diesem Tool kann pro Phase eine Mantelzahl übergeben werden, anhand derer mittels der Verteilschlüssel pro Phase und Landkreis die Lastgänge berechnet werden. Von einer äquivalenten Regionalisierung eines Car-Sharing-Szenarios wird abgesehen. Grund hierfür sind zum einen große Unsicherheiten für den Ausbau von CarSharing und zum anderen das laut „The Demystification of Car Sharing“ von ATKearney [1] begrenzte Potential. Die zu erwartende Zahl der Elektrofahrzeuge in diesem Bereich und mit ihnen die zusätzliche jährliche Energiemenge wird laut [1] mit ca. 2,8 TWh beziffert.

Für die Synthese von Ladelastgängen wird auf die Verkehrserhebung „Mobilität in Deutschland 2017“ des infas Instituts für angewandte Sozialwissenschaft aus dem Jahr 2019 als Datenbasis zurückgegriffen [2]. Neben zeitlich hochaufgelösten Informationen zum Verkehrsverhalten enthält die Erhebung zu jedem erfassten Tagesfahrprofil weitere Metainformationen sowie z. B. den BBSR-Regionsgrundtyp (Regionstypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung) [3], welcher die Berücksichtigung regionaler Unterschiede im Verkehrsverhalten ermöglicht. Aufbauend auf der in [4] und Kapitel 3 beschriebenen Methodik werden diese Eintagesfahrprofile zu Jahresfahrprofilen verknüpft. Unter Berücksichtigung technischer und systemischer Parameter von Fahrzeugen und der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur werden jährliche Ladelastgänge von Batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle, BEV) für jeden Raumtypen erstellt. Entsprechend der Zuordnung von Raumtypen zu Landkreisen und der deutschlandweiten Mantelzahl an E-Pkws werden so die regionsspezifischen Ladelastgänge pro Landkreis ermittelt.

Da sich durch die regionalisierten privaten Elektrofahrzeuge nur Aussagen treffen lassen, wo die Fahrzeuge zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen werden, muss darüber hinaus der private Fernverkehr separat betrachtet werden, um das Laden bei längeren Strecken abbilden zu können. Da angenommen werden kann, dass dieses Laden vornehmlich entlang von Autobahnen und Bundesstraßen stattfinden wird und sich der Ausbau der Ladesäuleninfrastruktur auf bestehende Tankstellen fokussieren wird, werden diese Tankstellen aus den OpenStreetMap-Daten [5] extrahiert. Durch die Zuweisung von stündlich gezählten Fahrzeugen pro Autobahn- oder Bundesstraßenabschnitt aus den Zählstellen-Daten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [6] zu den Tankstellen, können die dortigen Ladelastgänge unter Annahme von verfügbaren Ladeleistungen abgeschätzt werden.

1.2 Gewerblich zugelassene Pkw

Das Fahr- und Ladeverhalten von gewerblichen Flotten unterscheidet sich grundlegend von dem von privaten Fahrzeughaltern. So fallen zum einen die Tages- und Jahresfahrleistungen deutlich höher aus. Zum anderen unterscheiden sich die Fahrleistungen unter der Woche deutlich von denen am Wochenende. Zudem ist im Vergleich zum privaten motorisierten Individualverkehr das Fahrverhalten und die Zusammensetzung der gewerblichen Fahrzeugflotte sehr viel heterogener. Entsprechend erfolgt vor der eigentlichen Modellierung des Verkehrsverhaltens zunächst eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Wirtschaftszweige. Als Datenbasis wird hier die Verkehrserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ aus dem Jahre 2012 [7] sowie die Bestandszahlen des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA) verwendet. Aufbauend auf dieser Analyse werden zunächst die Wirtschaftszweige identifiziert, in denen eine Elektrifizierung der Flotte besonders wahrscheinlich erscheint und für diese Wirtschaftszweige deutschlandweite Lastgänge erstellt. Die so synthetisierten Lastgänge werden über die von der Bundesagentur für Arbeit bereitgestellten Beschäftigungszahlen nach Wirtschaftszweigen [8] jedem Landkreis zugewiesen und gewichtet.

1.3 Oberleitungshybrid-LKW (OH-Lkw) im Schwerlastverkehr

Im Bereich des Schwerlastverkehrs wird bei der Elektrifizierung von OH-Lkw ausgegangen. Für diese muss für die Erstellung von Lastgängen zunächst der absolute Energiebedarf über ein Jahr ermittelt werden. Dazu werden spezifische Verbrauchswerte für OH-Lkws aus den Studien „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterverkehr“ des Öko-Instituts [9] und „Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles“ des Öko-Instituts [10] entnommen, die eine Vorhersage zu Fahrzeugverbräuchen in den Jahren 2015, 2020 und 2030 treffen. In Kombination mit der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke des Schwerverkehrs aus den BASt Zählstellendaten, die auf Landkreise aggregiert werden, können so die regionalen Auswirkungen einer Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs abgeschätzt werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt links den Verlauf des Lastgangs über eine e

xemplarische Woche im Januar und rechts die wöchentlichen Mittelwerte der stündlichen Last im Verlauf des betrachteten Jahres. Die Werte entsprechen dem Mittelwert über alle BASt-Zählstellen.

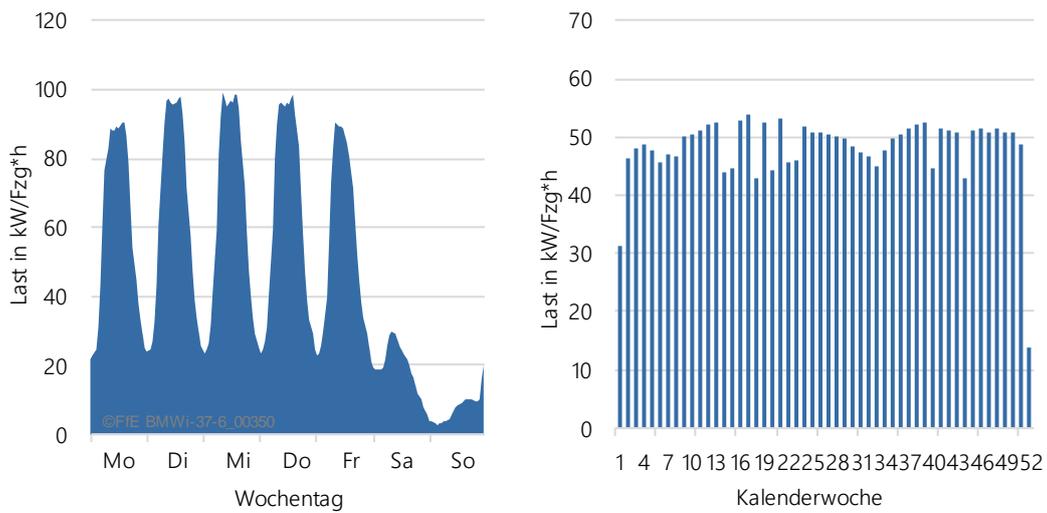


Abbildung 1-1: Verlauf eines Wochenlastgangs im Januar (links) und wöchentliche mittlere Last im Verlauf des Jahres (rechts) ermittelt durch den Mittelwert über alle BASt-Zählstellen

Im vorliegenden Bericht wird als erstes die Regionalisierung des zukünftigen BEV-Bestandes und die Modellierung der Lastgänge vorgestellt. In Kapitel 5 werden letztere miteinander verschnitten, um skalierte Lastgänge je Region abzuleiten. Hierfür wurde ein MATLAB®-Tool entwickelt, das in diesem Kapitel vorgestellt wird. Anschließend werden im Projekt erstellte Steckbriefe zu den verschiedenen Antriebstechnologien vorgestellt und die Bedeutung der Elektromobilität herausgestellt. Zuletzt folgen die Ergebnisse in Kapitel 6.

2 Regionalisierung des zukünftigen BEV-Bestands

2.1 Bestandsregionalisierung heute

Der Bestand der Fahrzeuge nach Fahrzeugtyp zum 1.1.2019 liegt vom Kraftfahrt-Bundesamt bereits auf Landkreisebene vor. Es findet daher keine weitere Regionalisierung statt.

2.2 Privater Nahverkehr

Die Regionalisierung der BEV im privaten Nahverkehr erfolgt über drei Phasen der Entwicklung, die unabhängig voneinander berechnet werden. Diese sind die Pionier-Phase, die Mainstream-Phase und die Standard-Phase. In jeder Phase kommen unterschiedliche strukturelle und charakteristische Parameter zum Tragen, die pro 100 x 100 m-Zelle berechnet werden. Die strukturellen Parameter umfassen die privaten Garagen, Sammelgaragen sowie Pendeldistanz und Streuung und beschreiben den Umfang der Mobilität. Charakteristische Parameter sind die Leistung der Photovoltaikanlagen pro Zelle, die Wohnfläche je Wohnung und das mittlere Einkommen und repräsentieren die Affinität zur Elektromobilität. Diese Parameter unterschiedlicher Einheiten (Anzahl, Kilowatt, Euro etc.) ergeben durch Applikation entsprechender Gewichtungen dimensionslose Punkte und bilden in Kombination die Verteilschlüssel pro Zelle für die Regionalisierung. Es wird die Annahme getroffen, dass die Pionier-Phase hauptsächlich von Menschen mit hoher Affinität zu Elektromobilität dominiert wird, die im Bundesvergleich ein hohes Einkommen aufweisen und große Wohnungen oder Einfamilienhäuser besitzen. Daneben findet sich bei den Pionieren häufig bereits eine eigene Photovoltaik-Anlage auf dem Hausdach, wodurch ein Elektroauto zumindest teilweise durch eigens produzierten Strom geladen werden kann. Diese Phase ist nach oben auf 3 Mio. BEV gedeckelt. In der Mainstream-Phase soll ein Zustand erhöhter Durchdringung mit Elektrofahrzeugen abgebildet werden, in der diese zwar noch nicht den Markt dominieren, jedoch auch keine Randerscheinung mehr darstellen. Diese Phase ist auf 5 Mio. BEV gedeckelt. Am Ende der Mainstream-Phase sind also maximal 8 Mio. BEV auf Deutschland verteilt. Die abschließende Standard-Phase wird auf alle BEV ab 8 Mio. Fahrzeuge angewendet. In ihr spielen charakteristische Parameter keine Rolle mehr, da davon ausgegangen wird, dass der Kauf eines Elektrofahrzeugs nicht länger abhängig von der Affinität ist, sondern nur noch durch den Umfang der Mobilität vor Ort definiert wird. Da die drei Phasen unabhängig voneinander regionalisiert werden, werden sie am Ende der Berechnung addiert, um die Gesamtzahl an BEV pro Zelle zu erhalten.

2.2.1 Private Garagen

Die privaten Garagen pro 100 m-Gitterzelle werden aus den Wohneinheiten nach Gebäudetyp abgeleitet. Dabei werden die Gebäude aus OpenStreetMap zunächst nach Anzahl der Wohneinheiten unterschieden. In die Klasse der Ein-Wohneinheiten-Häuser (EWEH) fallen Einfamilienhäuser, Doppelhäuser und Reihenhäuser. Große Einfamilienhäuser mit zwei Wohneinheiten werden ebenfalls dieser Klasse zugeordnet. Wohngebäude mit drei oder mehr Wohneinheiten werden als Klasse Mehrfamilienhäuser (MFH) definiert (siehe Abbildung 2-1). Pro Wohneinheit der EWEH wird eine private Garage festgelegt, pro Wohneinheit der MFH 0,7 Sammelgaragen pro Wohneinheit.



Abbildung 2-1: Typisierung von OSM-Gebäuden

2.2.2 Pendeldistanz und Streuung der Pendeldistanz

Die Parameter Pendeldistanz und Streuung der Pendeldistanz basieren auf dem fFe-Pendlermodell, das versucht, allen Pendlern durch lineare Optimierung eine Start- und Zielgemeinde zuzuweisen. Dazu nutzt das Modell die Statistiken zu Ein- und Auspendlern je Gemeinde der Regionalstatistik des Statistischen Bundesamts [11]. Die Optimierungsgröße ist dabei die gesamte Pendelstrecke aller Pendler. Abbildung 2-2 zeigt die Pendlerströme und Pendlerdistanzen auf der Karte. Aus diesem Modell werden die mittlere Pendeldistanz sowie die Streuung der Pendeldistanz entnommen und als strukturelle Parameter für die Regionalisierung genutzt. Das Pendlermodell trifft vereinfachte Annahmen und unterschätzt die absoluten Pendeldistanzen, da alle Pendler im Modell nur die kürzest mögliche Distanz zurücklegen.

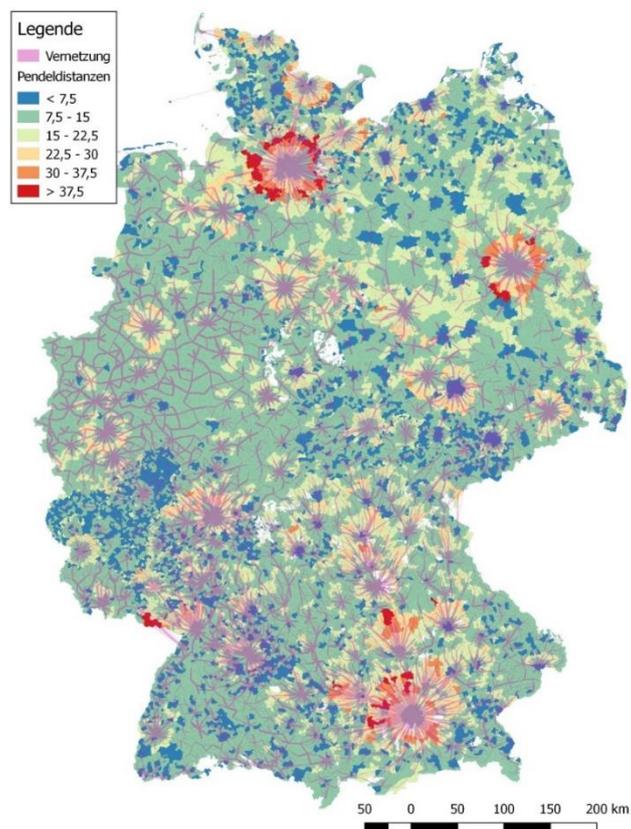


Abbildung 2-2: Pendlerströme und -distanzen in Deutschland

2.2.3 Leistung Photovoltaikanlagen

Alle Photovoltaik-Anlagen sind im Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur [12] mit Adresse und Leistung hinterlegt und können so den OSM-Gebäuden zugeordnet werden. Die Leistung wird zuerst auf die 100 m Zellen und anschließend auf Landkreisebene aggregiert.

2.2.4 Wohnfläche

Die mittlere Wohnfläche je Einwohner bzw. Wohnung kann dem 1 km-Gitter des Zensusatlas der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder [13] entnommen werden. Es wird angenommen, dass das Verhältnis zwischen Wohnfläche und Einwohner pro Zelle konstant ist. So kann eine mittlere Wohnfläche pro 100 m Zelle abgeleitet werden.

2.2.5 Mittleres Einkommen

Das mittlere Einkommen aller Lohn- und einkommenssteuerpflichtigen Bürger wird der Regionalstatistik [11] entnommen. Diese Werte liegen auf Gemeindeebene vor. Es wird angenommen, dass dieser Wert innerhalb einer Gemeinde konstant ist. So kann ein mittleres Einkommen pro Zelle berechnet werden.

2.2.6 Erstellung der Verteilungsschlüssel

Die genannten strukturellen und charakteristischen Parameter werden in ihrer Gewichtung je Phase variiert, um die kontextuellen Annahmen zu quantifizieren. Diese Gewichtungen sind in Tabelle 2-2-1 und Tabelle 2-2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2-1: Strukturelle Parameter der Regionalisierung des privaten Nahverkehrs

Strukturelle Parameter	Faktor Pionier-Phase	Faktor Mainstream-Phase	Faktor Standard-Phase
Private Garagen	1	0,8	1
Sammelgaragen	0,1	0,3	1
Pendeldistanz, Mittel	$f(\text{Pendeldistanz})$	$f(\text{Pendeldistanz})$	$f(\text{Pendeldistanz})$
Pendeldistanz, Streuung	$f(\text{Pendeldistanz})$	$f(\text{Pendeldistanz})$	$f(\text{Pendeldistanz})$

Tabelle 2-2-2: Charakteristische Parameter der Regionalisierung des privaten Nahverkehrs

Charakteristische Parameter	Faktor Pionier-Phase	Faktor Mainstream-Phase	Faktor Standard-Phase
Leistung Photovoltaikanlagen	$\min(0,5 \times \frac{p(kW)}{10}, 2)$	$\min(0,4 \times \frac{p(kW)}{10}, 2)$	-
Wohnfläche	Je 1 Punkt pro 50 m ² über 70 m ²	Je 0,8 Punkte pro 50 m ² über 70 m ²	-
Einkommen	Je 1 Punkt pro 20.000 € über 20.000 €	Je 0,8 Punkt pro 20.000 € über 20.000 €	-

Pendeldistanz und Streuung der Pendeldistanz ergeben einen Faktor für die weitere Gewichtung der Parkmöglichkeiten in Abhängigkeit folgender Matrix:

		Streuung in km										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pendeldistanz in km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	4	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	6	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	12	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	14	42	42	42	42	42	42	42	40	38	36	34
	16	48	48	48	48	48	46	44	42	40	38	36
	18	54	54	54	52	50	48	46	44	42	40	38
	20	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40
	22	54	54	54	52	50	48	46	44	42	40	38
	24	48	48	48	48	48	46	44	42	40	38	36
	26	42	42	42	42	42	42	42	40	38	36	34
	28	36	36	36	36	36	36	36	36	36	34	32
	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	32	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	34	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
	36	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	38	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Abbildung 2-3: Gewichtung der Pendeldistanz

Die Pionier-Phase ist in ihren strukturellen Merkmalen durch ein hohes Gewicht privater Garagen und nur geringes Gewicht an Sammelgaragen geprägt. Bei den charakteristischen Parametern geht die Leistung der Photovoltaikanlagen mit maximal 2 Punkten pro Zelle ein. Hohe durchschnittliche Wohnfläche und mittleres Einkommen gehen mit hohem Gewicht in die Verteilschlüssel ein. Die Summe der Parkmöglichkeiten pro Zelle wird anschließend mit der Funktion aus Pendeldistanz und Pendelstreuung nach der Matrix in Abbildung 2-3 multipliziert.

In der Mainstream-Phase spielt die Affinität zu Elektromobilität noch eine nicht zu vernachlässigende Rolle, wenn auch nicht mehr so ausschlaggebend wie in der Pionier-Phase. Die charakteristischen Größen wurden daher leicht reduziert. Die strukturellen Parameter werden ebenfalls in Richtung weniger kaufkräftiger Bürger verschoben, indem die privaten Garagen geringer und die Sammelgaragen stärker gewichtet werden. Die Summe der Parkmöglichkeiten wird wie in der Pionier-Phase zusätzlich durch die Pendlermatrix gewichtet.

In der Standard-Phase fallen die charakteristischen Parameter gänzlich weg. Entscheidend sind nur noch Parkmöglichkeiten und Pendeldistanzen. Sowohl private als auch Sammelgaragen gehen daher gleichwertig in die Verteilschlüssel mit ein und werden anschließend mit der Pendlermatrix multipliziert.

Die Berechnung der Verteilschlüssel pro Zelle erfolgt nach der Formel:

$$V_{Pixel} = \frac{\sum S_{Zelle} \times \sum C_{Zelle}}{\sum_{DE} (\sum S_{Zelle} \times \sum C_{Zelle})}$$

- V Verteilschlüssel
- S Struktureller Parameter
- C Charakteristischer Parameter

Das Produkt aus der Summe aller strukturellen Parameter pro Zelle mit der Summe aller charakteristischen Parameter pro Zelle wird über die Summe aller Parameter über Deutschland normiert. Die Summe aller Verteilschlüssel ergibt somit 1.

Für die Übergabe an das MATLAB®-Tool werden die Verteilschlüssel anschließend auf Landkreisebene summiert. Vom Nutzer werden Mantelzahlen für jede Phase, unter Berücksichtigung der maximalen Grenzen, vorgegeben. Das Tool verteilt diese dann auf die pro Landkreis und Phase hinterlegten Verteilschlüssel.

2.3 Privater Fernverkehr

Für die Regionalisierung des privaten Personenfernverkehrs werden zunächst Tankstellen aus OpenStreetMap selektiert, die in maximal 100 m Entfernung zu einer Autobahnauffahrt, Raststätte oder Bundesstraße liegen. Größere Marken-Tankstellen wie Shell, Esso etc. erhalten dabei 10 Ladepunkte, kleinere Tankstellen wie freie Tankstellen 6 Ladepunkte, da dieses Verhältnis approximiert die heutige Situation verfügbarer Zapfsäulen an den entsprechenden Tankstellen widerspiegelt.

Zusätzlich werden die stündlichen Verkehrszählungen der BASt an Autobahnen und Bundesstraßen berücksichtigt. Um jede Zählstelle wird ein Voronoi-Polygon erstellt. Diese Polygone bilden ausgehend von jeder Zählstelle eine Fläche, die sich in jede Richtung genau zur halben euklidischen Distanz bis zur nächsten Zählstelle erstreckt. Die zu fahrende Strecke zwischen zwei Zählstellen wird vereinfacht als die 1,4-fache Luftliniendistanz angenommen. So kann für jedes Voronoi-Polygon die Verkehrsmenge als Anzahl Fahrzeuge und die gefahrene Gesamtstrecke ermittelt werden. Daraus ergibt sich der Indikator Fahrzeugkilometer pro Stunde für das Jahr 2018. Die Voronoi-Polygone werden dann mit den zuvor selektierten Tankstellen verschnitten, um die entstandene elektrische Last den Ladesäulen zuzuweisen. Die stündlichen Fahrzeugkilometer werden proportional zu den Ladepunkten auf die Tankstellen verteilt. So entsteht eine normierte Fahrzeugkilometer-Zeitreihe pro Tankstelle. Diese Lastgänge werden anschließend auf Landkreisebene aggregiert. Im MATLAB®-Tool werden diese normierten Lastgänge der Fahrzeugkilometer pro Stunde mit der nach Tabelle 3-4 verbleibenden Energiemenge verschnitten die nach den Simulationen der Lastgänge nicht zu Hause bzw. am Arbeitsplatz geladen werden können. Auf diese Weise werden die Lastgänge pro Landkreis für den privaten Fernverkehr zu ermitteln.

Auf der Karte in Abbildung 2-4 sind die Tankstellen an Autobahnen und Bundesstraßen sowie die BASt-Zählstellen dargestellt. Die Tagesfahrleistungen pro Zählstelle in Fahrzeugkilometern pro Stunde werden anteilig nach verfügbaren Ladepunkten pro Tankstelle auf diese verteilt.

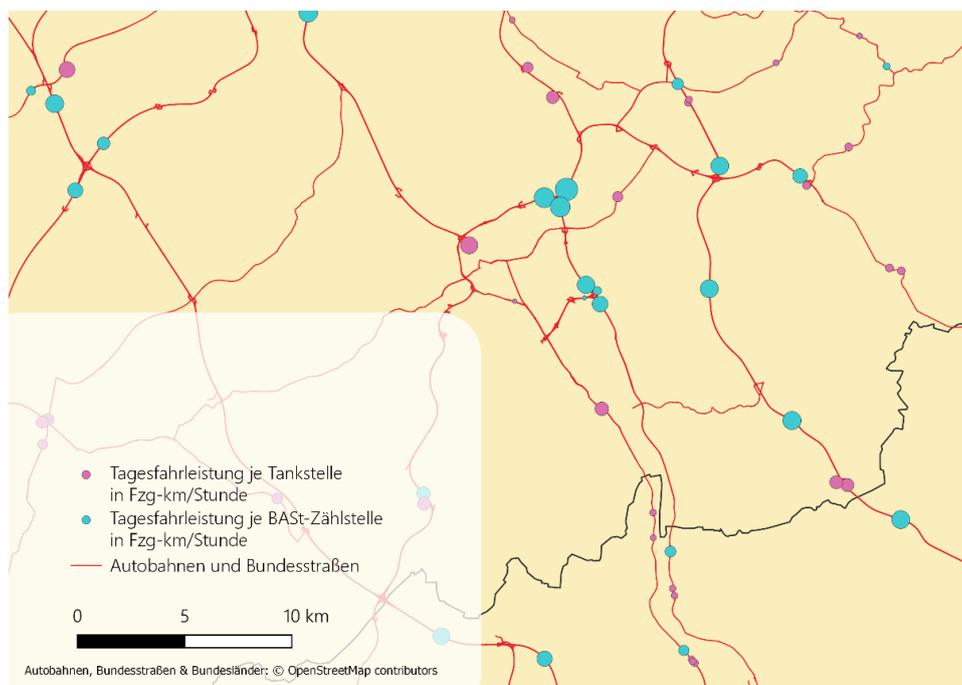


Abbildung 2-4: Ausschnitt des Deutschen Bundes- und Autobahnnetzes mit Tagesfahrleistung pro BASt-Zählstelle und Tagesfahrleistung pro Tankstelle

2.4 Gewerbliche Elektrofahrzeuge

Zur Abbildung gewerblicher Elektrofahrzeuge werden zunächst relevante Wirtschaftszweige identifiziert, in denen eine Elektrifizierung der Nutzfahrzeuge wahrscheinlich ist und die in statistisch relevanter Anzahl an Fahrzeugen vorhanden sind. Die Beschreibung dieser Wirtschaftszweige findet sich in Kapitel 3.2.

Aus den KiD-Daten geht die absolute, deutschlandweite Zahl an gewerblichen Fahrzeugen pro Wirtschaftszweig hervor, während die Beschäftigtenzahlen pro Wirtschaftszweig und Landkreis aus den von der Bundesagentur für Arbeit bereitgestellten Beschäftigungszahlen nach Wirtschaftszweigen [8] entnommen werden können. Unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Fahrzeuge eines Wirtschaftszweigs auf seine Beschäftigten wird die Zahl an gewerblichen Fahrzeugen pro Wirtschaftszweig und Landkreis ermittelt. Diese landkreisscharfen Zahlen werden mit der deutschlandweiten Gesamtzahl an gewerblichen Fahrzeugen normiert, um einen Verteilschlüssel pro Landkreis und Wirtschaftszweig zu erhalten.

3 Modellierung der Elektrofahrzeuglastgänge

Bei der Modellierung der Ladelastgänge wird nach Abbildung 3-1 zwischen privatem Nahverkehr, privatem Fernverkehr und gewerblichem Verkehr unterschieden.

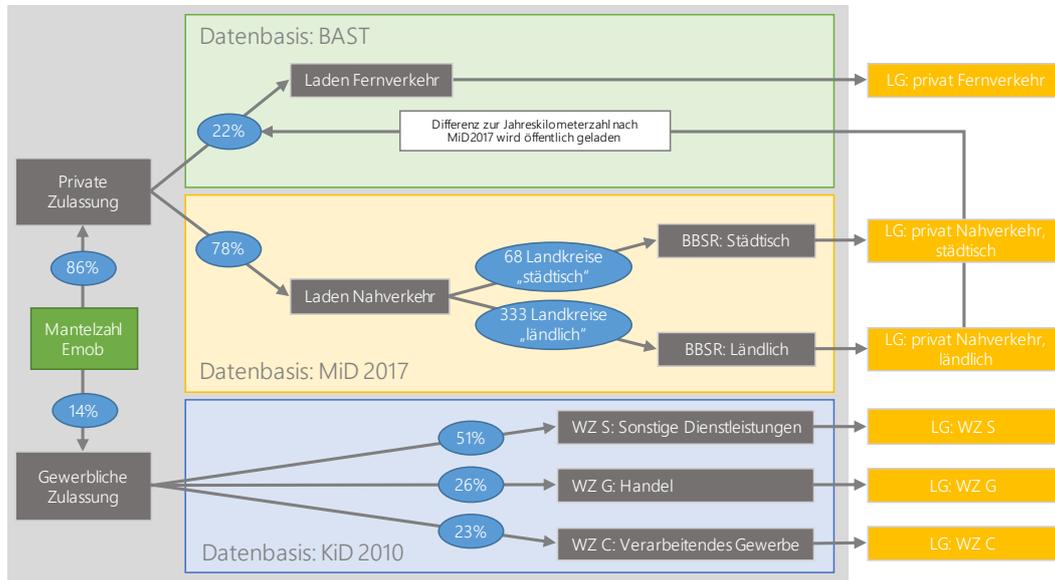


Abbildung 3-1: Übersicht zur Methodik der Lastgangmodellierung

Die Datengrundlage für den privaten Nahverkehr liefert die Mobilitätshebung „Mobilität in Deutschland 2017“ des infas Instituts für angewandte Sozialwissenschaft aus dem Jahr 2019 [2], während für den privaten Fernverkehr die öffentlich zugänglichen Verkehrszählungsdaten des BAST (Bundesamt für Straßenwesen, [6]) zur Anwendung kommen. Die Modellierung des gewerblichen Verkehrs basiert auf der Untersuchung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ der Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH aus dem Jahr 2012 [7]. Beide Studien enthalten neben einer großen Zahl detaillierter Wegtagebücher umfangreiche Meta-Daten zu den erfassten Haushalten, Personen, Gewerbebetrieben bzw. Fahrzeugen und ergibt ein umfassendes Bild des deutschen Verkehrsverhaltens. Zudem geben die Bestands- und Neuzulassungsdaten des Kraftfahrzeugbundesamts ([14] und [15]) Aufschluss über die grundlegende Struktur des Verkehrssektors, welche ebenfalls in die Modellierung einfließt. Die in der Abbildung dargestellte prozentuale Verteilung der Fahrzeuge basiert auf den Zulassungszahlen des Jahres 2019. Tabelle 3-1 zeigt eine Auswahl der untersuchten Kennzahlen für den privat zugelassenen Pkw-Bestand sowie gewerbliche zugelassene Pkw und Leichte Nutzfahrzeuge (LNF).

Tabelle 3-1: Kennzahlen des privaten und gewerblichen Verkehrs in Deutschland aus [2], [7], [14] und [15]

	Privat Pkw	Gewerblich Pkw	Gewerblich LNF
Bestand am 01.01.2019	42.014.205	5.067.448	1.626.649
Anteil am gesamten Bestand	86,3 %	10,4 %	3,3 %
Neuzulassung 2018	1.249.011	2.185.695	244.660
Anteil an gesamten Neuzulassungen	33,9 %	59,4 %	6,6 %
Neuzulassungsrate	3 %	43 %	15 %
Mittlere Jahreskilometerleistung	14.234	20.821	14.361
Anzahl Fahrten pro Tag	1,8	5,8	13,9
Tageskilometer werktags	30,8	47,3	53,8
Tageskilometer Wochenende	24,4	9,8	11,6
Strombedarf bei vollst. Elektrifizierung in TWh/a	120	21	7

Auffällig ist der mit rund 42 Mio. Fahrzeugen hohe Anteil privater Pkw am gesamten Fahrzeugbestand. Um die Relevanz einer potenziellen Elektrifizierung auf das Energiesystem einzuordnen, wird der Strombedarf bei vollständiger Elektrifizierung abgeschätzt. Dieser ergibt sich aus dem Fahrzeugbestand, der durchschnittlichen Jahreskilometerleistung und einer Annahme zum durchschnittlichen Energiebedarf der Fahrzeuge (hier: 20 kWh/100km bei Pkw und 30 kWh/100km für LNF). Bei einer durchschnittlichen Jahreskilometerleistung von 14.234 km resultiert für alle privat zugelassenen Pkw ein maximaler Strombedarf von jährlich 120 TWh, wohingegen sich der Gesamtbedarf von Pkw und LNF des gewerblichen Verkehrs nur auf insgesamt 28 TWh pro Jahr beläuft. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Modellierung zukünftiger BEV-Lastgänge auf dem privaten Bereich. Trotz des deutlich geringeren Maximalbedarfs an Strom sind gewerblich genutzte Fahrzeuge ebenfalls für die Elektromobilität interessant. Hohe Neuzulassungsraten, gut planbare Fahrzyklen und eine leicht erschließbare Ladeinfrastruktur auf dem Betriebsgelände bieten gute Voraussetzungen für eine schnelle Durchdringung von BEV in der gewerblichen Nutzung. Zudem stellen die Fahrzeuge durch die Befreiung von der Gewerbe-Kfz-Steuer geringe Betriebskosten und hohe Jahreskilometerleistungen auch aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Fahrzeugen dar. Untersuchungen des Fraunhofer ISI aus dem Jahre 2014 [41] sprechen ebenfalls für die Berücksichtigung des gewerblichen Sektors. In den folgenden beiden Abschnitten wird die Struktur und das Verkehrsverhalten sowohl des privaten als auch des gewerblichen Verkehrs detailliert vorgestellt, um anschließend die Annahmen und die Methodik zur Lastgangsynthese zu erläutern.

3.1 Privater Verkehr

Um der Heterogenität des Sektors und der räumlichen Verteilung der Ladevorgänge gerecht zu werden, kommen im Bereich des privaten Verkehrs zwei grundsätzlich verschiedene Modellierungsansätze zur Anwendung. Nur so lassen sich Rückschlüsse auf die resultierende Netzbelastung im Kontext des Netzentwicklungsplans ziehen.

Es wird zwischen den folgenden beiden Ladearten unterschieden:

- Laden im privaten und halböffentlichen Raum (privater Nahverkehr)
- Laden im öffentlichen Raum an Schnellladesäulen (privater Fernverkehr)

Es wird davon ausgegangen, dass ein großer Teil der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen in Zukunft entweder zu Hause oder am Arbeitsplatz durchgeführt werden. Auf diese Weise lässt sich der Energiebedarf der meisten

Kurzstrecken abdecken. Der Energiebedarf längerer Strecken und mehrtägiger Fahrten hingegen wird hauptsächlich an öffentlichen Schnellladesäulen an Bundesstraßen und Autobahnen gedeckt. Das Vorgehen zur Lastgangmodellierung dieser beiden Ladearten wird in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 vorgestellt.

3.1.1 Privater Nahverkehr

Bei der Modellierung der Ladelastgänge von Elektrofahrzeugen ist vor allem das Fahr- und Ladeverhalten der Fahrzeughalter, sowie technische Randbedingungen von Elektrofahrzeugen relevant. Zudem werden für die Regionalisierung der resultierenden Lastgänge regionale Unterschiede im Fahrverhalten der Nutzer abgebildet. Für die Modellierung des privaten Nahverkehrs bietet die Mobilitätshebung „Mobilität in Deutschland 2017“ eine geeignete Datenbasis. Neben einer detaillierten Erfassung von rund 960.000 Einzelwegen von 316.000 Personen in 156.000 Haushalten enthält der Datensatz eine Vielzahl sozioökonomischer Metainformationen und eine Zuordnung der Profile zu den Regionstypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Die vom BBSR typisierten Kreistypen unterscheiden sich neben der Berücksichtigung von Kernstädten hauptsächlich durch die Bevölkerungsdichte und dienen der Verortung der erstellten Lastgänge. Auf diese Weise kann regional unterschiedliches Fahr- und Ladeverhalten berücksichtigt werden. Abbildung 3-2 zeigt das grundlegende methodische Vorgehen vom Rohdatensatz der MiD hin zu regionsspezifischen Ladelastgängen an privater und halböffentlicher Ladeinfrastruktur. Die methodischen Schritte und Annahmen zu den einzelnen Schritten werden im weiteren Verlauf des Kapitels ausführlich beschrieben.

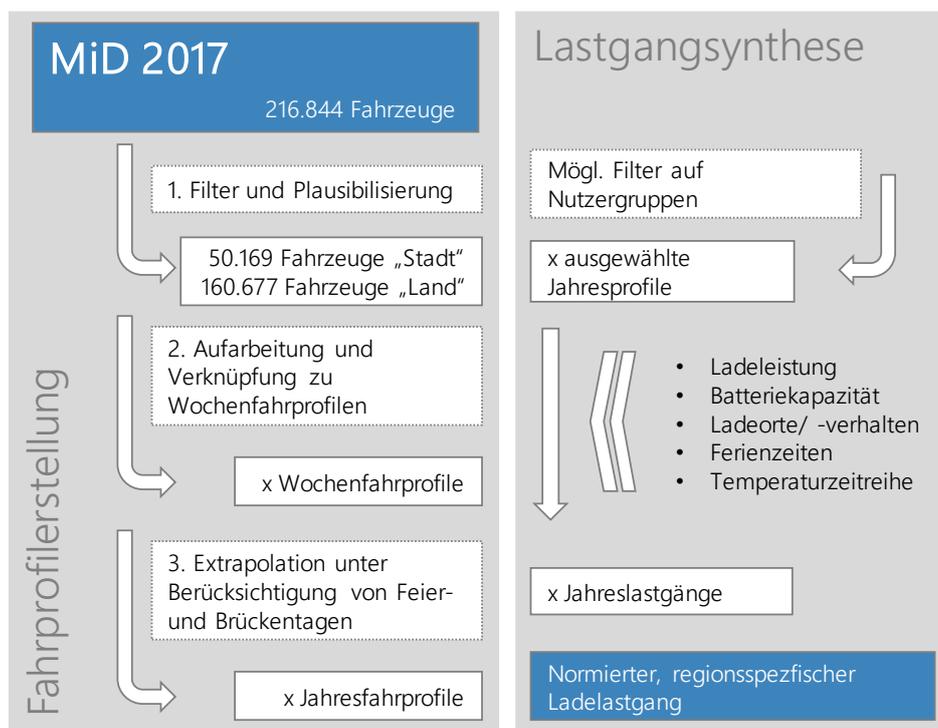
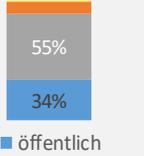
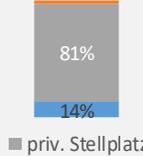
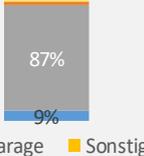
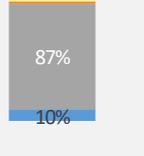


Abbildung 3-2: Methodische Schritte zur Erstellung der Jahreslastgänge

Ziel der Methodik ist es, aus den in der MiD erhobenen Eintagesfahrprofilen zusammenhängende Jahresfahrprofile einzelner Elektrofahrzeuge abzuleiten. Zunächst werden die Fahrprofile der Fahrzeuge auf Plausibilität und Verwertbarkeit geprüft und gefiltert. An dieser Stelle erfolgt zudem die Vorauswahl von Fahrprofilen anhand des in der Erhebung angegebenen „Siedlungsstrukturellen Kreistypen“ des BBSR. Tabelle 3-2 zeigt das Ergebnis einer Voranalyse des Verkehrsverhaltens innerhalb der definierten Kreistypen.

Tabelle 3-2: Kennzahlen des privaten Verkehrs in Deutschland nach BBSR-Kreistypen (Quelle: MiD2017, [2])

BBSR Siedlungsstrukturelle Kreistypen 2017	Kreisfreie Großstadt	Städtischer Kreis	Ländlicher Kreis mit Verdichtungsansätzen	Dünn besiedelter Kreis
Anzahl Haushalte	48.508	59.435	26.723	21.754
Jahreskilometerleistung	13.221	14.334	14.805	14.849
Tageskilometer	13,17	17,58	16,96	15,75
mittlere Fahrstrecke in km	6,6	8,3	8,34	8,36
Anzahl Fahrten am Tag	1,63	1,99	1,87	1,77
Anzahl Auto im Haushalt	1,66	1,96	2,02	2,03
Üblicher Stellplatz zu Hause				

Demnach hat die Bevölkerung in Kernstädten (Kreisfreie Großstädte) ein von den restlichen Bevölkerungsgruppen grundlegend unterschiedliches Fahrverhalten, was von kürzeren Wegen, weniger Fahrten pro Tag in einer insgesamt geringeren Jahresfahrleistung gekennzeichnet ist. Auch unterscheidet sich der übliche Stellplatz der Fahrzeuge zu Hause deutlich von dem der anderen Kreistypen. So ist davon auszugehen, dass zusätzlich zum Verkehrsverhalten auch das Ladeverhalten der Fahrzeugnutzer ein anderes ist. Die anderen drei Kreistypen „Städtischer Kreis“, „Ländlicher Kreis mit Verdichtungsansätzen“ und „Dünn besiedelter Kreis“ hingegen weisen ein ähnliches Fahrverhalten auf. Aus diesem Grund werden die Fahrprofile dieser Kreistypen im Rahmen der Lastgangmodellierung zu einem gemeinsamen „Ländlichen Raumtyp“ zusammengefasst. Abbildung 3-3 zeigt links die vier Siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR und rechts die zwei resultierenden Raumtypen „Ländlich“ und „Städtisch“. Auch wenn flächentechnisch „Ländlich“ deutlich überwiegt, existieren in der Kategorie „Städtisch“ 50.169 Fahrzeuge im Vergleich zu 160.677 Fahrzeugen in ländlichen Regionen. In den nächsten Schritten der Modellierung wird zwischen diesen beiden Raumtypen unterschieden und die Fahrprofile entsprechend vorausgewählt.

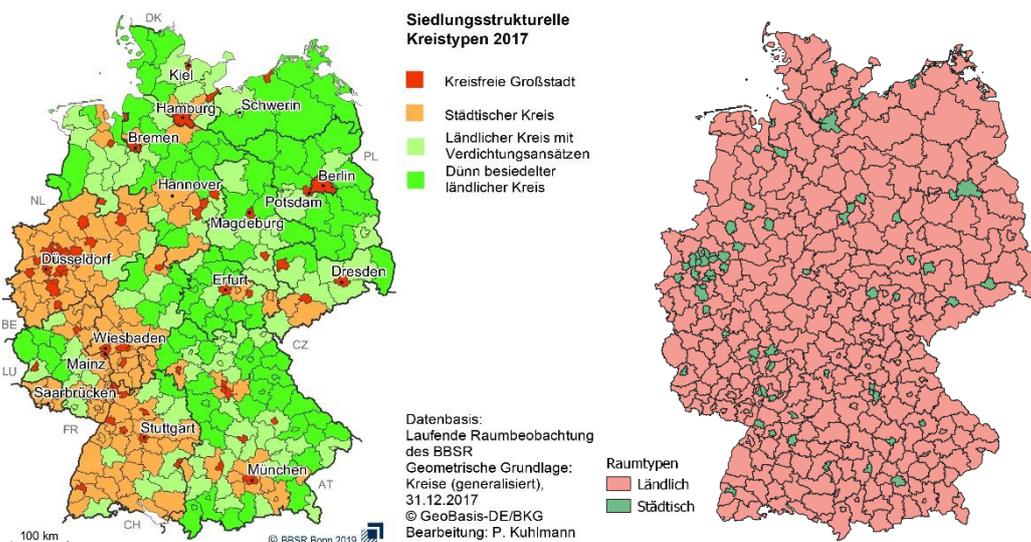


Abbildung 3-3: Siedlungsstrukturelle Kreistypen nach BBSR links, für die Erstellung der regionsspezifischen Ladelastgänge zusammengefasste Raumtypen rechts

Um eine sinnvolle Verknüpfung der einzelnen Tagesfahrprofile verschiedener Nutzer innerhalb dieser Raumtypen zu zusammenhängenden Wochen- bzw. Jahresfahrprofilen zu ermöglichen, werden die in der Umfrage der MiD zusätzlich erhobenen sozioökonomischen Metadaten und das Fahrverhalten für eine Clusterung in verhaltenshomogene Nutzergruppen (NG) analysiert und aufbereitet. Dabei kommen die Parameter typische Wegstrecke, Jahreskilometerleistung, die tägliche Fahrtzahl und die Information „Haushaltstyp“ (Differenzierung nach Größe, Alter und Kindern) zur Anwendung. Diese Kennwerte werden genutzt, um drei verhaltenshomogene NG abzuleiten. Diese sind definiert als „Ein- und Mehrpersonenhaushalte ohne Kind“, „Ein- und Mehrpersonenhaushalte mit Kind“ und „Ein- bzw. Zweipersonenhaushalte Rentner“. Den NG werden jeweils die entsprechenden Tagesfahrprofile zugewiesen. Zudem werden über die Metainformationen der Fahrzeugnutzer und den Zielort der morgendlichen Fahrt die Profile identifiziert, welche Berufspendlern zugeordnet werden können. Darauf aufbauend wird in Abhängigkeit von der ersten Wegstrecke zur Arbeit sowie dem dortigen Ankunftszeitpunkt eine Clusterung der als Pendler-Profile identifizierten Fahrprofile in zwölf verschiedene Pendlergruppen (PG) vorgenommen. Bei der Verknüpfung zu Wochenfahrprofilen wird zwischen Pendler- und Nicht-Pendler-Fahrprofilen unterschieden. Abbildung 3-4 zeigt die Methodik, welche der Verknüpfung der Tagesfahrprofile zu zusammenhängenden Pendler-Wochenfahrprofilen zugrunde liegt.

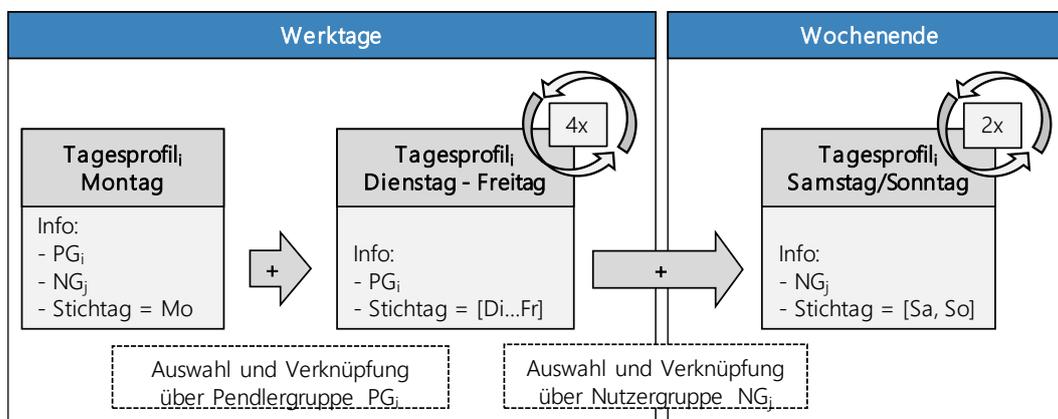


Abbildung 3-4: Methodik zur Verknüpfung von Eintagesfahrprofilen zu Wochenfahrprofilen

Nach Auswahl eines randomisierten Profils für den Montag werden für die vier darauffolgenden Wochentage zufällige Pendlerprofile aus der gleichen Pendlergruppe gezogen und nach Überprüfung der Verknüpfbarkeit verkettet. Für die beiden Wochenendtage wird jeweils ein Profil aus der gleichen Nutzergruppe des zu Beginn gezogenen Montagprofils gezogen. Die synthetisierten Wochenfahrprofile werden anschließend unter Berücksichtigung von Feier- und Brückentagen auf ein Jahr extrapoliert. Feier- und Brückentage werden als Sonntag bzw. Samstag modelliert. Dabei wird vereinfachend unterstellt, dass sich das Fahrverhalten der Nutzer im Verlauf des Jahres nicht ändert. Abwesenheit in Ferienzeiten findet wird erst in einem späteren Schritt der Lastgangmodellierung berücksichtigt.

Die Berechnung des spezifischen Fahrzeugverbrauchs erfolgt in Anlehnung an das in MOS 2030 [16] erarbeitete Verbrauchsmodell, welches auf den Daten von [17] und der Studie [18] beruht. Im Verbrauchsmodell wird zwischen Kleinwagen, Mittelklasse- und Oberklassefahrzeugen differenziert und der elektrische Energiebedarf in Abhängigkeit von Außentemperatur und durchschnittlicher Geschwindigkeit je Wegstrecke berechnet. Abbildung 3-5 zeigt die aktuelle Verteilung des Fahrzeugbestands nach Segmenten und die Zuordnung zu den drei genannten Fahrzeugklassen.

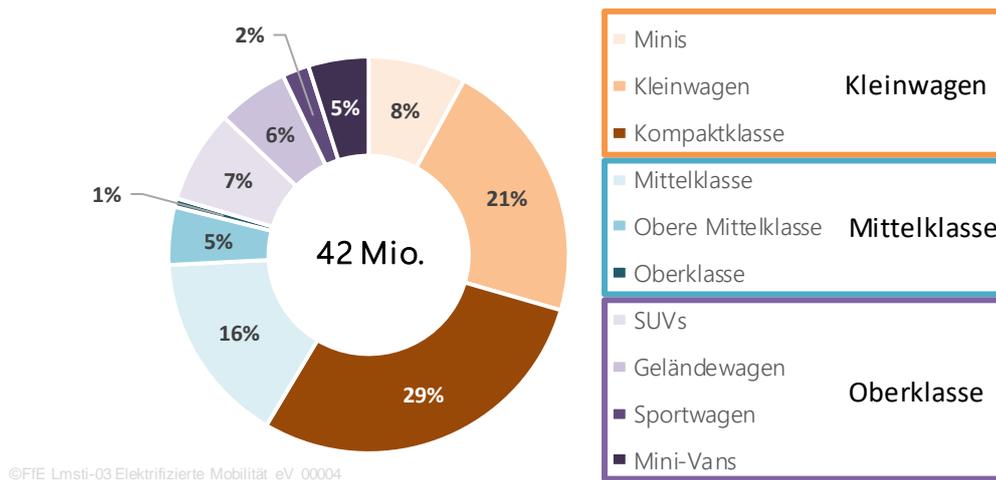


Abbildung 3-5: Verteilung des Fahrzeugbestands nach Segmenten (/UBK-232619/, Stand 01.01.2019)

Für den spezifischen Energieverbrauch wird für alle drei Fahrzeugklassen ein mittlerer Wert angenommen, da der Mehrverbrauch und die höheren Jahresfahrleistungen der Oberklassefahrzeuge die geringeren Werte der Kleinwagen kompensieren. Auch die aus dem Mehrverbrauch resultierenden längeren Ladezeiten einer möglichen Elektrofahrzeugflotte dieser Aufteilung sollte im Mittel durch die geringeren Ladezeiten der großen Zahl von Kleinwagen ausgeglichen werden. In der Folge wird das Verbrauchsmodell der Mittelklassefahrzeuge zur Abbildung des gesamten Fahrzeugbestands verwendet. Dabei wird eine Batteriegröße in dieser Fahrzeugklasse von 50 kWh unterstellt. Das entspricht im Mittel in etwa der durchschnittlichen Batteriekapazität aller aktuell verfügbaren Fahrzeugmodelle (siehe Abbildung 3-6). Es kann davon ausgegangen werden, dass damit ein großer Teil der im Nahverkehr zurückgelegten Strecken abgedeckt werden kann.

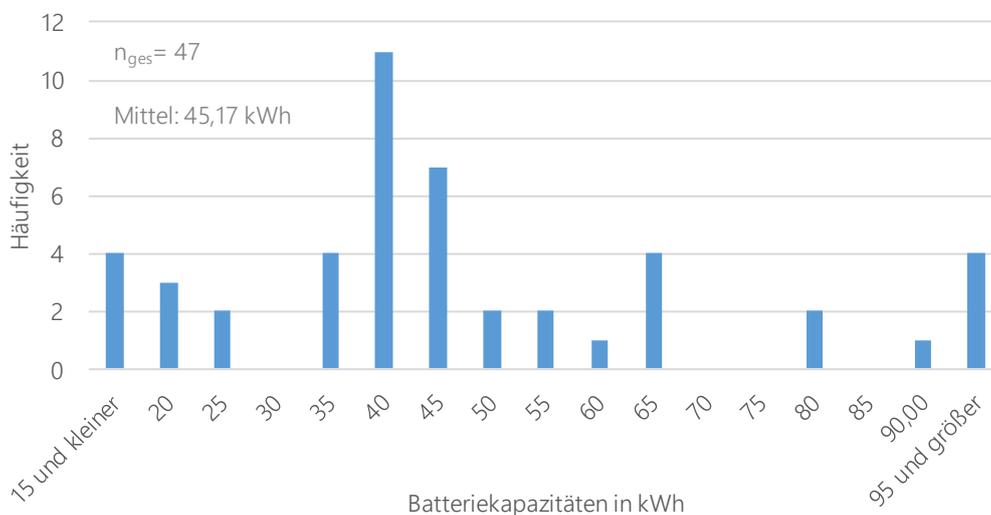


Abbildung 3-6: Häufigkeitsverteilung der Batteriekapazitäten aktueller Elektrofahrzeuge (Stand 12/2019, Quelle: /UBK-240319/)

Neben der Fahrzeugklasse und der Geschwindigkeit wird im Verbrauchsmodell die Außentemperatur berücksichtigt. Diese hat neben dem Klimatisierungsbedarf des Fahrzeugs Einfluss auf den Rollwiderstand der Reifen bzw. den Antriebsverbrauch der Fahrzeuge. In der Energiesystemmodellierung des Auftraggebers kommen neun verschiedene Temperaturregionen zur Anwendung. Der Einfluss dieser stundenaufgelösten Temperaturzeitreihen auf den Fahrzeugverbrauch wurde vorab an 100 exemplarischen Jahresfahrprofilen untersucht. Tabelle 3-3 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Tabelle 3-3: Untersuchung zum Einfluss der vorgegebenen Temperaturzeitreihen auf den Jahresenergiebedarf von 100 exemplarischen Fahrprofilen

Temperaturregion	Mittlere Temperatur in °C	Mittlerer Jahresenergiebedarf in kWh	Abweichung vom mittleren Temperaturverlauf
TR1	9,5	2.479	0,5%
TR2	9,1	2.504	-0,5%
TR3	9,9	2.487	0,1%
TR4	9,0	2.518	-1,1%
TR5	10,0	2.461	1,2%
TR6	10,2	2.462	1,1%
TR7	9,6	2.498	-0,3%
TR8	9,5	2.509	-0,7%
TR9	8,8	2.536	-1,8%
Mittel	9.5	2.490	

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen den sehr geringen Einfluss der neun vorgegebenen Temperaturzeitreihen auf den Jahresenergiebedarf der Fahrzeuge. Es wird davon ausgegangen, dass auch der Einfluss auf den resultierenden Ladelastgang der Fahrzeuge gering ausfällt. Zur Reduktion der Komplexität wird deshalb nur der mittlere Temperaturverlauf in der Modellierung berücksichtigt.

Neben den technischen Parametern des Fahrzeugs spielen bei der Erstellung der Ladelastgänge insbesondere auch das Ansteckverhalten der Fahrzeugnutzer und die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur eine zentrale Rolle. Ersteres wird im Modell über eine vom Ladezustand der Fahrzeugbatterie abhängige Ansteckwahrscheinlichkeit beim Eintreffen an einem Ladeort abgebildet. Für die hier durchgeführten Simulationen wird der Verlauf dieser Ansteckwahrscheinlichkeit nach Abbildung 3-7 unterstellt.

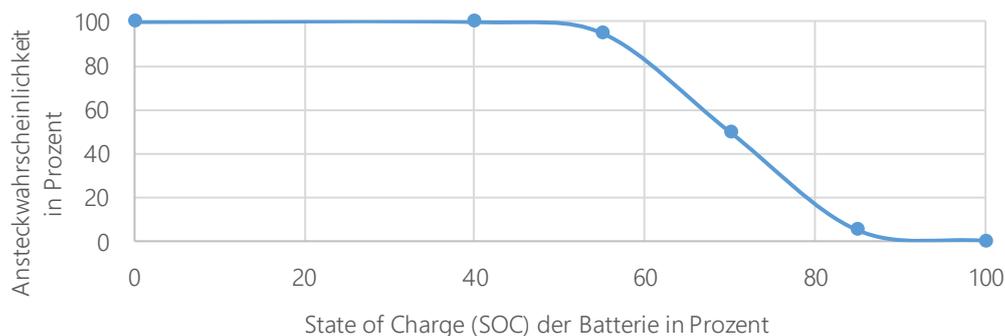


Abbildung 3-7: Ansteckwahrscheinlichkeit am Ladeort in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie

Bezüglich der verfügbaren Ladeinfrastruktur werden im Modell unterschiedliche Annahmen für die Fahrprofile des städtischen und des ländlichen Raums getroffen (siehe auch Abbildung 3-3). So wird davon ausgegangen, dass im städtischen Raum zu Hause nicht immer ein eigener Stellplatz mit einer entsprechenden Wallbox zur Verfügung steht, sondern auch öffentliche Ladepunkte mit höheren Ladeleistungen genutzt werden. Auf dem Land hingegen steht meistens (siehe auch Tabelle 3-2) eigene Stellplätze mit Ladepunkten zur Verfügung. Da die Installation von Wallboxen mit höheren Ladeleistungen jedoch mit höheren Investitionen verbunden ist und diese aufgrund der langen Standzeiten der Fahrzeuge über Nacht häufig nicht benötigt werden, wird davon ausgegangen, dass für die Hälfte der Fahrzeuge „zu Hause“ nur eine Ladeleistung von 3,7 kW zur Verfügung steht. Bezüglich der

Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz und im öffentlichen Raum werden bei Stadt und Land die gleiche Verfügbarkeit unterstellt. Abbildung 3-8 zeigt die diesbezüglich getroffenen Annahmen.

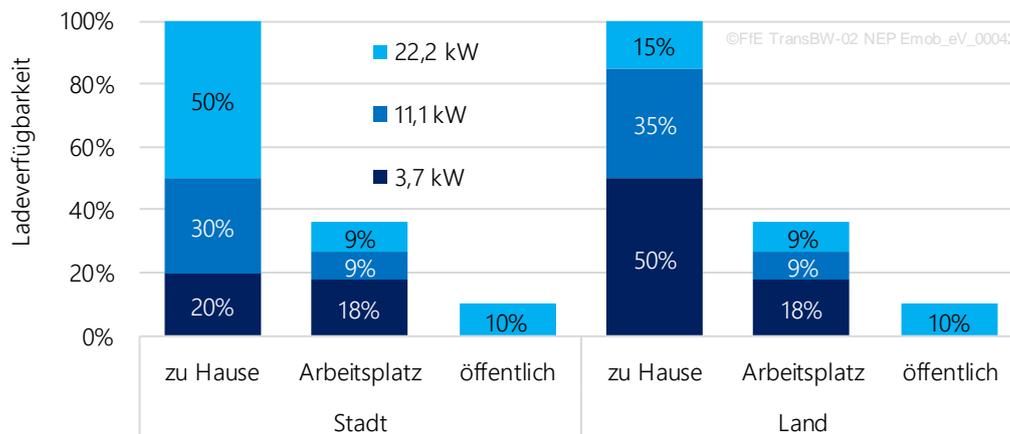


Abbildung 3-8: Annahmen zur Verfügbarkeit von Ladeleistungen an den Orten "zu Hause", "am Arbeitsplatz" und "öffentlich"

Aufbauend auf den in diesem Abschnitt vorgestellten Annahmen wird für beide Regionstypen jeweils ein Ladestrom bei einem direkten Laden (Unflexibler Lastgang) und einem spätest möglichen Laden (Bedarfsgang) simuliert. Darauf aufbauend wird der für die Implementierung der Fahrzeuge im Energiesystemmodell als Speicher zudem benötigte Kapazitätsgang sowie der Anschlusslastgang abgeleitet. Tabelle 3-4 zeigt die durchschnittlich zurückgelegten Wegstrecken und den daraus resultierenden Jahresenergiebedarf für ein mittleres Fahrzeug nach den Simulationsergebnissen für den Nahverkehr für den städtischen und den ländlichen Bereich. Darauf aufbauend wird der verbleibende Energiebedarf berechnet, den die Fahrzeuge beim Zurücklegen längerer Strecken an der öffentlichen Schnellladeinfrastruktur beziehen müssen.

Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse des privaten Nahverkehrs

	Städtischer Verkehr	Ländlicher Verkehr
Mittlere Jahreskilometer Nahverkehr (Simulationsergebnis)	10.644	11.637
Mittlere Jahreskilometerleistung (Auswertung MiD2017)	13.221	14.557
Mittlere Jahresenergiemenge Nahverkehr in kWh (Simulationsergebnis)	1.923	2.056
Durchschnittsverbrauch Nahverkehr in kWh/100km (Simulationsergebnis)	18,1	17,7
Verbleibende Energiemenge Fernverkehr in kWh (berechnet bei 20 kWh/100km)	514,4	584

3.1.2 Privater Fernverkehr

Tabelle 3-4 zeigt die aus der Simulation des Nahverkehrs resultierenden Jahreskilometerleistungen und die resultierenden Energiemengen, die zu Hause bzw. am Arbeitsplatz geladen werden können. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Mobilitätsbedarf der Fahrzeugnutzer bei der Umstellung von einem konventionellen Fahrzeug auf ein Elektrofahrzeug nicht ändert. Entsprechend muss der verbleibende Energiebedarf der Fahrzeuge, der beim Zurücklegen von längeren Fahrstrecken und Mehrtagesfahrten entsteht, über das Laden an der öffentlichen (Schnell-) Ladeinfrastruktur gedeckt werden. Die unterstellte Verteilung dieser

Schnellladeinfrastruktur entlang von Autobahnen und Bundesstraßen wird in Kapitel 2.3 beschrieben. Um die verbleibenden Energiemengen (siehe letzte Zeile Tabelle 3-4) in einen zeitlich aufgelösten Ladelastgang zu überführen, wird an dieser Stelle auf die öffentlich zugänglichen Verkehrszählungsdaten des BASt verwiesen [6]. Die Daten stellen stündlich aufgelöste Verkehrszählungen an Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen dar. Zu beachten ist hierbei, dass es sich lediglich um eine Zählung der Fahrzeuge handelt und keine weiteren Informationen zu gefahrener Strecke oder Start- bzw. Endzeit vorhanden sind. Die gezählten Fahrzeuge pro Zählstelle werden deswegen nach der in Kapitel 2.3 beschriebenen Methodik über einen geometrischen Ansatz in eine Zeitreihe „Fahrzeugkilometer pro Stunde“ überführt und den nächstgelegenen Tankstellen zugeordnet. Diese Zeitreihen werden dann auf Landkreisebene aggregiert und ergeben einen zeitaufgelösten Indikator für die Tankstellenauslastung jedes Landkreises.

Werden diese Zeitreihen mit der Mantelzahl privater Elektrofahrzeuge und den jeweiligen für den Fernverkehr verbleibenden Energiemengen aus Tabelle 3-4 verschnitten, ergeben sich die Ladelastgänge der öffentlichen Schnellladeinfrastruktur an Autobahnen und Bundesstraßen.

3.2 Gewerblicher Verkehr

Die zu Beginn des Kapitels in Tabelle 3-1 vorgestellten Untersuchungen zum privaten und gewerblichen Verkehr haben ergeben, dass sich das Fahrverhalten von gewerblichen Flotten grundlegend von dem der privaten Fahrzeughalter unterscheidet. So fallen zum einen die Tages- und Jahresfahrleistungen deutlich höher aus. Zum anderen unterscheiden sich die Fahrleistungen unter der Woche deutlich von denen am Wochenende. Zudem ist das Fahrverhalten und die Zusammensetzung der gewerblichen Fahrzeugflotte im Vergleich zum privaten motorisierten Individualverkehr sehr viel heterogener. Entsprechend erfolgt vor der eigentlichen Modellierung des Verkehrsverhaltens zunächst eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Wirtschaftszweige. Dabei werden zum einen die Verkehrserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ aus dem Jahre 2012 [7] und zum anderen die Bestands- und Neuzulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA) als Datenbasis verwendet ([14] und [15]). Nach Statistischem Bundesamt [19] wird zwischen 20 Wirtschaftszweigen unterschieden, welche in Tabelle 3-5 dargestellt sind. Aufgrund des geringen Elektrifizierungspotenzials im Bereich der Leichten Nutzfahrzeuge (LNF) (siehe Tabelle 3-1) werden diese aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen und hier lediglich die Pkw-Flotte betrachtet.

Tabelle 3-5: Wirtschaftszweige nach [19]

Kürzel	Wirtschaftszweig	Kürzel	Wirtschaftszweig
A	Land-, Forstwirt., Fischerei	K	Finanz-, Versicherungsdienstleistungen
B	Bergbau, Gewinnung Steine, Erden	L	Grundstücks-, Wohnungswesen
C	<i>Verarbeitendes Gewerbe/ Warenherstellung</i>	M	freiberufl., wissenschaftl., tech. Dienstl.
D	Energieversorgung	N	sonst. Wirt. Dienstl.
E	Wasserversorgung, Abfallwirt.	O	Öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers.
F	Baugewerbe/Bau	P	Erziehung, Unterricht
G	<i>Handel</i>	Q	Gesundheits-, Sozialwesen
H	Verkehr und Lagerei	R	Kunst, Unterhaltung, Erholung
I	Gastgewerbe/ Beherbergung, Gastronomie	S	<i>sonst. Dienstl.</i>
J	Information, Kommunikation	U	Exterritoriale Organisat. und Körperschaften

Für jeden der Wirtschaftszweige werden charakteristische Kenngrößen der Fahrzeugflotte aus den beiden oben genannten Quellen ausgewertet und einander gegenübergestellt. Auf diese Weise wird die Struktur des gewerblichen Verkehrs herausgearbeitet und die Auswahl der im weiteren Verlauf zu simulierenden Wirtschaftszweige vorbereitet. Die Kennzahlen dieser Auswertungen für jeden der 20 Wirtschaftszweige sind in Tabelle 3-6 dargestellt.

Tabelle 3-6: Kennzahlen des gewerblichen Verkehrs in Deutschland (Quelle: [7], [14] und [15])

WZ	Bestand 01.01.2019 (KBA)	Neuzulassungen 2018 (KBA)	Neuzulassungs- quote	Jahreskilometer- leistung (KiD)	Strombedarf bei vollst. Elektrifizierung in TWh/a
A	37.306	3.446	9%	16.820	0,1
B	7.405	1.126	15%	25.563	0,0
C	725.265	412.058	57%	26.934	3,9
D	48.035	8.469	18%	16.335	0,2
E	23.322	4.116	18%	25.400	0,1
F	276.658	37.631	14%	22.459	1,2
G	849.777	766.081	90%	20.250	3,4
H	213.384	45.243	21%	21.129	0,9
I	61.334	8.231	13%	15.360	0,2
J	82.173	18.843	23%	24.982	0,4
K	83.123	30.649	37%	23.192	0,4
L	43.038	13.113	30%	12.966	0,1
M	123.127	25.641	21%	22.964	0,6
N	516.317	436.306	85%	23.509	2,4
N.1	255.851	375.896	147%	23.509	1,2
O	138.911	26.182	19%	15.250	0,4
P	17.261	3.326	19%	25.238	0,1
Q	273.165	47.414	17%	15.350	0,8
R	21.942	4.261	19%	11.164	0,0
S	1.515.942	291.816	19%	23.915	7,3
U	9.963	1.743	17%	27.641	0,1

Bei Betrachtung des tatsächlichen Fahrzeugbestands wird ersichtlich, dass 61 % der Fahrzeuge in den Wirtschaftszweigen „Verarbeitendes Gewerbe / Warenherstellung“ (WZ C), „Handel“ (WZ G) und „Erbringung von sonstigen Dienstleistungen“ (WZ S) gemeldet sind. Die ersten beiden weisen zudem eine sehr hohe Neuzulassungsquote auf, sodass davon auszugehen ist, dass eine Elektrifizierung dieser Fahrzeugflotten sehr schnell stattfinden kann. Besonders auffällig ist die hohe Neuzulassungsquote auch im Wirtschaftszweig N („Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen“). Bei genauerer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass dafür insbesondere die Fahrzeugvermietung verantwortlich ist. Aufgrund der hohen Fahrleistungen von Mietfahrzeugen ist hier eine schnelle Elektrifizierung der Flotte jedoch zumindest fragwürdig. Zudem liegt für die Modellierung des Fahrverhaltens dieser Fahrzeuge keine ausreichende Datenbasis vor, sodass diese ausgeschlossen werden müssen. Auf Basis der in der KiD2010 angegebenen Tagesfahrleistungen werden zudem für jeden Wirtschaftszweig die durchschnittlichen Jahreskilometerleistungen und unter Annahme eines Durchschnittsverbrauchs von 20 kWh / 100 km auch der maximale Strombedarf der jeweiligen Fahrzeugflotte bei vollständiger Elektrifizierung abgeschätzt. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass die durchschnittlichen Tageskilometer an jedem Tag des Jahres anfallen. An dieser Stelle treten erneut die drei erstgenannten Wirtschaftszweige besonders hervor, sodass diese für die weitere Verwendung und die Simulation der Ladelastgänge ausgewählt werden.

Für die Simulation der Ladelastgänge kommt die gleiche Methodik zur Anwendung, die bereits in Kapitel 3.1.1 für den Nahverkehr von privat zugelassenen Fahrzeugen vorgestellt wurde. Zudem werden die gleichen Annahmen hinsichtlich der technischen Parameter der Fahrzeuge (Batteriekapazität von 50 kWh, Fahrzeugkategorie „Mittelklasse“) getroffen. Lediglich das Ansteckverhalten und die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur wird

angepasst. So wird davon ausgegangen, dass die simulierten Fahrzeuge immer angesteckt werden, wenn sie am Betriebsgelände ankommen. Die unterstellte Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Da ein Teil der gewerblich zugelassenen Fahrzeuge auch privat genutzt werden können wird auch ein Laden zu Hause berücksichtigt.

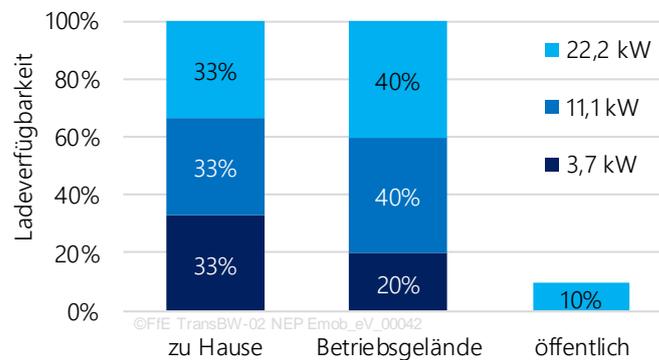


Abbildung 3-9: Annahmen zur Verfügbarkeit von Ladeleistungen im gewerblichen Verkehr

Unter diesen Annahmen werden für jeden der drei ausgewählten Wirtschaftszweige Ladelastgänge für direktes Laden (Unflexibler Lastgang) und spätestmögliches Laden (Bedarfsgang) simuliert und der im Energiesystemmodell benötigte Kapazitätsgang sowie der Anschlusslastgang berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass im Gegensatz zum Privatverkehr die gesamte Energiemenge der Fahrzeuge auf dem Betriebsgelände geladen wird und somit kein Laden an öffentlichen Schnellladesäulen stattfindet. Die synthetisierten Lastgänge werden über die von der Bundesagentur für Arbeit [8] bereitgestellten Beschäftigungszahlen nach Wirtschaftszweigen jedem Landkreis zugewiesen und entsprechend gewichtet. Tabelle 3-4 zeigt zusammengefasst die charakteristischen Werte für die drei betrachteten Wirtschaftszweige.

Tabelle 3-7: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse des gewerblichen Verkehrs

	WZ C	WZ G	WZ S
Mittlere Jahreskilometer (Simulationsergebnis)	14.674	14.547	14.390
Mittlere Jahresenergiemenge in kWh (Simulationsergebnis)	2.576	2.574	2.572
Durchschnittsverbrauch in kWh/100km (Simulationsergebnis)	17,6	17,7	17,9

3.3 Exkurs: Mögliche Integration der Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen in linearen Optimierungsmodellen

Zur Abbildung der Ladesteuerung großer Flotten in lineare Optimierungsmodelle werden vier verschiedene Zeitreihen erstellt, die im Folgenden kurz vorgestellt und mathematisch definiert werden. Mit den erstellten Zeitreihen lässt sich die Speichergleichung nutzen.

1. Unflexibler Lastgang

Der Unflexible Lastgang entsteht unter der Annahme, dass der Ladevorgang startet sobald die Fahrzeugnutzer ihr Fahrzeug an einem Ladeort angesteckt haben. Für die Entscheidung, ob ein Ansteckvorgang erfolgt ist eine sog. Ansteckwahrscheinlichkeit unterstellt, die vom SOC des Fahrzeugs abhängt. Die Ansteckwahrscheinlichkeit ist umso höher je geringer der SOC ist.

2. Bedarfsgang

Der Bedarfsgang, oder der Lastgang des „spätest möglichen Ladens“ entsteht, wenn die Fahrzeuge den Ladevorgang zum letztmöglichen Zeitpunkt starten und das Fahrzeug somit genau zum Abfahrzeitpunkt vollgeladen ist. Abbildung 3-10 zeigt den schematischen Verlauf dieser beiden Ladevorgänge über den Zeitraum des stehenden Fahrzeugs am Ladeort.



Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des Ladelastgangs, Bedarfsgangs und des Kapazitätsgangs für ein Elektrofahrzeug

3. Kapazitätsgang

In Abbildung 3-10 ist zusätzlich der sog. Kapazitätsgang dargestellt. Er entspricht dem „virtuellen Speicher“ den ein Fahrzeug dem Netzsystem zur Verfügung stellen kann. Dabei spielt der reale Ladestand keine Rolle, solange die Endbedingung (das Fahrzeug ist zum Abfahrzeitpunkt vollgeladen) erfüllt wird. Zu Beginn baut sich die Kapazität langsam auf, da die Ladeleistung begrenzt ist und somit nicht von Anfang an die volle Kapazität als freie Speicherkapazität zur Verfügung steht. Gegen Ende der Standdauer des Fahrzeugs nimmt die Kapazität im gleichen Maße ab, wie sie zu Beginn zugenommen hat, um den Endzustand (Batterie vollgeladen) zu gewährleisten. Kommt es zu keiner Überlappung zwischen dem unflexiblen Lastgang und dem Bedarfsgang entspricht die maximale Speicherkapazität der zu ladenden Energie.

Der Kapazitätsgang ergibt sich aus dem Integral der Differenz zwischen unflexiblen Lastgang und des Bedarfsgangs:

$$E_{kap}(t) = \int_0^t P_{unflex}(t) - P_{late}(t) dt$$

E_{kap} in kWh: Kapazitätslastgang

P_{unflex} in kW: (unflexibler) Ladelastgang

P_{late} in kW: Bedarfsgang

4. Anschlusslastgang

Der Anschlussleistungsgang errechnet sich aus dem Quotienten aus Kapazitätsgang und der durchschnittlichen Ladedauer pro Fahrzeug nach:

$$P_{Anschluss}(t) = \frac{E_{kap}(t)}{E_{Dauer}}$$

$P_{Anschluss}$ in kW: Anschlusslastgang

E_{kap} in kWh: Kapazitätsgang

E_{Dauer} in h: durchschnittliche Ladedauer

Die sich aus der Simulation ergebenden, durchschnittlichen Ladedauern für die betrachteten Nutzergruppen bzw. Wirtschaftszweige sind in Tabelle 3-8 dargestellt.

Tabelle 3-8: Durchschnittliche Ladedauern in den betrachteten Nutzergruppen/Wirtschaftszweigen

Nutzergruppe/Wirtschaftszweig	Durchschnittliche Ladedauer in h
privat - ländlich	2,8
privat - städtisch	2,1
gewerblich – Verarbeitendes Gewerbe/ Warenherstellung	0,86
gewerblich - Handel	0,94
gewerblich – sonst. Dienstleistungen	0,93

Nutzung in der Speichergleichung:

Die Speichergleichung lautet wie folgt.

$$P_{in}(t)dt - P_{out}(t)dt = dW(t)$$

P_{in} in kW: Ladeleistung

P_{out} in kW: Entladeleistung

dW in kWh: Änderung Energieinhalt Speicher

Dabei entspricht P_{out} hier dem Lastgang des spätest möglichen Ladens (Bedarfsgang), und P_{in} der Anschlusslastgang (lower bound = 0, upper bound = Anschlusslastgang).

4 MATLAB®-Tool

In dem hier entwickelten MATLAB®-Tool werden die Regionalisierung aus Kapitel 2 und die normierten Lastgänge aus Kapitel 3 zusammengefügt und mit vorzugebenden Mantelzahlen zu Lastgängen je Landkreis verarbeitet. Die schematische Darstellung für Input und Output des Tools sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

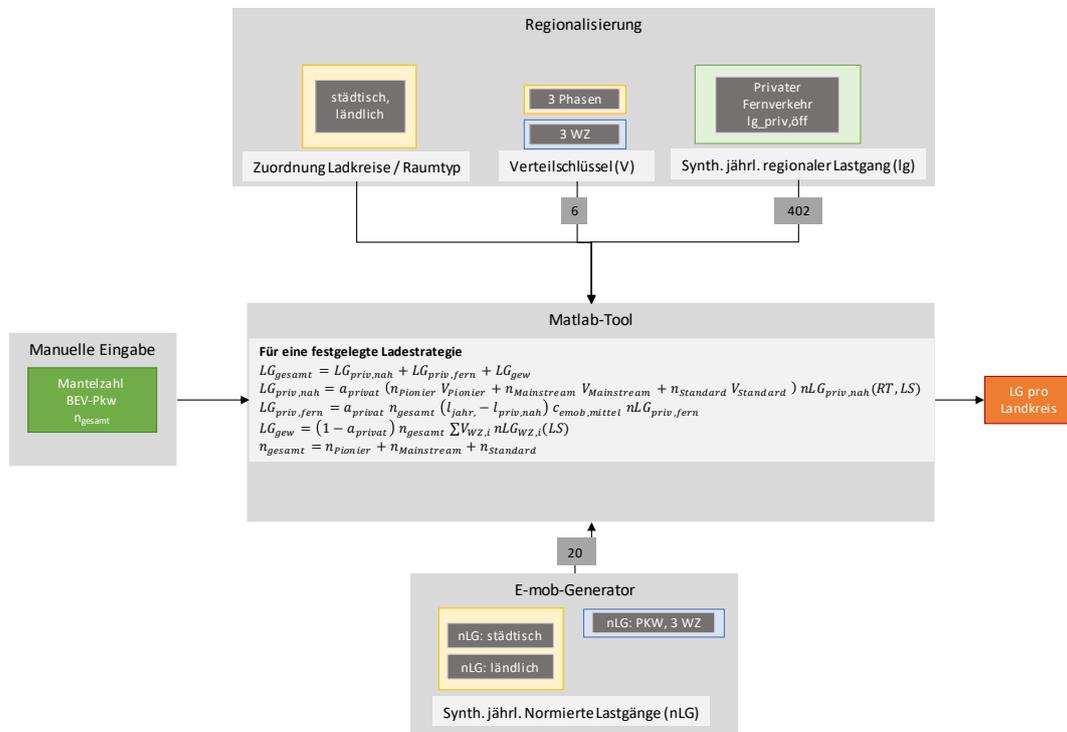


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des MATLAB®-Tools

Input, welcher vom Nutzer vorgegeben werden muss, sind die deutschlandweiten Mantelzahlen für BEV. Weiter gehen in das Modell bei der Regionalisierung die Verteilschlüssel für den privaten Nahverkehr und den gewerblichen Verkehr sowie die Zuordnung der Raumtypen zu den Landkreisen (bzw. Gemeinden oder PLZs) und die normierten Fahrzeugkilometer-Zeitreihen je Landkreis für den privaten Fernverkehr ein. Hierbei liegen beim privaten Nahverkehr die drei Verteilschlüssel für die unterschiedlichen Phasen vor: Pionier, Mainstream und Standard. Beim gewerblichen Verkehr werden Verteilschlüssel für die drei betrachteten Wirtschaftszweige bereitgestellt. Bei der Erstellung des Lastgangs gehen die normierten Lastgänge für den privaten Nahverkehr und den gewerblichen Verkehr ein. Beim privaten Nahverkehr wird zwischen ländlichem und städtischem Raum (2 Raumtypen) unterschieden, beim gewerblichen Verkehr gehen normierte Lastgänge für jeden der drei ausgewählten Wirtschaftszweige ein. Außerdem existieren für alle Lastgänge vier Variationen für die verschiedenen Ladestrategien.

Mit Hilfe der hier vorgestellten Inputdaten werden skalierte Lastgänge für jeden Landkreis (bzw. Gemeinde oder PLZ) für die festgelegte Ladestrategie erstellt und in eine CSV-Datei exportiert. Die Gleichungen zur Erstellung der skalierten Lastgänge sind nachfolgend dargestellt:

$$LG_{gesamt, Ladestrategien} = LG_{priv, nah} + LG_{gew}$$

$$LG_{priv, nah} = a_{privat} (n_{Pionier} V_{Pionier} + n_{Mainstream} V_{Mainstream} + n_{Standard} V_{Standard}) nLG_{priv, nah}(RT, LS)$$

$$LG_{gew} = (1 - a_{privat}) n_{gesamt} \sum V_{WZ, i} nLG_{WZ, i}(LS)$$

$$LG_{gesamt,fix} = LG_{priv,fern}$$

$$LG_{priv,fern} = a_{privat} n_{gesamt} (l_{jahr} - l_{priv,nah}) c_{emob,mittel} nLG_{priv,fern}$$

$$n_{gesamt} = n_{pionier} + n_{Mainstream} + n_{Standard}$$

$$\text{mit } a_{privat} = 86\%, l_{jahr,kba} = 14\,663\text{ km bzw. } 13\,221\text{ km}, c_{emob,mittel} = 20 \frac{kWh}{100km}$$

Aktuell ist die Aufteilung der Mantelzahlen zwischen privaten und gewerblichen Fahrzeugen festgesetzt auf 86 % private und 14 % gewerbliche. Diesen Zahlen liegen die Werte des KBA zu privaten und gewerblich zugelassenen Fahrzeugen aller Wirtschaftszweige zugrunde. In der Lastgangmodellierung hingegen finden zunächst nur die drei größten Wirtschaftszweige Berücksichtigung. Sie sind jedoch variabel programmiert, sodass eine leichte Anpassung im Tool bei Änderung des Verhältnisses in Deutschland möglich ist.

Momentan sind 3 Mio. Fahrzeuge für die Pionier-Phase für den privaten Nahverkehr und 5 Mio. Fahrzeuge für die Mainstream-Phase für den privaten Nahverkehr als Standardwert implementiert. Wird vom Nutzer eine Gesamt-BEV-Fahrzeugzahl kleiner 9,3 Mio. eingegeben, wird die Mainstream-Phase dementsprechend gekürzt, bei einer Gesamt-BEV-Fahrzeuganzahl kleiner 3,5 Mio. greift nur noch die Pionier-Phase. Es ist möglich, diese Festlegung zu ändern und andere Grenzen für die Pionier-Phase und die Mainstream-Phase zu setzen. Die Zahlen sollten jedoch nie größer als 3 bzw. 5 Mio. sein, da dann die Annahmen aus der Regionalisierung nicht mehr zutreffen.

5 Steckbriefe

Im Zuge dieser Studie wurden neben der Regionalisierung und Modellierung von Elektrofahrzeuglastgängen Steckbriefe erstellt, welche einen kurzen, prägnanten Überblick über die verschiedenen Antriebstechnologien geben. Dabei werden die folgenden Antriebe untersucht:

- Batterieelektrische Pkw (BEV-Pkw)
- Plug-In-Hybride Pkw (PHEV-Pkw)
- Brennstoffzellen-Pkw (FCEV-Pkw)
- Erdgas-Pkw (CNG-Pkw)
- Oberleitungshybrid-Lkw (OH-Lkw)
- BEV-Lkw, PHEV-Lkw, FCEV-Lkw und CNG-Lkw in einem Steckbrief
- E-Busse des öffentlichen Personennahverkehrs
- E-Pkw in CarSharing-Konzepten

In den Steckbriefen werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Antriebstechnologien, die Treiber und Hemmnisse, der Bestand und Szenarien über die mögliche Entwicklung sowie die technoökonomischen Parameter dargestellt und analysiert. Einzig der gesammelte Lkw-Steckbrief weicht von diesem Format ab. Die Vor- und Nachteile sowie die Treiber und Hemmnisse einer Antriebstechnologie sind allgemein in den Pkw-Steckbriefen dargestellt, sodass nur der Ausbau und die Kosten der Lkw als zusätzliche Aspekte im Lkw-Steckbrief Erwähnung finden. Die entwickelten Steckbriefe liegen als PDF-Datei bei.

Im vorliegenden Bericht wird vor allem das Augenmerk auf den Vergleich der verschiedenen Pkw-Technologien gelegt. In Tabelle 5-1 sind die Vor- und Nachteile, in Tabelle 5-2 die Treiber und Hemmnisse für die verschiedenen Technologien im Vergleich dargestellt. Beide Vergleiche sind auf Basis heutiger Erkenntnisse erstellt und sind stark abhängig von u. a. regulatorischen Rahmenbedingungen.

Tabelle 5-1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Antriebstechnologien

	BEV-Pkw	PHEV-Pkw	FCEV-Pkw	CNG-Pkw
Reichweite	--	+	+	+
Lade-/Tankdauer	--	+	++	++
Lade- / Tankstellen	+	+	--	+
Emissionen	lokal: ++ Produktion: --	lokal: + Produktion: -	lokal: ++ Produktion: +	lokal: - Produktion: +
Lärm	++	+/-	++	-
Effizienz	++	+	+	--
Anschaffungskosten	--	--	--	+
Betriebskosten	++	+	-	+
Marktreife	+	+	-	++

Bei den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Antriebstechnologien sind die technischen Parameter Reichweite, Lade-/ Tankdauer, Lade-/ Tankstellen, Emissionen, Lärm, Effizienz und die ökonomischen Parameter Anschaffungskosten, Betriebskosten sowie Marktreife dargestellt. Bei den Emissionen werden sowohl die lokalen Emissionen als auch die Emissionen, welche bei der Produktion entstehen, betrachtet.

Beim Vergleich der verschiedenen Antriebstechnologien wird ersichtlich, dass bei Reichweite und Lade-/ Tankdauer die BEV-Pkw am schlechtesten abschneiden. Dafür schneiden sie bei Lärm, Effizienz und Betriebskosten besonders gut ab. Bei den Emissionen ist das Bild bei den BEV gemischt, lokal sind die Emissionen sehr gut zu bewerten, jedoch entstehen bei der Fahrzeugherstellung, hauptsächlich aufgrund der Produktion der Batterie [20], mehr Emissionen als bei den anderen Pkw-Technologien. Bei den Anschaffungskosten und der Marktreife schneiden die CNG-Pkw am besten ab, bei der Effizienz am schlechtesten. Die Verfügbarkeit von Lade-/ Tankstellen sind für FCEV-Pkw am kritischsten zu betrachten. Insgesamt ist das Bild sehr gemischt, es lässt sich kein eindeutiger Trend in Richtung einer Technologie feststellen.

Tabelle 5-2: Treiber und Hemmnisse der verschiedenen Antriebstechnologien

	BEV-Pkw	PHEV-Pkw	FCEV-Pkw	CNG-Pkw
Flottenemissionsvorgaben der EU	+	+	+	+
Öffentliche Förderung	+	+	+	--
Fahrverbote von Diesel- & Benzinfahrzeugen	+	+	+	+
Akzeptanz: Reichweite	--	+	+	+
Infrastruktur	+	+	-	+/-
Marktangebot	+	+	-	+

Bei den Treibern und Hemmnissen werden die Flottenemissionsvorgaben der EU, öffentliche Förderung, Fahrverbote von Diesel- und Benzinfahrzeugen, Akzeptanz durch Reichweite und Infrastruktur und Marktangebot betrachtet. BEV und PHEV-Pkw schneiden hier sehr ähnlich ab. Lediglich bei der Reichweite ist der BEV-Pkw negativ zu bewerten. Die rein elektrische Reichweite von PHEV-Fahrzeugen ist zwar geringer als bei BEV-Pkw, jedoch ist durch die Option des konventionellen Tankens die Akzeptanz und auch die Reichweite größer. Insgesamt existieren für BEV- und PHEV-Pkw starke Treiber durch die Flottenemissionsvorgaben der EU und (mögliche zukünftige) Fahrverbote für konventionelle Fahrzeuge, öffentliche Förderung (sowohl auf lokaler als auch auf bundesweiter Ebene) sowie eine neue Firmenlandschaft im Automobilbereich. Neue Firmen drängen im Bereich Elektromobilität in den Markt und auch die Automobilkonzerne setzen zunehmend auf Elektromobilität. Neben den bei der Batterieherstellung anfallenden Emissionen sind im Kontext der BEV-Pkw noch die benötigten Rohstoffe, vor allem Kobalt und Lithium, von Interesse. Für FCEV-Pkw ist auch eine öffentliche Förderung vorhanden, allerdings sind aktuell wenige Modelle auf dem Markt und die Infrastruktur ist noch wenig ausgebaut. CNG-Pkw als letzte der hier betrachteten Antriebstechnologien erhält aktuell kaum politische Aufmerksamkeit und ist in der öffentlichen Wahrnehmung wenig präsent, obwohl es bei den anderen Treibern auch positive Impulse erhalten könnte. So sind aktuell viele Modelle am Markt verfügbar.

Um geeignete Szenarien erfassen zu können, stellt sich die Frage, wie sich Treiber und Hemmnisse, aber auch Vor- und Nachteile zukünftig entwickeln werden. Aufgrund aktueller Relevanz der Technologie wird hier der Fokus auf die Elektrofahrzeuge und im Speziellen BEV-Pkw gelegt. Im nachfolgenden Exkurs wird auf verschiedene Aspekte der Batterietechnologie und den BEV aus heutiger Sicht mit Fokus auf die zukünftige Entwicklung eingegangen.

Exkurs: Zukunft von Batterien und Elektrofahrzeugen

Batterien in Elektrofahrzeugen werden häufig als extrem teuer und nicht nachhaltig angesehen, zudem verursache das Laden von Elektrofahrzeugen große Infrastrukturprobleme. Folgender Exkurs soll dazu dienen, einen Einblick in die zukünftige Entwicklung zu geben.

Kosten: Nach den aktuellen Zahlen von BNEF [21] zu Batteriekosten auf Systemebene soll bereits im Jahr 2024 eine Batterie mit 100 kWh, welche für eine Reichweite von rund 500 km ausreicht, nur noch 10.000 \$ kosten. Im Jahr 2010 lagen die Kosten noch bei dem zehnfachen. Im Jahr 2030 könnten die Kosten sogar auf 6100 \$ fallen.

Energiedichte: In den kommenden Jahren ist weiter von einer Steigerung der Energiedichte auszugehen. So existieren immer wieder Meldungen, die von einer Steigerung um mehr als 50 % in den nächsten Jahren sprechen. In wie weit diese eintreten wird, bleibt abzuwarten.

Lebensdauer: In Fahrzeugen verbaute Batterien weisen in der Regel eine Zyklfestigkeit von mehr als 500 Vollzyklen auf. Bei einer Reichweite von 500 km und einer Vollzyklenzahl von 500 ergibt sich daraus eine erzielbare Fahrleistung von 250.000 km. Obwohl die Kapazität der Batterien über die Zeit hinweg abnimmt, zeigen einige Werte für das Tesla Model S aus dem Realbetrieb, dass mit diesen Fahrzeugen eine Fahrleistung von mehr als 500.000 km zurücklegbar ist [22], [23].

Materialien: Mit der Entwicklung der Batterietechnologie werden auch andere Materialien eingesetzt [21]. Hierdurch kann auch die Diskussion um die Ressourcenverfügbarkeit und deren Einsatz in Zukunft in einem neuen Licht geführt werden.

Klimabilanz: Ein weiteres Hemmnis besteht in der zum Teil verbreiteten Meinung, dass Elektrofahrzeuge über den Lebenszyklus hinweg gesehen klimaschädlicher sind als Benzin- und Dieselfahrzeuge. Diese Meinung stützt sich auf Veröffentlichungen, die eine veraltete Datenbasis verwendet haben. Mittlerweile wurde auch von der häufig zitierten schwedischen Metastudie [24], auf die sich diese Analysen beziehen, ein Update veröffentlicht. In der aktualisierten Fassung [25] wird eine Reduktion der Klimawirkung der Batterieproduktion von 150-200 kg CO₂-Äquivalenten (Äq.) auf 61-106 kg CO₂-Äq. je kWh Batteriekapazität ausgewiesen. Dies ist vor allem auf den geringeren Energieverbrauch in der Produktion sowie den Emissionsfaktor der eingesetzten Energie zurückzuführen, was sich mit den Erkenntnissen der Analysen [20] und [26] deckt. Wie in [27] gezeigt, stellt sich in diesem Fall die Klimabilanz von BEVs (Golf-Klasse) positiv dar.

Netzbelastung: Um die Netzbelastungen durch Elektrofahrzeuge bei hohen Durchdringungen zu untersuchen, gehen mittlerweile Unternehmen von der Theorie in die Praxis. So stellte die Netze BW in dem Feldversuch „E-Mobility Allee“ eine BEV-Quote von 50 % in einem Verteilnetz her und untersuchten die Konsequenzen auf das Netz. Dabei zeigte sich, dass die Fahrzeuge nicht immer sofort nachgeladen wurden, da die Nutzer Vertrauen in die Reichweite erlangten. Hierdurch kam es zu deutlich geringen Netzbelastungen, als es häufig befürchtet wird. [28]

Als nächstes wird der Bestand und die Entwicklung der verschiedenen Antriebstechnologien betrachtet. In Tabelle 8-1, Tabelle 8-2, Tabelle 8-3, Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 im Anhang sind der Bestand und die Entwicklung der verschiedenen Antriebstechnologien aus verschiedenen Szenarien dargestellt. Wie zu sehen ist, wird das größte Wachstum bei den BEV- und PHEV-Pkw erwartet. Zu diesen Technologien sind auch die meisten Studien vorhanden. FCEV-Pkw werden häufig entweder gar nicht betrachtet oder nicht einzeln ausgewiesen, sondern unter E-Pkw mitberücksichtigt. CNG-Pkw gehen von dem im Mittel geringsten Wachstum aus, nur in 2018-IEW-ZXX-EL und 2014-EnRePr werden Bestände von über 5 Mio. erreicht. Über alle Antriebstechnologien werden für 2050 große Schwankungsbreiten erreicht, bei BEV-Pkw von 3 Mio. (2015-KSZ-T) bis 30 Mio. (2018 - IEW-ZXX-TM), bei PHEV-Pkw von 3 Mio. (2014 - EnRePr) bis 18 Mio. (2016-UBA-FI+), bei FCEV-Pkw von 0 (z. B. 2016-Renewability-Effizienz) bis 12 Mio. (2018-IEW-ZXX-EL) und bei CNG-Pkw bei 0 (z. B. 2016-Renewability-Effizienz) bis 7 Mio. (2014-EnRePr).

Aus dem zukünftigen Fahrzeugbestand, dem durchschnittlichen Verbrauch sowie der Fahrleistung lassen sich ein Gesamtstromverbrauch für 2050 berechnen. Annahme sind hier 14.000 km/a, 20 kWh/100 km für BEV und PHEV-Pkw mit einer Aufteilung Diesel zu Elektro von 50 % bei den PHEV-Pkw. Für BEV-Pkw liegt er bei 8,4 TWh bis 84 TWh, für PHEV-Pkw je nach Szenario zwischen 4,2 TWh und 25,2 TWh. Neben den Pkw-Steckbriefen wurden auch Steckbriefe für OH-Lkw, CarSharing und E-Busse erstellt, da diese als aktuelle Trends in der Diskussion identifiziert wurden. Für die spätere Implementierung zur Bestimmung des regionalisierten Stromverbrauchs durch Elektromobilität in Deutschland finden jedoch nur OH-Lkw Eingang. Grund hierfür sind die vergleichsweise geringen Stromverbräuche von CarSharing und E-Bussen im Vergleich zu OH-Lkw und BEV-/PHEV-Pkw (siehe Abbildung 5-1).

Gesamtstrombedarf

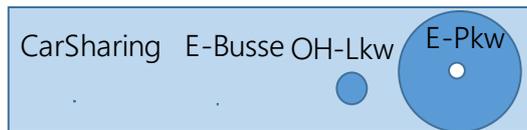


Abbildung 5-1: Grafische Darstellung des Gesamtstrombedarfs der verschiedenen Kategorien CarSharing, E-Busse, OH-Lkw und E-Pkw (BEV und PHEV)

Bei den technoökonomischen Parametern der E-Pkw werden die Ladeinfrastruktur sowie die Kosten (CAPEX) und Batteriekapazitäten näher betrachtet. Zur Analyse der öffentlichen Ladesäulen wird auf das Ladesäulenregister der Bundesnetzagentur zurückgegriffen. Dieses beinhaltet neben öffentlichen Ladesäulen teilweise auch private bzw. halböffentliche Ladesäulen, allerdings herrscht für diese keine Meldepflicht. Es gibt kein Register, welches die privaten Ladesäulen sammelt, sodass eine exakte Aussage über diese schwierig ist. Die öffentlichen Ladesäulen werden in den Steckbriefen bzgl. Ladeleistung, Anzahl Ladepunkte und dem Zubau öffentlicher Ladesäulen analysiert. Die Analyse der Ladeleistung aus den Steckbriefen ist noch einmal in Abbildung 5-2 dargestellt. Bei den Ladeleistungen liegt der Standard bei 22 kW. Unter Sonstige fallen hier Ladeleistungen kleiner 3,7 kW, 4,14-7,5 kW, 11,4 kW -21 kW, 22,1 kW-45 kW, 53 kW-75 kW. Insgesamt gibt es 41 verschiedene Ladeleistungen.

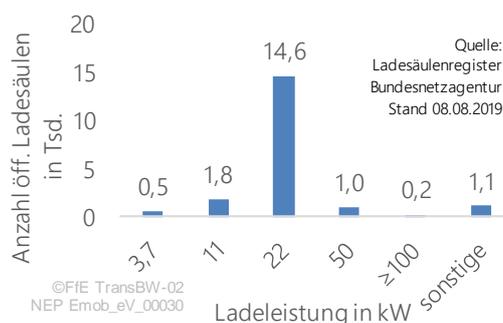


Abbildung 5-2: Ladeleistung der öffentlichen Ladesäulen

6 Ergebnisse

6.1 Regionalisierung der ÜNB-Szenarien auf Bundesländer

Basierend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Methodik der Regionalisierung werden die von den ÜNB übergebenen Mantelzahlen, namentlich die Szenarien A 2035, B 2035, C 2035 und B 2040 auf die Phasen *Pioniere*, *Mainstream* und *Standard* verteilt. Die Pionier-Phase umfasst 3 Mio., die Mainstream-Phase 5 Mio. Fahrzeuge. Die restlichen Fahrzeuge sind der Standard-Phase zuzuordnen. Tabelle 6-1/Tabelle 6-1: Anzahl BEV pro Bundesland und ÜNB-Szenario nach der Regionalisierung listet die Zahl an BEV pro Bundesland nach der dreistufigen Regionalisierung.

Bundesland	A2035		B2035		C2035		B2040	
	Privat	Gewerblich	Privat	Gewerblich	Privat	Gewerblich	Privat	Gewerblich
BW	1.115.331	147.585	1.578.430	221.377	2.130.048	313.618	2.019.725	295.170
BY	1.318.257	170.587	1.873.081	255.880	2.541.044	362.497	2.407.453	341.174
BE	86.127	50.744	195.525	76.117	362.431	107.832	329.050	101.489
BB	137.574	47.174	240.719	70.760	382.016	100.244	353.758	94.347
HB	22.770	6.830	45.772	10.245	79.835	14.514	73.023	13.660
HH	52.327	13.689	108.322	20.534	193.529	29.090	176.488	27.379
HE	572.241	57.009	825.778	85.514	1.129.293	121.145	1.068.590	114.018
MV	99.520	28.727	174.046	43.090	273.236	61.045	253.399	57.454
NI	750.579	118.014	1.102.249	177.021	1.525.711	250.780	1.441.019	236.028
NW	1.565.528	197.290	2.314.610	295.935	3.227.775	419.241	3.045.143	394.580
RP	403.775	66.575	584.670	99.863	802.284	141.472	758.762	133.151
SL	120.758	15.600	170.338	23.401	227.653	33.151	216.191	31.201
SN	210.850	74.505	385.640	111.758	625.567	158.323	577.582	149.010
ST	105.817	42.000	198.354	63.000	327.117	89.251	301.365	84.000
SH	210.961	42.145	329.852	63.217	483.832	89.558	453.037	84.290
TH	107.579	41.525	192.621	62.287	308.622	88.240	285.423	83.050

Tabelle 6-1: Anzahl BEV pro Bundesland und ÜNB-Szenario nach der Regionalisierung

Diese Werte sind ebenfalls in Abbildung 6-1 dargestellt. Zu beachten ist in diesem Diagramm, dass das Verhältnis zwischen privaten und gewerblichen Fahrzeugen pro Bundesland unterschiedlich sein kann (manche Bundesländer weisen höhere Zahlen an gewerblichen Fahrzeugen auf als andere). In Summe über die Bundesländer bleibt das Verhältnis privat zu gewerblich jeweils gleich.

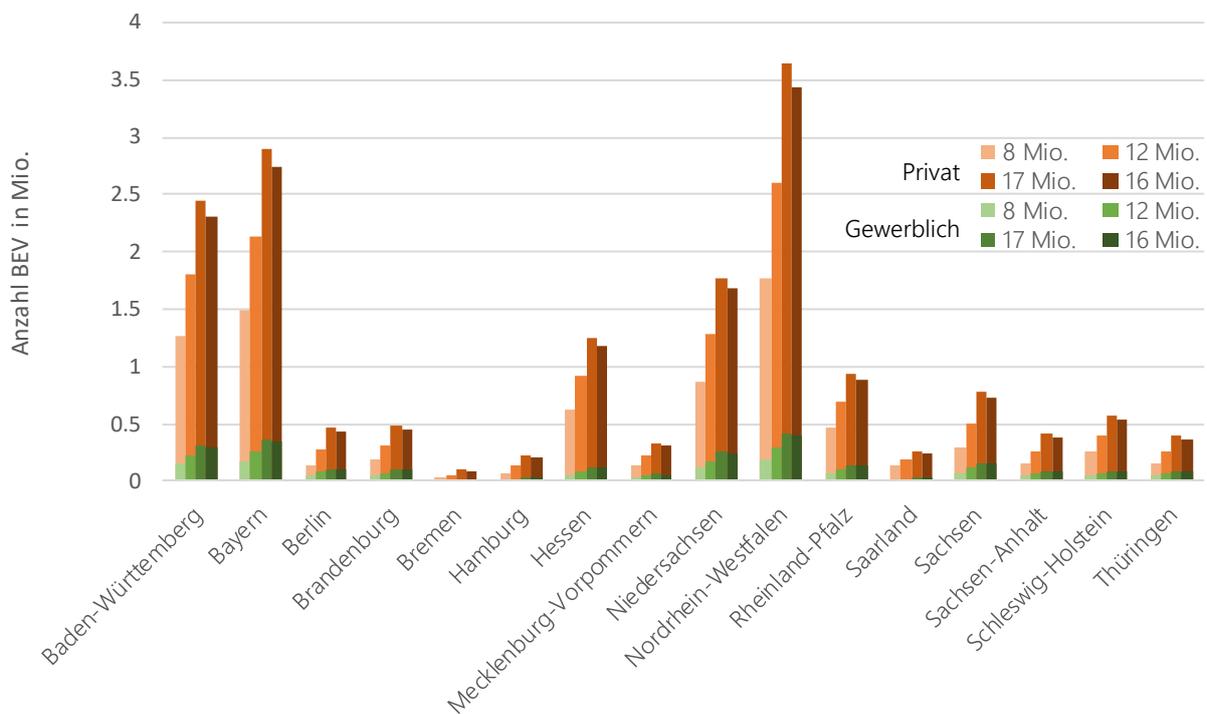


Abbildung 6-1: Regionalisierte BEV-Zahlen pro Bundesland und Szenario, getrennt nach privaten (orange) und gewerblichen (grün) Fahrzeugen

Exemplarisch ist Szenario B 2035 regionalisiert als BEV pro km² in Abbildung 6-2 als Heatmaps und Abbildung 6-3 auf Landkreisebene dargestellt. Die Heatmaps erlauben einen landkreisunabhängigen Blick auf die Entwicklung des BEV-Bestandes. So ist beispielsweise die Stadt-zentrierte Entwicklung in Mecklenburg-Vorpommern klarer zu erkennen als in der Landkreis-gemittelten Darstellung. Deutlich wird die früher einsetzende Entwicklung in Regionen West- und Süddeutschlands, die von höherem Einkommen geprägt sind. In der Standard-Phase holen jedoch vor allem die Stadtgebiete in Ostdeutschland auf. Durch Herabsetzen der Grenzwerte für den charakteristischen Parameter Einkommen konnte eine früher und stärker einsetzende Entwicklung in Regionen Ostdeutschlands beobachtet werden, während die Variation der Wohnfläche keine signifikanten Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland zeigten.

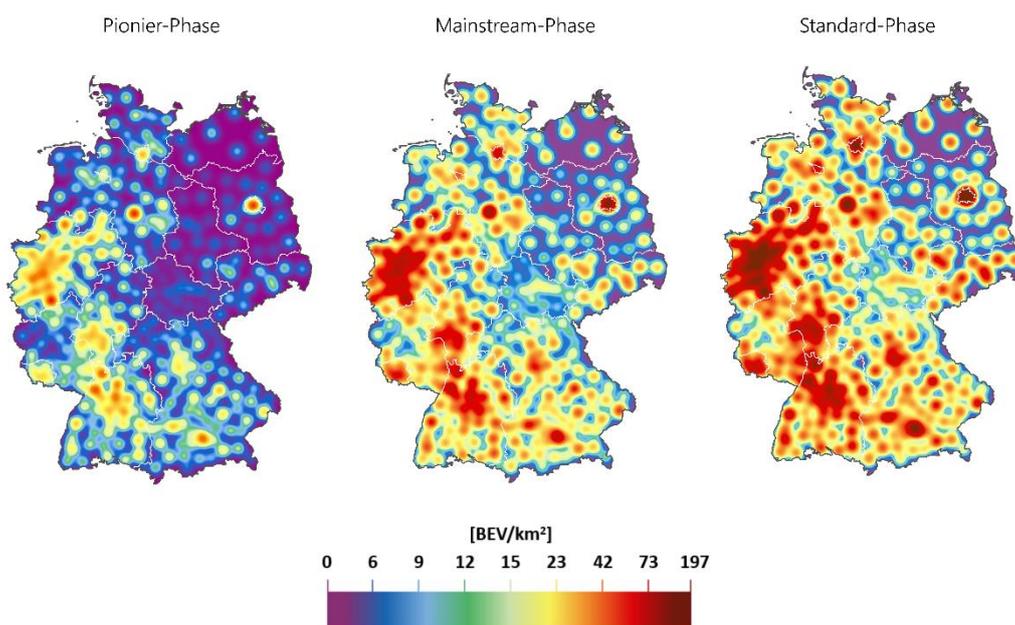


Abbildung 6-2: BEV pro Km² und Regionalisierungs-Phase als Heatmaps

Abbildung 6-3 zeigt eine Landkreis-abhängige Darstellung der BEV-Zahlen. Die Farbskalen sind zwischen den Phasen nicht vergleichbar.

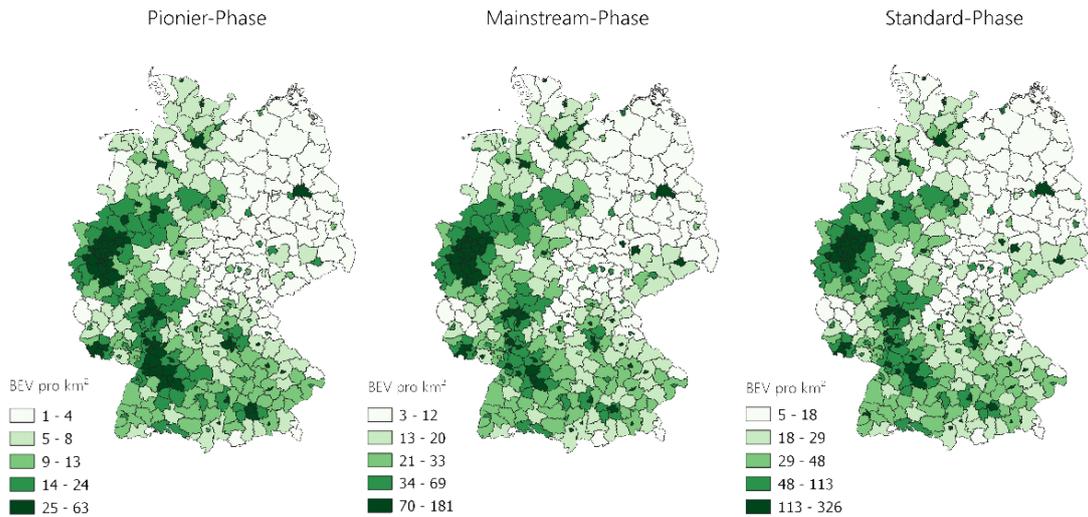


Abbildung 6-3: BEV pro Km² und Regionalisierungsphase auf Landkreisen

In der Detailbetrachtung einzelner Parameter zeigt sich die Auswirkung der getroffenen Annahmen. Für das Beispiel der Photovoltaik-Leistung pro Zelle wird in Abbildung 6-4 ein Ausschnitt aus dem Landkreis Starnberg betrachtet. Links sind Zellen abgebildet, in denen nach Marktstammdatenregister Photovoltaikanlagen registriert sind. Die Zellen in der Mitte, mit Photovoltaik-Leistung zwischen 5 und 23 kW, führen im finalen Verteilschlüsselraster (rechts) zu deutlich höheren Gewichtungen.



Abbildung 6-4: Detailbetrachtung des charakteristischen Parameters "Photovoltaik-Leistung" (links) in Gegenüberstellung mit den finalen Verteilschlüsseln (rechts)

6.2 Deutschlandweite Lastgänge für die verschiedenen Kategorien

Abbildung 6-5 zeigt den mittleren Verlauf des auf ein Fahrzeug normierten Nahverkehrsladestroms des Regionstyps „städtisch“. Links ist der Verlauf des direkten Ladens (also direkt nach Ankunft am Ladeort) und rechts des „spätest möglichen“ Ladens (also Vollladen zum Abfahrzeitpunkt).

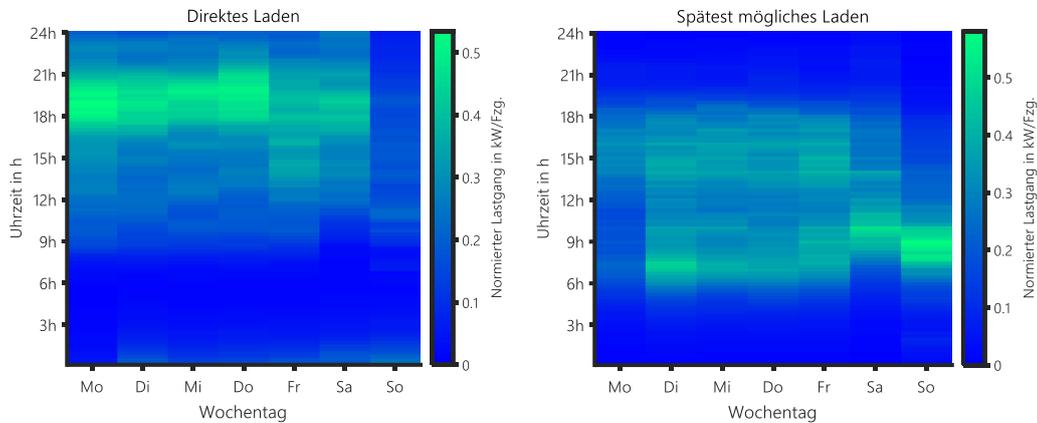


Abbildung 6-5: Mittlerer Verlauf des normierten, privaten Nahverkehrsladestroms „städtisch“

Klar ersichtlich ist die Lastspitze die bei direktem Laden abends entsteht, wenn viele Fahrzeuge nach Hause kommen und angesteckt werden. Bei einem spätest möglichen Laden verteilt sich dieser Peak aufgrund der unregelmäßigeren Abfahrzeiten besser im Verlauf des Tages. Abbildung 6-6 zeigt die gleiche Auswertung exemplarisch für den gewerblichen Verkehr im Wirtschaftszweig „Handel“.

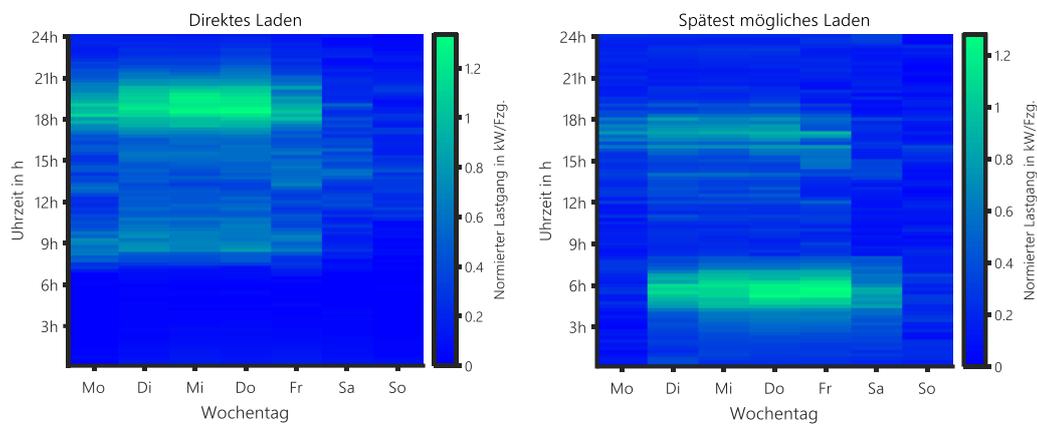


Abbildung 6-6: Mittlerer Verlauf des normierten, gewerblichen Lastgangs des Wirtschaftszweigs „Handel“ (WZ G)

Deutlich ersichtlich sind hier zum einen die ausgeprägteren Lastspitzen in den Abend- (normales Laden) bzw. Morgenstunden (spätest mögliches Laden). Die Begründung dafür liegt zum einen in den höheren unterstellten Ladeleistungen auf dem Betriebsgelände und zum anderen in der grundsätzlichen höheren Gleichmäßigkeit des Fahrverhaltens der gewerblichen Flotte während der Arbeitszeit. Abbildung 6-7 zeigt den Verlauf der Lastgänge des direkten Ladens über eine mittlere Woche bei einer angenommenen Gesamtzahl von zwölf Millionen Fahrzeugen.

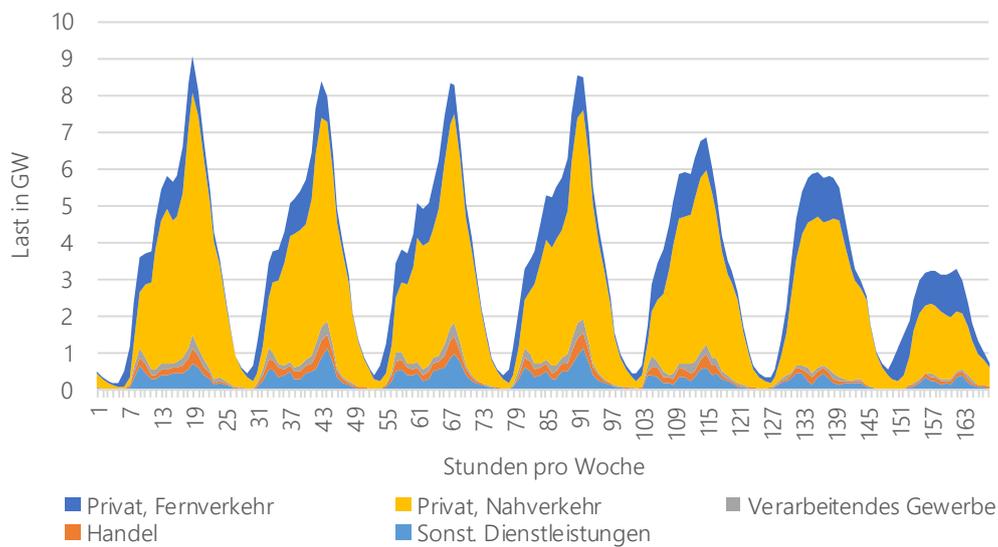


Abbildung 6-7: Lastgang aller betrachteten Typen für eine mittlere Woche bei zwölf Mio. Fahrzeugen

Dargestellt sind die beiden Lastgänge des privaten Verkehrs (Nahverkehr und Fernverkehr) sowie die Lastgänge der drei betrachteten Wirtschaftszweige „Verarbeitendes Gewerbe“, „Handel“ und „Sonstige Dienstleistungen“. Wie zu erwarten hat das private Laden zu Hause und am Arbeitsplatz (in Gelb dargestellt) den größten Anteil, wohingegen der gewerbliche Verkehr aufgrund der geringen Zulassungszahlen einen entsprechend kleineren Anteil aufweist. Insgesamt zeigen sich deutliche Ladespitzen in den Abendstunden. Abbildung 6-8 zeigt zudem die nach der Höhe der Gesamtlast sortierte Jahresdauerlinie der durch die Fahrzeuge induzierte elektrische Last.

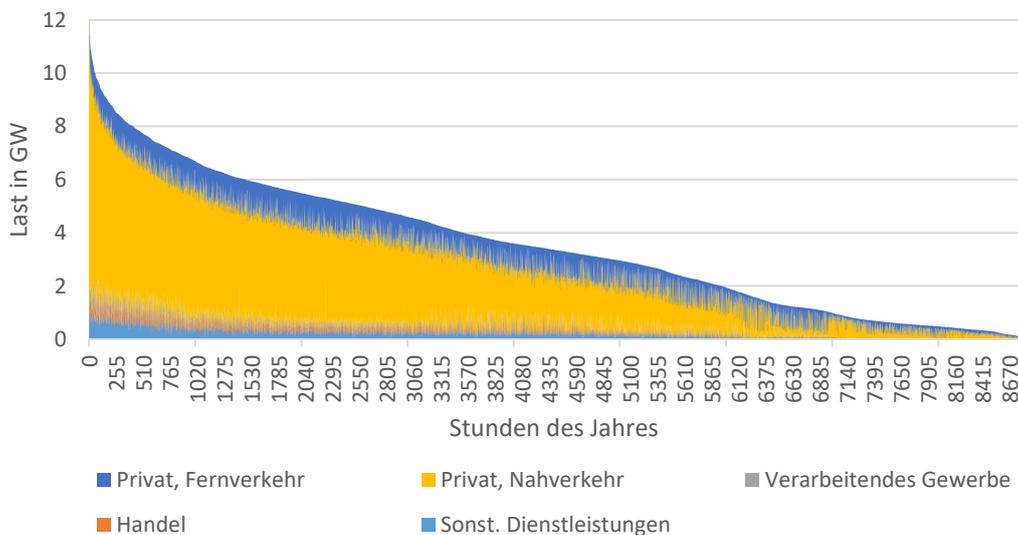


Abbildung 6-8: Jahresdauerlinie der Last durch Elektrofahrzeuge bei zwölf Mio. Fahrzeugen

Die unterstellte Fahrzeugflotte erzeugt eine Höchstlast von insgesamt 12,4 GW, welche jedoch nur sehr selten auftritt. Die mittlere Last der Elektrofahrzeuge beträgt lediglich 3,6 GW. Insgesamt verursacht die Fahrzeugflotte von zwölf Mio. Fahrzeugen einen zusätzlichen Energiebedarf von rund 31 TWh.

7 Literatur

- [1] Stolle, Wulf O. et al.: The Demystification of Car Sharing - What it is, what it's not, and what it could be - An in-depth analysis of customer perspective, underlying economics, and secondary effects. Chicago: ATKearney, 2019.
- [2] Mobilität in Deutschland 2017 - Datensatz; Bonn: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2019.
- [3] Raumordnungsregionen: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/Raumordnungsregionen/downloadangebote.html;jsessionid=80A87C0ED0C2221EB7E5B26C949465CE.live21303>; Bonn: Bauinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2015.
- [4] Fattler, Steffen; Böing, Felix; Pellinger, Christoph: Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen und deren Einfluss auf betriebsbedingte Emissionen in: IEWT 2017 - 10 . Internationale Energiewirtschaftstagung Wien. Wien: TU Wien, 2017.
- [5] OpenStreetMap (OSM) - OpenStreetMap und Mitwirkende: <http://www.openstreetmap.org/>; Cambridge: OpenStreetMap Foundation, 2004 (überarbeitet: 2019).
- [6] Datensatz zu Automatischen Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen - Abruf der Daten vom Online-Portal: https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html; Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Verkehrswesen, 2018.
- [7] Wermuth, Manfred: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010) - Schlussbericht. Braunschweig: Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, 2012.
- [8] Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Wirtschaftsabteilungen WZ 2008: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistik-nach-Themen/Beschaeftigung/Beschaefigte/Beschaefigte-Nav.html>; Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit, 2016.
- [9] Kühnel, Sven et al.: Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr - Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Berlin: Öko-Institut e.V., 2018.
- [10] Hacker, Florian: Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles - A system perspective on zero-emission heavy-duty road freight transport and challenges for a successful market entry. 2018.
- [11] Regionaldatenbank - www.regionalstatistik.de. Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014.
- [12] Marktstammdatenregister - Öffentliche Einheitenübersicht. In: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht>. (Abruf am 2019-03-07); Bonn: Bundesnetzagentur, 2019.
- [13] Ergebnisse ohne Grenzen: der Zensus-Atlas in: www.zensus2011.de (Abruf am 23.11.2015). Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015
- [14] Bestand an Pkw am 1. Januar 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten. In: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_dusl.html?nn=663524. (Abruf am 2019-11-04); Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2019.
- [15] Fahrzeugzulassungen im September 2019; Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2019.
- [16] Pellinger, Christoph; Schmid, Tobias; et al.: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Hauptbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2016
- [17] Huss, Arno; Maas, Heiko; Hass, Heinz: JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS. Ispra: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2013.
- [18] Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis. Wien: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), 2012.
- [19] Klassifikationen - Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). Wiesbaden: Statistische Bundesamt, 2008
- [20] Regett, A. et al.: Klimabilanz von Elektrofahrzeugen - Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
- [21] Henze, Veronika: Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019. In: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1>. (Abruf am 2019-12-10); New York: BloombergNEF, 2019.

- [22] Steinbuch, Maarten: Tesla Model S battery degradation data. In: <https://steinbuch.wordpress.com/2015/01/24/tesla-model-s-battery-degradation-data/>. (Abruf am 2019-12-10); Eindhoven: Steinbuch, 2018.
- [23] Tesloop's High Mileage Teslas. In: <https://www.tesloop.com/blog/2019/2/6/tesloops-high-mileage-teslas>. (Abruf am 2019-12-10); Los Angeles: Tesloop, 2019.
- [24] Romare, Mia et al.: The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries - A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017.
- [25] Emilsson, Erik et al.: Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2019.
- [26] Regett, Anika et al.: Environmental Impact of Electric Vehicles: Potential of the Circular Economy?. In: Der Antrieb von morgen 2019 (S. 121-140). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [27] Fattler, Steffen; Regett, Anika: Environmental Impact of Electric Vehicles: Influence of Intelligent Charging Strategies. In: Grid Integration of Electric Mobility 2019; München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2019.
- [28] Groscurth, Hans-Jörg: Netze BW sieht sich für Elektromobilität gut gerüstet - Netzbetreiber zieht positive Bilanz des Modellversuchs „E-Mobility Allee“ in Ostfildern – Folgeprojekte stehen in den Startlöchern. In: <https://www.netze-bw.de/News/Netze-BW-f%C3%BCr-Elektromobilitaet-gut-geruestet>. (Abruf am 2019-12-10); Stuttgart: Netze BW GmbH, 2019.
- [29] Adolf, Jörg Dr.; Rommerskirchen, Stefan Dr.: Shell PKW-Szenarien bis 2040 - Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität. Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH, 2014.
- [30] Schill, Wolf-Peter: Power System Impacts of Electric Vehicles in Germany: Charging with Coal or Renewables? - Discussion Papers. Berlin: DIW Berlin (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung), 2018.
- [31] Chèze, B. et al.: SSelecTRa - Scenarios for the electrification of transport - D4.1 Policy scenarios to sustain EV development. Paris: IFP Energies nouvelles, 2015.
- [32] Zimmer, Wiebke Dr.; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz: Renewability III - Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Berlin: Öko-Institut e. V., 2016.
- [33] Knörr, Wolfgang; Heidt, Christoph; Gores, Sabine; Bergk, Fabian: "Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035" (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014) - Endbericht. Heidelberg: Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2016.
- [34] Kasten, Peter; Mottschall, Moritz: Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016.
- [35] Timpe, Christof: Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität - Endbericht zum „Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität“ (Vergabenummer 16EM2111) im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in: 2017. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., 2017.
- [36] Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015.
- [37] Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- [38] Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [39] Bründlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena) - Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH). Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2018.
- [40] Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika et al.: Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems (Dynamis) - Hauptbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
- [41] Plötz, Patrick; Gnann, Till; Ullrich, Sandra; Haendel, Michael; Globisch, Joachim; Dütschke, Elisabeth; Wietschel, Martin; Held, Michael: Elektromobilität in gewerblichen Flotten. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2014.

8 Anhang

8.1 Metastudie

Tabelle 8-1: Bestand der verschiedenen Antriebstechnologien

KBA	BEV-Pkw	PHEV-Pkw	FCEV-Pkw	CNG-Pkw
2019	83.175	72.589	372	470.746

Tabelle 8-2: Entwicklung der BEV-Pkw

BEV-Pkw	2020	2030	2040	2050
2014 – EnRePr /BMW i-01 14/	323.000	1.755.000	3.777.000	5.514.000
2014 - Shell – Alternativ [29]	200.000	1.200.000	3.130.000	
2014 - Shell – Trend [29]	210.000	730.000	1.610.000	
2015 - DIW – BAU [30]	100.000	900.000		
2015 - DIW - EM+ [30]	100.000	1.000.000		
2015 - SSelecTRA - opt. [31]		5.197.630		
2015 - SSelecTRA - pes. [31]		1.060.359		
2016 - Renewbility – Basis [32]		2.513.000		3.203.000
2016 - Renewbility – Effizienz [32]		1.001.000		17.794.000
2016 – TREMOD [33]		1.960.000		
2016 - UBA - E+ [34]	243.791	1.629.834	11.450.915	23.849.848
2016 - UBA - FI+ [34]	33.917	434.355	1.341.568	2.744.870
2017 - Öko-Institut e.V. [35]	130.200	1.035.900		
2015 - KSZ-T [36]				3.192.000
2015 - KSZ-Z80 [36]				19.982.000
2015 - KSZ-Z95 [36]				21.619.000
2017 - LFS-T [37]				7.200.000
2017 - LFS-Z80 [37]				15.500.000
2018 - KP-T [38]				9.000.000
2018 - KP-Z80 [38]				21.000.000
2018 - KP-Z95 [38]				28.000.000
2018 - IEW-T [39]				5.300.000
2018 - IEW-Z80-EL [39]				30.200.000
2018 - IEW-Z80-TM [39]				12.100.000
2018 - IEW-Z95-EL [39]				30.200.000
2018 - IEW-Z95-TM [39]				12.100.000
2019 - Dynamis fuEL [40]	310.100	9.457.200	24.440.400	27.410.400

Tabelle 8-3: Entwicklung der PHEV-Pkw

PHEV-Pkw	2020	2030	2040	2050
2014 – EnRePr /BMW i-01 14/	212.000	1.084.000	2.180.000	3.298.000
2014 - Shell – Alternativ [29]	200.000	1.920.000	5.450.000	5.500.000
2014 - Shell – Trend [29]		1.070.000	2.620.000	
2015 - DIW – BAU [30]	300.000	2.900.000		
2015 - DIW - EM+ [30]	400.000	3.700.000		
2016 - Renewbility – Basis [32]		449.000		6.478.000
2016 - Renewbility – Effizienz [32]		5.387.000		13.928.000
2016 – TREMOD [33]		3.410.000		
2016 - UBA - E+ [34]	845.805	7.460.315	18.418.291	15.562.406
2016 - UBA - FI+ [34]	765.136	5.824.650	14.965.197	18.409.351
2017 - Öko-Institut e.V. [35]	475.600	3.798.200		
2015 - KSZ-T [36]				11.995.000
2015 - KSZ-Z80 [36]				10.301.000
2015 - KSZ-Z95 [36]				9.178.000
2017 - LFS-T [37]				8.100.000
2017 - LFS-Z80 [37]				14.600.000
2018 - KP-T [38]				16.000.000
2018 - KP-Z80 [38]				10.000.000
2018 - KP-Z95 [38]				7.000.000
2018 - IEW-T [39]				6.000.000
2018 - IEW-Z80-EL [39]				5.600.000
2018 - IEW-Z80-TM [39]				16.000.000
2018 - IEW-Z95-EL [39]				5.600.000
2018 - IEW-Z95-TM [39]				16.000.000

Tabelle 8-4: Entwicklung der FCEV-Pkw

FCEV-Pkw	2020	2030	2040	2050
2014 – EnRePr /BMW i-01 14/	1.000	10.000	205.000	1.016.000
2014 - Shell – Alternativ [29]	60.000	450.000	1.530.000	
2014 - Shell – Trend [29]	0	250.000	520.000	
2015 - DIW – BAU [30]	-	-	-	-
2015 - DIW - EM+ [30]	-	-	-	-
2016 - Renewability – Basis [32]	0	0	0	0
2016 - Renewability – Effizienz [32]	0	0	0	378.000
2016 – TREMOD [33]	0	0	0	0
2017 - Öko-Institut e.V. [35]	-	-	-	-
2018 - IEW-T [39]		900.000		2.100.000
2018 - IEW-Z80-EL [39]		1.200.000		6.600.000
2018 - IEW-Z80-TM [39]		2.200.000		12.100.000
2018 - IEW-Z95-EL [39]		1.200.000		6.600.000
2018 - IEW-Z95-TM [39]		2.200.000		12.100.000
2019 - Dynamis fuEL [40]	0	266.400	2.540.400	4.610.700

Tabelle 8-5: Entwicklung der CNG-Pkw

CNG-Pkw	2020	2030	2040	2050
2014 – EnRePr /BMW i-01 14/	410.000	2.056.000	4.799.000	7.105.000
2014 - Shell – Alternativ [29]	170.000	740.000	1.220.000	
2014 - Shell – Trend [29]	170.000	610.000	660.000	
2015 - DIW – BAU [30]	-	-	-	-
2015 - DIW - EM+ [30]	-	-	-	-
2016 - Renewability – Basis [32]	0	0	0	279.000
2016 - Renewability – Effizienz [32]	0	0	0	0
2016 – TREMOD [33]	0	0	0	0
2018 - KP-T [38]	1.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000
2018 - KP-Z80 [38]	1.000.000	2.000.000	2.000.000	3.000.000
2018 - KP-Z95 [38]	1.000.000	2.000.000	3.000.000	2.000.000
2018 - IEW-T [39]		100.000		0
2018 - IEW-Z80-EL [39]		0		0
2018 - IEW-Z80-TM [39]		6.800.000		2.300.000
2018 - IEW-Z95-EL [39]		0		0
2018 - IEW-Z95-TM [39]		6.800.000		2.300.000
2019 - Dynamis fuEL [40]	443.000	1.554.000	2.540.400	3.764.700