



Kurzstudie

Ladepprofile von elektrischen Fahrzeugen

KURZSTUDIE: LADEPROFILE VON ELEKTRISCHEN FAHRZEUGEN

MODELLIERUNG FÜR DEN SZENARIORAHMEN DES NETZENTWICKLUNGSPANS 2025

November 2024

Michael von Bonin, Steffen Meinecke, Norman Gerhardt, Jonathan Bergsträber

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE
Joseph-Beuys-Straße 8
34117 Kassel
Tel: +49 561 7294-265
www.iee.fraunhofer.de

Abschlussbericht zum Projekt:
Kurzstudie Ladeprofile von elektrischen Fahrzeugen
Modellierung für den Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2025

Herausgeber:

Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE

Joseph-Beuys-Str. 8

34117 Kassel

www.iee.fraunhofer.de

[E-Mail senden](#)

Veröffentlicht am:

20.11.2024

Bearbeiter:

Michael von Bonin

Steffen Meinecke

Norman Gerhardt

Jonathan Bergsträßer

Projektpartner:

TransnetBW GmbH

TenneT TSO GmbH

50Hertz Transmission GmbH

Amprion GmbH

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Kurzzusammenfassung	10
Summary	11
1 Einleitung und Aufgabenstellung	12
2 Status Quo und Ausblick der Elektromobilität	13
2.1 Allgemeine Verkehrsentwicklung	13
2.1.1 Güterverkehr	13
2.1.2 Personenverkehr	14
2.2 Bestandsentwicklung PKW und leichte Nutzfahrzeuge	17
2.2.1 Methodik Fahrzeugbestandsmodell	17
2.2.2 Entwicklung der Energieträgerpreise	18
2.2.3 Ergebnisse deutschlandweiter Hochlauf PKW und LNF	20
2.3 Entwicklung schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	22
2.3.1 Hintergrund	22
2.3.2 Deutschlandweiter Hochlauf	24
2.3.3 Anteil Depotladen am Verkehrsaufkommen	26
2.3.4 Anschlussleistung Autobahnladen	28
3 Entwicklung Flexibilität von E-Kfz und LNF	30
3.1 Regulatorik	31
3.2 Hochlauf der Verfügbarkeit von Komponenten für die Nutzung von V2G und DSM	31
3.2.1 Übersicht	31
3.2.2 Fahrzeug	33
3.2.3 Ladepunkt, Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)	34
3.2.4 iMSys	34
3.2.5 HEMS: Heimenergiemanagementsystem	35
3.2.6 Backend-Systeme	35
3.3 Hochlaufszenario für Ladeflexibilität und V2G	36
3.3.1 Zusammenfassung und Ergebnis Flexibilitätsszenario	36
3.3.2 Hochlauf von PV-Eigenstromoptimiert	37
3.3.3 Marktorientiertes Laden und V2G	38
3.4 PKW-Arbeitgeberladen und Nutzfahrzeuge	39
3.5 Ergebnis Hochlauf Flexibilitätstypen	39
4 Modellierung zeitlich hoch aufgelöstes Ladeverhalten und Flexibilitätspotenzial	41
4.1 Modellierung Fahrverhalten	41
4.1.1 Übersicht des Modellansatzes	41
4.1.2 Mobilitätsgruppen	42

4.1.3	Skalierungsgruppen	44
4.1.4	Nutzungstyp – Reise- und Pendlerfahrzeuge.	46
4.1.5	Zuordnung der Typtage	47
4.1.6	Auswahl Wegeketten, Parametrierung Distanzen, Startzeiten, Aufenthaltszeiten und Geschwindigkeiten.	48
4.1.7	Ergebnisse und Validierung	49
4.2	Methodik zur Ableitung von Ladeprofilen aus Fahrprofilen	52
4.2.1	Überblick	52
4.2.2	Beschreibung wichtiger Kennzahlen	52
4.2.3	Modellierung des Stromverbrauchs und der Flexibilität	55
4.2.4	Bedarfsladen an öffentlichen Stationen im Urlaub oder auf Reisen	57
4.2.5	Validierung mit gemessenen Ladeprofilen	58
4.3	Zusammenstellung und Aggregation	60
4.3.1	Notwendigkeit und Herausforderungen bei der Aggregation	60
4.3.2	Zusammenstellen der Profile in Aggregationsgruppen	62
5	Anhang	65
5.1	Verteilung Mobilitätsgruppen und Skalierungsgruppen	65
6	Literatur	67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Szenarienvergleich für die langfristige Aufteilung des Güterverkehrs auf die Verkehrsmittel.....	13
Abbildung 2: Szenarienvergleich für die Aufteilung des Personenverkehrs auf die Verkehrsmittel.	14
Abbildung 3: Entwicklung der Gesamtanzahl PKW im Vergleich.	15
Abbildung 4: Entwicklung des Verkehrsaufkommens für Personen- und Güterverkehr bis 2050.	16
Abbildung 5: Für Energiesystemoptimierung exogen vorgegebene Entwicklung des Stromverbrauchs.	16
Abbildung 6: Entwicklung des exogenen Stromverbrauchs des Bus- und Bahnverkehrs.....	17
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des TCO-Modells	18
Abbildung 8: Angesetzte Entwicklung der Energiepreise.....	19
Abbildung 9: Modellerte jährliche Entwicklung des Pkw- und LNF-Fahrzeugbestands in Deutschland.....	21
Abbildung 10: Modellerte Pkw- und LNF-Neuzulassungen in Deutschland	21
Abbildung 11: Entwicklung Anzahl SNF Deutschland.....	25
Abbildung 12: Entwicklung Fahrleistung SNF Deutschland	25
Abbildung 13: Entwicklung Stromverbrauch SNF Deutschland	26
Abbildung 14: Beispiel für die Veränderung der Ladenotwendigkeit je täglichen Fahrkilometern für ein Fahrzeug mit einer durchschnittlichen täglichen Fahrleistung von 275 km und einer Batteriereichweite von 300 km	27
Abbildung 15: Elektrischer Fahranteil in Abhängigkeit der täglichen Fahrleistung SNF, inkl. erster Ladung im Depot bei über 300 km (Quelle: Eigene Analyse und Darstellung auf Basis [ISI 2020])	27
Abbildung 16: Verteilungen von Ankunftszeiten und Ladeenergie im Depot [ef.ruhr 2021]	28
Abbildung 17: Ladeprofile für SNF an der Autobahn (tagsüber und nachts gestapelt) und im Depot (separat dargestellt).....	28
Abbildung 18: IT-Systemarchitektur auf Kundenseite – Backend, iMSys, Steuerbox, HEMS und steuerbare Verbraucher	32
Abbildung 19: Entwicklung der Flexibilitätstypen für E-Kfz bis 2045. EFZH bezieht sich in der Grafik auf selbstgenutzte (nicht vermietete) EFZH.	40
Abbildung 20: Anteile Flexibilitätstypen E-Kfz bis 2045. EFZH bezieht sich in der Grafik auf selbstgenutzte (nicht vermietete) EFZH.	40
Abbildung 21: Übersicht der Modellkomponenten für die Erstellung von Fahrprofilen/Fahrtenbüchern.....	41
Abbildung 22: Definition der Mobilitätsgruppen für die Fahrprofilmodellierung.....	43

Abbildung 23: Skizze zur Veranschaulichung der Wirkung von Skalierungsgruppen.	45
Abbildung 24: Relative Abweichung der Reishäufigkeit jedes Kalendermonats von der mittleren Reishäufigkeit im Reisedatensatz der MiD2017-Befragung	47
Abbildung 25: Haushalts-Einkommens-spezifische Verteilung der Anzahl von Arbeitstagen pro Woche.....	48
Abbildung 26: Verteilung des Pkw-Standortes im Verlauf einer durchschnittlichen Woche.	50
Abbildung 27: Kumulierte Häufigkeit (Summenfunktion) der Jahresfahrleistungen aus dem Fahrprofilgenerator und aus dem MiD2017-Fahrzeugdatensatz	51
Abbildung 28: Mittlere Aufenthaltszeit einer Auswahl von 100 modellierten Fahrzeugen.	54
Abbildung 29: Temperaturabhängiger stationärer und instationärer Leistungs- bzw. Energiebedarf eines E-Kfz.	55
Abbildung 30: SOC-Grenzen und Anschlussleistung eines aggregierten Einzelfahrzeuges bestehend aus 100 Fahrzeugen für unterschiedliches Ansteckverhalten (Ohne Zusatz: Immer angesteckt am Ladeort vs. plug2: Anstecken am Ladeort, sobald der SOC von 40 % unterschritten wurde).....	56
Abbildung 31: Gefahrene Urlaubsstrecke (rechte Achse) und repräsentatives Autobahnladeprofil(links) normiert auf ein Fahrzeug.	57
Abbildung 32: Gefahrene Urlaubsstrecke (rechte Achse) und Ladeprofil am Urlaubsort (links) normiert auf ein Fahrzeug.	58
Abbildung 33: Verteilung der Energieverbräuche je Ladevorgang nach [ElaadNL 2020].....	59
Abbildung 34: Durchschnittliche Anschlussleistung im Wochenverlauf für alle Raumtypen unterschieden zwischen den Ladeorten und nach Pendelverhalten.....	62
Abbildung 35: Durchschnittliche Ladeenergie im Wochenverlauf für alle Raumtypen in kWh unterschieden zwischen Pendlern und Nicht-Pendlern und Arbeitgeberladen.	63
Abbildung 36: Durchschnittliche Anschlussleistung im Wochenverlauf für die Raumtypen R1 und R3 in kW unterschieden zwischen Arbeitgeberladen und Heimpladen.....	63
Abbildung 37: Durchschnittliche geladene Leistung beim Sofortladen im Wochenverlauf für alle Raumtypen in kWh unterschieden zwischen Pendlern und Nicht-Pendlern.....	64
Abbildung 38: Tagesmittelwerte des SOC über den Jahresverlauf für alle Raumtypen unterschieden zwischen Fahrzeugen, die zuhause bzw. Beim Arbeitgeber laden.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung des modellierten deutschlandweiten Bestands an PKW und LNF zu anderen Studien (in Millionen)	22
Tabelle 2: Aufteilung der Fahrzeuge auf die Antriebs- und Größenklassen für die verschiedenen Jahresfahrleistungsklassen (JFL)	22
Tabelle 3: Modellierte Größenklassen SNF. Lastzug/Sattelzug (LZ/SZ)	23
Tabelle 4: Potenzialerschließung für flexibles Laden von	30
Tabelle 5: Komponenten zur Nutzung von V2G und DSM	32
Tabelle 6: Auflistung der Modelle, die Unterstützung anbieten für V2G gemäß [EV-Database].	33
Tabelle 7: Datengrundlage für die Ermittlung der Anteile der verwendeten Flexibilitätstypen.	37
Tabelle 8: Anteil der BEV mit der Fähigkeit bidirektional zu laden.	39
Tabelle 9: Auswertung einiger Kenngrößen für verschiedene Raumtypen.	43
Tabelle 10: Übersicht aller Parametervariationen für die vier Skalierungsgruppen und für LNF im Modell.	45
Tabelle 11: Zuordnung der Eigenschaften Reisefahrzeug und Pendelfahrzeug für ein Beispielhaushalt mit 3 Fahrzeugen und 2 Berufstätigen	46
Tabelle 12: Verteilung der Nutzungstypen. Bei der ersten Ziffer steht die „1“ für ein Reisefahrzeug, bei der zweiten Ziffer steht die „1“ für ein Pendelfahrzeug.	46
Tabelle 13: Wahrscheinlichkeit, je Raumtyp, dass für regelmäßige berufliche Wege nicht der Pkw verwendet wird.	48
Tabelle 14: Auswahlset von Wegeketten mit Arbeitsfahrten für Pendler und Wegeketten für sonstige Tage. Die Kodierung der Reiseziele ist "1" für Arbeit, "2" für Sonstiges, "3" für zuhause.	49
Tabelle 15: Modellierte Größenklassen Pkw/LNF und notwendige mittlere Ladeinfrastruktur. In Klammern Zweitwagen (ZW)	53
Tabelle 16: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die repräsentative Verteilung der Ladetypen.	53
Tabelle 17: Häufigkeit der Mobilitätsgruppen und der Skalierungsgruppen aus den MiD-Daten.	65

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BAST	Bundesamt für Straßenverkehr
BEV	Battery Electric Vehicle
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DSM	Demand Side Management
EEG	Erneuerbaren Energien Gesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
GNDEW	Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende
HEMS	Home Energy Management System
iMSys	intelligentes Messsystem
JFL	Jahresfahrleistung
KBA	Kraftfahrtbundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LZ/SZ	Lastzug/Sattelzug
MCS	Megawatt Charging System
MiD	Mobilität in Deutschland (Umfrage von 2017)
MSB	Messstellenbetreiber
MW	Megawatt
NCS	Night Charging System
NEP	Netzentwicklungsplan
OCPP	Open Charge Point Protocol
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PPA	Power Purchase Agreement
PV	Photovoltaik
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
TCO	Total Cost of Ownership
UBA	Umweltbundesamt
V2G	Vehicle-to-Grid
ZW	Zweitwagen

Kurzzusammenfassung

Die Studie bietet einen Überblick über die Entwicklung des Stromverbrauchs und des Flexibilitätspotenzials im Mobilitätssektor und beschreibt die Modellierung von Verbrauchszeitreihen und Zeitreihen zur Abbildung der Flexibilität. Die Studie ist gegliedert in drei wesentliche Abschnitte:

1. **Hochlauf der Elektromobilität:** Die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugbestands bis 2045 wird aufgezeigt, wobei besonders die Auswirkungen der Entwicklung der Energiepreise auf den zunehmenden Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Vordergrund stehen. Es wird projiziert, dass bis 2035 mehr als 20 Millionen BEV in Betrieb sind, und diese Zahl bis 2045 auf knapp 35 Millionen ansteigen wird.
2. **Hochlauf der Flexibilität:** Der zweite Abschnitt untersucht das Potenzial von Elektrofahrzeugen zur Bereitstellung von Flexibilität, einschließlich Vehicle-to-Grid (V2G) und eigenstromoptimiertem Laden in Verbindung mit PV-Anlagen. Angetrieben wird dieser Flexibilitätshochlauf durch regulatorische Maßnahmen und den Ausbau der Ladeinfrastruktur, wobei Anreize geschaffen werden, die Fahrzeuge nicht nur zum Laden, sondern auch zur Netzunterstützung oder zum Einsatz im Markt zu nutzen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Hochlauf der Elektrofahrzeuge und die Implementierung flexibler Ladestrategien stark von dem Hochlauf von BEV an Ein- und Zweifamilienhäusern und den entsprechenden infrastrukturellen Gegebenheiten abhängt. Während die Eigenstromoptimierung durch PV in den frühen Jahren dominiert, wächst die Bedeutung von marktgesteuerten Ladeformen mit der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen kontinuierlich.
3. Das **Modell zur Abbildung des Stromverbrauchs und des Flexibilitätspotenzials** bildet den Schwerpunkt der Studie, wobei die wichtigsten Parameter, die die Ladelast beeinflussen, wie Fahrzeuggröße, Batteriekapazität, Fahrverhalten und Ladeort, erläutert werden. Das Modell verwendet hauptsächlich Daten aus der Umfrage „Mobilität in Deutschland 2017“ (MiD), um realistische Fahrprofile für eine repräsentative Stichprobe von deutschen Autobesitzern zu erstellen. Das Modell verfügt dabei über verschiedene Spezifika, die sicherstellen, dass die Repräsentativität der Heterogenität der Flotte ausreichend abgebildet ist und sowohl das Alltagsverhalten als auch saisonale Effekte berücksichtigt sind. Ein wesentlicher Aspekt ist die **Temperaturabhängigkeit**, wobei flexible Temperaturzeitreihen historische und zukünftige Szenarien berücksichtigen, um wetterabhängige Effekte realistisch abzubilden. Die Nutzung von **Mobilitätsgruppen** nach raumtypologischen und haushaltsspezifischen Merkmalen ermöglicht eine repräsentative Aggregation und berücksichtigt demografische Veränderungen. Durch die modulare Struktur werden Fahr- und Ladeprofile sowie die Aggregation getrennt, und mithilfe von **Skalierungsgruppen** wird die Verteilung der Jahresfahrleistung präziser modelliert. Saisonalitäten, wie Urlaubszeiten und Feiertage, werden durch die Umfrage Mobilität in Deutschland 2017 und Verkehrszählungen vom Bundesamt für Straßenverkehr detailliert erfasst. Zudem können aktuelle **Mobilitätstrends**, wie mehr Autoreisen, Home-Office oder autonomes Fahren, flexibel integriert werden. In **Aggregationsgruppen** werden Ladeprofile mit ähnlicher Charakteristik zusammengefasst, um die Anzahl der zu modellierenden Speicher für spätere Analysen gering zu halten und dabei den Informationsverlust durch die Aggregation zu verringern.

Summary

The study provides an overview of the development of electricity consumption and flexibility potential in the mobility sector and describes the modeling of consumption time series and time series for mapping flexibility. The study is divided into three main sections:

1. **Ramp-up of electromobility:** The future development of the vehicle fleet up to 2045 is shown, with a particular focus on the effects of the development of energy prices on the increasing use of battery electric vehicles (BEV). It is projected that there will be more than 20 million BEVs in operation by 2035, and that this figure will rise to almost 35 million by 2045.
2. **Ramp-up of flexibility:** The second section examines the potential of electric vehicles to provide flexibility, including vehicle-to-grid (V2G) and self-power-optimized charging in conjunction with PV systems. This flexibility ramp-up is driven by regulatory measures and the expansion of charging infrastructure, creating incentives to use the vehicles not only for charging, but also for grid support or for use in the market. The results make it clear that the ramp-up of electric vehicles and the implementation of flexible charging strategies are heavily dependent on the ramp-up of BEVs at single and two-family homes and the corresponding infrastructural conditions. While electricity optimization through PV dominates in the early years, the importance of market-driven forms of charging grows continuously with the increasing spread of electric vehicles.
3. The **model for mapping electricity consumption and flexibility potential** is the focus of the study, explaining the most important parameters that influence the charging load, such as vehicle size, battery capacity, driving behavior and charging location. The model mainly uses data from the "Mobility in Germany 2017" (MiD) survey to create realistic driving profiles for a representative sample of German car owners. The model has various specific features that ensure that the representativeness of the heterogeneity of the fleet is adequately mapped and that both everyday behavior and seasonal effects are considered. A key aspect is **temperature dependency**, whereby flexible temperature time series consider historical and future scenarios to realistically map weather-dependent effects. The use of **mobility groups** according to spatial typological and household-specific characteristics enables a representative aggregation and takes demographic changes into account. The modular structure separates driving and loading profiles as well as aggregation, and the distribution of annual driving performance is modeled more precisely with the help of **scaling groups**. Seasonal factors, such as vacation periods and public holidays, are recorded in detail using the Mobility in Germany 2017 survey and traffic count data from the Federal Road Traffic Office. In addition, current **mobility trends**, such as more car journeys, working from home or autonomous driving, can be flexibly integrated. Charging profiles with similar characteristics are grouped together in **aggregation groups** to keep the number of memories to be modeled for later analyses low and to reduce the loss of information through aggregation.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Für den aktuellen zu erarbeitenden Netzentwicklungsplan 2025 sind die vier ÜNB nach §12a EnWG verpflichtet Szenarien zu entwickeln, welche die Bandbreite der wahrscheinlichen Entwicklungen für Erzeugung und Verbrauch vor dem Hintergrund der aktuellen klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung aufzeigen soll. Der zukünftige Stromverbrauch durch Elektromobilität ist ein wichtiges Flexibilitätspotenzial für den Strommarkt und sollte möglichst realitätsnah in seiner Auswirkung auf das Übertragungsnetz berücksichtigt werden.

Vor dem Hintergrund wird in dieser Kurzstudie eine Methodik vorgestellt, die sowohl den Hochlauf der Elektromobilität als auch der Flexibilität abbildet und zur Modellierung des zeitlichen Verlaufs der Last sowie des Potenzials zur Lastverschiebung und Rückspeisung von elektrischen Fahrzeugen mit folgenden Eigenschaften dient.

- **Repräsentativität und Saisonalität:** Die Ladeprofile bilden sowohl das alltägliche Verhalten als auch saisonale Aspekte repräsentativ ab. Dabei wird anhand von sozioökonomischen und raumtypologischen Eigenschaften eine ausreichende Heterogenität gewährleistet, um Lastspitzen in der Elektromobilität und im Energiesystem nicht zu unter- bzw. überschätzen. Das ermöglicht auch regional unterschiedliche Fahrmuster entsprechend abzubilden.
- **Regionale Zuordnung und repräsentative Verteilung:** Der zeitliche Verbrauch kann mit der bestehenden Modellkette anhand geeigneter Schlüssel auf Landkreise zugeordnet werden. ist somit auch auf regionaler Ebene repräsentativ sein. Das ermöglicht auch eine Kopplung der flexiblen Anteile der E-Mobilität mit dem Energiesystem
- **Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugkategorien, Fahrverhalten und Ladeinfrastruktur:** Die Modellierung ist flexibel und modular aufgebaut und kann aktuelle und neue Entwicklungen in Bezug auf Fahrverhalten, Ladepräferenzen, Fahrzeugeigenschaften und Ladeinfrastruktur und relevante Kennzahlen wie Batteriegröße, Ladeleistung, durchschnittlicher Verbrauch, Temperatureinfluss und Kalenderjahr mitberücksichtigen.

Die Ergebnisse dieser Studie sollen im kommenden Netzentwicklungsplan und in anderen netzplanerischen Untersuchungen sowie in Versorgungssicherheitsbewertungen der ÜNB genutzt werden können. Ziel ist es, den Stromverbrauch für Elektromobilität und die Flexibilität dieses Verbrauchs für verschiedene Zieljahre angemessen abzubilden. **Kapitel 2** gibt dazu zunächst einen Überblick über den Status Quo und die erwartete Entwicklung des Fahrzeugbestandes und der Elektromobilität sowie weiterer relevanter Kennzahlen. In **Kapitel 3** wird für den zukünftigen Bestand der E-Kfz-Flotte untersucht, welches Potenzial für verschiedene Arten der Flexibilität vorhanden ist. **Kapitel 4** beschreibt die Methodik zur Modellierung des zeitlichen Stromverbrauchs und Flexibilitätspotenzial der E-Kfz im Detail und zeigt einige Auswertungen, um den Mehrwert der Methodik darzustellen.

2 Status Quo und Ausblick der Elektromobilität

In diesem Kapitel wird ein umfassender Überblick über den aktuellen Stand und die zukünftige Entwicklung der Elektromobilität gegeben. Zunächst wird die allgemeine Verkehrsentwicklung betrachtet, um die übergeordnete Entwicklung im Personen- und Güterverkehr einzuordnen. Dies wird als Input für die anschließende detaillierte Analyse des Hochlaufs von Pkw, leichten Nutzfahrzeugen (LNF) und schweren Nutzfahrzeugen (SNF) verwendet.

Für die Entwicklung des Hochlaufs von Pkw und LNF wird dann das am IEE entwickelte Fahrzeugbestandsmodell [Trost 2017] verwendet, um den Einfluss relevanter Parameter (u.a. Flottengrenzwerte, Energieträgerpreise) auf die Total-Cost-of-Ownership (TCO), nach denen die Kaufentscheidung erfolgt, zu bewerten.

Für die Entwicklung der SNF wird als Grundlage das Mengengerüst des SNF-Szenarios für ein treibhausgasneutrales Deutschland in 2045 der [AGORA 2021] verwendet anstelle eines Bestandsentwicklungsmodells.

2.1 Allgemeine Verkehrsentwicklung

Für einen allgemeinen Überblick über die Verkehrsentwicklung wurden die Szenarien Klimaneutrales Deutschland 2045 von Agora [AGORA 2021], die Langfristszenarien 3 vom BMWK [ISI 2024] (beide mit Klimazielerreichung) und der Projektionsbericht 2023 des UBA [UBA 2023] (Trendentwicklung und Klimazielerverfehlung) verwendet.

2.1.1 Güterverkehr

Die Verkehrsentwicklung im Güterverkehr weist dabei geringe Differenzen zwischen den Szenarien aus (Abbildung 1).

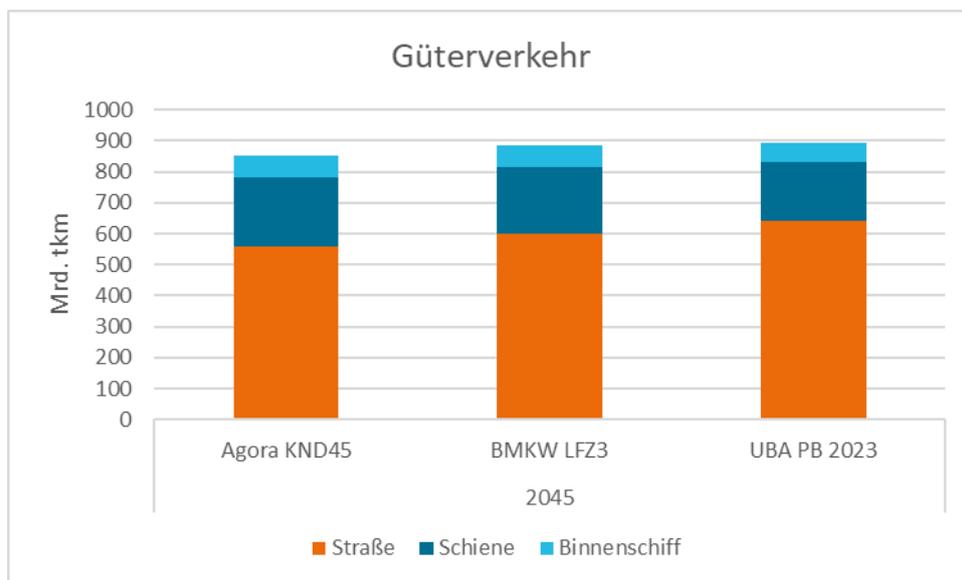


Abbildung 1: Szenarienvergleich für die langfristige Aufteilung des Güterverkehrs auf die Verkehrsmittel.

Das in dieser Studie verwendete Szenario für Güterverkehr basiert auf den Entwicklungen der Agora-Studie, da hier eine umfassende Datengrundlage vorhanden ist und moderate Anteile von Wasserstoff-Lkw berücksichtigt wurden. Der Anteil der Oberleitungs-Lkw aus dem KND45-Szenario wurde jedoch als batterieelektrische Lkw (BEV-LKW) modelliert. Für die weiteren Analysen des

Energieverbrauchs (siehe Kapitel 2.3) ergibt sich somit ein Verkehrsvolumen von 550 Mrd. Tonnenkilometern (tkm), das auf den Straßenverkehr entfällt und durch schwere Nutzfahrzeuge (SNF) transportiert wird.

2.1.2 Personenverkehr

Im Personenverkehr sind die Unterschiede zwischen den Szenarien dagegen sehr groß (Abbildung 2). Hier stellt das LFZ3 eher ein Trendszenario in Bezug auf Pkw dar, während das KND45 eine sehr hohe Verkehrsverlagerung auf Schiene, ÖPNV und Radverkehr unterstellt. Die zur Umsetzung dieses theoretischen Verlagerungspotenzials notwendigen Maßnahmen sind anspruchsvoll (Umsetzungsgeschwindigkeit Infrastruktur, notwendige öffentliche Investitionsbedarfe, regulatorische Rahmenbedingungen) für eine wahrscheinliche Realisierung wird weshalb von einem mittleren Szenario ausgegangen, woraus ein mittlere Strombedarf für Pkw resultiert.

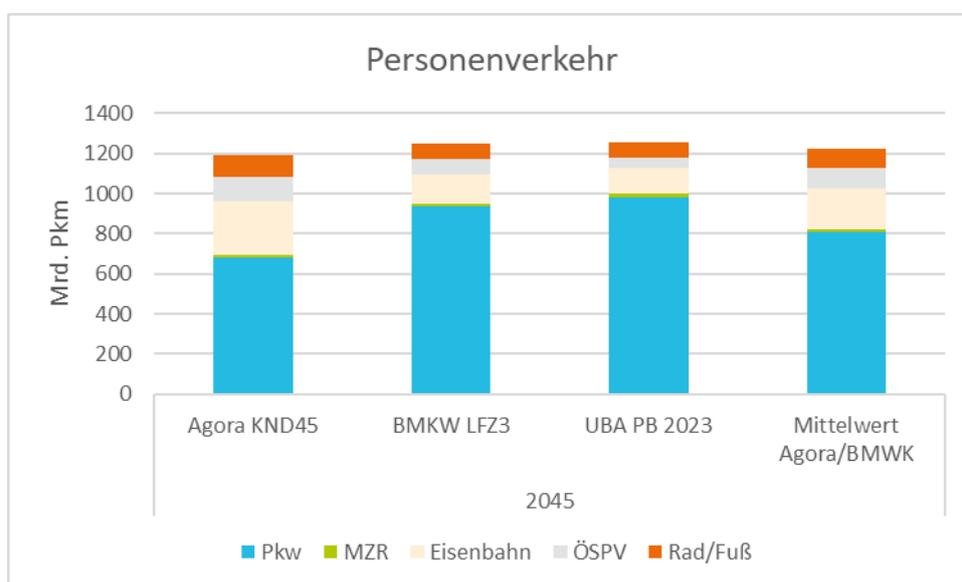


Abbildung 2: Szenarienvergleich für die Aufteilung des Personenverkehrs auf die Verkehrsmittel.

Diese Szenarien sind jedoch aggregierte Betrachtungen für Deutschland. Bei genauerer Betrachtung der regionalen Entwicklungen zeigt sich, dass aufgrund des demografischen Wandels und der zunehmenden Verstädterung die hohe Zahl an Fahrzeugen in Deutschland bis 2045 möglicherweise nicht realistisch ist. Insbesondere die Fahrzeugzulassungen pro Kopf hängen stark von der Größe der Kommune ab. Daher stellt sich die Frage, ob die Veränderung des Modal-Split (Verkehrsanteile verschiedener Verkehrsmittel) nur durch politische Maßnahmen bedingt ist oder ob auch der Bevölkerungsrückgang und die Überalterung in ländlichen Gebieten eine Rolle spielen. Diese Wechselwirkungen einer Grobregionalisierung auf alle Einzelgemeinden Deutschlands unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung und der Trendentwicklung bei Zulassungszahlen in Ballungsräumen wurde iterativ vom Fraunhofer IEE geprüft. Als Zielgröße wird im Fahrzeugbestandsmodell des Fraunhofer IEE AgentCarID eine Zielgröße von 40 Mio. Pkw und LNF entsprechend dem Szenario KND45 der Agora Energiewende als maximal mögliche Grenze angestrebt (Abbildung 3).

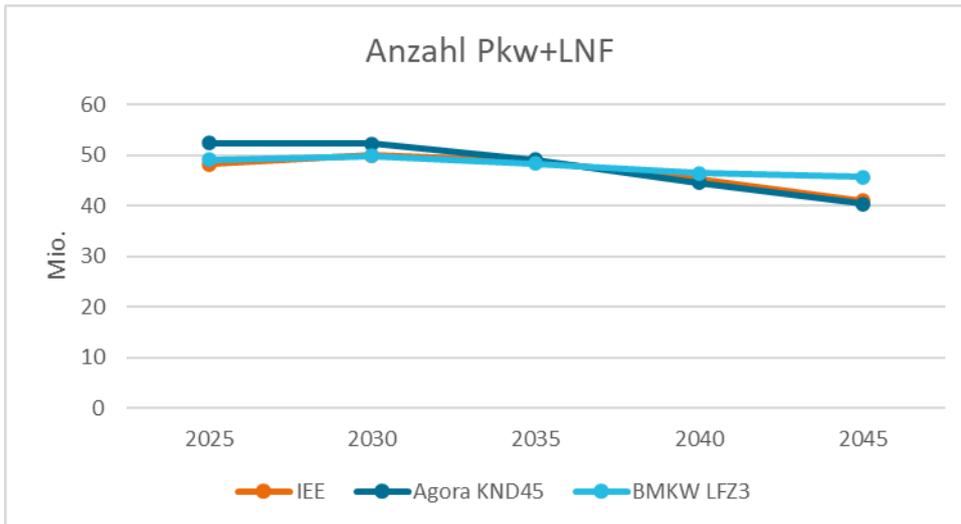
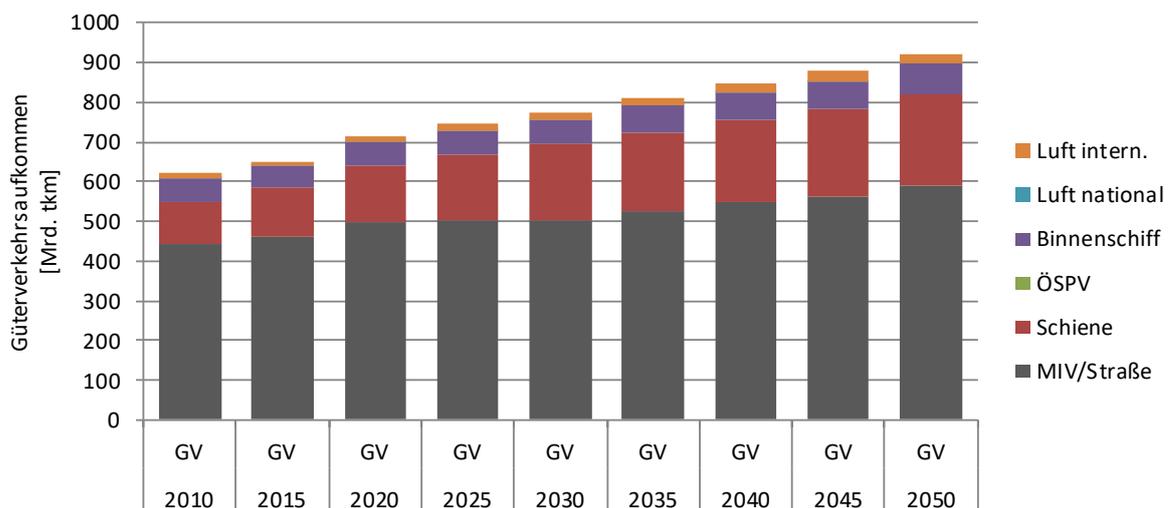


Abbildung 3: Entwicklung der Gesamtanzahl PKW im Vergleich.

In Hinblick auf das Verkehrsaufkommen ist der Rückgang der jährlichen Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) von Pkw im KND45 durch weitergehende Maßnahmen überproportional hoch. Deswegen wird für diese Studie ein Mittelwert aus KND45 und LFZ3 abgeleitet (siehe auch Abbildung 2, rechter Balken für Personenkilometer). Dabei werden auch die Maßnahmen im Bereich Ride-Sharing und Ride-Pooling im KND45 nicht berücksichtigt (Einfluss auf den Besatzungsgrad bzw. Anzahl Personen pro Fahrt) und auch bei den Anteilen der Größenklassen der Pkw (klein, mittel, groß) wird die historische Verteilung beibehalten.

Damit ergibt sich folgende in Abbildung 4 dargestellte angenommene Entwicklung des Güter- und Personenverkehrs als Inputgröße für die Modellierung von Stromverbrauch und Lade- und Flexibilitätsprofilen.



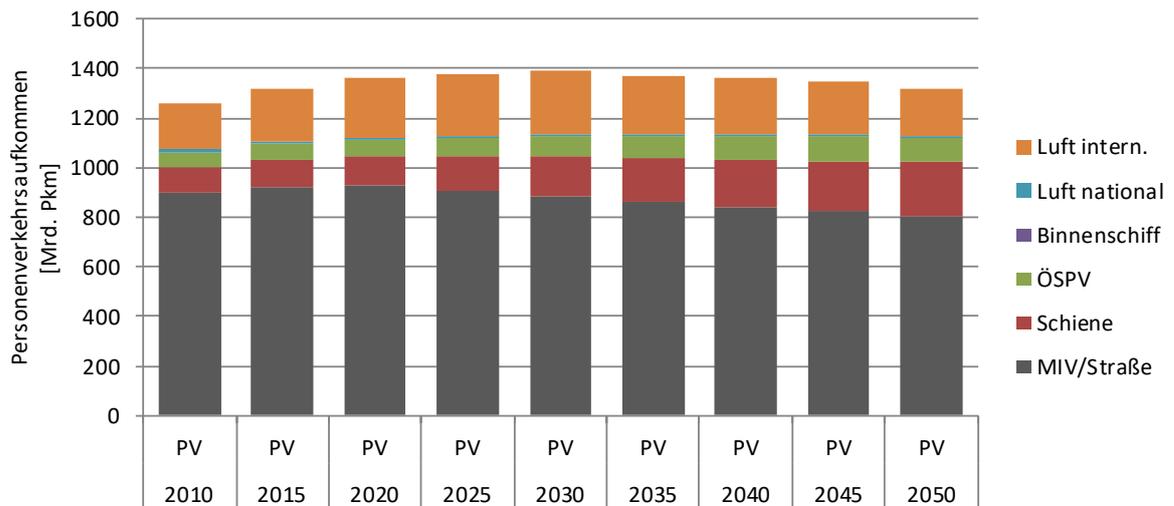


Abbildung 4: Entwicklung des Verkehrsaufkommens für Personen- und Güterverkehr bis 2050.

Der Verbrauch von Pkw (klein, mittel, groß) und LNF (Strom und Kraftstoff) ergibt sich aus der Simulation der Fahrzeugbestandsentwicklung. Für SNF (Strom, H2 und Kraftstoff) wird die Bestandsentwicklung auf Basis des KND45-Szenario abgeleitet (Unterscheidung N2, N3s, N3l / Depotladen und Autobahnladen).

Der Verbrauch aller anderen Verkehrsmittel wird auf Basis der Verkehrsentwicklung (s. Abbildung 1 und Abbildung 2) abgeleitet und exogen vorgegeben (Abbildung 5)

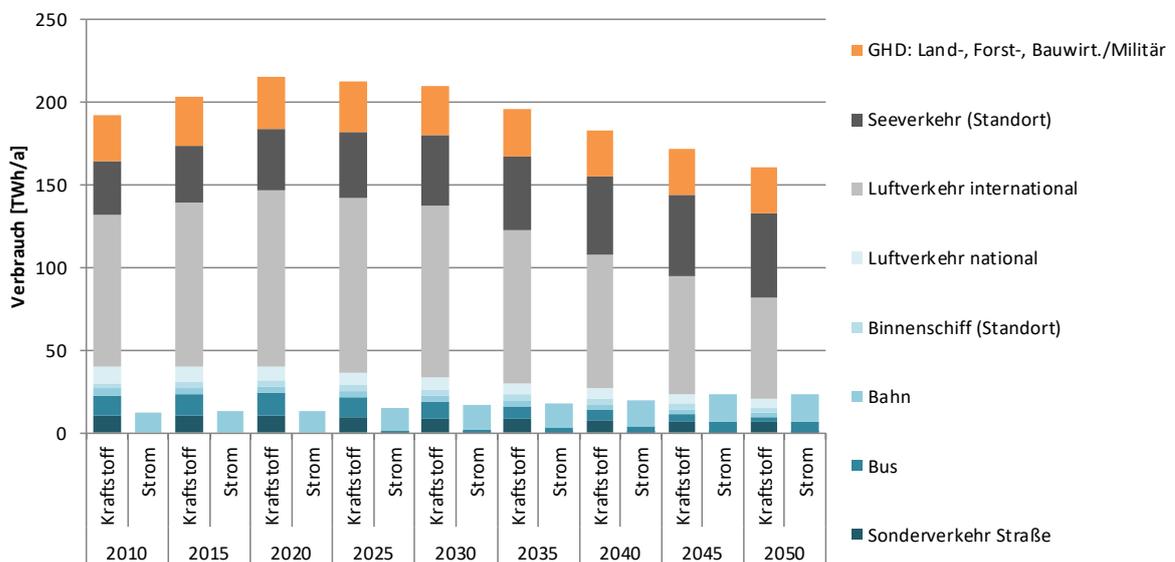


Abbildung 5: Für Energiesystemoptimierung exogen vorgegebene Entwicklung des Stromverbrauchs.

Als weiterer Stromverbrauch ist hierbei der Bahnverkehr und zukünftig auch der Busverkehr relevant, ebenfalls abgeleitet aus dem Mittelwert aus KND45 und LFZ3 (Abbildung 6).

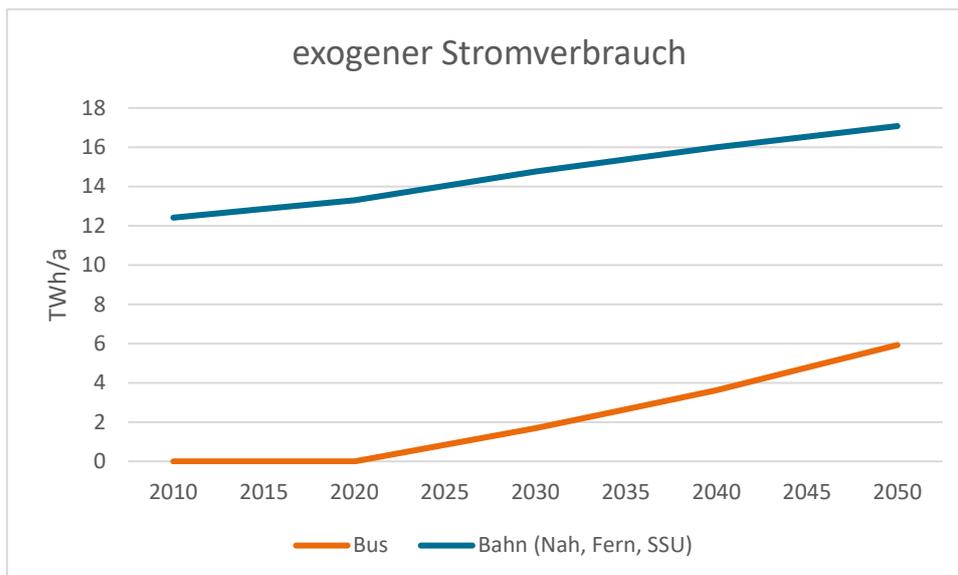


Abbildung 6: Entwicklung des exogenen Stromverbrauchs des Bus- und Bahnverkehrs.

2.2 Bestandsentwicklung PKW und leichte Nutzfahrzeuge

Die Entwicklung des Fahrzeugbestandes hängt von einer Vielzahl von Faktoren mit unterschiedlich großem Einfluss ab. So hat z.B. das für 2035 angesetzte Verbot von Neuzulassungen von Verbrennungsmotoren einen starken Einfluss auf die Entwicklung des Fahrzeugbestands. Einen weiteren Einfluss stellen die Energieträgerpreise dar. Die Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom- und Energieträger hängt wiederum stark von regulatorischen Vorgaben sowie der Entwicklung des Energiesystems im nationalen und internationalen Raum ab. Wichtige Entwicklungen und Trends werden hier aufbereitet, dargestellt und zu einem schlüssigen Zielbild zusammengesetzt.

2.2.1 Methodik Fahrzeugbestandsmodell

Für die Erstellung deutschlandweiter Markthochlaufszenerarien der Elektromobilität wurde das bestehende, am Fraunhofer IEE entwickelte, TCO- (Total cost of ownership-) Fahrzeugbestandsmodell aktualisiert und weiterentwickelt. Das Modell erlaubt die quantitative Ermittlung von zukünftigen Fahrzeugbeständen, indem es auf Basis umfangreicher Eingangsparameter eine detaillierte Simulation der Marktdurchdringung vielfältiger Fahrzeugantriebe ermöglicht. Der Modellierungsansatz basiert auf einem disaggregierten Nachfragemodell kombiniert mit einem dynamischen Stock-Flow-Ansatz, bei dem die individuelle Kaufentscheidung anhand von Vergleichskalkulationen der Gesamtkosten erfolgt (siehe dazu Abbildung 7). Um Fahrzeugbestandsszenarien daraus abzuleiten, wurde mithilfe des Fahrzeugbestandsmodells ein jährlicher Simulationslauf durchgeführt (d.h. für jedes Jahr erfolgt eine einzelne Simulation des Fahrzeugbestands) und die Entwicklung differenziert nach Größenklassen, Antriebstechnologien und Kraftstoffarten dargestellt. Mithilfe dieses Modells und einem detailliert ausgearbeiteten regulatorischen Rahmen wurde die jahresscharfe Entwicklung simuliert, die auch als Input für das Modell zur zeitlichen Abbildung des Ladeverhaltens dient.

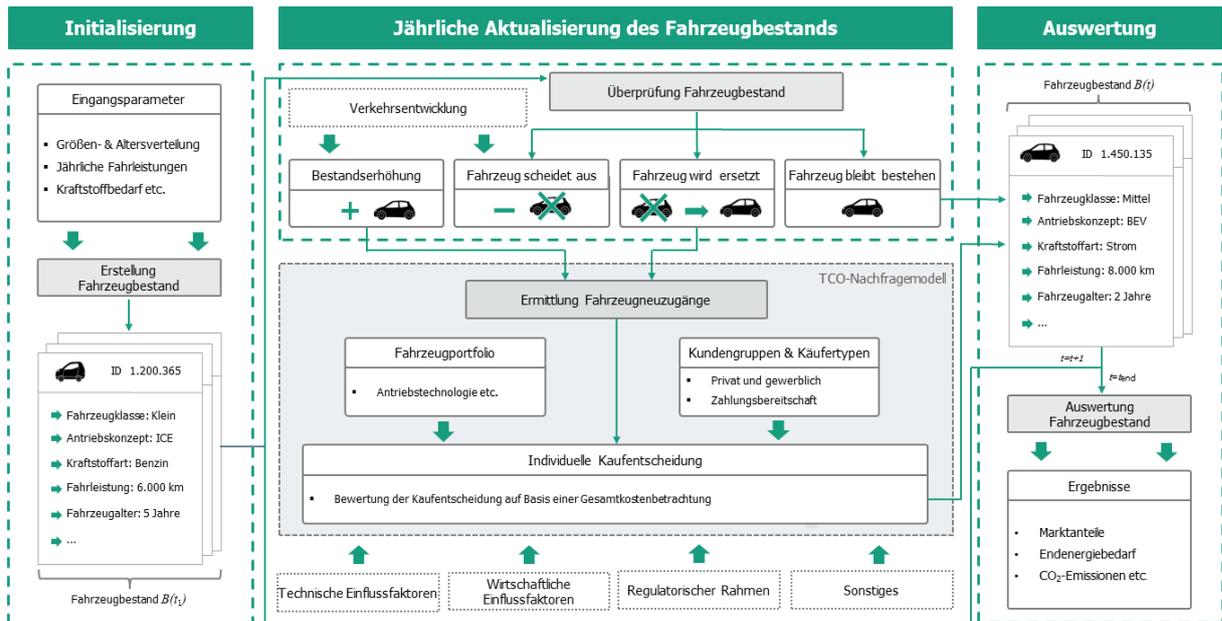


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des TCO-Modells

Die Entwicklung des Fahrzeugbestandes hängt von einer Vielzahl von Faktoren mit unterschiedlich großem Einfluss ab. So ist das für 2035 angesetzte Verbot von Neuzulassungen von Verbrennungsmotoren eine Zielmarke für die reale Marktentwicklung des Fahrzeugbestands. Es wird dabei angenommen, dass sich dies in der Preispolitik der Hersteller widerspiegelt. Daneben ist die Entwicklung der Energieträgerpreise von großer Bedeutung. Weitere Einflüsse für die Flottenentwicklung sind Annahmen zu Marktverfügbarkeit, Akzeptanz und Reichweitenanforderungen von BEV sowie Förderpolitik wie zum Beispiel Kaufprämien oder Steuervorteile.

2.2.2 Entwicklung der Energieträgerpreise

Die Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom- und Energieträger hängt stark von regulatorischen Vorgaben sowie der Entwicklung des Energiesystems im nationalen und internationalen Raum ab. Für die Bestimmung des Fahrzeughochlaufs ist ein in sich stimmiger Rahmen notwendig, der auf prognostizierten zukünftigen Entwicklungen beruht. Heute macht die Mineralöl- bzw. die Energiesteuer für Benzin und Diesel einen hohen Anteil an den Einnahmen des Fiskus aus. Für die Ausgaben des Staates im Verkehrsbereich und den höheren Zahlungsbereitschaften für Mobilität ist es deshalb notwendig, dass bei steigenden Anteilen von E-Mobilität und fallenden Anteilen von Benzin- und Dieselmotoren auch hier zukünftig Einnahmen generiert werden. Die Annahmen für die angesetzte Entwicklung der Energieträgerpreise sind in Abbildung 8 zusammengefasst und werden im Folgenden erläutert.

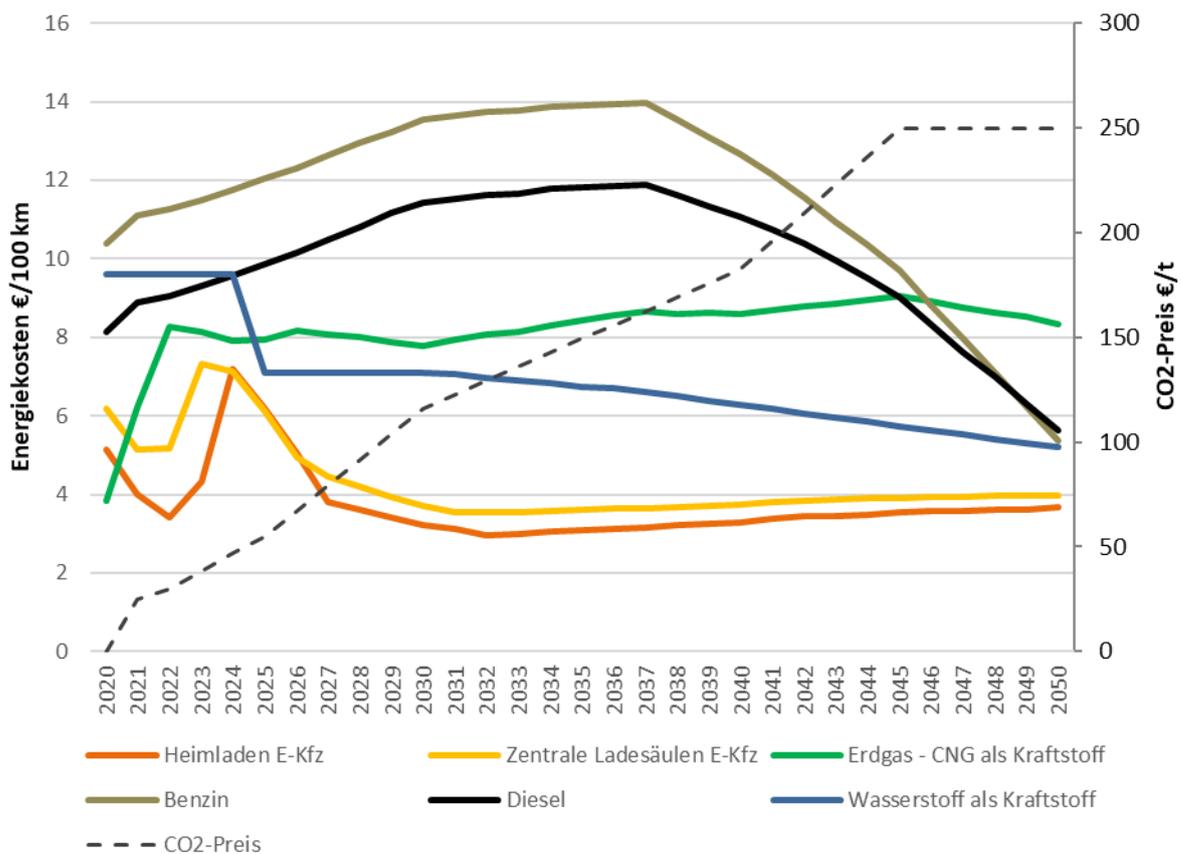


Abbildung 8: Angesetzte Entwicklung der Energiepreise

Strompreise

Die grundsätzliche Entwicklung des Strompreises für Ladestrom ist mit Unsicherheiten behaftet. Durch den Wegfall der EEG-Umlage stehen hier insbesondere die Netzentgelte als auch der Börsenpreis im Fokus.

Beim **Börsenstrompreis** ist mit zunehmender Durchdringung von Wind- und Solarstrom in Europa eine Stabilisierung der mittleren Strompreise auf dem Niveau der Vollkosten von EE-Strom zu erwarten, trotz steigender CO₂-Preise, aber mit hohen Schwankungen innerhalb eines Jahres. Hohe Übergewinne für EE-Strom sind in einem funktionierenden Strommarkt nicht zu erwarten oder werden wahrscheinlich regulatorisch eingegrenzt. Extreme Endverbraucherpreise des Jahres 2022 und 2023 werden deswegen als eine Ausnahmerecheinung gewertet.

Im Bereich der **Netzentgelte** in der Niederspannung wird in dem Szenario unterstellt, dass E-Kfz im Rahmen des Smart-Meter-Rollouts mittelfristig häufiger und höhere Reduktionen als unterbrechbare Stromverbraucher nach §14a erhalten. Langfristig werden aber aufgrund der hohen Durchdringung von unterbrechbaren Stromverbrauchern diese Reduktionen abgebaut, weil sie sonst stark zu Lasten anderer Verbraucher gehen würden und die Netzengpässe sich mit den Fahrzeugen auch mit weniger starken Anreizen beheben lässt. Neben der hier berücksichtigten horizontalen Kostenwälzung (Ausgleich zwischen Netzbetreibern) stellt sich zusätzlich die Frage, welche Entwicklung der Kostenwälzung zwischen den Spannungsebenen (vertikale Kostenwälzung, Ausnahmen für die energieintensive Industrie) unterstellt werden. Hier wird ein mittleres Szenario unterstellt.

Um den Preis für öffentliches Laden abschätzen zu können wird eine „extra“ Marge zur **Ladeinfrastruktur-Refinanzierung** an öffentlichen Ladesäulen angenommen. Basis hierfür sind unterschiedliche Preismodelle verschiedener öffentlicher Ladesäulenbetreiber. Durch eine höhere zukünftige Auslastung der Ladesäulen wird diese Marge langfristig sinken.

Preise für fossile Kraftstoffe

Mittelfristig wird eine inflationsbedingte Reduktion und langfristig ein sukzessiver Wegfall der Mineralöl- bzw. der Energiesteuer für Benzin und Diesel unterstellt, was die Abnahme der Benzin- und Dieselpreise ab 2037 in Abbildung 8 erklärt.

Um das Fiskalaufkommen in der Höhe zu erhalten, braucht es dafür eine Alternative. Eine technologie neutrale Option für den Wegfall der **Mineralölsteuer** wäre die Einführung einer kilometerabhängigen KFZ-Steuer.

Doch aufgrund des hohen **CO₂-Preises**, der den Benzin- und Dieselpreisen zugerechnet ist, und der damit verbundenen zusätzlichen Kosten bzw. des vergleichbaren Kostenniveaus von synthetischen Kraftstoffen bleibt die Stromnutzung (insbesondere beim Heimpladen) wirtschaftlicher (Abbildung 8). Der CO₂-Preis orientiert sich langfristig an den CO₂-Vermeidungskosten für synthetisch erzeugten Kraftstoff („Power-to-Liquid“, P2L).

Die Beschaffungspreise für fossile Kraftstoffe orientieren sich an dem „Sustainable Development Szenario“ des World Energy Outlook [IEA 2022] bzw. langfristig an den P2L- und P2G-Preisprognosen. Als durchschnittlicher Verbrauch wurde für Diesel 7,0 l/100km, für Benzin 7,7 l/100 km und für Erdgas 4,2 kg/100 km angenommen [BMDV 2023].

Wasserstoffpreis

Wasserstoffpreis: Die Wasserstoffpreise betragen 2020 an Tankstellen 9,50 €/kg (285 €/MWh) „grauen“ Wasserstoffs. Es ist davon auszugehen, dass die Beschaffungspreise langfristig stark sinken. Es wird von einem Absinken bis 2050 der Preise für importieren grünen flüssigen Wasserstoff ausgegangen, sodass der Endverbraucherpreis auf ca. 160 €/MWh sinkt. (Anhaltwerte für den Import liefert der globale Power-to-X Atlas des IEE [Pfennig 2023]); da hier Endverbraucherpreise ins Modell gehen, werden noch Margen, Verteilung und Vertrieb auf die Preise draufgeschlagen.

2.2.3 Ergebnisse deutschlandweiter Hochlauf PKW und LNF

Die modellierte Entwicklung des Fahrzeugbestandes geht von den Bestandswerten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) aus dem Jahr 2021 aus [KBA 2022] und nähert sich in der Gesamtanzahl im Jahr 2030 an ca. 50 Millionen an und nimmt bis zum Jahr 2050 u. a. aufgrund des demografischen Wandels auf ca. 40 Millionen Pkw und LNF ab (siehe Abbildung 9). Im Model wurde dabei die Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen so vorgegeben, dass diese Eckzahlen für 2030 und 2045 in der Bestandsentwicklung erreicht wurden. Wie bei der Beschreibung für das Verkehrsaufkommen bereits erläutert, spielt für den angenommen Fahrzeugrückgang auch eine Rolle, dass die Anzahl von Fahrzeugen in den Großstädten etwa aufgrund vermehrter Nutzung des Öffentlichen Personennahverkehrs und vermehrter Carsharing-Angebote gegenüber heute überproportional sinkt [AGORA 2021] und zukünftig mehr und jüngere Personen in Ballungsräumen wohnen

und weniger und älteren Personen im ländlichen Raum. Diese Wechselwirkungen wurden im Rahmen der Grobregionalisierung iterativ geprüft.

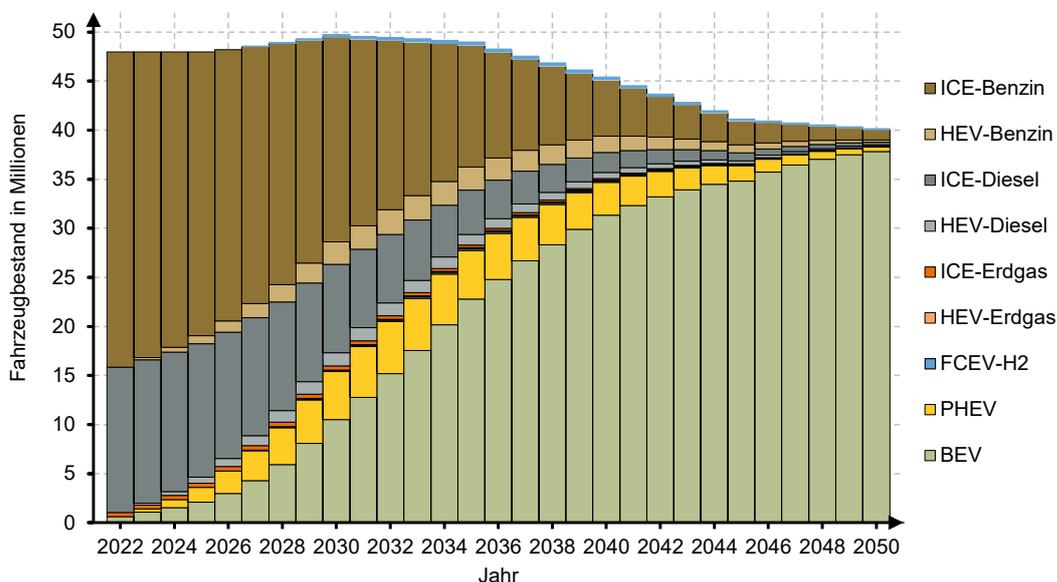


Abbildung 9: Modellierter jährlicher Entwicklung des Pkw- und LNF-Fahrzeugbestands in Deutschland

Abgesehen von diesen Vorgaben zur Gesamtanzahl ergibt sich die Entwicklung des Pkw- und LNF-Bestandes aus den modellierten jährlichen Neuzulassungen. Für diese wurde eine Kalibrierung an den tatsächlichen KBA-Zahlen von 2022 vorgenommen. Ein Zulassungsstopp für sämtliche Verbrennungsmotoren ab dem Jahr 2035 wird auch von der ermittelten Marktentwicklung wiedergegeben (siehe Abbildung 10). Die Annahme einer kontinuierlichen Anpassung der Beschaffungspreise für BEV und die erwartete Entwicklung der Energieträgerpreise führt dazu, dass auch schon vor 2035, die Neuzulassungen für Verbrenner stark reduziert sind.

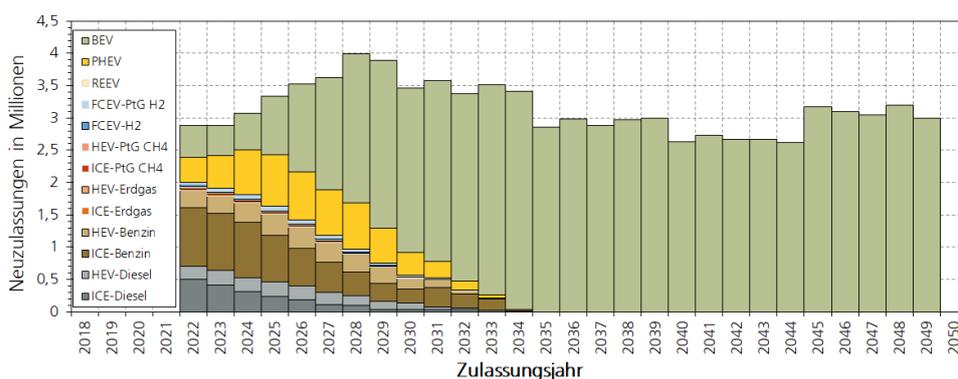


Abbildung 10: Modellierter Pkw- und LNF-Neuzulassungen in Deutschland

Damit ergeben sich die in Tabelle 1 mit „IEE24“ bezeichneten Fahrzeugbestandszahlen. Diese sind den entsprechenden Zahlen aus Agora-Studie zum Treibhausgasneutralen Deutschland 2045 [AGORA 2021] und dem NEP-Szenario [NEP 2023] gegenübergestellt. Für das Jahr 2045 ergeben sich z.B. 1,57 PHEV + 34,82 BEV = 36,39 E-Pkw. Eine Vergleichbarkeit ist hierbei grundsätzlich gegeben. Im Detail weist die Agora-Studie langfristig in Summe etwas weniger Fahrzeuge auf, während die eigenen Daten mit dem letzten NEP fast deckungsgleich sind.

Tabelle 1: Gegenüberstellung des modellierten deutschlandweiten Bestands an PKW und LNF zu anderen Studien (in Millionen)

	IEE24	Agora	Polit. Ziel	IEE24	Agora	IEE24	NEP 2023	IEE24	Agora	NEP 2023
Jahr	2030			2035		2037		2045		
Diesel	10,37	12		5,59	7	4,22		1,13	1	
Benzin	23,19	24		14,74	15	11,40		3,27	3	
PHEV	4,91	5		4,69	7	4,42	4	1,57	3	2
BEV	10,49	9	15	22,79	17	26,69	27	34,82	30	35
davon LNF	1,17			2,07		2,39	2	2,61		3
Pkw insgesamt	49,98	50		48,90	46	47,41		40,97	37	

Tabelle 2 zeigt die Verteilung der Fahrzeuge auf verschiedene Antriebsarten und Größenklassen, differenziert nach Jahresfahrleistungsklassen (JFL). Die Übersicht verdeutlicht, wie sich Fahrzeugtypen und -größen in Abhängigkeit von der jährlichen Fahrleistung verteilen. Dabei ist Fahrzeuge mit geringerer Fahrleistung eher dem kleinen Segment oder den PHEV zugeordnet werden, während bei hohen Fahrleistungen mittlere und große BEV's den größten Anteil ausmachen.

Tabelle 2: Aufteilung der Fahrzeuge auf die Antriebs- und Größenklassen für die verschiedenen Jahresfahrleistungsklassen (JFL)

Antrieb	BEV			PHEV		
Größenklasse	Klein	Mittel	Groß	Klein	Mittel	Groß
< 7000	0.42	0.05	0.05	0.00	0.26	0.21
7000 - 14000	0.35	0.30	0.18	0.03	0.13	0.03
>14000	0.14	0.39	0.21	0.02	0.14	0.11

2.3 Entwicklung schwere Nutzfahrzeuge (SNF)

2.3.1 Hintergrund

Es bestehen große Unsicherheiten aufgrund der Dynamik der Marktentwicklung (Geschwindigkeit und Technologie). Im Vergleich zu Pkw und LNF besteht derzeit für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) bisher kein Verbrennerverbot ab 2035, sondern eine Reduktion um 65 %. Während im [NEP 2023] eine Kombination der Antriebe von BEV-Lkw (20,3 TWh in 2045 Szenario B), Oberleitungs-Hybrid-Lkw (26,3 TWh in 2045 Szenario B) und FCEV-Lkw mit in Summe 47,1 TWh Stromverbrauch unterstellt wurde, fokussiert die aktuelle Markterwartung stark auf BEV-Lkw.

Neben der Frage des Markthochlaufs für Deutschland stellt sich die Frage, wo die elektrischen Lkw geladen werden. Dabei ist insbesondere die Konzentration von Ladeinfrastruktur an den Autobahnen herausfordernd, während das Laden in den Depots der Speditionen breiter in der Fläche verteilt ist. Dabei soll eine gewisse Anschlussfähigkeit an die Szenarien des NEP gewahrt bleiben und kein Extrem-Szenario gerechnet werden. Gleichwohl soll die Marktdynamik im Sinne einer Aktualisierung berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zum Pkw/LNF-Markt wird kein Agentenmodell bzw. Flottenbestandsmodell eingesetzt, um die Verkehrsträger-Entwicklung detailliert zu bestimmen. Stattdessen wird als Grundlage das Mengengerüst des SNF-Szenarios für ein treibhausgasneutrales Deutschland in 2045 der [AGORA 2021] verwendet. Hierbei sind im Jahr 2030 61% der Neuzulassungen CO₂-neutrale Fahrzeuge und im Jahr 2035 93 %. Im Flottenbestand sind dagegen 2030 erst 15% CO₂-neutral und 2035 47 %. Da diese Fahrzeuge aber in den ersten zwei Dekaden des Markthochlaufs höhere Fahrleistungen als das Mittel der Fahrzeuge erreichen, liegt ihr Fahranteil 2030 bei 25 % und 2035 bei 68 %. Für den Aufbau einer Oberleitungs-Infrastruktur bedarf es politischer Mehrheiten, die derzeit nicht absehbar sind. Deswegen werden die Anteile des Oberleitungs-Lkw im Szenario als BEV interpretiert.

Ein grundsätzliches Problem der Modellierung sind die fehlenden Daten des hohen Anteils ausländischer Lkw in Deutschland (ca. 40 %). Daher wurde nationale Daten zu größenspezifischen Zulassungen und Fahrleistungen verwendet und für die Ermittlung des Gesamtverkehrsaufkommens hochskaliert. Wir ordnen hierbei die SNF in drei Größenklassen, sowie nach Depotladen und Autobahnladen ein und bestimmen auf Basis der Fahrzeuganzahl und den spezifischen Fahrleistungen mittels Literaturannahmen zu Batteriegrößen und spezifischen Verbrauch [IFEU 2021] die Entwicklung des gesamten Stromverbrauchs inkl. dem Laden ausländischer SNF in Deutschland. Grundlage für den Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur ist die aktuelle Studie von [ef.ruhr 2021], eine Übersicht der modellierten Größenklassen zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Modellierte Größenklassen SNF. Lastzug/Sattelzug (LZ/SZ)

	N2: 3,5-12 t	N3: 12-26 t	N3S: 26-40 t (LZ/SZ)
			
Depotladen	100 kW je Ladepunkt		
Autobahnladen	900 kW je Ladepunkt „Megawatt Charging System“) – MCS 100 kW je Ladepunkt „Night Charging System“ – NCS		

Es wird ein Verhältnis von 1:2,5 hinsichtlich der Ladenenergien von MCS zu NCS angesetzt.

2.3.2 Deutschlandweiter Hochlauf

Im Folgenden ist das Ergebnis des deutschlandweiten Hochlaufs im direkten Vergleich zwischen Depotladen und Autobahnladen dargestellt, jeweils für Anzahl Fahrzeuge, ihre Fahrleistung und ihren Stromverbrauch. Der steigende Gesamtverbrauch, ergibt sich durch den angenommenen höheren Transportbedarf (siehe Abbildung 4). Zudem wird deutlich, dass die leichteren Fahrzeuge zwar eine hohe Anzahl aufweisen und überwiegend im Depot geladen werden (Abbildung 11), die mittlere Fahrleistung (Abbildung 12) und ihr summierter Stromverbrauch (Abbildung 13) aber gering sind. Die Last- und Sattelzüge dominieren die Fahrleistung sowie den Verbrauch. Aber auch hier ist der Anteil des Depotladens in Summe größer als der des Autobahnladens.

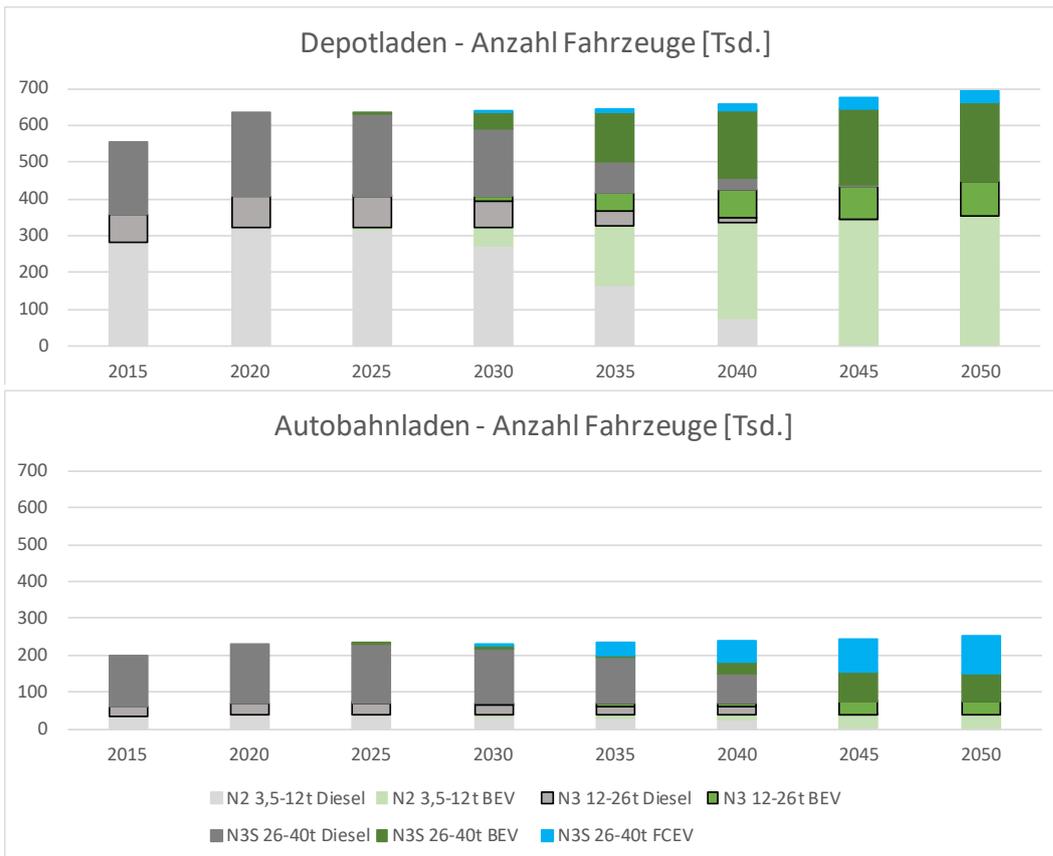


Abbildung 11: Entwicklung Anzahl SNF Deutschland

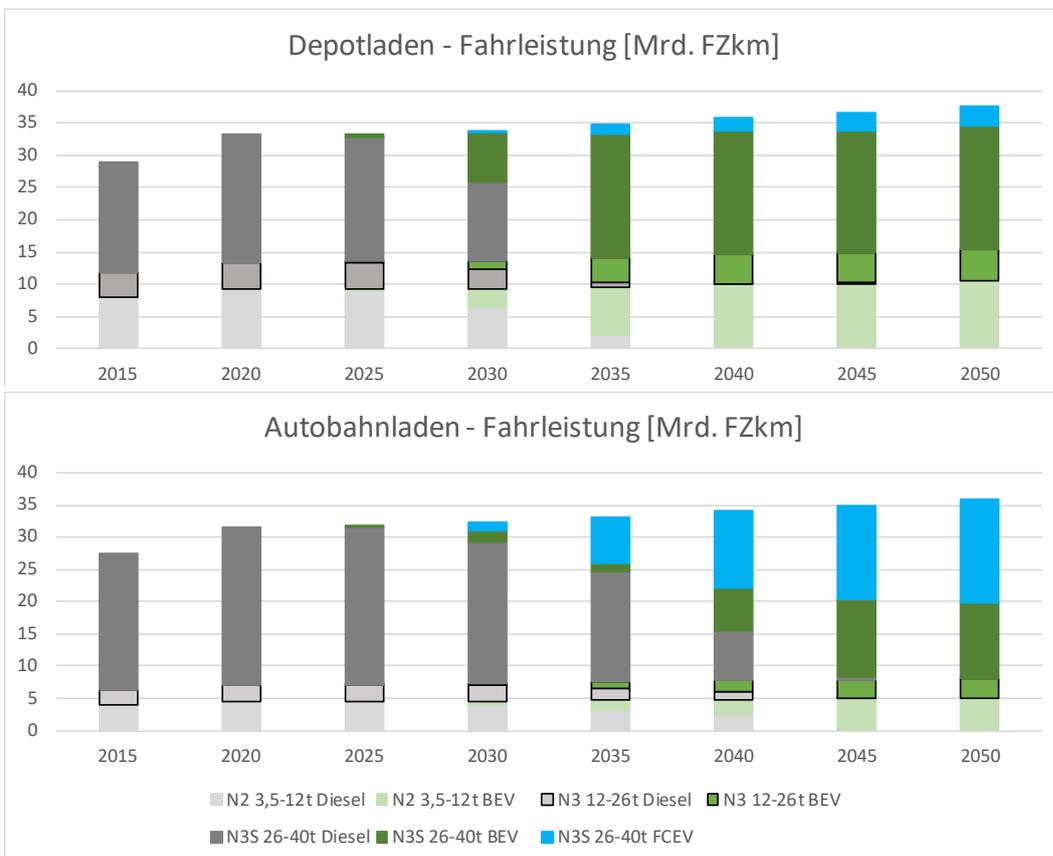


Abbildung 12: Entwicklung Fahrleistung SNF Deutschland

In Summe ergibt sich für SNF ein langfristiger jährlicher Stromverbrauch von 56 TWh in 2045 mit 61 % im Depot (im Vergleich zu 47 TWh im NEP 2023). Der Stromverbrauch auf der Autobahn von 39 % teilt sich auf in Megawatt Charging System – MCS und Night Charging System – NCS.

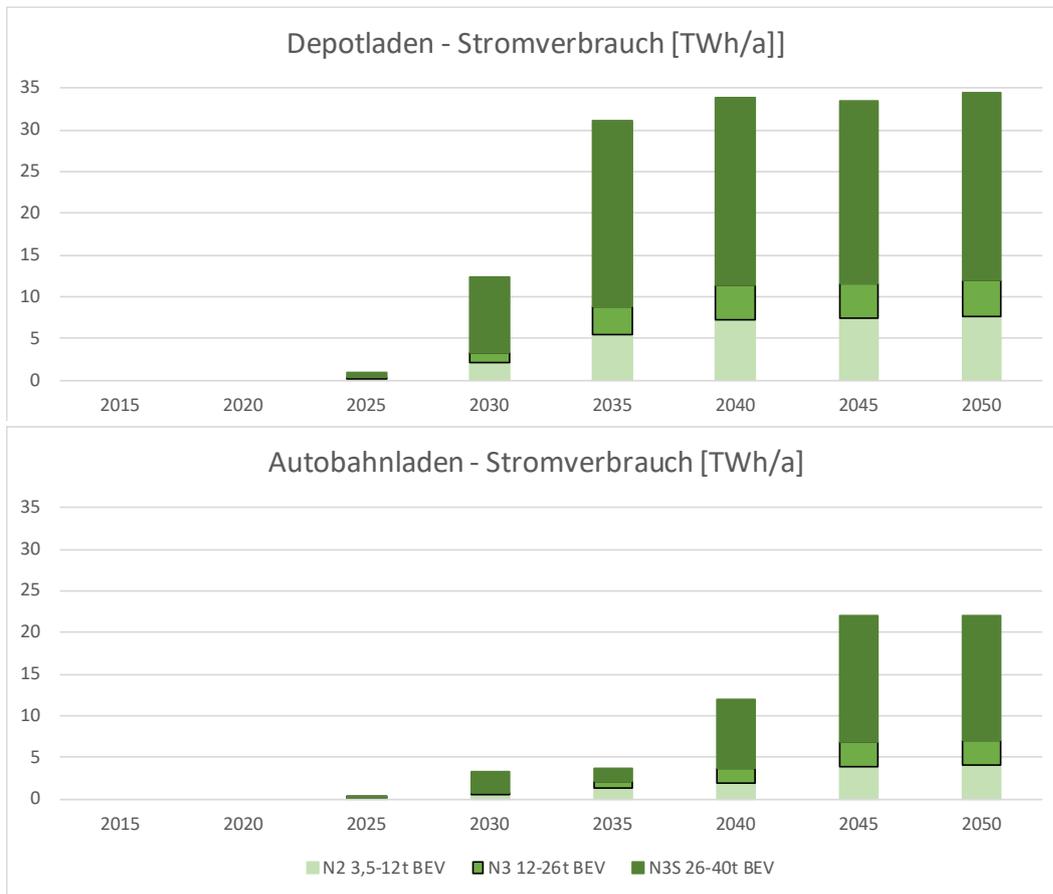
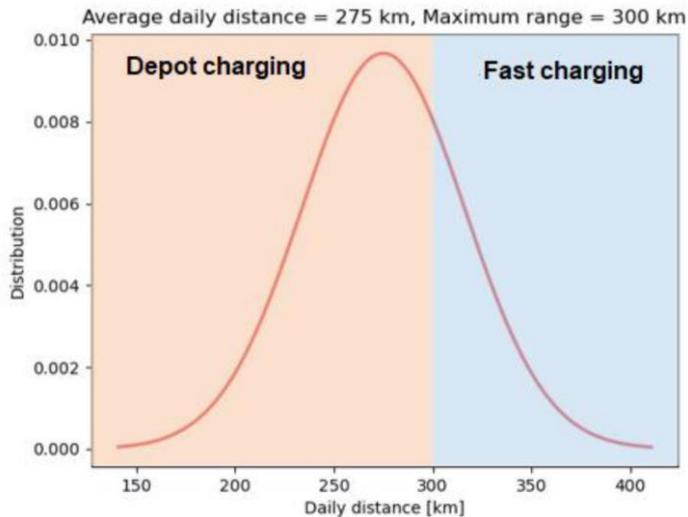


Abbildung 13: Entwicklung Stromverbrauch SNF Deutschland

2.3.3 Anteil Depotladen am Verkehrsaufkommen

Grundsätzlich weist das Depotladen deutlich geringere Kosten als das öffentliche Schnellladen auf der Autobahn auf. Der Markthochlauf wird sich im Depotladen außerdem in Hinblick auf die noch nicht flächendeckend vorhandene Infrastruktur schneller entwickeln. Dabei ist die Reichweite, die ein Lkw vom Depot aus elektrisch leisten kann, eine Wirtschaftlichkeitsfrage der Batterieauslegung und erschließt einen unterschiedlich großen Teil der Gesamtflotte. Dabei wird eine Batteriekapazität für 300 km als wahrscheinliche Entwicklung erachtet [IFEU 2021; ISI 2021; TNO 2022] womit ca. 1/3 der Fahrleistung der Flotte elektrisch abgedeckt werden kann (Abbildung 14). Für die Modellierung des Ladens von SNF werden entsprechend 300 km als Reichweite mit einer Ladung verwendet.



(Quelle: [TNO 2022])

Abbildung 14: Beispiel für die Veränderung der Ladenotwendigkeit je täglichen Fahrkilometern für ein Fahrzeug mit einer durchschnittlichen täglichen Fahrleistung von 275 km und einer Batteriereichweite von 300 km

Aufgrund des ökonomischen Vorteils des Depotladens ist davon auszugehen, dass Speditionen diesen Anteil durch komplexere Maßnahmen maximieren werden. Eine einfache, in der Modellierung umgesetzte Maßnahme ist das Starten von Fahrten > 300 km mit voller Ladung und Reduktion des Nachladens auf das notwendige Maß. Folgende KiD-Stichprobe (KiD: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland - Abbildung 15) statistischer Fahrten [ISI 2020] besteht zwar nur aus in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen (Inländerprinzip), diese fahren aber auch international. Daher sehen wir die Tagesweitenverteilung als repräsentativ für eine durchschnittliche Flotte an. Durch das Starten mit voller Ladung ergibt sich ein Anteil von etwas mehr als 50 % für das Depotladen. Dies ist die Grundlage für die weitergehende Aufteilung des Verkehrsaufkommens in Depot- und Autobahnladen.

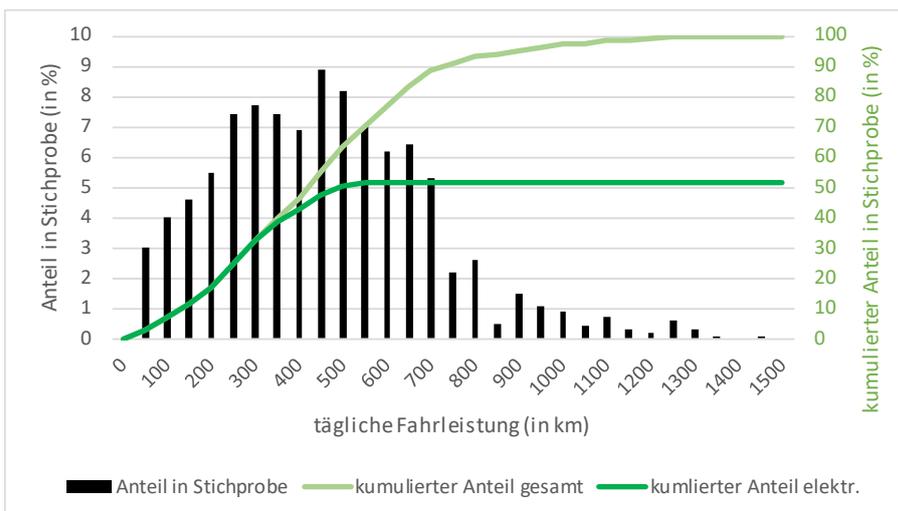


Abbildung 15: Elektrischer Fahranteil in Abhängigkeit der täglichen Fahrleistung SNF, inkl. erster Ladung im Depot bei über 300 km (Quelle: Eigene Analyse und Darstellung auf Basis [ISI 2020])

Die notwendige Anschlussleistung ergibt sich vereinfacht direkt aus der Anzahl der Fahrzeuge und der in

Tabelle 3 dargestellten Leistung von 100 kW für N3S, 50 kW für N3 und 22 kW für N2. Für den Bereich des Depotladens von SNF fehlt bislang die Datengrundlage, inwiefern durch Lademanagement die Anzahl der Ladepunkte und die Maximallast reduziert werden können. Wir gehen von einem sich über die Jahre ändernden Verhältnis von 1:1 hin zu 2:1 (Fahrzeuge je Ladepunkt) aus, verbunden mit den anfänglich höheren Jahresfahrleistungen von E-Fahrzeugen gegenüber dem Flottendurchschnitt im Markthochlauf. In der Praxis kann dies aber auch eine höhere Anzahl von Ladepunkten bedeuten. Dieser Näherungswert dient als Indikator für die Maximallast am Netzanschlusspunkt.

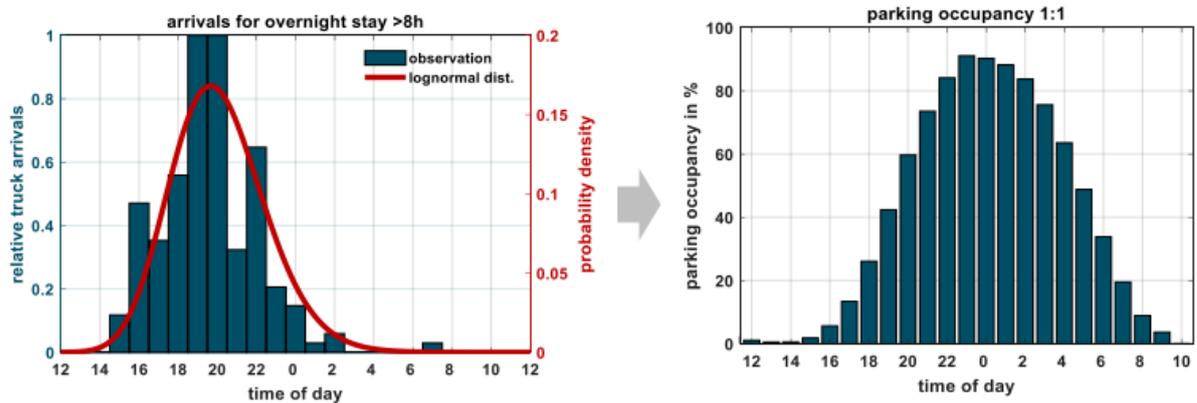


Abbildung 16: Verteilungen von Ankunftszeiten und Ladeenergie im Depot [ef.ruhr 2021]

2.3.4 Anschlussleistung Autobahnladen

Der gesamte Energiebedarf Deutschlands zum Laden von E-Lkw auf Autobahnen von 2 TWh im Jahr 2028, 3,5 TWh 2033 und 22 TWh 2045 (siehe folgendes Kapitel) wird zunächst im Verhältnis 1:2,5 auf MCS und NCS aufgeteilt.

Die Ladekapazitäten pro Ladestelle in Megawatt werden aus den ermittelten Ladeenergien über die Volllaststunden (VLS) ermittelt, die sich aus den in Abbildung 17 dargestellten Profilen ergeben. Für Tag- und Nachtladen an Autobahnen zusammen ergeben sich 2.250 Volllaststunden.

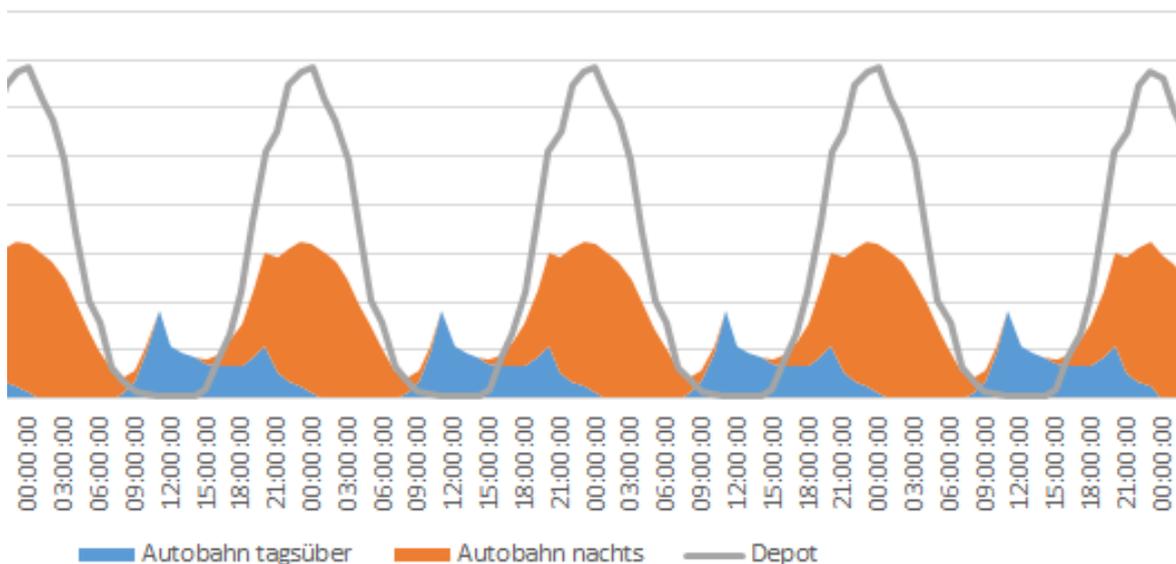


Abbildung 17: Ladeprofile für SNF an der Autobahn (tagsüber und nachts gestapelt) und im Depot (separat dargestellt)

Das Verhältnis von MCS zu NCS ist eine aktuelle Forschungsfrage. Wegen Parkplatzmangels ist ein hoher Anteil MCS zu erwarten. Die Bandbreite für das Verhältnis reicht von 1:2,5 [ef.ruhr] bis zu 1:1 aus Expertengesprächen. Für diese Studie wird ein Verhältnis von 1:2,5 (MCS:NCS) angesetzt. Auf dicht befahrenen Autobahnen ist ein Großteil des Stromverbrauchsprofils des Nachtladens (orange in Abbildung 17) Rastplätzen (ohne heutige Tankstellen) zuzuordnen und dort auslegungsbestimmend.

3 Entwicklung Flexibilität von E-Kfz und LNF

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick darüber, wie viele E-Fahrzeuge künftig flexibel laden und ihren Verbrauch zeitlich verschieben können. Der Anteil der E-Fahrzeuge, die in Zukunft flexibel laden, ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da technische, wirtschaftliche und regulatorische Faktoren ineinandergreifen. Die Bereitschaft zum flexiblen Laden hängt stark von der Entwicklung intelligenter Ladeinfrastrukturen und der Verfügbarkeit von Echtzeit-Daten ab, die dynamisches Laden ermöglichen. Zudem spielen finanzielle Anreize, wie dynamische Strompreismodelle oder Vergütungen für netzdienliches Laden, eine wesentliche Rolle. Auch die Akzeptanz und das Ladeverhalten der Nutzer werden maßgeblich die Verbreitung des flexiblen Ladens beeinflussen.

Um die Bandbreiten der Flexibilitätsnutzung abzuschätzen, unterscheidet die Studie zwischen leichter und schwerer erschließbaren Potenzial: Das einfach erschließbare Potenzial umfasst Haushalte in selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH), da dort in der Regel private Stellplätze mit eigener Wallbox zur Verfügung stehen. Ebenfalls eingeschlossen sind privat genutzte Pkw, die regelmäßig am Arbeitsplatz oder leichte Nutzfahrzeuge (LNF), die im Depot geladen werden können. Als schwerer erschließbares Potenzial gelten Haushalte in vermieteten EZFH oder Mehrfamilienhäusern (MFH), da für die Nutzung der Flexibilität zusätzliche technische Voraussetzungen und Rahmenbedingungen erforderlich sind, oder Hemmungen bei der Investition bestehen. Es ist in Zukunft war auch denkbar, dass dieses Potenzial zum Teil erschlossen wird und Nutzer von E-Fahrzeugen in MFH ihren Ladestrom flexibel bereitstellen, allerdings in geringerem Umfang. Für Plug-In-Hybride wird ebenfalls angenommen, dass sie eher unflexibel laden.

Die grobe Unterscheidung zwischen leicht und schwer erschließbares Potenzial ist in Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Potenzialerschließung für flexibles Laden von

	Ladeort
leichter erschließbares Potenzial	EZFH selbstgenutzt
	Arbeitgeberladen
	Depotladen für LNF
schwerer erschließbares Potenzial	EZFH vermietet
	MFH
	öffentliches Laden
	PHEV

Im Folgenden wird das entsprechende Potenzial quantifiziert und ein Zentralszenario sowie mögliche Bandbreiten für die Flexibilitätsnutzung dargestellt. Dabei wird zunächst ein Überblick über notwendige regulatorische und technische Voraussetzungen und deren Zusammenhang mit dem Hochlauf der Flexibilität gegeben.

3.1 Regulatorik

Durch das Zusammenspiel von Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW) wird ein rechtlicher Rahmen geschaffen, der die Nutzung der Flexibilität von Elektrofahrzeugen fördert. §14a EnWG ermöglicht es Netzbetreibern, E-Kfz in ihre Netzmanagementstrategien zu integrieren, während das GNDEW die notwendigen digitalen und infrastrukturellen Voraussetzungen schafft.

§14a EnWG ermöglicht es Verteilnetzbetreibern, steuerbare Verbrauchseinrichtungen (SteuVE), wie z.B. Elektrofahrzeuge, in ihr Netzengpassmanagement einzubeziehen. Seit dem Beschluss der Bundesnetzagentur (BNetzA) vom 27.11.2023 (BK6-22-300) ist mit dem Jahresbeginn 2024 der Mechanismus aktiv. Im gleichen Zuge hat die BNetzA am 23.11.2023 (BK8-22/010-A) u.a. neue zeitvariable Netzentgelte für §14a SteuVE eingeführt, die zusätzliche Anreize für flexible Lasten ab 01.04.2025 schaffen sollen. Dies kann dazu beitragen, dass Besitzer von E-Kfz finanziell profitieren, wenn sie ihr Fahrzeug zu bestimmten Zeiten laden oder entladen. Darüber hinaus sind ab 2025 nach **§41a EnWG** alle Stromlieferanten dazu verpflichtet dynamische Strompreise anzubieten.

Neben dem Notfallinstrument §14a EnWG existieren nach **§14c EnWG** ergänzend die regulatorischen Rahmenbedingungen für freiwillige netzdienliche Flexibilitätsdienstleistungen im Verteilnetz. Bisher liegen der Bundesnetzagentur jedoch keine Vorschläge für eine marktliche Beschaffung zur Erhöhung der Effizienz im Betrieb bzw. Ausbau der Verteilnetze vonseiten der Netzbetreiber vor. Daher wird dieses marktgestützte Instrument, bspw. zur Reduktion von §14a EnWG-Eingriffen, aktuell nicht in Deutschland eingesetzt.

Das **GNDEW** zielt darauf ab, die Digitalisierung des Energiesystems voranzutreiben und damit die Integration von erneuerbaren Energien und flexiblen Verbrauchseinrichtungen wie E-Kfz zu erleichtern. Das GNDEW verpflichtet zur Einführung intelligenter Messsysteme (iMSys), die eine echtzeitnahe Erfassung und Steuerung der Energieerzeugung bzw. -verbrauchs ermöglichen. Für steuerbare Verbrauchseinrichtungen nach §14a EnWG sind iMSys in Zukunft verpflichtend. Diese Systeme sind eine wichtige Grundlage für die Umsetzung von Flexibilitätsstrategien und V2G-Anwendungen. Das GNDEW fördert zudem den Ausbau einer sicheren und leistungsfähigen Kommunikationsinfrastruktur, die notwendig ist, um die Datenübertragung zwischen E-Kfz, Netzbetreibern und anderen Akteuren im Energiesystem zu gewährleisten.

VDE-FNN erarbeitet in Zusammenarbeit mit den Netzbetreiber **Netzanschlussregeln** u.a. für Stromerzeuger und -verbraucher (§§ 19, 49(2) EnWG). Für V2G Anwendungsfälle gibt es noch kein vollumfängliches Regelwerk. Inwieweit Ladeeinrichtungen / electric vehicle supply equipment (EVSE) bzw. E-Kfz ausgelegt werden müssen, ist somit derzeit unklar. Eine Regulierung insbesondere der VDE-AR-N 4105 „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ und der VDE-AR-N 4100 „Technische Anschlussregeln Niederspannung“ ist zukünftig zu erwarten [DKE 2024; FfE 2024].

3.2 Hochlauf der Verfügbarkeit von Komponenten für die Nutzung von V2G und DSM

3.2.1 Übersicht

Für die Steuerung der E-Kfz im Sinne von Smart Charging und für bidirektionales Laden sind einige technische Voraussetzungen notwendig, die teilweise mit Mehrkosten für den Nutzer verbunden

sind. Zur Übersicht wird in Abbildung 18 das Zusammenspiel der für die Nutzung von Flexibilität wichtigen Komponenten dargestellt.

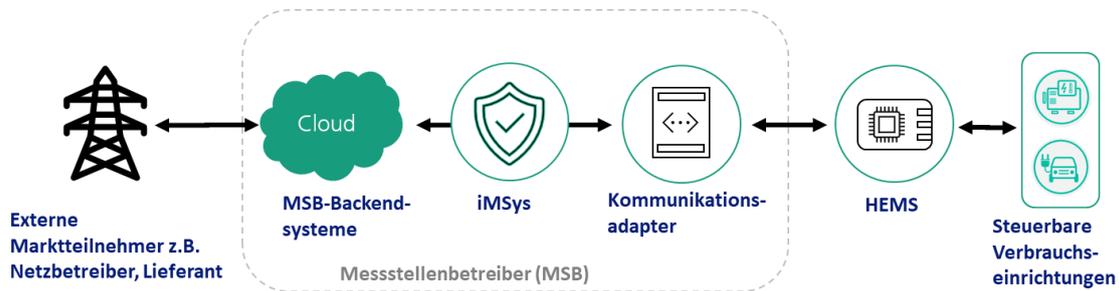


Abbildung 18: IT-Systemarchitektur auf Kundenseite – Backend, iMSys, Steuerbox, HEMS und steuerbare Verbraucher

In Tabelle 5 sind die für die Nutzung von Vehicle-to-Grid (V2G) und Lastverschiebung (DSM) relevanten Komponenten und der erwartete Hochlauf zusammengefasst. In den darauffolgenden Kapiteln werden die Bedeutung und der erwartete Hochlauf der wichtigsten, bzw. kritischen Komponenten, im Detail erläutert.

Tabelle 5: Komponenten zur Nutzung von V2G und DSM

Komponente	Erläuterung	Hochlauf
MSB-Backendsysteme	Ist für den VNB wichtig zur Umsetzung von §14a, Netzzustandsdaten aus dem iMSys werden verwendet für Netzzustandsschätzungen. MSB kommuniziert mit Steuerbox via IEC 61850.	Recht auf iMSys-Einbau ab 2025, jedoch Übergangsfristen bis Ende 2026 für netzorientierte Steuerung nach §14a EnWG vorhanden
Intelligentes Messsystem (iMSys), SMGW + mME	Stellt u.a. abrechnungs- und bilanzierungsrelevante Messdaten bereit. Besteht im Kern aus Smart Meter Gateway (SMGW) und moderner Messeinrichtung (mME).	Smart Meter Rollout läuft schleppend an. Soll laut GNDWE (MsbG) bis 2032 weitestgehend abgeschlossen sein.
Kommunikationsadapter (z.B. FNN-Steuerbox)	Hardwaretechnische Trennung der steuerbaren Anlagen hinter dem Netzanschlusspunkt und der iMSys-Infrastruktur, die in der Verantwortung vom Messstellenbetreiber (MSB) steht.	Aktuell nur über Sonderweg produktiv einsetzbar, ab Ende 2024 erste BSI-zertifizierte Anbieter von Steuerboxen zu erwarten. Initial steht DSM im Fokus.
Heimenergiemanagementsystem (HEMS)	Überwacht, steuert und optimiert die Energieflüsse in einem Haushalt.	Wird wahrscheinlich Standard, wenn es ausreichend flexible Anlagen hinter dem Netzanschlusspunkt gibt. Kein Engpass.
Fahrzeug/EV	Ladesysteme innerhalb des E-Kfz (i.d.R. DC-AC-Wandler und DC-DC-Wandler mit Ladecontroller), damit der Strom in eine bzw. beide Richtungen fließen kann	In Zukunft für die meisten Fahrzeuge der Mittel- und Oberklasse integriert.

mit den interoperablen Kommunikationsstandards ISO 15118-2 für DSM und 15118-20 für V2G.

Ladepunkt/EVSE	Externe Ladeeinrichtung, um technische Voraussetzungen für AC- bzw. DC-Laden zu erfüllen sowie Schnittstelle sowohl zum E-Kfz (Standards: s. „EV“ oben) als auch zu den darüberliegenden Komponenten wie Steuerbox oder HEMS. Relevante digitale Kommunikationsstandards für DSM bzw. V2G sind vor allem EEBUS und OCPP 2.1.	Marktangebot steigend, aber Hürde durch zusätzliche Kosten für Endnutzer.
EV-OEM-Backendsystem	Backendsysteme der E-Kfz- Hersteller zur Kommunikation mit dem Fahrzeug. (Nicht in Abbildung)	in Entwicklung, kein Engpass zu erwarten

3.2.2 Fahrzeug

Dazu gehören auf Nutzerseite eine entsprechende Ausstattung des Fahrzeugs und/oder des Ladepunktes mit Kommunikationseinrichtungen und Stromwandlern. Von den am Markt verfügbaren E-Kfz-Modellen sind laut EV-Database [EV-Database] aktuell 34 von 350 „bidi-ready“.

Für die Fahrzeuge wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge der Mittelklasse und Oberklasse mit den entsprechenden technischen Merkmalen ausgestattet sein werden, während die „kleinen“ Fahrzeuge die Zusatzkosten für den On-Board-Charger i.d.R. vermeiden werden. In der EV-Database werden alle aktuellen und angekündigten E-PKW aufgeführt. Dort ist zu sehen, dass von allen 350 aufgeführten Modellen (und deren Ausführung) lediglich 12 V2G-Support auf AC-Seite anbieten und 42 auf DC-Seite. In der Tabelle werden die verschiedenen Modell-Ausführungen nur jeweils einmal aufgelistet.

Tabelle 6: Auflistung der Modelle, die Unterstützung anbieten für V2G gemäß [EV-Database].

Model	V2G via AC	V2G via DC	Größensegment
Audi-Q4-e-tron	No	Announced	SUV
CUPRA-Born	No	Announced	Mittelklasse
Kia-EV9-998-kWh-AWD	Yes	No	SUV
Lucid-Air-Grand-Touring	Announced	Announced	Groß
Nissan-Leaf	No	Yes	Mittelklasse
Polestar-3-Long-Range-Dual-motor	Announced	Announced	SUV
Renault-5-E-Tech-40kWh-120hp	Announced	No	Klein
Skoda-Enyaq	No	Announced	Mittelklasse
Volkswagen-ID-Buzz	No	Announced	Nutzfahrzeug
Volkswagen-ID3	No	Announced	Mittelklasse
Volkswagen-ID4	No	Announced	Mittelklasse
Volkswagen-ID5	No	Announced	Groß
Volkswagen-ID7	No	Announced	Groß
Volvo-EX90	Announced	Announced	SUV

Bis 2030 ist zu erwarten, dass der Anteil noch deutlich steigt, und bis 2035 etwa 60 – 70 % in der Lage sein werden auszuspeisen [e-mobil BW 2023]. Dabei ist zu erwarten, dass überwiegend die größeren Segmente fast alle rückspeisefähig sein, da der Anteil der zusätzlichen Kosten im Vergleich zum Fahrzeug eher gering ist.

3.2.3 Ladepunkt, Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)

Die Ladepunkte zumeist Wallboxen, an denen sich das Fahrzeug ansteckt zum Laden, spielen eine zentrale Rolle für die Implementierung von Vehicle-to-Grid (V2G) Technologien. Es wird angenommen, dass sich der Markt für Wallboxen an den Fahrzeugmarkt anpasst und keinen zusätzlichen Flaschenhals darstellt. Sowohl die Wallbox als auch das E-Kfz müssen in der Lage sein, miteinander zu kommunizieren, um den Energiefluss zu steuern. Dies wird durch das ISO 15118 Protokoll gewährleistet, das eine Standardisierung nicht-proprietärer Lösungen für den Umgang mit herstellereinstellübergreifenden Ladeeinrichtungen beinhaltet und Vorgaben für eingebaute Zähler in Wallbox bzw. E-Kfz macht. Beim On-Board-Charger (DC/AC-Wandler) kann man dann im Fahrzeug die AC-Seite messen. ISO 15118-20 macht dabei weitergehende Vorgaben für bidirektionale Ladeflüsse, während sich die ISO 15118-2 ausschließlich unidirektionales Laden behandelt [NPM 2024].

Die Marktdurchdringung bidirektionaler Ladesysteme hängt von verschiedenen Faktoren ab. Aktuell ist die Auswahl an E-Fahrzeugmodellen mit bidirektionalem Ladevermögen begrenzt, was die Nachfrage nach entsprechenden Ladestationen schwächt. Zudem sind diese Ladesäulen teurer als unidirektionale Alternativen, was die Akzeptanz hemmt. Obwohl Aggregatoren potenziell höhere Markterlöse generieren könnten, sind nur wenige aktiv, und es fehlt oft an der kritischen Masse für Skaleneffekte. Für einen Durchbruch bidirektionaler Ladestationen sind ein breiteres Angebot kompatibler Fahrzeuge mit der ISO 15118-20 Schnittstelle, die Klärung regulatorischer Rahmenbedingungen und der Zugang zu attraktiven Vermarktungswegen notwendig. Dazu müssen Ladestationen den neuen Industriestandard OCPP 2.1 unterstützen, um die Integration mit Aggregatoren zu erleichtern. Der Anwendungsfall V2H kann hier als Türöffner für V2G fungieren [e-mobil BW 2023; FfE 2024].

Aktuell sind EVSE vor allem über proprietäre Modbus-Schnittstellen oder den OCPP-Standard mit einem HEMS verbunden. Zur Kommunikation mit der (FNN-)Steuerbox des Messstellenbetreibers wird der EEBUS-Standard eingesetzt, um Wirkleistungswerte digital zu übertragen. Für die Direktkommunikation zwischen Steuerbox und EVSE sind ebenfalls EEBUS und OCPP 2.0.1 in Planung. Die Mehrheit der Wallboxen unterstützt derzeit den OCPP 1.6-Standard, der grundlegende Funktionen wie Benutzer-Authentifizierung und Abrechnung von Ladevorgängen bietet. Einige Modelle sind bereits auf den OCPP 2.0.1-Standard umgestellt, der als IEC-Standard anerkannt ist und erweiterte Funktionen wie Smart Charging, Lastmanagement und eine verbesserte Integration mit Energiemanagementsystemen bietet. Zudem gibt es proprietäre DC-Lösungen, die für spezifische Fahrzeugmarken entwickelt wurden, jedoch nicht mit anderen Fahrzeugen kompatibel sind. Dennoch wächst die Verfügbarkeit massenmarktfähiger Lösungen rasch, da die Entwicklung von Wallboxen schneller voranschreitet als die der E-Fahrzeuge.

3.2.4 iMSys

Zudem muss der Hausanschluss über ein intelligentes Messsystem (iMSys) verfügen, bestehend aus Smart Meter Gateway (SMGW) und moderne Messeinrichtung (mME), deren Hochlauf bislang noch sehr schleppend verläuft, aber durch Anforderungen vom §14a EnWG und dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GNDEW) jetzt beschleunigt werden soll. Aktuell ist die viertelstündliche Abrechnung ebenfalls nur über iMSys erlaubt. Das GNDEW besagt, dass bis 2025 alle grundzuständigen Messstellenbetreiber (gMSB) 20 % ihrer Messlokationen mit Letztverbrauchern

ab 6.000 bis 100.000 kWh/a einschließlich §14a EnWG SteuVE sowie EEG/KWKG-Erzeuger von 7 bis 100 kW installierter Leistung mit einem iMSys ausstatten müssen. Mit dem Zielwert einer 95 % Ausstattungsquote bis Ende 2030 soll das iMSys nach GNDEW für die hier betrachteten Anwendungsfälle in der Breite zur Verfügung stehen. Im Bericht zum Rechtsrahmen und zur Entwicklung der Digitalisierung der Energiewende [EY & BET 2024] ist der Hochlauf jahresscharf und differenziert nach Hausanschlüssen bzw. Gebäudetyp dargestellt. Die Einschätzung der Autoren nach einer Umfrage zeigt auf, dass die Ziele grundsätzlich leistbar und von allen gMSB erwartbar sind, jedoch große Herausforderungen bestehen bei der Umsetzung anspruchsvoller Messkonzepte und der Herstellung der technischen Rahmenbedingungen für den Betrieb insbesondere der neuen Kommunikationstechnik.

Insgesamt lässt sich die Aussage treffen, dass für den Hochlauf in den nächsten Jahren bis Ende 2030 die Verfügbarkeit der Komponenten und des Smart-Meter-Rollouts einen Flaschenhals darstellen könnte bei einem schnelleren Hochlauf als aktuell angekündigt, für die hier verwendeten Annahmen jedoch nicht. Ab 2032 sollte jeder Netzanschluss mit einer EVSE mit den entsprechenden Mess- und Steuereinrichtungen ausgestattet sein. Dann sollten die Kosten für EVSE und andere Komponenten durch höhere Standardisierung aber auch durch Skaleneffekte weiter sinken.

3.2.5 HEMS: Heimenergiemanagementsystem

Verschiedene kommerzielle Anbieter bieten bereits HEMS an. Sie steuern die Energieflüsse im Heimsystem, um dabei ein bestimmtes Ziel zu verfolgen. Sie können auch theoretisch den Kommunikationsadapter zur iMSys-Anbindung integriert haben, derzeit befindet sich dieser aber am Netzanschlusspunkt, da die BSI-Zertifizierung wesentlich aufwendiger wäre als auch der Verantwortungübergang zwischen MSB und Letztverbraucher sich komplizierter darstellt. Aktuelle § 14a EnWG-Regularien ermöglichen grundsätzlich die Option mit und ohne HEMS. Sobald es sowohl genug flexible Assets in einem Haushalt gibt als auch eine Eigenerzeugung bspw. per PV existiert, wird es sehr wahrscheinlich, dass sich ein Haushalt ein HEMS mit lokaler Komponente zulegen wird. Hintergrund sind vor allem die Möglichkeiten der Berücksichtigung der Eigenerzeugung beim erlaubten Netzbezug, sowie die Option die Kundenbedürfnisse beim Einsatz verschiedener SteuVE besser auszugleichen. Zum Beispiel, ob es aktuell vorteilhafter wäre die Wärmepumpe oder das E-Kfz herunterzuregeln.

3.2.6 Backend-Systeme

Backend-Systeme kommen dort zum Einsatz, wo über die Steuerung des Ladevorgangs oder für die Ausgabe von Preis-Signalen entschieden wird. Backendsysteme können u.a. lokale Zählerdaten aufnehmen (mME und/oder zusätzliche Kundenzähler) und kommunizieren die Steuerungssignale oder die Anreizsignale mit dem HEMS oder mit der Wallbox z.B. im Falle von Laden am Arbeitsplatz. In Abhängigkeit der Ausführung können diese anteilig beim Messstellenbetreiber liegen, der die Nutzung der *Wide Area Network* (WAN)-Kommunikation per iMSys anbietet, oder ausschließlich bei Akteuren, die in den Prozess der Flexibilisierung eingebunden sind, wie ein (Sub-)Aggregator. Diese greifen direkt über die zweite WAN-Anbindung, also i.d.R. über öffentliches Internet, auf eine Wallbox oder ein E-Kfz zu. In dieser Kette können bspw. das HEMS-System (Backend-Komponente) oder ein E-Kfz-OEM-System eingebunden sein.

Für die Verteilnetzbetreiber ist der iMSys-Einbau zentral, um die Vorgaben von §14 a EnWG umzusetzen. Sie brauchen die Netzzustandsdaten, die aus dem iMSys kommen und nutzen diese für

ihre Netzzustandsschätzungen. Bis Ende 2025 kann es an dieser Stelle noch zu Übergangslösungen wie Rundsteuertechnik kommen, ab 2026 sollten jedoch die Backendsysteme zur Nutzung der iMSys-Infrastruktur bereitstehen. Sobald grundsätzlich die WAN-Kommunikation zum Netzanschluss – z.B. mit einem HEMS – bzw. zur SteuVE – z.B. ein E-Kfz – per iMSys steht, können ebenfalls Lieferanten im Rahmen der Ad-Hoc-Steuerung über einen Web-API-Service (echtzeitnaher Universallprozess) Leistungsvorgaben an einen Haushalt senden [SwaggerHub 2024].

3.3 Hochlaufszenario für Ladeflexibilität und V2G

3.3.1 Zusammenfassung und Ergebnis Flexibilitätsszenario

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in Kapitel 3.2 beschriebenen Komponenten die Marktentwicklung gut begleiten können – vorausgesetzt, der Rollout der iMSys verläuft wie angekündigt und konzentriert sich prioritär auf Standorte, an denen E-Fahrzeuge ans Netz angeschlossen werden. Darüber hinaus stellt sich für EV-Nutzer die Frage, ob die Steuerungs- oder bidirektionale Ladeoptionen ausreichend attraktiv sind, um die zusätzlichen Kosten für eine entsprechende Ladestation oder Fahrzeugausstattung zu rechtfertigen. Zur Einschätzung des Potenzials für flexibles Laden werden in dieser Studie verschiedene Ladeorte in „leicht erschließbares“ und „schwer erschließbares“ Potenzial unterteilt: Einfache Erschließbarkeit haben dabei alle EV-Nutzer mit privatem Stellplatz in selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhäusern sowie E-Fahrzeuge, die regelmäßig zum Arbeitsplatz pendeln und dort eine Lademöglichkeit vorfinden. Als schwer erschließbares Potenzial gelten die Fahrzeuge, die Haushalten in vermieteten EZFH oder MFH zugeordnet werden. Für die Analyse der Flexibilitätsoptionen werden zudem das PV-Potenzial der selbstgenutzten Einfamilienhäuser und der Markthochlauf von Fahrzeugen mit V2G-Fähigkeit berücksichtigt.

Im Folgenden sind die Schritte zur Berechnung des Hochlaufs der Flexibilität zusammengefasst. EZFH meint hier immer selbstgenutzte (nicht vermietete) EFZH:

1. Verschneidung der Gebäudedaten (D3) mit den Hochlaufzahlen von E-Kfz (D1) zur Ermittlung der Anzahl von BEV in EZFH in 2045
2. Berechnung des Anteils der BEV in EZFH für 2025 aus der Prosumerstudie (D2+D4) und für 2045 aus Schritt (1) und Interpolation für die Zwischenjahre. Durch Interpolation des relativen Anteils wird der frühere Hochlauf von BEV in EZFH berücksichtigt.
3. Ermittlung der absoluten Anzahl von BEV in EZFH für 2030, 2035 und 2045
4. Verschneidung von PV-Hochlaufzahlen für 2045 mit den Fahrzeughochlaufzahlen
5. Analoges Vorgehen wie in (2) zur Ermittlung des Anteils von BEV + PV in EFZH, da angenommen wird, dass zunächst ein Zusammenhang zwischen dem Hochlauf von PV und BEV im Haushalt besteht.
6. Fähigkeit der Fahrzeuge zur Rückspeisung gilt ab 2030 als maßgebend für den Anteil von V2H bzw. V2G.

In Tabelle 7 werden die Daten aufgeführt, die zur Erstellung des Hochlaufszenarios verwendet werden.

Tabelle 7: Datengrundlage für die Ermittlung der Anteile der verwendeten Flexibilitätstypen.

Ziel	Daten	Quelle	
Anzahl BEV in EFZH	D1	Anzahl BEV und PHEV	Fahrzeugbestandsmodell (siehe 2.2.2)
	D2	Durchschnittliche Anzahl Pkw je Wohneinheit in EFZH	MiD-Auswertung [infas 2018]
	D3	Anzahl EFZH-Wohneinheiten	[DENA 2023] und [IEE 2023]
	D4	BEV in EFZH	Prosumer-Studie [LichtBlick 2024]
Anzahl BEV + PV in EFZH	D5	PV-Ausbau	IEE-Modell PV-Ants mithilfe von 3D-Gebäudedaten
Ermittlung des V2G/V2H Potenzials	D6	Anteil der BEV mit der Fähigkeit bidirektional zu laden	Auswertung der Ankündigungen der Hersteller [e-mobil BW 2023]

In den folgenden Unterkapiteln sind die Schritte zur Ermittlung der Flexibilitätstypen und die verwendeten Daten im Detail erläutert.

3.3.2 Hochlauf von PV-Eigenstromoptimiert

Eine Optimierung im Haushalt ist vor allem dann attraktiv, wenn der von der PV-Anlage erzeugte Strom anstelle des teureren Netzstroms verwendet werden kann. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass diese Anwendung gegenüber einer Optimierung am Strommarkt bevorzugt wird (sowohl finanziell und organisatorisch als auch emotional). Deswegen ist die Ermittlung des Anteils dieses Segmentes am Fahrzeugbestand maßgebend, da dadurch der verbleibende Restbestand für andere Flexibilitätsausprägungen begrenzt wird.

Das Potenzial dafür liegt vor, wenn eine ausreichende Dachfläche für eine PV-Anlage vorhanden ist und das Erzeugungspotenzial neben dem Haushaltsstrom auch in der Lage ist, den zusätzlichen Fahrstrom zu versorgen. Des Weiteren ist die Personenidentität sowohl für die PV-Investitionsbereitschaft als auch für den wirtschaftlichen Vorteil des Eigenstroms wichtig. Das ist für große selbst genutzte Ein- und Zweifamilienhäuser der Fall bei Vernachlässigung von Reihenhäusern und vermieteten EFH/ZFH. In Summe trifft dies für 10,35 Mio. Wohneinheiten (WE) zu [DENA 2023] und [IEE 2023]. Aktuell fallen auf jede Wohneinheit in diesem Segment im Schnitt 1,43 Pkw [infas 2018]. Für die erwartete Reduzierung des Pkw-Bestandes auf 85 % im Jahr 2045 gegenüber heute wird ein stark überproportionaler Rückgang in Mehrfamilienhäusern unterstellt und ein leicht überproportionaler Rückgang in vermieteten EZH/ZFH. Im Segment der großen selbstnutzenden EFH/ZFH blieben dabei noch 1.36 Pkw/WE im Jahr 2045. Somit würden insgesamt etwa 14,07 Mio. Pkw auf diesen Gebäudetypen fallen.

Es sind jedoch weitere Potenzialeinschränkungen zu berücksichtigen. Diese ergeben sich durch den Fahrzeugtyp (PHEV werden aufgrund der kleinen Batteriegröße als unflexibel angenommen) sowie durch den politisch angestrebten Abschluss des Markthochlaufs für PV bis 2040 gegenüber dem Markthochlauf der E-Fahrzeuge bis 2045 (vereinfachte Annahme, dass dann keine HEMS nachträglich installiert werden). Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die Dachausrichtung bzw. die solare Ressource und die generelle Potenzialausschöpfung für 400 GW PV in 2040 in ganz Deutschland (ca. 211 GW Dachanlagen und 189 GW Freifläche). Bei einem BEV-Anteil von 77% im Jahr 2040 (siehe Markthochlauf in Kapitel 2.2) und einer Umsetzung des PV-Potenzials

auf 86% der großen selbstgenutzten EFH/ZFH (Potenzialerschließung im Markthochlauf, Dachausrichtung)¹ beträgt das maximale Potenzial für PV-optimiertes Laden im Haushalt 9,3 Mio. BEV-Fahrzeuge im Jahr 2040 und 2045.

Zur aktuellen und kurzfristigen Verbreitung vom HEMS mit PV-EV-Eigenstromoptimierung im realen Markt (für 2023) gibt der Verfasser der Studie an, dass 22 % der aktiven Prosumer über die Kombination PV+EV+HEMS verfügen in 2023. Die Prosumer-Studie von Lichtblick gibt ebenfalls an, dass es jeweils 1,2 Mio. HEMS-Systeme und PV-EV-Kombinationen Ende 2023 gab [LichtBlick 2024]. Bei einem Anteil von BEV/EV von 61 % ergeben sich für Anfang 2024 0.73 Mio. BEV in Kombination mit einer PV-Anlage. Für diese Fahrzeuge wird angenommen, dass sie auch ein HEMS besitzen.

Die Jahre 2030 bis 2040 wurden zwischen diesen Kennzahlen interpoliert. Dabei wurde jedoch das Verhältnis zwischen BEV in EFZH zu BEV gesamt interpoliert, um den Umstand zu berücksichtigen, dass der BEV-Hochlauf in EFZH anfangs vermehrt in diesem Segment stattfindet.

Einige der Fahrzeuge werden bis dahin auch fähig sein zur Rückspeisung und die Kapazität der Fahrzeugbatterie nutzen, um den Haushalt mit Strom zu versorgen. Werden regulatorische Hemmnisse dafür beseitigt beim Vorhandensein von dynamischen Stromtarifen, kann der Nutzer dadurch einen entsprechenden Mehrwert generieren, der annahmeweise immer die attraktivere Option darstellt für den Nutzer für den Fall, dass Wallbox, BEV und der Haushalt entsprechend ausgestattet sind (siehe Kapitel 3.2).

Es handelt sich jeweils um das maximale Potenzial, da die Nutzer sich je nach Regulatorik und Anreizsystem auch entscheiden können unflexibel zu laden oder am Strommarkt orientiert zu laden. Für das Zentralszenario wird eine langfristige regulatorische Attraktivität für PV-Eigenstrom unterstellt und dieses Potenzial auch umgesetzt. Auf der anderen Seite werden mögliche freie Flexibilitätspotenziale für den Strommarkt in Zeiten mit geringer Solareinstrahlung (Herbst/Winter) vernachlässigt. Es kann aber auch angenommen werden, dass für die Haushalte mit einer Kombination von EV+PV in selbstgenutzten EFZH einen kombinierten Tarif nutzen, bei dem sich das Laden zunächst an der PV-Einspeisung und nachgelagert am Markt orientiert.

3.3.3 Marktorientiertes Laden und V2G

Bei einer angenommenen Präferenz für PV-optimiertes Laden verbleibt für BEV-Nutzer in selbstgenutzten EFZH ohne PV-Potenzial die Möglichkeit den Ladevorgang zu verschieben am Strommarkt orientiert oder ins Netz zurück zu speisen. Da es bereits heute einige Anbieter gibt, die dynamische Strompreise anbieten und der wirtschaftliche Vorteil bereits gegeben ist, wird davon ausgegangen, dass alle verbleibenden BEV-Nutzer ihr Ladeverhalten am Markt orientieren, während für V2G Restriktionen in Bezug auf technische Verfügbarkeit und Nutzerbereitschaft gelten. Die Studie [e-mobil BW 2023] hat die Ankündigungen der zurzeit relevantesten Hersteller auf dem deutschen Markt zusammengefasst, um eine Abschätzung des Hochlaufs von BEV's mit der Fähigkeit, bidirektional zu laden zu erhalten (s. Tabelle 8). Die Verhältnisse sind auf alle BEV's bezogen, und werden in dieser Untersuchung auch für BEV's in EFZH angewendet. Die Werte für 2040 und 2045 wurden als Annahme in Absprache mit Experten ergänzt.

¹ Unveröffentlichtes Ergebnis des IEE aus der Planungsregion OST (NAP 2024) – auf Basis der mittels eines 3D-Gebäudemodells berechneten Anlagenverteilung auf alle Einzelgebäude der Region.

Tabelle 8: Anteil der BEV mit der Fähigkeit bidirektional zu laden.

	2025	2030	2035	2040	2045
Anteil V2G/V2H	11%	39%	65%	70%	75%

3.4 PKW-Arbeitgeberladen und Nutzfahrzeuge

Für das flexible Laden beim Arbeitgeber oder im Falle von Betriebsfahrzeugen am Depot ist die Standardisierung durch Vorgaben wie die ISO 15118-2 und 15118-20 besonders wichtig, da Fahrzeuge keinem festen Ladepunkt zugeordnet sind. Für die beiden Anwendungsfälle wird angenommen, dass sich mehrere Fahrzeuge einen Ladepunkt teilen. Für diese Studie wird angenommen, dass bis zu drei Fahrzeuge an einem Ladepunkt mit einer Leistung von 11 kW laden können. Dadurch kommt es auch beim ungesteuerten Laden bereits zu einer Glättung der Lastzeitreihe.

Für die SNF gilt ebenfalls, dass sie als unflexibel angenommen sind bzw. beim Speditionsladen schon der Effekt des Lademanagements zur Begrenzung der Spitzenleistung in den fixen Ladeprofilen berücksichtigt ist. Laut der Studie [NLL 2023] werden 27 % der Energiemenge beim Arbeitgeber geladen. Dieser Anteil wird als marktoptimiertes Laden ohne V2G angenommen.

3.5 Ergebnis Hochlauf Flexibilitätstypen

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen das Ergebnis des Hochlaufs von E-Kfz im zentralen Basisszenario. Deutlich erkennbar ist, dass der frühe Anstieg der E-Kfz-Nutzung in EZFH in Kombination mit Photovoltaikanlagen (PV) anfangs einen hohen relativen Anteil hat. Dieser Anteil nimmt jedoch im Laufe der Zeit merklich ab, da zunehmend mehr E-Kfz in Mehrfamilienhäusern (MFH) zu erwarten sind. Bis zum Jahr 2045 laden etwa 9 Mio. E-Kfz PV-optimiert. Der wesentliche Hochlauf findet jedoch bereits bis 2035 statt, wobei zu diesem Zeitpunkt bereits über 8 Mio. E-Kfz eigenstromoptimiert laden. Auffällig ist der starke Anstieg der Fahrzeuge, die auch in das Hausnetz rückspeisen (V2H): Bis 2045 nutzen fast 7 Mio. Fahrzeuge diese Technologie.

Im Gegensatz dazu verläuft der Hochlauf des marktgesteuerten Ladens etwas kontinuierlicher. Im Jahr 2035 laden im Segment der Einfamilienhäuser knapp 4 Mio. Fahrzeuge marktorientiert, davon etwa 1,1 Mio. mit Vehicle-to-Grid (V2G). Bis 2045 steigt diese Zahl auf knapp 7 Mio. Fahrzeuge, wovon etwa 2 Mio. V2G nutzen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass der Hochlauf der E-Kfz-Nutzung und die Implementierung verschiedener Ladestrategien eng mit den infrastrukturellen Gegebenheiten und der technologischen Weiterentwicklung, insbesondere im Bereich der dezentralen Energieerzeugung und -speicherung, verknüpft sind. Während die Eigenstromoptimierung durch PV in den frühen Jahren dominiert, wächst die Bedeutung marktgesteuerter Ladeformen mit der zunehmenden Durchdringung der E-Kfz im gesamten Wohnungssektor stetig an.

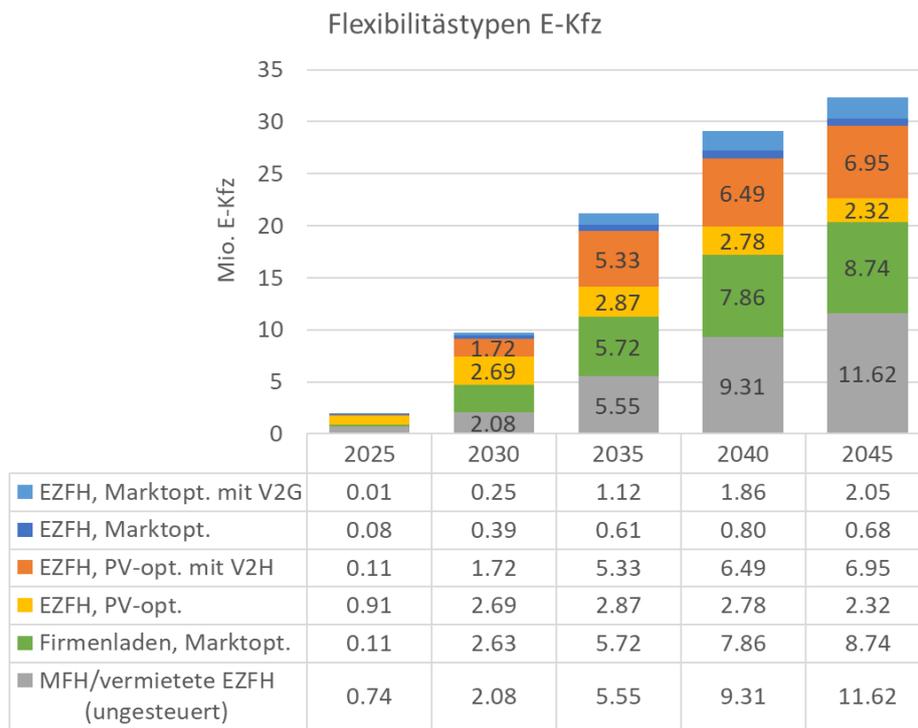


Abbildung 19: Entwicklung der Flexibilitätstypen für E-Kfz bis 2045. EFZH bezieht sich in der Grafik auf selbstgenutzte (nicht vermietete) EFZH.

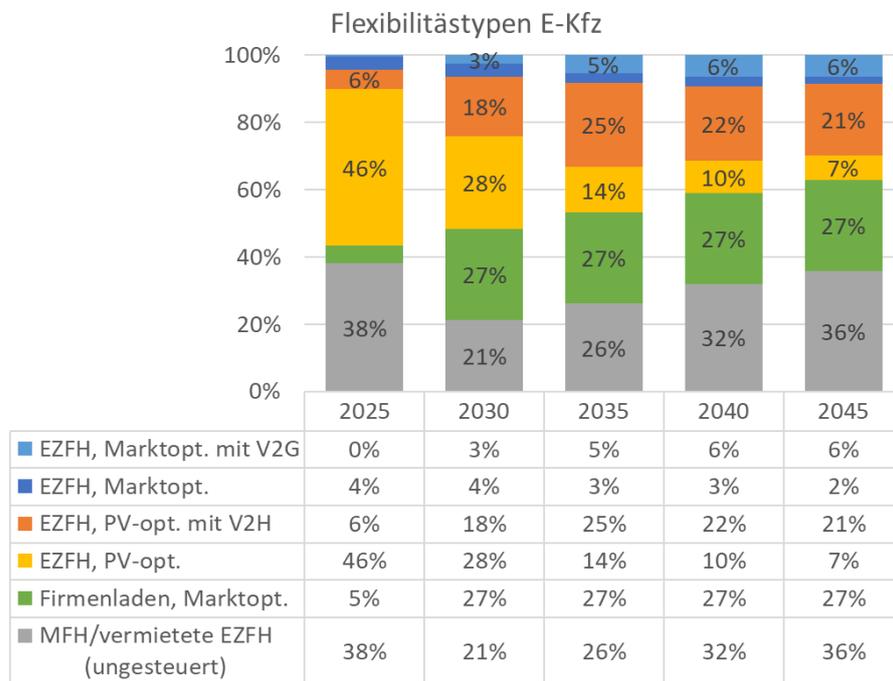


Abbildung 20: Anteile Flexibilitätstypen E-Kfz bis 2045. EFZH bezieht sich in der Grafik auf selbstgenutzte (nicht vermietete) EFZH.

4 Modellierung zeitlich hoch aufgelöstes Ladeverhalten und Flexibilitäts-potenzial

In diesem Kapitel wird die Methodik beschrieben für die Modellierung, um den Bedarf an Ladestrom von Fahrzeugen mit Elektroantrieb in Deutschland zu projizieren.

4.1 Modellierung Fahrverhalten

4.1.1 Übersicht des Modellansatzes

Für die Modellierung der Lastprofile von Elektrofahrzeugen (E-Kfz) und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) wird auf Daten der Mobilitätsenerhebung "Mobilität in Deutschland 2017" [infas 2018] zurückgegriffen, ergänzt durch Zählstellendaten des Bundesamtes für Straßenverkehr [BASt 2019]. Die hohe Anzahl an Befragten und die Berücksichtigung sozioökonomischer Daten ermöglichen eine genaue Zuordnung von tageszeitlichen und saisonalen Verbrauchsmustern zu spezifischen Standorten. Gleichzeitig wird eine repräsentative Verteilung auf die Landkreisebene ermöglicht.

Die Erstellung von repräsentativen Fahrprofilen für die PKW innerhalb der Mobilitätsgruppen erfolgt in der in *Abbildung 21* dargestellten Abfolge verschiedener Schritte.

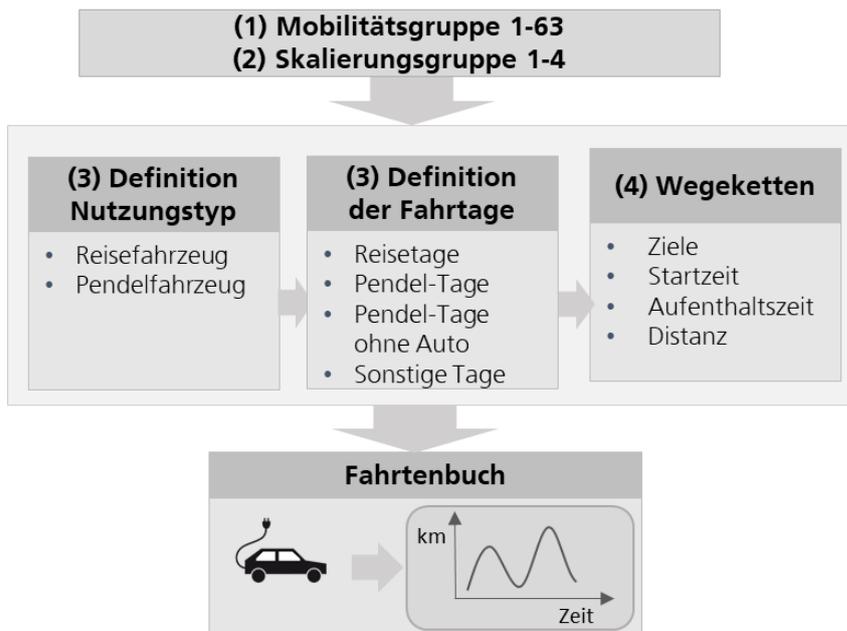


Abbildung 21: Übersicht der Modellkomponenten für die Erstellung von Fahrprofilen/Fahrtenbüchern.

Im ersten Schritt wird das Fahrzeug einer Mobilitätsgruppe zugeordnet. Die **Mobilitätsgruppe** differenziert die Haushalte mithilfe von raumtypologischen und sozioökonomischen Merkmalen. Die Festlegung der Mobilitätsgruppe dient als Grundlage für die zufällige Auswahl weiterer Parameter, die das Fahrprofil definieren. Als nächstes wird das Fahrzeug einer **Skalierungsgruppe** zugeordnet. Das Konzept der Skalierungsgruppen dient dazu Abhängigkeiten zwischen Parametern herzustellen, die in der Modellierung unabhängig betrachtet werden, da aus Komplexitätsgründen nicht alle Abhängigkeiten als bedingte Wahrscheinlichkeiten im Modell abgebildet werden können. Anhand dieser Zuordnungen werden dann Wahrscheinlichkeitsverteilungen für weitere Fahrverhaltensparameter bestimmt, die jedes Fahrzeug individuell charakterisieren.

Im folgenden Schritt wird für jedes Fahrzeug mithilfe des Haushaltsdatensatzes definiert, ob der Pkw neben Alltagsfahrten auch zum **Pendeln** und/oder zum **Reisen** verwendet wird. Die Reisen werden dann über das Jahr verteilt. Für die Tage im Jahr in denen das Fahrzeug nicht auf Reisen ist, werden dann für alle Pkw, die zum Pendeln verwendet werden, die Tage festgelegt, an denen mit dem Fahrzeug zur Arbeit gefahren wird. Dabei werden Aspekte wie Home-Office und Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs berücksichtigt.

Im letzten Schritt wird dann für den Pkw für jeden Tag des Jahres eine **Wegekette** zugeordnet, die sowohl Alltagsfahrten mit Pendeln als auch Alltagsfahrten ohne Pendeln berücksichtigt. Dies geschieht wiederum durch zufälliges Ziehen aus dem MiD2017-Datensatz aller Pkw-Wegekette, die das Ziel Arbeit enthalten für Pendler, bzw. nicht enthalten, wenn es kein Pendelfahrzeug ist. Abschließend wird die Startzeit, die Zielzeit und die Distanz jedes Weges der Wegekette mit Hilfe von bedingten Wahrscheinlichkeiten bestimmt.

Die Methodik ermöglicht die Zuordnung jedes Ladevorgangs zum jeweiligen Standort (zuhause, Arbeit, öffentlich). Für die regionale Zuordnung zu Landkreisen kann davon ausgegangen werden, dass das Laden zuhause, bei der Arbeit und an öffentlichen Standorten in dem eigenen Landkreis stattfindet, während das **Autobahnladen** in der Regel außerhalb stattfindet.

Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert erläutert.

4.1.2 Mobilitätsgruppen

Im **ersten Schritt** wird für die Erstellung von Fahrprofilen für private PKW differenziert in spezifische, als hinreichend homogen angenommene, **Mobilitätsgruppen**. Innerhalb einer Mobilitätsgruppe ist das Fahrverhalten (Jahresfahrleistung, Anzahl Pendler, Urlaubsfahrten...) statistisch repräsentiert und kann so für die Ermittlung von Gleichzeitigkeiten und das Zusammenwirken mit anderen (wetterabhängigen) Erzeugern und Verbrauchern verwendet werden. Für vertiefende Betrachtungen oder Sensitivitätsanalysen kann auch die Auswahl der Mobilitätsgruppe variiert werden und zum Beispiel für eine bestimmte Region spezifisch Pendler mit einer höheren Pendeldistanz ausgewählt werden. Bei der Modellierung größerer Flotten, wie z.B. bei der Betrachtung von Energiesystemen, ermöglichen die Variation der spezifischen Anteile der Profile aus jeder Mobilitätsgruppe eine Repräsentativität in größerem Umfang. Die Zuordnung zu den Mobilitätsgruppen erfolgt anhand von repräsentativen Statistiken zu einem der sieben regionalstatistischen Raumtypen (RegioStar7) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und zu Haushaltstypen (mit/ohne Kinder, Single-/Mehrpersonenhaushalt) sowie Haushaltseinkommen [BMVI 2021]. Die Häufigkeitsverteilung der Mobilitätsgruppen in Deutschland ist in Tabelle 17 aufgelistet.

Die Gruppen werden durch folgende auch in Abbildung 22 dargestellten Eigenschaften differenziert:

Raumtyp: Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) hat spezifisch für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung die Raumtypen der RegioStar7-Kategorie verwendet. Sie ermöglichen es raumtypische Mobilitätsmuster zu differenzieren, die sich durch den übergeordneten Regionstyp (städtisch oder ländlich) und die Bevölkerungsdichte ergeben.

Haushaltsgröße und -Einkommen: Die Haushalte werden durch zwei Eigenschaften charakterisiert, den Haushaltstyp und das Nettoeinkommen. Der Haushaltstyp beeinflusst das Mobilitätsver-

halten bspw. durch Reisezeitbeschränkungen auf Schulferien (Haushalte mit minderjährigen Kindern) oder durch die Nutzung eines PKW mit mehreren Personen. Das Einkommen wiederum hat eine hohe Wechselwirkung mit den Arbeitsfahrten (Pendeln) und der Häufigkeit von Urlaubsfahrten mit Pkw. Während eine detailliertere Betrachtung eher wichtig ist für die Netzplanung in einem Gebiet, ist die übergeordnete Betrachtung dann von Bedeutung, wenn Rückkopplungen mit dem Energiesystem bzw. den Strompreisen untersucht werden sollen, wie beispielsweise beim marktgesteuerten Laden.

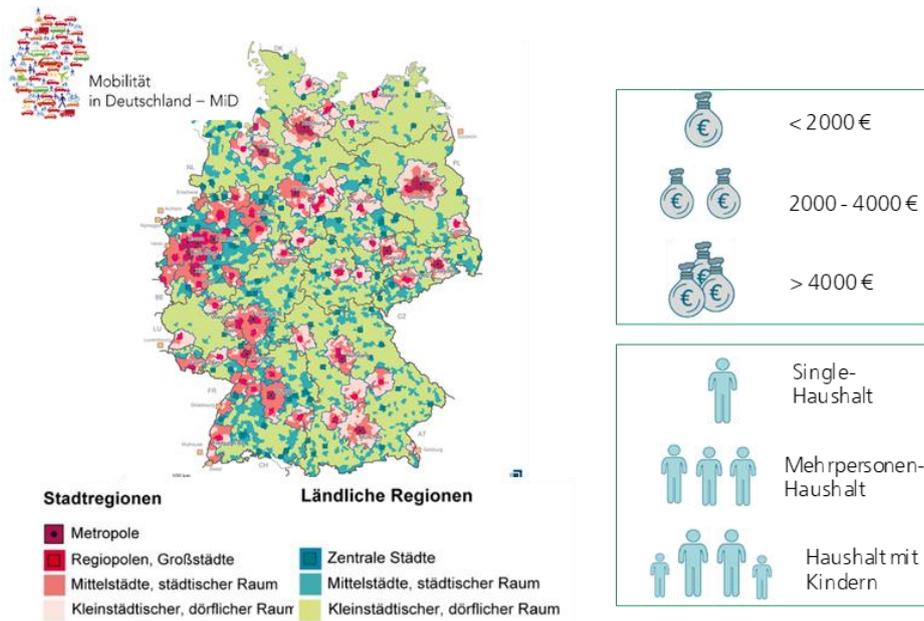


Abbildung 22: Definition der Mobilitätsgruppen für die Fahrprofilmodellierung.

Alle weiteren Eigenschaften, durch die ein Fahrprofil definiert wird, z.B. Nutzungstyp, Pendelverhalten, Wegedistanzen oder Reiseverhalten werden als bedingte Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Mobilitätsgruppe definiert. In Tabelle 9 sind einige Kenngrößen für eine modellierte Anzahl von 500 Profilen für verschiedene Raumtypen zusammengefasst.

Tabelle 9: Auswertung einiger Kenngrößen für verschiedene Raumtypen.

	Metropole	Stadt-Umland	DEU
Anzahl Personen im Haushalt	1,8	2,1	2,0
Jahresfahrleistung [km]	12428	13359	13330
Urlaubsstrecke [km]	2148	1706	1694
Alltagsstrecke [km]	10280	11652	11636
Tage ohne Fahrt im Jahr	155	125	132
Summe Nicht-Pkw-Pendeln	0,5	0,3	0,3
Abwesenheit an Alltags-Fahrtagen [h]	11,6	9,9	10,3
Pendeldistanz [km]	13,8	15,0	14,7
Anteil	20 %	25 %	100 %

Dabei ist zu sehen, dass in städtischen Metropolen sowohl die Pendeldistanzen als auch die jährlichen Fahrleistungen der Fahrzeuge deutlich kürzer sind im Vergleich zu ländlicheren Gebieten. Der private Pkw wird in diesen urbanen Räumen überwiegend für Reisen oder Wochenendausflüge verwendet, da die täglichen Wege oft kürzer sind und öffentliche Verkehrsmittel häufiger genutzt werden. Im Gegensatz dazu sind im Stadt-Umland-Gebiet die Pendeldistanzen entweder sehr kurz, etwa für kurze Fahrten innerhalb der Gemeinde, oder sehr lang, beispielsweise für den täglichen Arbeitsweg in die Stadt.

Zudem fällt auf, dass in Metropolen Fahrzeuge häufiger ungenutzt herumstehen, da sie seltener für kurze Strecken genutzt werden. Wenn ein Fahrzeug jedoch in der Stadt eingesetzt wird, ist es durchschnittlich länger unterwegs als im Umland, was dazu führt, dass sich der Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug aufgeladen werden muss, in städtischen Regionen etwas nach hinten verschieben könnte. Dies liegt daran, dass bei längeren Fahrten der Energieverbrauch höher ist, was die Notwendigkeit des Ladens verzögert.

4.1.3 Skalierungsgruppen

Des Weiteren ist noch ein anderer wichtiger Aspekt zu berücksichtigen, um die Repräsentativität der Ladeprofile zu gewährleisten. Wenn die einzelnen Parameter aus einer statistischen Verteilung basierend auf den MiD-Daten gezogen und zusammengefügt werden, fällt die **Varianz der Jahrfahrleistung** der Profile zu gering aus, sodass „Wenigfahrer“ und „Vielfahrer“ unterrepräsentiert werden.

Aufgrund der hohen Anzahl an simulierten Tagen pro Jahr wird es bei einer mittleren Wahrscheinlichkeit von 40 % für eine tägliche Wegekette mit mindestens zwei Fahrten immer unwahrscheinlicher, dass Fahrprofile erzeugt werden, die entweder sehr wenige (<50) oder sehr viele (>300) Tage mit Fahrten aufweisen. Obwohl solche extremen Formen der Fahrzeugnutzung in der Realität durchaus vorkommen, spiegelt das Modell diese Randbereiche nicht realistisch wider.

Dieser Effekt entsteht durch die Überlagerung mehrerer statistischer Einflüsse, wie beispielsweise die Pendeldistanzen, die Anzahl der Arbeitstage, Urlaubsfahrten oder andere relevante Faktoren. Durch diese statistische Überlagerung wird die Abbildung der „Wenigfahrer“, die ihr Fahrzeug selten nutzen, und der „Vielfahrer“, die es besonders häufig verwenden, stark verzerrt. Somit lässt sich mit dem Modell lediglich das Verhalten im Durchschnitt gut abbilden, während die extremen Nutzungsformen, die ebenfalls einen wesentlichen Teil der Realität ausmachen, unzureichend berücksichtigt werden. Diese Einschränkung führt dazu, dass das Modell in seiner Vorhersagekraft für die gesamte Bandbreite der tatsächlichen Fahrzeugnutzung limitiert ist und die Realität nur in einem eingeschränkten Maße widerspiegelt.

Die Lösung dieser Problematik ist die Verwendung von Skalierungsgruppen. Jedes Profil wird zu Beginn einer Skalierungsgruppe zugeordnet, für die dann einzelne Parameter angepasst werden, die die Wahrscheinlichkeit für Tage mit Fahrten und die Fahrdistanzen verändern. Auf diese Weise werden Abhängigkeiten zwischen Parametern, die in der Modellierung als unabhängige Größen eingehen berücksichtigt. Diese Problematik ist von hoher Wichtigkeit und in der Literatur und bestehenden Open-Source-Modellen bislang noch wenig beachtet. Abbildung 23 veranschaulicht schematisch die Notwendigkeit dieses Ansatzes. Auf der linken Seite sind die "echte" Verteilung

der Jahresfahrleistungen und eine aus der Modellierung ohne Skalierungsgruppe abgeleitete Verteilung dargestellt.

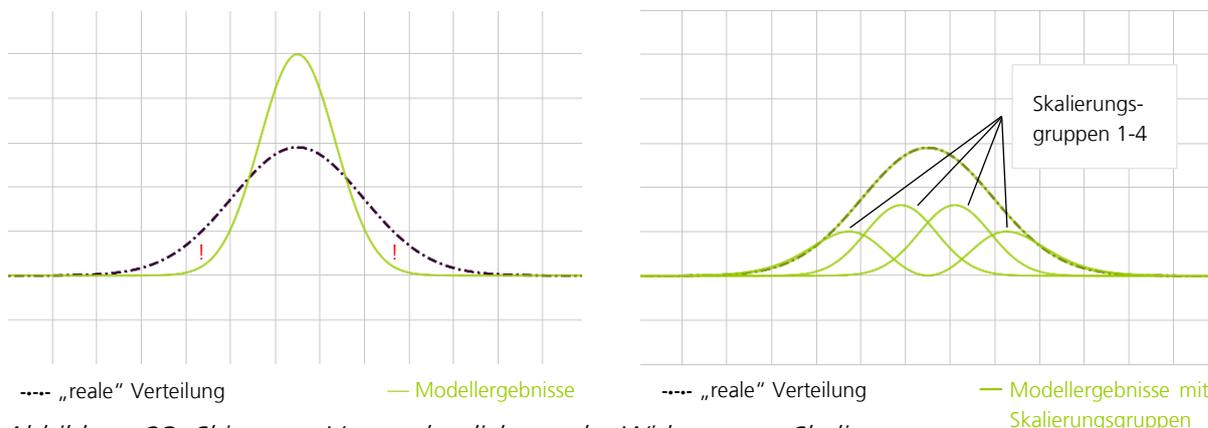


Abbildung 23: Skizze zur Veranschaulichung der Wirkung von Skalierungsgruppen.

Die Verteilung auf die einzelnen Skalierungsgruppen (siehe Tabelle 17 im Anhang) und die Parameterwahl wird im Rahmen der Validierung so angepasst, dass die Verteilung der Jahresfahrleistungen der modellierten Daten mit der Originalverteilung aus den MiD-Daten möglichst übereinstimmt. Die Parameter, mit denen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen modifiziert werden, sind in Tabelle 10 aufgeführt. Das Konzept der Skalierungsgruppen wird zusätzlich verwendet, um die Profile der LNF zu parametrieren, die im Vergleich zu den Alltagsprofilen der Pkw deutlich häufiger und länger fahren, jedoch (fast) keine Reisen unternehmen und in der Regel nicht am Wochenende fahren.

Tabelle 10: Übersicht aller Parametervariationen für die vier Skalierungsgruppen und für LNF im Modell.

Parameter	1	2	3	4	LNF
Pendelfahrzeug: j/n? (sonstige Kriterien erfüllt)	70%	70%	100%	100%	1
Pendeldistanz-Verteilung (Weibull) - summierte Wahrscheinlichkeit	<65%	<70%	<75%	>40%	> 0,75
Multiplikator für durch- schnittliche Wahrschein- lichkeit für KEINE Reise im Haushalt je Mob.-Gr.	100%-180%	100%-180%	80%-100%	30%-70%	500 % - 600 %
Wahrscheinlichkeit für Wegekette am Wochen- tag (sonstige Tage-Modul)	5%-39%	49%-60%	59%-79%	74%-98%	90 % - 100 %
Wahrscheinlichkeit für Wegekette am Wochen- ende	10%-35%	30%-60%	40%-65%	70%-92%	10 % - 30 %
Profilspezifische Distanz- skalierung (sonstige Ziele)	70%-90%	70%-100%	80%-120%	110%-140%	200 % - 250 %

Parameter	1	2	3	4	LNf
Arbeitstage mit Pendeln / Teilzeit	50 %: - 1 Tag 50 %: unverändert	unverändert	unverändert	50 %: 5 Tage 50 %: unverändert	90 %: 5 Tage
Multiplikator für Anteil von Autoreisen	50%-100%	50%-100%	100%-160%	100-160%	10 % - 20 %

4.1.4 Nutzungstyp – Reise- und Pendlerfahrzeuge.

Um festzulegen, ob es sich bei einem Fahrzeug um ein Reisefahrzeug und/oder ein Pendelfahrzeug handelt mit entsprechender Auswahl der Wegekette wird aus dem MiD-Haushaltsdatensatz die Anzahl der Berufstätigen und die Anzahl der Fahrzeuge analysiert. Es wird festgelegt, dass in jedem Haushalt ein Fahrzeug zum Reisen verwendet wird. Ein Haushalt mit einem Fahrzeug, wird also grundsätzlich auch zum Reisen verwendet. Von diesem Grundsatz wird dann je nach Skalierungsgruppe abgewichen. Durch dies Methodik wird korrigiert, dass Fernreisen im MiD-Datensatz nicht ausreichend berücksichtigt sind und dadurch die mittlere Jahresfahrleistung von den Fahrzeugen laut Kraftfahrtbundesamt (KBA) im MiD-Datensatz im Mittel unterschritten wird.

Für die Pendlerfahrzeuge gilt zunächst, dass im Haushalt so viele Fahrzeuge für regelmäßige berufliche Wege verwendet werden, wie es Berufstätige gibt. Die Berücksichtigung von Arbeitswegen, die nicht mit dem Auto zurückgelegt werden, erfolgt später in der Modellierung. Zur Veranschaulichung folgendes Beispiel: Für ein Haushalt mit drei Fahrzeugen und zwei Berufstätigen gilt die Aufteilung in Tabelle 11:

Tabelle 11: Zuordnung der Eigenschaften Reisefahrzeug und Pendelfahrzeug für ein Beispielhaushalt mit 3 Fahrzeugen und 2 Berufstätigen

Fahrzeug im HH	Reisefahrzeug	Pendelfahrzeug
Fz1	Ja	Ja
Fz2	Nein	Ja
Fz3	Nein	Nein

Mit diesen Annahmen ergibt sich die in Tabelle 12 aufgeführte Grundverteilung der Nutzungstypen für den ersten Raumtyp. Durch die Verwendung der Skalierungsgruppen, wird diese Verteilung dann später im Modell noch modifiziert (siehe Tabelle 10).

Tabelle 12: Verteilung der Nutzungstypen. Bei der ersten Ziffer steht die „1“ für ein Reisefahrzeug, bei der zweiten Ziffer steht die „1“ für ein Pendelfahrzeug.

Gruppe	00	01	10	11
R1HH1Eink1	0.02	0.66	0.00	0.32
R1HH1Eink2	0.03	0.28	0.00	0.69
R1HH1Eink3	0.07	0.19	0.00	0.74
R1HH2Eink1	0.05	0.72	0.00	0.23
R1HH2Eink2	0.09	0.42	0.06	0.43

R1HH2Eink3	0.10	0.12	0.19	0.58
R1HH3Eink1	0.04	0.28	0.01	0.68
R1HH3Eink2	0.06	0.03	0.08	0.82
R1HH3Eink3	0.08	0.00	0.21	0.71

Anhand der vier Nutzungstypen kann in den nächsten Schritten die Zuordnung der Typtage erfolgen.

4.1.5 Zuordnung der Typtage

Jeder der 365 Kalendertage wird einer der folgenden Typtagen zugeordnet.

1. Reisetage
2. Urlaubstag
3. Arbeitstag mit Auto-Pendeln
4. Arbeitstag ohne Auto-Pendeln
5. Sonstiger Tag

Die Anzahl und die Länge der Reisen und somit der **Reisetage** wird mithilfe von Auswertungen des MiD-Reisedatensatzes festgelegt. Eine Reisefahrt bedeutet eine Abwesenheit vom Heimatort mit mindestens einer Übernachtung.

Bei der Verteilung der Reisen auf das Kalenderjahr wird zunächst unterschieden zwischen kurzen und langen Reisen und dann für lange Reisen zwischen Haushalten mit und ohne Kinder unter 18 Jahre. Alle kürzeren Reisen, also definiert als Reisen mit einer Länge von bis zu vier Tagen werden zufällig auf die (Feiertags-) Wochenenden verteilt. Für längere Reisen mit einer Dauer von mehr als vier Tagen werden diese für Haushalte mit Kindern auf die Schulferien gelegt. Für Haushalte ohne Kinder werden sie anhand von Reisetstatistiken (siehe Abbildung 24) auf das Jahr verteilt.

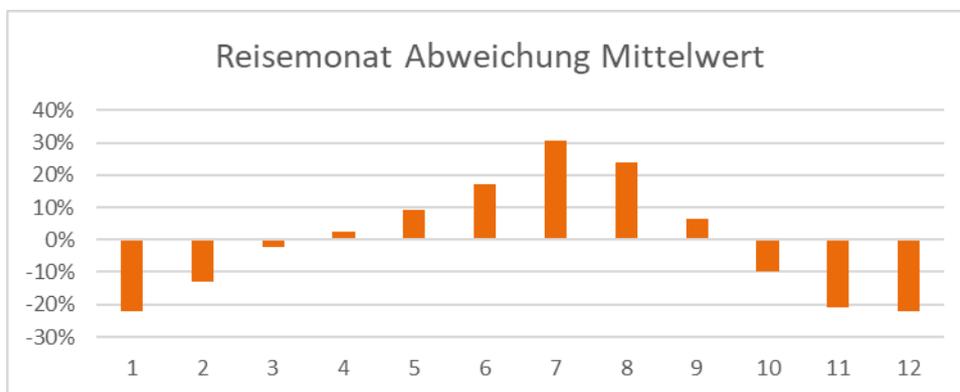


Abbildung 24: Relative Abweichung der Reishäufigkeit jedes Kalendermonats von der mittleren Reishäufigkeit im Reisedatensatz der MiD2017-Befragung

Für die Reisen gelten, dass der erste und der letzte Tag ein Reisetag ist, und die dazwischenliegenden Tage werden als **Urlaubstag** definiert.

Für die **Arbeitstage** ist zunächst von Bedeutung, ob das Fahrzeug für regelmäßige berufliche Wege (Pendelfahrzeug genutzt wird. Wenn das Fahrzeug als Pendelfahrzeug ausgewählt wird, werden von allen in Frage kommenden Werktagen die Urlaubstage und die arbeitsfreien Tage für Arbeitnehmer, die in Teilzeit oder im Homeoffice arbeiten, abgezogen. Die haushalts-einkommensspezifische Verteilung der Anzahl der Arbeitstage/Woche ist in Abbildung 25. Dabei ist zu erkennen, dass Single-Haushalte und Haushalte mit niedrigerem Einkommen vergleichsweise häufiger werktätig zur Arbeit fahren.

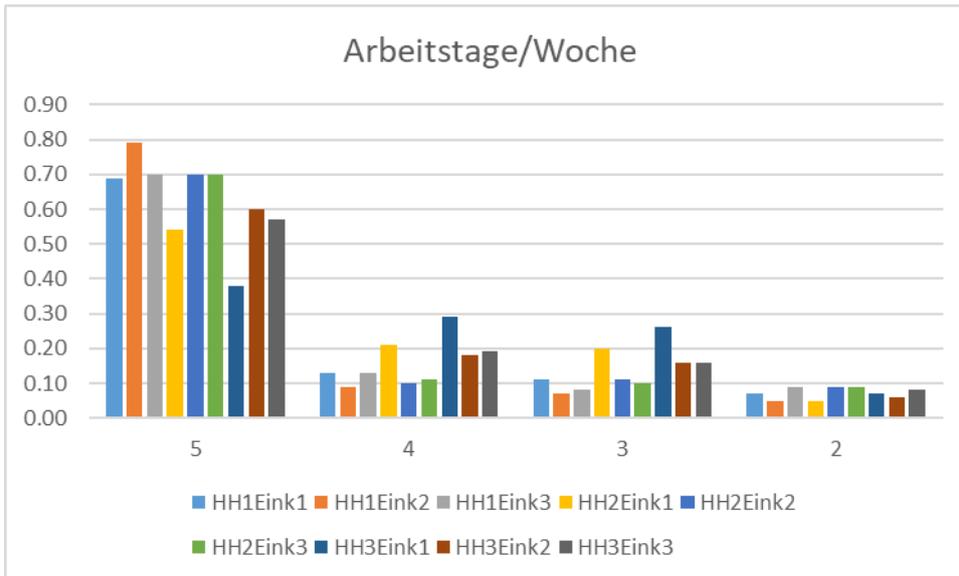


Abbildung 25: Haushalts-Einkommens-spezifische Verteilung der Anzahl von Arbeitstagen pro Woche

Nach der Erfassung der Arbeitstage bleiben noch **Arbeitstage ohne Pkw-Pendeln** zu bestimmen. Es ist möglich, dass trotz Vorhandensein eines Autos dieses nicht für den Arbeitsweg genutzt wird, z. B., wenn öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn etc.), das Fahrrad oder Fahrgemeinschaften benutzt werden. Die Beschäftigten in den verschiedenen Raumtypen machen von dieser Möglichkeit unterschiedlich häufig Gebrauch, wobei die Pkw-Nutzung mit zunehmender raumtypologischer Dichte deutlich abnimmt. Die Häufigkeit von Nicht-Pkw-Pendeln ist in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Wahrscheinlichkeit, je Raumtyp, dass für regelmäßige berufliche Wege nicht der Pkw verwendet wird.

Raumtyp	1	2	3	4	5	6	7
prob_auto	0.49	0.61	0.77	0.8	0.69	0.75	0.81

4.1.6 Auswahl Wegeketten, Parametrierung Distanzen, Startzeiten, Aufenthaltszeiten und Geschwindigkeiten.

Fünf Parameter definieren eine Wegekette.

- Die Abfolge der Ziele, z.B. 1323 (Arbeit-Zuhause-Sonstiges-Zuhause)
- Gesamt-Dauer der Wegekette
- Die Distanzen zu den einzelnen Zielen
- Die distanzabhängige Fahrgeschwindigkeit
- Der Aufenthalt an jedem einzelnen Ziel
- Der Startzeitpunkt.

Alle Parameter werden als abhängige Wahrscheinlichkeitsverteilungen Verteilungen aus dem MiD-Wege Datensatz abgeleitet. Für Reisetage ist die Auswahl der Wegekette einfach, da es nur einen Weg gibt. In Tabelle 14 sind die 10 häufigsten Wegeketten, für Arbeitstage und Nicht-Arbeitstage jeweils aufgelistet.

Tabelle 14: Auswahlset von Wegeketten mit Arbeitsfahrten für Pendler und Wegeketten für sonstige Tage. Die Kodierung der Reiseziele ist "1" für Arbeit, "2" für Sonstiges, "3" für zuhause.

Wegekette (Arbeit)	Häufigkeit (skaliert)	Wegekette (Sonstige)	Häufigkeit (skaliert)
13	42.70%	23	46.94%
1323	14.20%	2323	13.56%
123	12.30%	223	13.27%
1223	4.20%	2223	5.20%
12323	2.70%	232323	4.29%
213	2.60%	22323	3.20%
132323	2.60%	22223	2.84%
13223	2.20%	23223	2.22%
12223	1.70%	222223	1.27%

Für den Weg zur Arbeit wird für ein Fahrzeug immer die gleiche **Pendeldistanz** angenommen, die sich vor allem zwischen den Raumtypen unterscheiden. Die Pendeldistanz wird vor der Parametrierung der Wege festgelegt. Für Nicht-Pkw-Fahrten zu Arbeit werden im Anschluss alle Wege bis zum ersten Heimweg an einem Arbeitstag aus den zuvor festgelegten Wegeketten entfernt. Dadurch wird die Abwesenheitszeit von zu Hause während eines Arbeitstags, wenn kein Pkw genutzt wird, im Modell korrekt erfasst. Weitere Ziele können dann entsprechend der festgelegten Wegekette erst nach der Rückkehr von der Arbeit mit dem eigenen Pkw angefahren werden.

Die **Distanzen zu sonstigen Zielen**, die **Geschwindigkeit** und die Aufenthalte an den einzelnen Zielen, werden dann für jeden Weg zufällig ausgewählt und am Ende so skaliert, dass die **Gesamt-abwesenheit** korrekt getroffen wird.

Es ergibt sich dann im Ergebnis ein **Fahrtenbuch**, das für jede Fahrt im Jahr die Startzeit, die Zielzeit, die Strecke in km und das Wegziel unterschieden in Arbeit, zuhause, Sonstiges und Urlaub. Aus dem Fahrtenbuch kann dann das Fahrprofil erzeugt werden, das dann als Grundlage für die Erstellung eines Ladeprofils gilt.

4.1.7 Ergebnisse und Validierung

Das Reiseprofilmodell verteilt Reisen mit Übernachtungen über das Kalenderjahr in Abhängigkeit von Ferien und Feiertagen. Tagesreisen mit langen Fahrstrecken werden dagegen zunächst zufällig über das Jahr verteilt. Da es aber für die Bewertung der Auslegung von Netzen und Energiesystemen sehr wichtig ist, Hochlastereignisse durch solche Tagesfahrten realistisch abzubilden, wird ein Verfahren zur Umstrukturierung der Tage mit langen Tagesfahrten entwickelt. Dazu werden die Daten von den Autobahnzählstellen [BASt 2019] verwendet, um zwischen Tagen mit höherem und geringerem Verkehrsaufkommen zu unterscheiden.

Die weitere Validierung erfolgt mithilfe der Verteilung (Tabelle 17) und der Parameter der Skalierungsgruppen (Tabelle 10), die so angepasst werden, dass wichtige Validierungsparameter hinreichend genau getroffen werden. Dazu gehören:

1. Durchschnittlicher Wochenverlauf des Pkw-Standortes
2. Verteilung der Jahresfahrleistungen je Mobilitätsgruppe/Raumtyp

Abbildung 26 zeigt den durchschnittlichen Standort eines Pkw's der modellierten Zeitreihen, die sehr ähnlich der Verteilung aus dem MiD-Ergebnisbericht ist. Es ist zu sehen, dass im Durchschnitt lediglich 3 Prozent der Fahrzeuge unterwegs sind, während zu keinem Zeitpunkt mehr als 10 Prozent gleichzeitig auf den Straßen sind. Betrachtet man die gesamte Woche, zeigt sich, dass über die Hälfte der Fahrzeuge im Schnitt zuhause verweilen. Unter der Woche befinden sich zudem bis zu 30 Prozent der Fahrzeuge zeitgleich am Arbeitsplatz (siehe auch [Magdowski 2021, 2021])

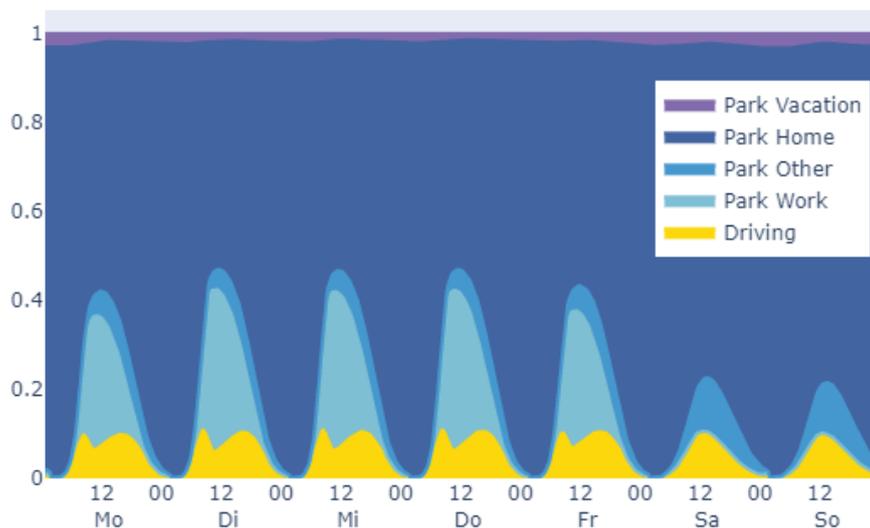


Abbildung 26: Verteilung des Pkw-Standortes im Verlauf einer durchschnittlichen Woche.

Abbildung 27 vergleicht die Jahresfahrleistungsverteilungen für die Raumtypen R4 (dörflicher Raum einer Stadtregion) und R5 (Zentrale Städte einer Ländlichen Region) aus dem Autodatensatz der MiD-Daten mit den modellierten Daten. Die modellierten Werte zeigen hier grundsätzlich einen ähnlichen Verlauf, wie die Grunddaten, jedoch insgesamt etwas höhere Jahresfahrleistungen, was an der Berücksichtigung des höheren Reiseaufkommens liegen kann.

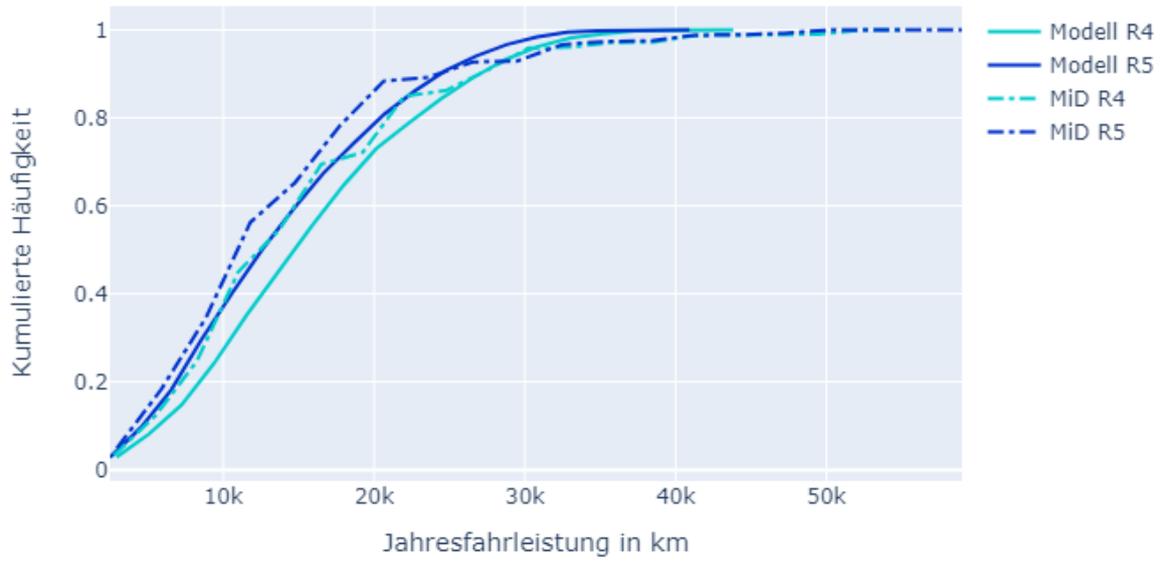


Abbildung 27: Kumulierte Häufigkeit (Summenfunktion) der Jahresfahrleistungen aus dem Fahrprofilgenerator und aus dem MiD2017-Fahrzeugdatensatz

4.2 Methodik zur Ableitung von Ladeprofilen aus Fahrprofilen

4.2.1 Überblick

Für die Ableitung von Ladeprofilen aus Fahrprofilen ist die Menge an empirischen Ladedaten sehr gering und nicht repräsentativ, da die heutigen Besitzer von Elektroautos hauptsächlich zur Gruppe der "Early Adopters" mit eigenem Fahrverhalten gehören. Daher müssen für die Erstellung von Ladeprofilen eine Reihe von Annahmen getroffen werden, die auf ersten Erfahrungen, verfügbaren Technologien und Einschätzungen von Stakeholdern basieren. Da die künftige Entwicklung ungewiss ist, müssen die Auswirkungen der wichtigsten und unsicheren Parameter variiert werden, um die Sensitivität zu bewerten. Zu den wichtigen Annahmen gehören Ladepräferenzen, die Ladeinfrastruktur und die Fahrzeugparameter. Um tatsächliche Ladezeitreihen zu erhalten, werden verschiedene Optionen in Betracht gezogen. Unkontrolliertes Laden, d.h. Laden ohne andere Einflüsse auf das Ladeverhalten als spezifische Nutzerpräferenzen, wird direkt aus den Ladeverfügbarkeitsprofilen erstellt und kann in zwei Varianten unterschieden werden. Der einfachste Fall des ungesteuerten Ladens ist das direkte Laden nach Ankunft an einem Ladepunkt. Eine weitere Variante ist das spätmöglichste Laden. Eine realistischere Annahme ist das Laden mit niedrigem SOC. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug nur dann geladen wird, wenn die verbleibende Reichweite unter einer bestimmten „anxiety range“ liegt, d. h. bei einem Ladezustand, bei dem sich der Nutzer unwohl fühlt und dazu neigt, bei der nächsten Gelegenheit zu laden.

4.2.2 Beschreibung wichtiger Kennzahlen

Batteriegröße und Stromverbrauch

Für die Modellierung von Ladeprofilen sind die **Batteriegröße und der Stromverbrauch** wichtige Parameter, um den Ladestromverbrauch zeitlich zuzuordnen. Die Batteriegröße nimmt Einfluss auf das **Einsteckverhalten**, und somit das Ladeverhalten und insbesondere die Flexibilität.

Die Batteriegröße ist ein wichtiger Kostenfaktor für Elektrofahrzeuge, den Käufer bei ihrer Kaufentscheidung zusammen mit ihren Reichweitenanforderungen und der vorhandenen Ladeinfrastruktur in Beziehung setzen. Der aktuelle Trend zu größeren Batterien könnte sich zukünftig umkehren, wenn Nutzer feststellen, dass auch kleinere Batteriegrößen für ihre Bedürfnisse ausreichen. Für den Energieverbrauch sind insbesondere das Gewicht und damit die Fahrzeuggröße entscheidend. Zur Analyse werden die aktuellen Fahrzeuggrößen auf Basis der Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) ausgewertet. Die folgende Tabelle 15 zeigt die modellierten Größenklassen. Für die Größenklassen Klein und Mittel wird unterschieden, ob es sich um einen Erstwagen oder einen Zweitwagen handelt. Der Zweitwagen ist hier so definiert, dass er nicht genutzt wird für Reisen mit Übernachtungen und eine kleinere Batterie nutzt. Für die Zuordnung der größenklassenabhängigen Fahrzeugeigenschaften zum Fahrprofil werden die Ergebnisse aus der Simulation des Fahrzeugbestandsmodells (Kapitel 2.2) verwendet. Der Verbrauch und die Batteriekapazitäten sind dann Mittelwerte für die jeweiligen Größenklassen aus [EV-Database]. Bei dem Verbrauch handelt es sich um den Verbrauch bei Idealbedingungen. Der temperaturabhängige Mehrverbrauch wird dabei extra modelliert. Für die Ladeprofile werden die Fahrprofile in drei Jahresfahrleistungsgruppen (<7000km, 7000-14000 km >14000 km) aufgeteilt und dann entsprechend der Größenklassenverteilung im Fahrzeugbestandsmodell zufällig zugeordnet.

Tabelle 15: Modellierte Größenklassen Pkw/LNF und notwendige mittlere Ladeinfrastruktur. In Klammern Zweitwagen (ZW)

Bezeichnung	Klein-Pkw (ZW)	Mittel-Pkw (ZW)	Groß-Pkw	LNF
				
Verbrauch kWh/km, ohne Temperaturabh. Mehrbedarf	0,15	0,16	0,18	0,20
Batteriekapazität in kWh	35 (25)	60 (50)	80	45
Bestand 1.1.2024 (in Mio.)	12,1	18,9	14,8	4,3

Ladeinfrastruktur, präferierter Ladeort

Es wird angenommen, dass jeder Nutzer einen präferierten Ladeort hat und nur an einem anderen Ort lädt, wenn es notwendig ist. Die Zuordnung erfolgt dabei mit bedingten Wahrscheinlichkeiten nach bestimmten Kriterien. Die Kriterien geben die Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur an einem bestimmten Ladeort an. Die Idee dabei ist, dass ein Fahrzeug nur dort laden kann, wo es auch häufig genug steht, damit er seine Strecken schafft. Bspw. würde nur ein Pendler, der regelmäßig zur Arbeit fährt sein Fahrzeug bevorzugt bei der Arbeit laden. Des Weiteren ist die relative Aufenthaltszeit an öffentlichen Orten ein verwendetes Kriterium. Dieser Art der Modellierung ermöglicht eine einfache Anpassung des Ladeortes für verschiedene Szenarienuntersuchungen. Ein mögliches Beispiel ist in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die repräsentative Verteilung der Ladetypen.

	Kriterien	Heimladen	Arbeitgeberladen	öffentl. Laden
kein Pendeln	wenig öfftl. Parken	100%	0%	0%
	viel öfftl. Parken	80%	0%	20%
Pendeln	wenig öfftl. Parken	60%	30%	0%
	viel öfftl. Parken	50%	20%	20%

Als Heimladen ist für diesen Fall der Ort gemeint, wo das EV am Ende des Tages steht, wenn es zuhause ist. Das kann auch öffentlich am Straßenrand sein. Erst für die Flexibilität ist dann wichtig, ob das EV in einem EFZH steht.

Ansteckverhalten

Die Fahrzeugbatterie bietet ein großes systemdienliches Speicherpotenzial. Damit das genutzt werden kann, ist die Bereitschaft, dass EV-Nutzer sich ans Stromnetz anschließen, auch wenn sie gerade nicht laden müssen von großer Bedeutung. Da der EV-Nutzer zunächst keinen Vorteil für seine Fahrt hat, ist es wichtig, dass es einen weiteren in der Regel finanziellen Anreiz gibt, das

Fahrzeug anzuschließen. Dieser Anreiz kann über zeitvariable Stromtarife erfolgen, die dazu führen, dass das EV mehr Möglichkeiten hat zu günstigen Zeiten das Auto zu laden. Eine weitere Möglichkeit ist, dass ein Aggregator die Zeit vergütet, die das EV angesteckt ist, um den Zeitraum zu vergrößern zur Nutzung der EV-Batteriekapazität. Aktuell gibt es bereits Anbieter für dynamische Stromtarife und es ist zu erwarten, dass der Markt der Flexibilitätsanbieter größer wird und somit auch der Anreiz mehr Zeit angesteckt zu sein. Dabei kann man grundsätzlich zwei Verhaltensweisen unterscheiden. Der einfache Fall ist, dass der EV-Nutzer nur ansteckt, wenn er auch laden will, dann allerdings bis zur nächsten Fahrt angesteckt bleibt. Wenn der Nutzer dann bspw. 12 Stunden zwischen Ankunft und Abfahrt hat, die Batterie aber bereits in drei Stunden vollgeladen wäre, ergibt sich daraus das Flexibilitätspotenzial für die Lastverschiebung (oder die Rückspeisung). Das andere Extrem wäre, dass das EV immer angesteckt wird, wenn es am Ladeort geparkt ist. Bei der Betrachtung der Verhältnisse der Aufenthaltszeit der Fahrzeuge (Abbildung 28) wird die Bedeutung dieses Aspekts einsichtig. Während die Fahrzeuge über 80 % der gesamten Zeit zuhause stehen, brauchen sie bei einer Anschlussleistung von jeweils 11 kW nur 2,9 % der Zeit zum Laden. Das Ansteckverhalten bestimmt wie groß der Anteil der theoretisch nutzbaren Flexibilität wirklich ist und ist daher maßgebend für die Nutzung der Flexibilität.



Abbildung 28: Mittlere Aufenthaltszeit einer Auswahl von 100 modellierten Fahrzeugen.

Temperaturabhängigkeit

Die Saisonalität des Ladestromverbrauchs hängt stark von den temperaturabhängigen Mehrverbräuchen zur Aufheizung der Kabine und der Batterie ab. An besonders heißen und kalten Tagen entsteht ein erhöhter Energiebedarf aufgrund der Abweichung der Außentemperaturen von den Komforttemperaturen des Fahrzeugnutzers. Dieser erhöhte Energiebedarf weist einen starken Zusammenhang mit anderen temperaturabhängigen Verbrauchern und Erzeugern, insbesondere Wärmepumpen, auf.

Es gibt eine Unterscheidung zwischen dem stationären und instationären Leistungsbedarf in Bezug auf die Temperaturabhängigkeit. Der stationäre Leistungsbedarf tritt auf, wenn das Fahrzeug während der Fahrt die Außentemperatur mit der Komforttemperatur ausgleicht und Energie aus der Batterie für Heizung/Kühlung benötigt.

Der instationäre Mehrbedarf entsteht durch das Aufheizen der Fahrzeugkabine und der Batterie vor der Fahrt und folgt näherungsweise linear der Umgebungstemperatur.

Für die Modellierungen wird hier das Wetterjahr 2012 ausgewählt, da es eine besonders lange kalte Periode gab, die eine Extremsituation für die Systemauslegung darstellt. Die Wahl des Wet-

terjahres ist aber grundsätzlich flexibel und auch Prognosen für zukünftige Szenarien zur Temperaturentwicklung unter Berücksichtigung des Klimawandel sind möglich. Der Zusatzbedarf variiert je nach Fahrprofil. Ein Fahrzeug mit vielen kurzen Strecken, bspw. muss öfter aufheizen und hat dadurch einen höheren spezifischen Verbrauch (kWh/km). Im Jahresverlauf liegt der spezifische Verbrauch bei etwa 10 bis 15 % über dem Verbrauch bei Normtemperatur.

Abbildung 29 stellt den erhöhten Leistungsbedarf bei Berücksichtigung der Außentemperatur dar. Der instationäre Mehrbedarf eines Fahrzeugs entsteht durch das Aufheizen der Fahrzeugkabine und der Batterie vor der Fahrt und ist in dargestellt. Die benötigte Energie zur Vorkonditionierung der Batterie und des Fahrzeugs folgen näherungsweise linear der Umgebungstemperatur. Die Batterie wird bei Temperaturen unter 0 ° C konditioniert.

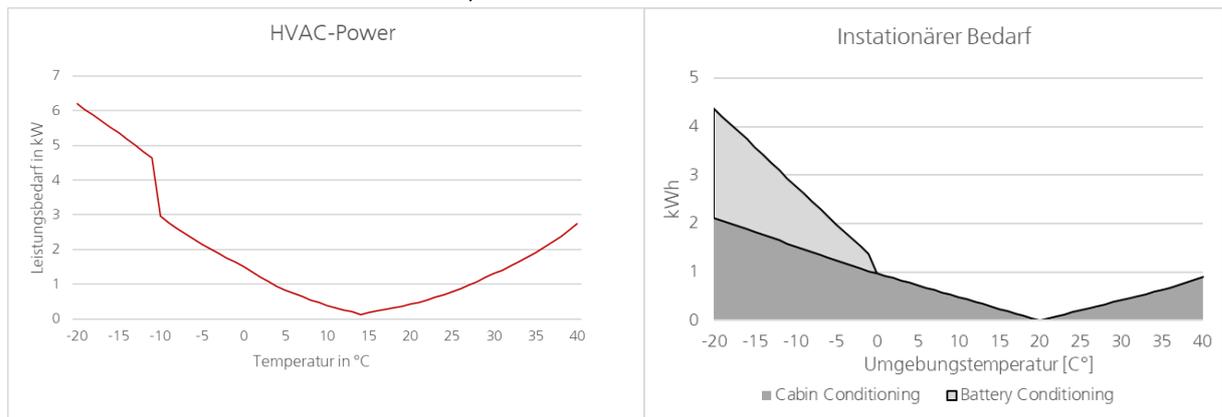


Abbildung 29: Temperaturabhängiger stationärer und instationärer Leistungs- bzw. Energiebedarf eines E-Kfz.

4.2.3 Modellierung des Stromverbrauchs und der Flexibilität

Sobald der gesamte Energieverbrauch, der bevorzugte Ladeort und das Ansteckverhalten des Fahrzeugs für jeden Zeitpunkt definiert sind, lässt sich daraus eine detaillierte Zeitreihe für die Anschlussleistung erstellen. Diese Zeitreihe gibt an, wie viel Ladeleistung zu jedem Zeitpunkt benötigt wird, basierend auf dem jeweiligen Energiebedarf des Fahrzeugs und der Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur an den bevorzugten Orten, wie zu Hause, am Arbeitsplatz oder an öffentlichen Ladestationen.

Aus dieser Zeitreihe der Anschlussleistung können wiederum zwei separate Zeitreihen für den Ladezustand der Batterie (SOC, State of Charge) abgeleitet werden: eine für den frühestmöglichen Zeitpunkt des Ladens und eine für den spätestmöglichen Ladevorgang. Diese beiden Zeitreihen hängen stark vom Ansteckverhalten ab, also davon, wann das Fahrzeug an die Ladeinfrastruktur angeschlossen wird und wie lange es dort verbleibt.

Die Kombination aus Anschlussleistung, Energieverbrauch und den definierten SOC-Grenzen (also den minimalen und maximalen Ladezuständen, die nicht unter- oder überschritten werden dürfen) ergibt das sogenannte Flexibilitätspotenzial. Dieses Potenzial beschreibt, in welchem Umfang und zu welchen Zeitpunkten der Ladevorgang flexibel gesteuert werden kann, ohne den Ladebedarf des Fahrzeugs zu gefährden. Die Anschlussleistung, der Verbrauch und die SOC-Grenzen definieren dann das Flexibilitätspotenzial, dass je nach Flexibilitätstyp (siehe Kapitel 3) dann zu einer konkreten Zeitverlauf des Ladestromverbrauchs führen.

In Abbildung 30 sind die SOC-Grenzen (links) und die Anschlussleistung eines aggregierten Fahrzeuges für die unterschiedliches Ansteckverhalten im Jahresverlauf abgebildet. In diesem Fall handelt es sich um 100 Pendlerfahrzeuge, die zuhause laden. Die blauen Linien geben die SOC-Grenzen und in der unteren Abbildung die Anschlussleistung für den Fall an, dass das E-Kfz immer angesteckt ist, sobald es sich am Ladeort befindet (zuhause). Die orangefarbenen Linien mit dem Zusatz „_plug2“ zeigen die SOC-Grenzen und die Anschlussleistung für den Fall, dass nur bedarfsorientiert angesteckt wird und der Ansteckvorgang somit erst getriggert wird, wenn eine bestimmte Füllstandsgrenze (hier 40 %) unterschritten ist. Für den Fall, dass immer angesteckt wird, liegt die durchschnittliche Differenz zwischen minimalen und maximalen Füllstand bei knapp 40 kWh. Für den Fall, dass nur bedarfsorientiert angesteckt wird liegt diese Differenz bei gut 15 kWh. Die Mittelwerte der Anschlussleistungen liegen entsprechend bei 8 und bei 3 kW.

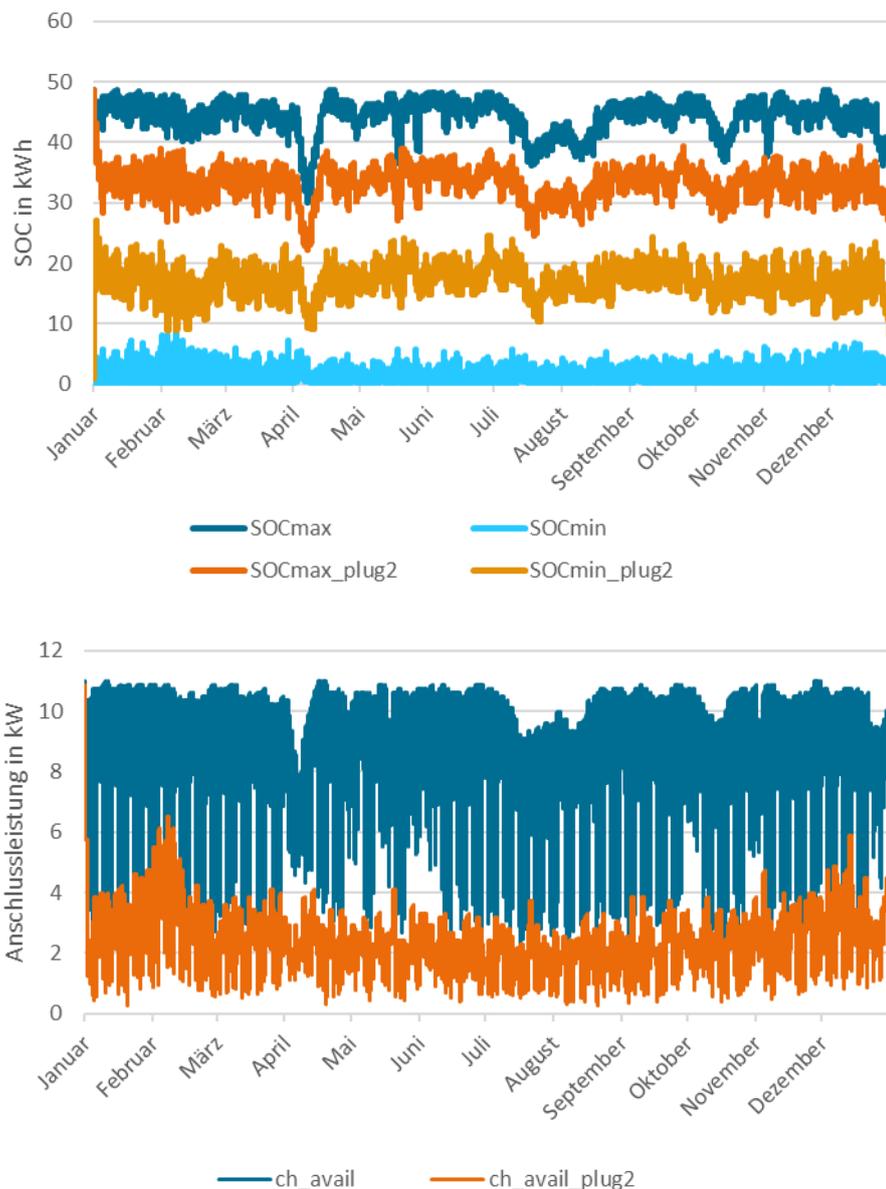


Abbildung 30: SOC-Grenzen und Anschlussleistung eines aggregierten Einzelfahrzeuges bestehend aus 100 Fahrzeugen für unterschiedliches Ansteckverhalten (Ohne Zusatz: Immer angesteckt am Ladeort vs. plug2: Anstecken am Ladeort, sobald der SOC von 40 % unterschritten wurde).

4.2.4 Bedarfsladen an öffentlichen Stationen im Urlaub oder auf Reisen

Die Ladevorgänge für Alltagsfahrten finden normalerweise entweder zu Hause, bei der Arbeit oder an öffentlichen Orten statt. Dabei ist zu erwarten, dass sie in der Nähe des Wohnortes oder zumindest innerhalb des entsprechenden Landkreises – die im NEP betrachtete Aggregationsebene - stattfinden. Für den Fall, dass die Zeit am präferierten Ladeort nicht ausreichend ist, um die geplante Strecke zu fahren wird zusätzlich die Option gezogen an einem (halb-) öffentlichen Ladepunkt zu laden, wenn das Ziel „Sonstiges“ angefahren wird. Der Ladevorgang findet dann immer noch im eigenen Landkreis statt.

Für Reisen mit Übernachtung, ist nicht davon auszugehen, dass sie am Wohnort, bzw. im Landkreis stattfinden. Daher ist in den Fahrprofilen gekennzeichnet, ob das Wegziel eine Reise ist, die nicht zuhause, sondern zum Beispiel am Urlaubsort endet und somit der Ladevorgang dort stattfindet. Für die räumliche Zuordnung kann hier ein Profil herausgebildet werden, das dann entsprechend einem Landkreis zugeordnet werden kann, der ein höheres Reiseaufkommen hat. Ähnlich verhält es sich mit dem Autobahnladeprofil. Dieses wird dadurch gebildet, dass das Fahrzeug die geplante Strecke des Fahrprofils nicht mit der verfügbaren Ladeleistung am präferierten Ladeort und auch nicht mit der Zusatzoption am Ziel „Sonstiges“ fahren kann. Für diesen Fall greift die Option, dass die Fahrt unterbrochen wird für einen Schnellladevorgang an der Autobahn mit 350 kW. Das Profil, das sich dadurch ergibt, kann dann Autobahnladestellen zugeordnet werden. Durch diese Methodik sind die saisonalen Effekte, wie die Ferienzeiten und die Temperaturabhängigkeit des Verbrauchs sowie die Abfahrtszeiten von Reisen und somit die Zeiten, an denen der Ladevorgang stattfindet, repräsentativ berücksichtigt. Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen ein aggregiertes Ladeprofil für das Autobahnladen und das Laden am Urlaubsort.

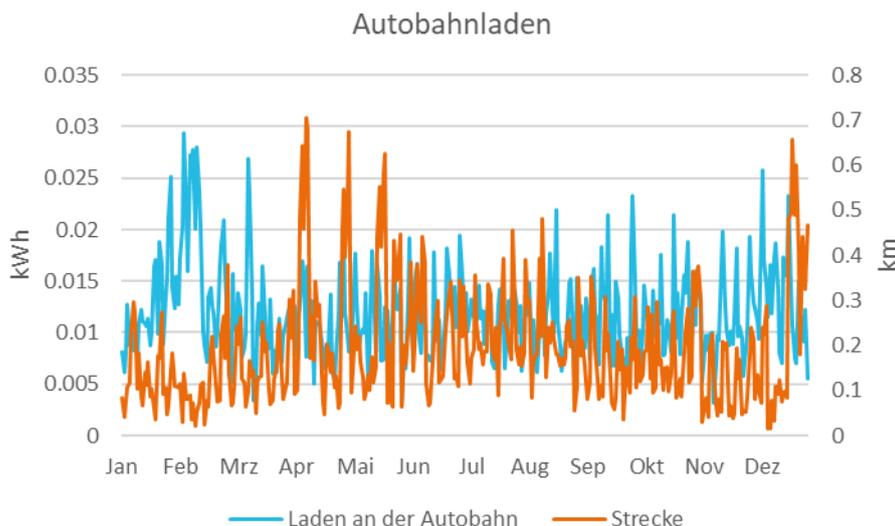


Abbildung 31: Gefahrene Urlaubsstrecke (rechte Achse) und repräsentatives Autobahnladeprofil(links) normiert auf ein Fahrzeug.

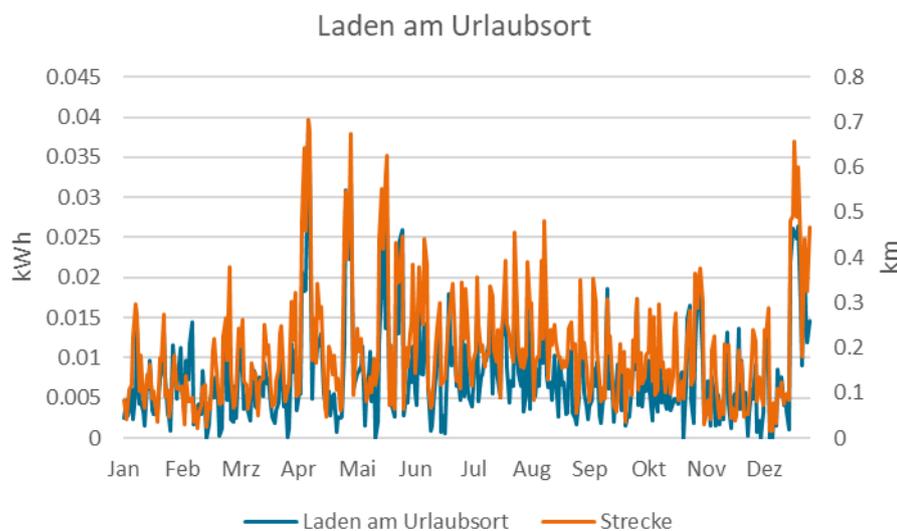


Abbildung 32: Gefahrene Urlaubsstrecke (rechte Achse) und Ladeprofil am Urlaubsort (links) normiert auf ein Fahrzeug.

Das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen entlang der Autobahnen zeigt, dass die Nachfrage für diesen Datensatz (Raumtyp R1 mit verhältnismäßig höherem Reiseaufkommen und höherem Anteil öffentlichem Laden) insbesondere an kalten Tagen am höchsten ist. Dies liegt daran, dass niedrige Temperaturen die nutzbare Batteriekapazität verringern und damit häufiger geladen werden muss. Dieser temperaturempfindliche Effekt ist so stark, dass er für die Ladeenergie dem erhöhtem Reiseaufkommen in der Urlaubszeit und an Feiertagen überwiegt. Das bedeutet, dass auch an verkehrsreichen Tagen während der Ferien die Nachfrage nach Ladevorgängen auf der Autobahn weniger ausgeprägt ist als an kalten Wintertagen.

Im Gegensatz dazu überwiegt bei Ladevorgängen am Reise- oder Urlaubsort der Einfluss der Ferienzeiten und Feiertage. Insbesondere während der Oster- und Weihnachtsfeiertage sowie in den Sommerferien steigt der Bedarf an Ladestrom entsprechend an, da viele Menschen mit ihren Fahrzeugen verreisen. Dieser erhöhte Bedarf in den Ferienzeiten übertrifft den zusätzlichen Ladebedarf, der durch kalte Temperaturen verursacht wird, sodass in diesen Zeiten insgesamt mehr Ladevorgänge verzeichnet werden als im Winter. Das kann auch daran liegen, dass die Reisen an den Feiertagen länger sind mit mehrtägigen Aufenthalten, dadurch kann es notwendig werden, auch am Urlaubsort nochmal nachzuladen. Die resultierenden Profile können dann regional nach anderen Kriterien zugeordnet werden als die Profile der Ladevorgänge, die im eigenen Landkreis stattfinden. Dazu können die Zählstellendaten der Autobahnen oder falls vorhanden Daten zum Tourismusaufkommen verwendet werden.

4.2.5 Validierung mit gemessenen Ladeprofilen

Auch wenn die realen Messdaten nicht ausreichend sind, um daraus repräsentativ Profile zu erstellen, können Sie an bestimmten Stellen verwendet werden, um das Modell parametrieren. Zu diesem Zweck werden im Folgenden drei Studien ausgewertet.

Die Plattform von **Elaad** [ElaadNL 2020] zeigt von dem gleichen Dataset Auswertungen zu Ankunftszeiten, Anschlusszeiten, Energiebedarf und Ladekurven von E-Fahrzeugen unterschieden zwischen den Ladeorten Heim, Arbeit und öffentlich. Die durchschnittlichen Ansteckzeiten und Energiebedarfe könnten dabei ebenso verwendet werden, um die Komfortreichweite einzustellen,

ist aber auch sehr abhängig von der Batteriekapazität der E-Kfz, die sich im Vergleich zu 2018 verändert hat und erwartungsgemäß in Zukunft noch weiter verändern wird.

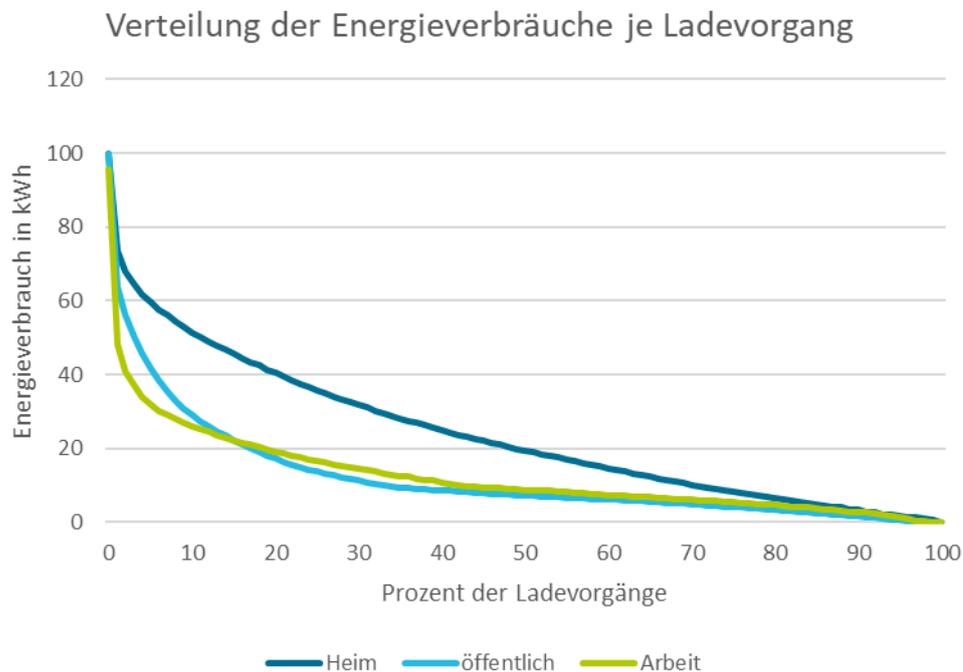


Abbildung 33: Verteilung der Energieverbräuche je Ladevorgang nach [ElaadNL 2020]

Die analysierten Daten umfassen überwiegend intelligente Ladevorgänge (69 %). Im Durchschnitt lädt jeder E-Auto-Besitzer etwa viermal pro Woche. Auffällig ist, dass die meisten Ladevorgänge bei einem hohen Ladezustand (SoC) von etwa 50 % beginnen. Die im Modell gewählte Einstellung von 40 % als Auslöser für einen Ladevorgang scheint daher insofern plausibel, dass die Batteriekapazitäten gegenüber 2020 in Zukunft steigen werden.

Die AC-Ladekurven zeigen einen leichten Rückgang der Ladegeschwindigkeit ab einem SoC von 75 %. Die Analyse bestätigt, dass E-Auto-Besitzer bei niedrigerem SoC eher auf Schnellladen zurückgreifen, verglichen mit dem Ladezustand zu Beginn regulärer AC-Ladevorgänge. In dieser Studie ist das öffentliche Laden für zwei Fälle relevant. Zum laden jene Fahrzeuge öffentlich, die regulär kein Zugang haben zu einer Ladestelle zuhause oder beim Arbeitgeber. Zum anderen laden jene E-Kfz öffentlich, die zwar in der Regel zuhause oder beim Arbeitgeber laden können, die Routenplanung jedoch ergibt, dass die Reichweite nicht ausreichend ist für die verbleibende geplante Strecke bis zum Ladepunkt.

Ein Vergleich zufällig ausgewählte intelligenter Ladevorgänge mit regulären Sitzungen zeigt, dass der Energiebedarf bei intelligenten Ladevorgängen zwischen 18 und 21 Uhr (während der abendlichen Spitzenlast) um 47 % niedriger ist als bei regulären Ladevorgängen. Intelligentes Laden scheint also eine deutliche Erhöhung des Stromverbrauchs im Haushalt während der abendlichen Spitzenzeiten zu vermeiden.

Im Projekt von **National Grid** in England [National Grid 2018] wurden 673 Haushalte mit Smart Charging Systemen ausgestattet, um zu untersuchen, ob diese Investitionen in den Netzausbau verschieben oder vermeiden können. Die Versuchsdaten zeigen, dass flexibles Laden technisch machbar und von den meisten Teilnehmern akzeptiert wird. Zudem wird analysiert, dass in den abendlichen Spitzenzeiten ein Lastmanagement erforderlich ist für die Netzintegration, wenn

keine anderen Anreize gesetzt werden. Zeitabhängige Anreize (Time of Use) sind besonders wirksam, um den Strombedarf von der Abendspitze zu verlagern, vor allem in Kombination mit intelligentem Laden über eine App. Intelligentes Laden kann dabei helfen, die negativen Folgen eines massenhaften Einsatzes solcher Anreize zu steuern und liefert wertvolle Daten für zukünftige Entwicklungen.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass während der abendlichen Spitzenzeit eine erhebliche Flexibilität besteht – 75 % der E-Fahrzeuge sind in dieser Zeit für weniger als 40 % der Dauer, in der sie angeschlossen sind, tatsächlich am Laden. Dies widerspricht sich nicht mit den Modellierungen in dieser Studie, hängt aber stark von dem Anreiz für das Anstecken ab und nimmt zudem eine andere Batteriekapazität ab. Die höchste Ladefrequenz wurde in den Wintermonaten zwischen Januar und Februar beobachtet, was vermutlich auf die geringere Effizienz der Batterien bei kaltem Wetter, Verluste durch Batterie-Konditionierung und den erhöhten Bedarf an Heizenergie für die Passagiere zurückzuführen ist. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen in dieser Studie, die zeigen, dass der Ladebedarf in kalten Phasen am höchsten ist und anderen saisonale Effekte, die zu höherem Fahrtaufkommen führen (z.B. Feiertag), überwiegt.

Die **BDL-Studie** wertet mehr als 20 BMW i3 Testfahrzeuge von Privathaushalten über einen Zeitraum von ein Jahr mit 9230 Ladevorgängen aus [A. Ostermann 2023] Die Fahrzeuge waren im Durchschnitt zu 56 % der Zeit verfügbar, mit einer täglichen Ansteckdauer von 13,5 Stunden. Der Ziel-Ladezustand (SOC) lag bei 59 %, während die durchschnittliche tägliche Abfahrtszeit um 7:00 Uhr morgens war. Grundsätzlich besteht hier auch das Problem der Vergleichbarkeit. Die nutzbare Batteriegrößen fallen mit 38 kWh etwas kleiner aus als zukünftige Batteriegrößen, was die Vergleichbarkeit der Werte für den angegebenen Ziel-SOC und den SOC, der einen Ladevorgang auslöst begrenzt. Die tägliche Ansteckdauer von 13,5 Stunden hängt mit der Anwesenheit am Ladeort und dem Anreiz für das Anstecken ab. Für modellierte im städtischen Raum ist die mittlere tägliche Ansteckzeit 19 Stunden, wenn immer angesteckt wird und 6,6 Stunden, wenn erst bei Bedarf angesteckt wird und dann angesteckt bleibt bis zum nächsten Weg.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die modellierten Ergebnisse grundlegend plausibel bleiben bei Betrachtung der Ergebnisse aus den Reallaboren. Die gemessenen Profile sind jedoch sehr fallspezifisch und teilweise mit einer älteren Generation von Fahrzeugen, die nicht mehr für die zukünftige Flotte repräsentativ sein wird. Das vermehrte Laden in Abendspitzen und der dominante Effekt durch kalte Monate gegenüber anderen Saisonalitäten sind in den Modellierungen gut abgebildet. Kennzahlen, wie der Anteil der angesteckten Fahrzeuge und die Sensitivität auf Preissignale sind eher fallspezifisch und nur qualitativ miteinander vergleichbar, liegen aber im plausiblen Bereich.

4.3 Zusammenstellung und Aggregation

4.3.1 Notwendigkeit und Herausforderungen bei der Aggregation

Die Aggregation von Einzelfahrzeugprofilen ist aus mehreren Gründen notwendig, insbesondere bei der Analyse großer Flotten von Elektrofahrzeugen oder bei der Planung von Ladeinfrastrukturen auf regionaler oder nationaler Ebene. Einzelne Fahrzeugprofile zu aggregieren hilft, den Rechenaufwand erheblich zu reduzieren, da es oft unpraktisch oder ineffizient ist, jedes Fahrzeug einzeln zu modellieren. Aggregierte Profile erlauben eine repräsentative Darstellung des Gesamtverhaltens vieler Fahrzeuge, was für Planungen und Simulationen unerlässlich ist. Dadurch können

Muster in der Ladedynamik erkannt und Prognosen erstellt werden, die für die Netzplanung, Laststeuerung und für die Abschätzung der zukünftigen Ladebedarfe erforderlich sind.

Dennoch führt die Aggregation mehrerer Einzelprofile zu einem Gesamtprofil oft zu einer idealisierten Sicht auf die Flexibilität und Ladepotenziale von Elektrofahrzeugen. Hier sind einige zentrale Aspekte:

1. **Synchronität der Ladevorgänge:** Bei der Aggregation wird häufig nicht berücksichtigt, dass die Ladevorgänge einzelner Fahrzeuge asynchron ablaufen. Das bedeutet, dass nicht alle Fahrzeuge zu gleichen Zeiten laden oder entladen. In einem aggregierten Profil entsteht der Eindruck, dass die gesamte Anschlussleistung zu jeder Zeit genutzt oder bereitgestellt werden kann. Dies führt dazu, dass die Flexibilität des Lade- und Entladeverhaltens überschätzt wird, weil in der Realität nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig verfügbar sind.
2. **Individuelle Ladeprioritäten und Nutzungszeiten:** Jedes Fahrzeug hat individuelle Ladepräferenzen und Nutzungszeiten, die je nach Fahrer unterschiedlich sind. Ein Fahrzeug, das typischerweise morgens aufgeladen wird, kann nicht in einem aggregierten Profil dieselbe Flexibilität bieten wie ein Fahrzeug, das abends geladen wird. Diese Unterschiede nivellieren sich in einem aggregierten Profil, sodass die spezifischen zeitlichen Einschränkungen einzelner Fahrzeuge nicht mehr klar erkennbar sind.
3. **Unterschiedliche Ladezustände (SOC):** Elektrofahrzeuge haben unterschiedliche Ladezustände, die in einem aggregierten Profil gemittelt werden. Fahrzeuge mit fast leerem Akku haben eine höhere Ladepriorität, während Fahrzeuge mit fast vollem Akku keine unmittelbare Ladeanforderung haben. Durch die Aggregation wird dieser Unterschied unsichtbar, was die tatsächliche Flexibilität des gesamten Systems verfälscht, da davon ausgegangen wird, dass alle Fahrzeuge gleichzeitig und vollständig flexibel sind.
4. **Unterschiedliche Ladeleistungen der Fahrzeuge:** Je nach Fahrzeugmodell und Ladeinfrastruktur variiert die maximale Ladeleistung erheblich. Hochleistungsfahrzeuge können schnell große Mengen Strom aufnehmen, während andere Fahrzeuge deutlich langsamer laden. Die Aggregation führt dazu, dass diese Unterschiede verwischt werden, wodurch eine einheitliche Ladeleistung angenommen wird, die in der Realität jedoch nicht existiert. Diese Annahme kann zu einer Überschätzung der möglichen Spitzenlast und der Verfügbarkeit der Flexibilität führen.
5. **Verteilnetzrestriktionen und Lastspitzen:** Das Verteilnetz ist oft nicht darauf ausgelegt, viele Elektrofahrzeuge gleichzeitig mit hoher Leistung zu versorgen. In einem aggregierten Profil wird jedoch häufig die Annahme getroffen, dass die gesamte verfügbare Anschlussleistung genutzt werden kann, ohne Rücksicht auf tatsächliche Netzbeschränkungen. Die Realität sieht oft anders aus: Netzbetreiber müssen Lastspitzen vermeiden, um Überlastungen und Schäden an der Infrastruktur zu verhindern, was die Flexibilität einschränkt. Besonders in Zeiten hoher Netzbelastung kann es zu Netzengpässen kommen, die im aggregierten Profil nicht berücksichtigt werden.
6. **Verschleiß der Batterien:** Die volle Batteriekapazität von Elektrofahrzeugen wird bewusst nicht vollständig für flexible Ladeoptionen genutzt, um den Verschleiß der Batterie zu minimieren. Um die Lebensdauer der Batterie zu verlängern, beschränken viele Fahrzeughersteller oder Nutzer die Lade- und Entladetiefe der Batterie (SOC). Das bedeutet, dass nicht die gesamte Kapazität der Batterie für Flexibilitätsdienste verfügbar ist, sondern nur ein Teilbereich, der den Verschleiß reduziert.

Zusammengefasst zeigt sich, dass ein aggregiertes Profil eine idealisierte Darstellung der Ladeflexibilität darstellt, die die tatsächlichen Gegebenheiten auf Einzelfahrzeugebene nicht korrekt abbildet. Solche Profile überschätzen oft die Flexibilität, weil sie von synchronisierten, gleichmäßigen

Lade- und Entladevorgängen ausgehen und spezifische Fahrzeugunterschiede und Netzrestriktionen vernachlässigen. In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze zur Aggregation der Profile, die einige der oben genannten Aspekte berücksichtigen [Al Taha 2023; Muessel 2023; Geng, S., Lee, T., Mallapragada, D., AND Botterud, A. 2023]. Für diese Modellierung werden die Einzelprofile zunächst in sinnvolle Aggregationsgruppen aufgeteilt, so dass innerhalb einer Aggregationsgruppe eine gewisse geometrische Ähnlichkeit vorhanden ist. Das berücksichtigt die ersten drei Punkte. Anschließend werden der Verbrauch, die SOC-Grenzen und die Anschlussleistung der Einzelprofile aufsummiert. Je nach Anwendungsfall kann dann für das aggregierte Profil die Anschlussleistung und die SOC-Grenzen pauschal reduziert werden. Damit werden auch die anderen Punkte mitberücksichtigt.

4.3.2 Zusammenstellen der Profile in Aggregationsgruppen

Wie im vorherigen Unterkapitel erwähnt, wird für die Zusammenstellung der Profile vor der Aggregation die optische Ähnlichkeit verwendet. Im ersten Schritt werden dabei alle Profile zusammengestellt, die repräsentativ sind für das Untersuchungsgebiet. Für Verteilnetzuntersuchungen kann man genaue Angaben verwenden für die Konstellation an Haushalten. Für größere Gebiete (z.B. Landkreise) ohne genaue Angaben der Zusammensetzung der Haushalte kann man Profile zu einzelnen Raumtypen zusammenfassen und die anderen Merkmale dort repräsentativ abbilden. Die prozentualen Verteilungen der 9 Mobilitätsgruppen je Raumtyp ergeben sich dann aus den summierten Gewichtungsfaktoren aus den MiD-Daten, die dadurch den Datensatz repräsentativ abbilden. Im zweiten Schritt werden aus diesem Pool weitere Merkmale des Fahr- und Ladeverhaltens zusammengefasst, die eine Ähnlichkeit vorweisen. Dabei wird der durchschnittliche Wochenverlauf für das untertägige Verhalten und der Jahresverlauf für das saisonale Verhalten analysiert. Unterschiede sind insbesondere zu erkennen beim Ladeort. Fahrzeuge, die beim Arbeitgeber laden, weisen ein deutlich anderes zeitliches Verhalten auf als Fahrzeuge, die zuhause laden (siehe Abbildung 34). Die aggregierte Anschlussleistung ist im Mittel deutlich höher beim Heimladen, weist aber auch ein anderes untertägliches Verhalten auf als für Arbeitgeberladen und sonstige Ladeorte. Während für Heimlader am Abend und in der Nacht die meisten Fahrzeuge angeschlossen sind, sind für Fahrzeuge, die beim Arbeitgeber oder öffentlich laden, die Anschlussleistung tagsüber höher. Da nicht immer alle Fahrzeuge unterwegs sind, ist selbst tagsüber dennoch die Anschlussleistung beim Heimladen in der Regel noch höher. Auch gut zu sehen ist hier, dass für öffentliches Laden der Peak eher am Nachmittag und für Arbeitgeberladen noch am Vormittag ist.

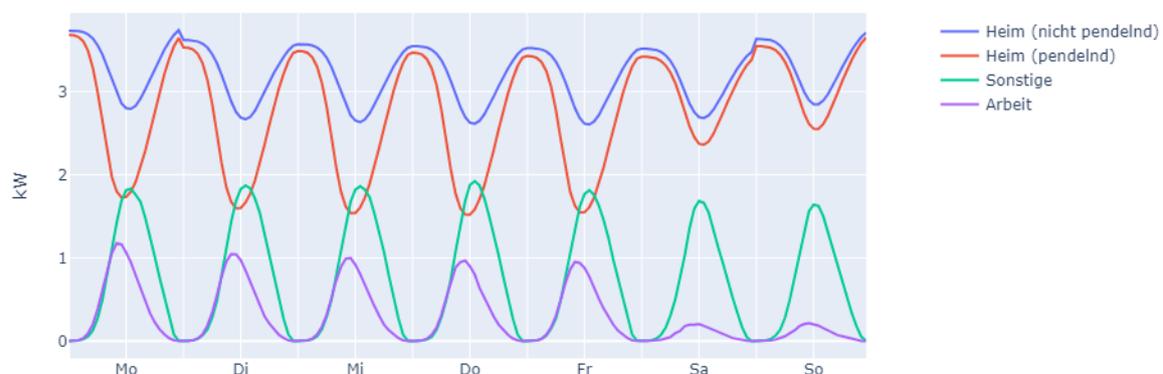


Abbildung 34: Durchschnittliche Anschlussleistung im Wochenverlauf für alle Raumtypen unterschieden zwischen den Ladeorten und nach Pendelverhalten.

Unterschiede sind ebenfalls zu sehen bei Betrachtung der Ladeenergie im Wochenverlauf für ungesteuertes Laden bei Bedarf (SOC fällt unter 40 %). Das Laden beim Arbeitgeber erfolgt gesammelt am Vormittag mit einem hohen Peak (*Abbildung 35*). Heimplader beziehen in Summe die höchste Energie am Nachmittag, wobei Pendler deutlich mehr laden müssen, aufgrund der in der Regel höheren Fahrleistung. Einige Fahrzeuge, die in der Regel beim Arbeitgeber laden, laden auch am Wochenende, jedoch zumeist an öffentlichen Ladeorten, oder auf Reisen, siehe Kapitel 4.2.4.

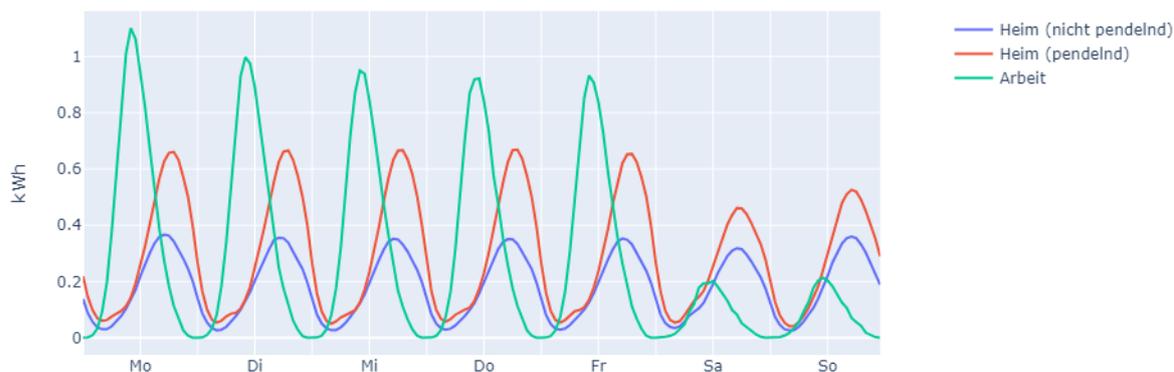


Abbildung 35: Durchschnittliche Ladeenergie im Wochenverlauf für alle Raumtypen in kWh unterschieden zwischen Pendlern und Nicht-Pendlern und Arbeitgeberladen.

Auch zwischen den Raumtypen sind dabei Unterschiede zu erkennen. Fahrzeuge, die nicht pendeln in Metropolen (R1) haben unter der Woche ihr Fahrzeug häufiger angeschlossen als in Stadtumlandgebieten (R3). Für Pendler ist die Anschlussleistung im Wochenverlauf ähnlich zwischen diesen Raumtypen (*Abbildung 36*).

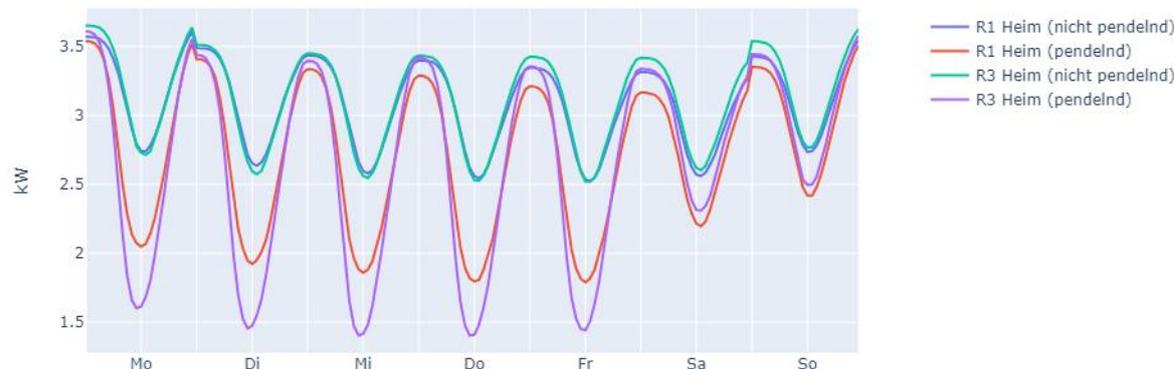


Abbildung 36: Durchschnittliche Anschlussleistung im Wochenverlauf für die Raumtypen R1 und R3 in kW unterschieden zwischen Arbeitgeberladen und Heimpladen.

In *Abbildung 37* ist der Verlauf des SOC in der Woche zu sehen, für den Fall, dass bei Bedarf geladen wird. Heimplader haben in der Regel einen deutlich höheren Batteriefüllstand als Arbeitgeberlader, die sie häufiger die Möglichkeit haben nachzuladen. Dass Pendler einen absolut gesehen höheren Batteriefüllstand haben, liegt daran, dass sie im Jahr mehr fahren und sich nach der in Kapitel 2 vorgestellten Logik eher für ein größeres Fahrzeug entscheiden würden. Für Fahrzeuge, die beim Arbeitgeber laden, ist zu sehen, dass der durchschnittliche Füllstand im Wochenverlauf ansteigt. Dies liegt darin, dass sie mit einer volleren Batterie ins Wochenende gehen wollen, da für sie ja dann sonst nur noch das teurere öffentliche Laden infrage kommt.

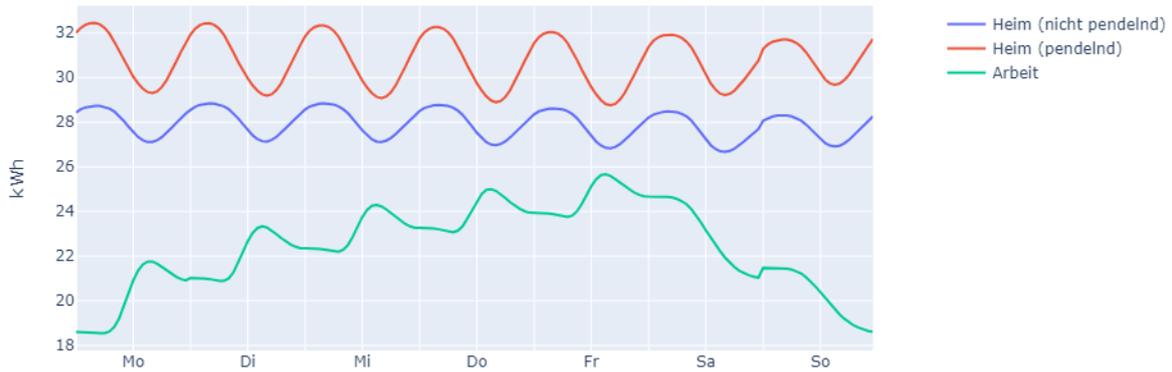


Abbildung 37: Durchschnittliche geladene Leistung beim Sofortladen im Wochenverlauf für alle Raumtypen in kWh unterschieden zwischen Pendlern und Nicht-Pendlern.

Im saisonalen Verlauf lassen sich bei Betrachtung des SOC-Verlaufs auch einige Effekte feststellen. Abbildung 38 zeigt dazu die Tagesmittelwerte über ein Jahr auf. Für alle Profile ist die Delle zu sehen an Feiertagen. Durch die Reisen, sinkt der SOC hier deutlich ab. Für Pendler und Fahrzeuge, die beim Arbeitgeberladen, sinkt der SOC auch in der Urlaubszeit im August merklich ab.



Abbildung 38: Tagesmittelwerte des SOC über den Jahresverlauf für alle Raumtypen unterschieden zwischen Fahrzeugen, die zuhause bzw. Beim Arbeitgeber laden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine Unterscheidung zwischen Ladeorten und Pendelverhalten aufgrund der Verläufe sehr empfehlenswert ist. Eine Unterscheidung zwischen den Raumtypen, kann je nach Anwendungsfall sinnvoll sein, der Unterschied ist jedoch geringer als zwischen den zuvor aufgeführten Merkmalen. Da diese Unterscheidung für die Aggregation jedoch nicht unbedingt ausreicht, um alle in 4.3.1 erwähnten Effekte ausreichend zu kompensieren, kann es sinnvoll sein, die SOC-Grenzen oder die Anschlussleistung zusätzlich zu reduzieren vor der Verwendung im Systemoptimierungsmodell, um die Flexibilität nicht zu überschätzen.

Es können auch noch weitere Optionen für eine Unterscheidung in Betracht gezogen werden, die sich teilweise überschneiden, wie bspw. Einkommen, Haushaltstyp, Skalierungsgruppe, Jahresfahrleistung. Welche Unterscheidung am sinnvollsten ist hängt von der Modellierungsart, der Rechenleistung und dem jeweiligen Untersuchungszweck ab.

5 Anhang

5.1 Verteilung Mobilitätsgruppen und Skalierungsgruppen

Table 17: Häufigkeit der Mobilitätsgruppen und der Skalierungsgruppen aus den MiD-Daten.

Mobilitätsgruppe_lang	Verteilung	Skalierungsgruppe			
		1	2	3	4
R1HH1Eink1	4.88%	35%	30%	15%	20%
R1HH1Eink2	4.38%	30%	20%	20%	30%
R1HH1Eink3	0.45%	30%	25%	15%	30%
R1HH2Eink1	0.66%	35%	30%	20%	15%
R1HH2Eink2	3.80%	30%	25%	20%	25%
R1HH2Eink3	1.95%	25%	20%	25%	30%
R1HH3Eink1	0.33%	30%	25%	20%	25%
R1HH3Eink2	1.31%	30%	25%	20%	25%
R1HH3Eink3	1.95%	25%	25%	20%	30%
R2HH1Eink1	3.78%	30%	30%	20%	20%
R2HH1Eink2	3.01%	30%	20%	20%	30%
R2HH1Eink3	0.24%	25%	20%	25%	30%
R2HH2Eink1	0.66%	30%	25%	20%	25%
R2HH2Eink2	3.22%	30%	25%	20%	25%
R2HH2Eink3	1.59%	25%	25%	25%	25%
R2HH3Eink1	0.24%	20%	25%	25%	30%
R2HH3Eink2	0.97%	25%	25%	25%	25%
R2HH3Eink3	1.40%	20%	20%	30%	30%
R3HH1Eink1	4.45%	30%	20%	20%	30%
R3HH1Eink2	4.44%	25%	20%	25%	30%
R3HH1Eink3	0.35%	25%	25%	25%	25%
R3HH2Eink1	0.87%	30%	35%	20%	15%
R3HH2Eink2	6.06%	30%	25%	25%	20%
R3HH2Eink3	3.37%	25%	25%	25%	25%
R3HH3Eink1	0.34%	20%	20%	30%	30%
R3HH3Eink2	1.71%	25%	30%	25%	20%
R3HH3Eink3	3.13%	20%	20%	30%	30%
R4HH1Eink1	1.08%	20%	25%	25%	30%
R4HH1Eink2	0.83%	30%	30%	20%	20%
R4HH1Eink3	0.05%	25%	25%	20%	30%
R4HH2Eink1	0.28%	25%	30%	20%	25%
R4HH2Eink2	1.62%	20%	30%	30%	20%
R4HH2Eink3	0.83%	20%	20%	30%	30%
R4HH3Eink1	0.10%	20%	20%	30%	30%
R4HH3Eink2	0.45%	20%	20%	30%	30%
R4HH3Eink3	0.78%	15%	20%	35%	30%
R5HH1Eink1	1.66%	30%	25%	25%	20%
R5HH1Eink2	1.13%	25%	25%	20%	30%
R5HH1Eink3	0.07%	25%	20%	25%	30%

R5HH2Eink1	0.31%	30%	30%	20%	20%
R5HH2Eink2	1.55%	30%	25%	25%	20%
R5HH2Eink3	0.57%	25%	20%	25%	30%
R5HH3Eink1	0.08%	25%	25%	20%	30%
R5HH3Eink2	0.40%	25%	25%	25%	25%
R5HH3Eink3	0.57%	20%	20%	30%	30%
R6HH1Eink1	2.93%	30%	25%	25%	20%
R6HH1Eink2	2.02%	30%	25%	20%	25%
R6HH1Eink3	0.10%	25%	20%	30%	25%
R6HH2Eink1	0.73%	25%	30%	25%	20%
R6HH2Eink2	3.42%	25%	30%	25%	20%
R6HH2Eink3	1.56%	25%	25%	20%	30%
R6HH3Eink1	0.20%	20%	30%	20%	30%
R6HH3Eink2	1.07%	20%	20%	30%	30%
R6HH3Eink3	1.41%	25%	20%	25%	30%
R7HH1Eink1	2.73%	30%	30%	20%	20%
R7HH1Eink2	1.91%	25%	25%	25%	25%
R7HH1Eink3	0.10%	30%	30%	20%	20%
R7HH2Eink1	0.95%	25%	30%	20%	25%
R7HH2Eink2	3.98%	25%	30%	25%	20%
R7HH2Eink3	1.75%	25%	25%	25%	25%
R7HH3Eink1	0.22%	25%	25%	20%	30%
R7HH3Eink2	1.29%	20%	30%	30%	20%
R7HH3Eink3	1.69%	25%	20%	25%	30%

6 Literatur

- [A. OSTERMANN 2023] A. Ostermann Bidirectional Electric Vehicles Field Trial Data Set (2023), 139–144
- [AGORA 2021] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut *Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*, www.agora-energie-wende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1
- [BASt 2019] Bundesanstalt für Straßenwesen *Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen*, www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html
- [BMDV 2023] Bundesministerium für Digitales und Verkehr *Verkehr in Zahlen 2023/2024*, bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html
- [BMVI 2021] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) *RegioStaR Regionalstatistische Raumtypologie des BMVI*, bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/regiostar-raumtypologie.pdf?__blob=publicationFile
- [DENA 2023] Deutsche Energie-Agentur *DENA Gebäudereport 2023: Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*
- [DKE 2024] DKE *Bidirektionales Laden: Energiewende mit E-Fahrzeug-Akkus ermöglichen*, www.dke.de/de/arbeitsfelder/mobility/bidirektionales-laden
- [ef.ruhr 2021] Burges *Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery-electric long-haul trucks: study on behalf of Transport & Environment*, www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/01/2022_01_TE_grid_integration_long_haul_truck_charging_study_final.pdf
- [ElaadNL 2020] *ElaadNL Open Datasets for Electric Mobility Research | Update April 2020*, platform.elaad.io/analyses/ElaadNL_opendata.php
- [e-mobil BW 2023] e-mobil BW, NRW.Energy4Climate *Bidirektionales Laden in Deutschland – Marktentwicklung und Potenziale*
- [EV-Database] *EV Database: Current and Upcoming Electric Vehicles*, ev-database.org/
- [EY & BET 2024] EY GmbH & Co. KG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (Hrsg.), BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH *Voruntersuchung zu den Analysen und Berichten des BMWK nach § 48 MsbG: Analyse von Rechtsrahmen, Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Kosten*
- [FfE 2024] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. *V2X Monitor - FfE*, www.ffe.de/veroeffentlichungen/v2x-monitor/
- [IEA 2022] International Energy Agency *World Energy Outlook 2022*, www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022
- [IEE 2023] Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik *Modell AgentHomeID*

- [IFEU 2021] ifeu, Fraunhofer IIS, PTV *Potentialanalyse für Batterie-Lkw: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“*
- [infas 2018] infas, DLR, IVT und infas 360 *Mobilität in Deutschland (im Auftrag des BMVI)*, Online, www.mobilitaet-in-deutschland.de/
- [ISI 2020] Plötz *Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw: Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA)*
- [ISI 2021] Link *Lieferverkehr mit Batterie-Lkw: Machbarkeit 2021: Fallbeispiel REWE Group - Region Nordost*, www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/11/Rewe_Machbarkeit_E-Lkw2021.pdf
- [ISI 2024] Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu, TU Berlin *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3: Modul Verkehr*, • https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Verkehr_V2_0_barrierefrei.pdf
- [KBA 2022] Kraftfahrtbundesamt *Zulassungszahlen bis 2022*, www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ1/fz1_2022.xlsx?__blob=publicationFile&v=5
- [LichtBlick 2024] LichtBlick SE *LichtBlick Prosumer Report 2024*, www.lichtblick.de/presse/prosumer2024/
- [Magdowski 2021] Magdowski *Prognostizierter Hochlauf der Ladeinfrastruktur in Hamburg und Modellierung des Ladestrombedarfs von Elektroautos für Niederspannungsnetze*, openhsu.ub.hsu-hh.de/handle/10.24405/13942
- [National Grid 2018] National Grid *National Grid - Electric Nation Data*, www.nationalgrid.co.uk/electric-nation-data
- [NEP 2023] BNetzA *Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045*
- [NLL 2023] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur *Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf*, nationale-leitstelle.de/wp-content/pdf/broschuere-lis-2025-2030-final-web.pdf
- [NPM 2024] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität *Roadmap Zur Implementierung der ISO 15118: Standardisierte Kommunikation Zwischen Fahrzeug und Ladepunkt*
- [PFENNIG 2023] Pfennig *Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050*. *Applied Energy* 347 (2023), 121289. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121289
- [SwaggerHub 2024] *EDI@Energy API-Webdienste zur prozessualen Abwicklung von Steuerungshandlungen in Verbindung mit intelligenten Messsystemen (iMS) - Universalbestellprozess*, app.swaggerhub.com/apis-docs/edi-energy/Steuerungshandlung_2023-10-24/1.0.0
- [TNO 2022] Tol *Techno-economic uptake potential of zeroemission trucks in Europe: Project funded by Transport & Environment, Agora Verkehrswende*, www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/Elektrische-Lkw/TNO_2022_R11862_Techno-economic_uptake_potential_of_zero-emission_trucks_in_Europe.pdf
- [UBA 2023] Öko-Institut für das Umweltbundesamt *Projektionsbericht 2023 für Deutschland*, www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland