

Masterarbeit

# Energetische und ökonomische Bewertung bidirektionaler Ladelösungen

Simon Salehi  
28.10.2024

HTW Berlin  
Fachbereich 1  
Regenerative Energien

Betreuung  
Prof. Dr.-Ing. Volker Quaschnig  
M.Sc. Joseph Bergner



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

## Kurzfassung

Privat genutzte Pkw in Deutschland befinden sich hauptsächlich in geparktem Zustand. Vor diesem Hintergrund und mit Hochlauf der Elektromobilität stellt sich die Frage, ob batterieelektrische Fahrzeuge zusätzlich als Heimspeicher genutzt werden könnten, um solare Überschüsse zwischenzuspeichern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird bidirektionales Laden für die Photovoltaik-Eigenverbrauchsoptimierung simulationsbasiert bewertet. Hierfür wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches verschiedene, aus der Simulation von Heimspeichersystemen bekannte Verlustmechanismen berücksichtigt. Zusätzlich besteht innerhalb des Modells die Möglichkeit, das bidirektionale System mit einem Heimspeichersystem zu erweitern.

Mittels Parametervariation werden zunächst unterschiedliche Einflussfaktoren des bidirektionalen Ladens für die Photovoltaik-Eigenverbrauchsoptimierung untersucht. Anschließend werden detaillierte Verlustanalysen mit zwei bidirektionalen Ladestationen (Wallboxen) durchgeführt. Zum einen wird eine reale bidirektionale Wallbox simuliert, deren Parametrierung anhand von Messdaten erfolgt. Zum anderen wird eine zukünftige, effizientere Wallbox simuliert, die mit heutigen Batterieumrichtern vergleichbare Effizienzen aufweist. Abschließend werden energetische und ökonomische Betriebsergebnisse ausgewählter Systemkonfigurationen analysiert und gegenübergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch bidirektionales Laden Netzbezüge verringern lassen und Kosten eingespart werden können. Bei den simulierten Systemen führen Umwandlungswirkungsgrade und Fahrzeugleistungsaufnahmen zu hohen Verlusten.

## Abstract

Privately used cars in Germany are parked most of the time. Considering this, and with the ramp-up of electromobility in mind, the question arises whether battery electric vehicles can additionally be used as home storage units to temporarily store solar surpluses.

In this work, bidirectional charging for photovoltaic self-consumption optimization is evaluated based on simulations. A simulation model is developed, which considers various loss mechanisms known from the simulation of home storage systems. The model also offers the option of adding a home storage system to the bidirectional system.

By parameter variation, different influencing factors of bidirectional charging for photovoltaic self-consumption optimization are examined first. Detailed loss analyses are then carried out with two bidirectional charging points (electric vehicle supply equipment, EVSE). On one hand, a real bidirectional EVSE is simulated, which is parameterized based on measured data. On the other hand, a more efficient EVSE is simulated, which has efficiencies comparable to present-day battery converters. Finally, the energetic and economic performance of different system configurations is analyzed and compared.

The results show that bidirectional charging can reduce grid consumption and save costs. Conversion efficiencies and vehicle power consumption lead to high losses in the simulated systems.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	IV
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Stand der Technik .....	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
2 Systemmodellierung.....	5
2.1 Modellbildung.....	5
2.1.1 PV-Wechselrichter .....	7
2.1.2 Bidirektionale Wallbox und Fahrzeug.....	8
2.1.3 Batteriesystem .....	13
2.2 Eingangszeitreihen .....	14
2.2.1 PV-Generatorleistung.....	15
2.2.2 Haushaltslast.....	16
2.2.3 Mobilitätsverhalten .....	17
2.3 Modellvalidierung .....	18
2.4 Effizienzkennzahlen .....	19
3 Ergebnisbetrachtung .....	21
3.1 Einflussfaktoren .....	22
3.1.1 Mobilitätsverhalten .....	22
3.1.2 Fahrzeug .....	24
3.1.3 Batteriesystem .....	25
3.2 Verlustanalyse .....	27
3.3 Systemvergleich.....	30
4 Diskussion .....	32
5 Zusammenfassung.....	34
A Anhang .....	37
A.1 Ergänzende Grafiken.....	37
A.2 Ergänzende Modellparameter .....	41
Abbildungsverzeichnis .....	42
Tabellenverzeichnis .....	43
Literaturverzeichnis .....	44

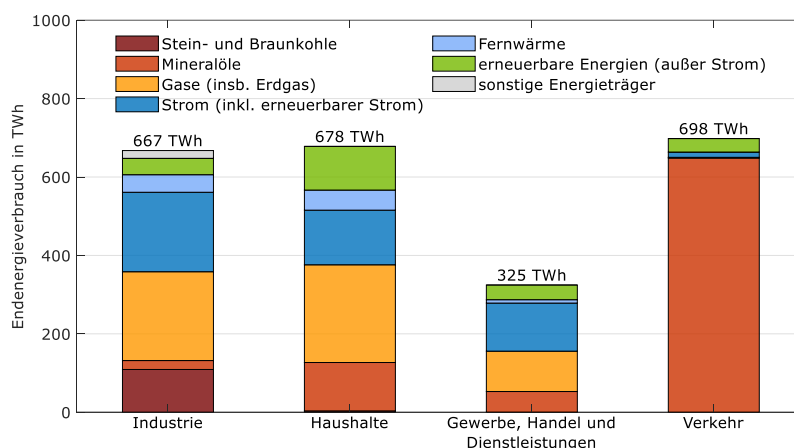
## Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
BAT	Batteriespeicher
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl. battery electric vehicle)
BS	Batteriesystem
CCS	kombiniertes Ladesystem (engl. combined charging system)
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl. fuel cell electric vehicle)
G	Netz (engl. grid)
L	elektrische Last (engl. electric load)
MPP	Punkt maximaler Leistung (engl. maximum power point)
OBC	Bordladegerät (engl. on-board charger)
PHEV	Plug-In-Hybridfahrzeug (engl. plug-in hybrid electric vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
PVG	PV-Generator
PVS	PV-System
SB	Standby
SOC	Ladezustand (engl. state of charge)
V2G	engl. vehicle-to-grid
V2H	engl. vehicle-to-home
V2X	engl. vehicle-to-everything
WB	Wallbox

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

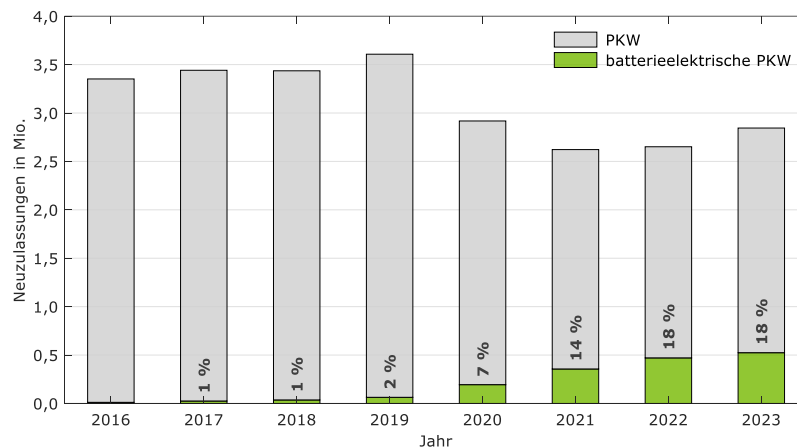
Der menschengemachte Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen der heutigen Zeit dar. Nach Bundes-Klimaschutzgesetz soll Deutschland bis spätestens 2045 Klimaneutralität erreichen [1]. Der größte Anteil deutscher klimaschädlicher Treibhausgasemissionen ist energiebedingt (2021: 84 %) [2]. Zentrale Aufgabe ist deshalb die sektorenübergreifende Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger und die Steigerung von Energieeffizienzen. Abbildung 1.1 zeigt den deutschen Endenergieverbrauch aufgeschlüsselt nach Sektoren und Energieträgern im Jahr 2022. Es wird deutlich, dass fossile Energieträger einen dominierenden Anteil am Endenergieverbrauch ausmachen. Darüber hinaus basiert nur etwa die Hälfte des deutschen Bruttostromverbrauchs auf erneuerbaren Energien (2022: 46,2 %; 2023: 51,8 %) [3]. 2022 entfiel der größte Anteil des deutschen Endenergieverbrauchs auf den Verkehrssektor (698 TWh), wobei dieser fast ausschließlich auf Kraftstoffen aus Mineralöl basierte (92,9 %) [4]. Mit 565 TWh hatte der Straßenverkehr den größten Anteil am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors, wovon 378 TWh auf den Personenindividualverkehr entfielen [5].



**Abbildung 1.1** Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren und Energieträgern im Jahr 2022. (Daten: [4])

Die Zahlen des Endenergieverbrauchs verdeutlichen die Bedeutung der Verkehrswende für das Erreichen von Klimazielen, deren Umsetzung Grund kontroverser Debatten ist. Eine im Jahr 2023 beschlossene Verordnung der Europäischen Union sieht vor, dass ab 2035 neuzugelassene Pkw und leichte Nutzfahrzeuge emissionsfrei sein müssen [6].

Für Expert\*innen gilt die Elektromobilität als Schlüsseltechnologie in einem klimaneutralen Verkehrssektor [7]. Unter Elektrofahrzeugen sind batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) zu verstehen, wobei PHEV als Übergangstechnologie gesehen werden kann [8]. Die Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamts sprechen dafür, dass sich batterieelektrische Pkw gegenüber wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-Pkw durchsetzen. 2023 wurden in Deutschland über 524 000 batterieelektrische Pkw zugelassen, während die Anzahl zugelassener Brennstoffzellen-Pkw bei unter 300 lag [9]. Abbildung 1.2 zeigt die Entwicklung der jährlichen Pkw-Neuzulassungen in Deutschland. Der Anteil batterieelektrischer Pkw hat in den letzten Jahren stetig zugenommen und lag 2023 bei 18 %. 2024 sind die Neuzulassungen von batterieelektrischen Pkw eingebrochen und machen einen Anteil von 13 % aus (Stand 8/2024) [9]. Als einer der Gründe hierfür kann der Wegfall der staatlichen Förderung für den Erwerb von BEV genannt werden [10].



**Abbildung 1.2** Anzahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen in Deutschland. (Daten: [9])

Insgesamt sind, Stand Januar 2024, in Deutschland über 49 Mio. Pkw zugelassen, die zu über 90 % rein mit Diesel oder Benzin betrieben werden [11]. Nur etwa 3 % des Pkw-Bestands ist batterieelektrisch. Dennoch erreichten Elektrofahrzeuge in Deutschland bereits Ende 2022 eine Batteriekapazität von insgesamt 65 GWh [12]. Vor dem Hintergrund durchschnittlicher Standzeiten privat genutzter Pkw von über 23 Stunden pro Tag, bietet sich die Nutzung der Fahrzeugbatterie als Speicher für zusätzliche Anwendungen im Energiesektor an [13]. Durch Rückspeisefähigkeit des Elektrofahrzeugs kann bidirektionales Laden ermöglicht werden, wobei verschiedene Anwendungsfälle in Betracht kommen, die sich unter dem Begriff vehicle-to-everything (V2X) zusammenfassen lassen [14]. Kostengünstiger Strom aus Photovoltaik (PV) oder dynamischen Stromtarifen könnte zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt im Haushalt genutzt werden. Für diesen Anwendungsfall ist der Begriff vehicle-to-home (V2H) geläufig. Unter vehicle-to-grid (V2G) ist die Rückspeisung vom Fahrzeug in das öffentliche Stromnetz zu verstehen. Das Fahrzeug könnte so Systemdienstleistungen erbringen und das Stromnetz stabilisieren.

## 1.2 Stand der Technik

Gegenstand der Untersuchung ist bidirektionales Laden für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung (V2H). Bei dieser Art des bidirektionalen Ladens werden solare Energieüberschüsse im BEV zwischengespeichert, um diese bei Bedarf für die Versorgung des Haushalts zu verwenden. Das Fahrzeug erfüllt demnach zusätzlich die Funktion eines Heimspeichers, der üblicherweise in den Abend- und Nachtstunden entladen wird [15]. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik des bidirektionalen Ladens für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung.

In BEV werden fast ausnahmslos Lithium-Ionen-Batterien verwendet. Als alternative Batterietechnologie setzen erste Fahrzeughersteller auch auf Natrium-Ionen-Batterien [16]. In Natrium-Ionen-Batteriezellen wird Lithium durch Natrium ersetzt und auf die Verwendung von Nickel und Kobalt verzichtet, weshalb diese Batteriezellen kostengünstig in der Herstellung sind [7]. Nachteilig ist die gegenüber Lithium-Ionen-Batteriezellen geringere Energiedichte. Nach einer Erhebung des ADAC beträgt die nutzbare Speicherkapazität heutiger BEV 21 kWh bis 112 kWh [17]. Zum Vergleich haben in Deutschland installierte Batteriesysteme (BS) üblicherweise Speicherkapazitäten von unter 11 kWh [15]. Einige der vom ADAC getesteten BEV erreichen Reichweiten von über 500 km, vereinzelt bereits über 600 km [17]. Äußere Einflüsse wie Streckeneigenschaften, Fahrstil und Außentemperatur können die Reichweiten von BEV jedoch deutlich reduzieren. Laut einer Studie der TU München verringert sich die Reichweite bei kalten

Außentemperaturen um bis zu 50 % [18]. Als Hauptgründe werden zusätzlicher Energiebedarf für die Erwärmung des Fahrzeuginnenraums und verringerte Rekuperation genannt. Durch Verwendung einer Wärmepumpe anstelle einer Widerstandsheizung kann der Energiebedarf für die Erwärmung des Fahrzeuginnenraums um bis zu zwei Drittel gesenkt werden [19].

Heutige BEV lassen sich mit Wechselstrom (AC) oder Gleichstrom (DC) laden. Beide Ladebetriebsarten werden in der europäischen Union standardmäßig über das combined charging system (CCS) realisiert, das auf den internationalen Standards IEC 61851 für die Ladeeinrichtung und IEC 62196 für die Ladesteckverbindung basiert [20]. AC-Laden erfolgt über den Stecker vom Typ 2 nach IEC 62196-2 mit ein- oder dreiphasigem Wechselstrom. Während dreiphasig technisch Ladeleistungen von 43 kW (63 A) möglich sind, haben sich im Heimbereich an der Wand befestigte Ladestationen, auch Wallboxen (WB) genannt, mit 11 kW (16 A) und 22 kW (32 A) maximaler Ladeleistung etabliert [21]. Um die Fahrzeugbatterie laden zu können, ist die Gleichrichtung des Wechselstroms erforderlich, welche beim AC-Laden über das fahrzeugeigene Bordladegerät (OBC) erfolgt. Dabei entstehen leistungsabhängige Ladeverluste, was beim Laden mit variablen Leistungen, wie es beispielsweise bei solaroptimiertem Laden der Fall ist, zu berücksichtigen ist. Bei Messungen mit unterschiedlichen BEV-Modellen wurden zwischen minimaler und maximaler AC-Ladeleistung Ladewirkungsgradabweichungen von bis zu 16 Prozentpunkten festgestellt [22]. Beim DC-Laden erfolgt die Gleichrichtung des Wechselstroms in der Ladestation. In der europäischen Union wird für das DC-Laden standardmäßig der Stecker Combo 2 nach IEC 62196-3 verwendet, mit dem Ladeleistungen bis 400 kW (400 A) möglich sind [23]. Die maximale DC-Ladeleistung wird jedoch bisher von keinem Serien-BEV erreicht, und nur wenige Modelle erreichen Leistungen von über 300 kW. Eine hohe maximale DC-Ladeleistung erreicht mit 367 kW beispielsweise das Modell *Lotus Eletre* [24]. Die maximale Ladeleistung hat allerdings nur eine geringe Aussagekraft, da nur wenige Modelle ihre maximale Leistung über den gesamten Ladevorgang konstant halten können [25]. Um Batteriealterung zu verhindern, wird in der Regel die Ladeleistung fahrzeugseitig über die Dauer des Ladevorgangs reduziert. Für die Schnelladefähigkeit von BEV ist die Ladeleistung von zentraler Bedeutung. Da der Ladestrom mit dem Stecker Combo 2 auf 400 A begrenzt ist, können hohe DC-Ladeleistungen erst mit höheren Spannungen erreicht werden [26]. Vor allem bei Oberklassefahrzeugen setzen Hersteller deshalb zunehmend auf 800 V-Architektur anstelle der weitverbreiteten 400 V-Architektur [27].

Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie bidirektionales Laden für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung technisch umgesetzt werden kann. Damit die Fahrzeugbatterie in den Haushalt entladen werden kann, muss die batterieseitige DC-Leistung in eine netzkonforme AC-Leistung umgewandelt werden. Die Funktion des Wechselrichters kann der fahrzeugeigene OBC übernehmen [28]. Diese technische Lösung hat den Vorteil, dass der bereits vorhandene OBC nur um die bidirektionale Funktionalität erweitert werden muss und dadurch keine hohen zusätzlichen Kosten zu erwarten sind. Andererseits werden Fahrzeugmodelle üblicherweise in unterschiedliche Länder exportiert, weshalb der OBC verschiedene technische Anschlussregeln erfüllen müsste.

Eine zweite Umsetzungsmöglichkeit des bidirektionalen Ladens ist über eine bidirektionale DC-Wallbox. Bei dieser technischen Lösung wird das Fahrzeug über die DC-Schnittstelle geladen und entladen. Fahrzeugseitig muss dafür lediglich die Entlademöglichkeit über die DC-Schnittstelle gewährleistet sein. Erste Fahrzeughersteller bieten diese Funktionalität bereits mit ihren Modellen an [29], [30]. Bei der leistungselektronischen Anbindung der bidirektionalen DC-Wallbox gibt es unterschiedliche, zu Heimspeichern vergleichbare Möglichkeiten. Die Wallbox kann als AC-gekoppeltes oder DC-gekoppeltes System realisiert werden. Bei der AC-Kopplung beinhaltet die Wallbox einen Umrichter und ist an das Stromnetz angebunden. Die Wallbox arbeitet im Ladebetrieb als Gleichrichter und im Entladebetrieb als Wechselrichter. Vorteil der AC-Kopp-

lung ist, dass die bidirektionale Wallbox zu einem bereits vorhandenen PV-System (PVS) nachgerüstet werden kann. Bei einem DC-gekoppelten System wird die bidirektionale Wallbox mit dem PV-Wechselrichter verknüpft. Die Wallbox und das PV-System haben einen gemeinsamen Hybridwechselrichter, wobei die Wallbox vor der Wechselrichterbrücke im DC-Zwischenkreis angebunden wird. Es ist zu erwarten, dass eine DC-gekoppelte Wallbox, ähnlich wie bei Heimspeichern, Effizienzvorteile haben kann [31]. Eine räumliche Trennung von Hybridwechselrichter und Wallbox ist aufgrund von Kabelverlusten problematisch. Für beide leistungselektronischen Anbindungen gilt, dass es sich um stationär installierte Systeme handelt, die nur eine technische Anschlussregel erfüllen müssen. Bidirektionale DC-Wallboxen für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung sind von ersten Herstellern verfügbar, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass sich bidirektionales Laden darüber etablieren wird [32], [33].

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur ist für das bidirektionale Laden mit der internationalen Norm ISO 15118-20 festgelegt [34]. Dennoch bestehen bezüglich des bidirektionalen Ladens noch offene Fragen. So ist beispielsweise die steuerliche Behandlung bidirektionaler Fahrzeuge weiterhin ungeklärt [14].

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die simulationsbasierte Untersuchung bidirektionalen Ladens für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung (V2H) unter Berücksichtigung von Verlustmechanismen. Auf Basis des an der HTW Berlin entwickelten Simulationsmodells *PerMod* [35] für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme wird im Rahmen der Arbeit ein Modell für die Simulation bidirektionalen Ladens entwickelt. Das Modell betrachtet bidirektionales Laden über die DC-Schnittstelle des Fahrzeugs. Die dafür erforderliche DC-Wallbox wird als AC-gekoppeltes System modelliert. Zusätzlich soll das bidirektionale System um ein AC-gekoppeltes Heimspeichersystem erweiterbar sein. Die zentralen Fragestellungen der Arbeit sind:

- Lässt sich verlustbehaftetes bidirektionales Laden für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung wirtschaftlich darstellen?
- Wie wirken sich verschiedene Systemkonfigurationen und Mobilitätsprofile energetisch und ökonomisch auf das bidirektionale Laden aus?
- Welchen Effekt hat die Erweiterung des bidirektionalen Systems um ein AC-gekoppeltes Heimspeichersystem?
- Welche Verluste entstehen in bidirektionalen Systemen und wie wirken sich diese energetisch und ökonomisch aus?

In Kapitel 2 werden zunächst die Modellierung des verlustbehafteten bidirektionalen Systems (Kapitel 2.1) und die Aufbereitung der Eingangszeitreihen (Kapitel 2.2) erläutert. Eine Validierung des Simulationsmodells wird anhand von Messungen, die an der TU Dortmund durchgeführt wurden, vorgenommen (Kapitel 2.3). Abschließend werden die verwendeten Effizienzkennzahlen vorgestellt und deren Berechnung erläutert (Kapitel 2.4).

Anhand des Simulationsmodells werden verschiedene simulationsbasierte Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 3 präsentiert werden. Zunächst werden anhand von Simulationen mit jeweils 50 Mobilitätsprofilen aus zwei Haushaltskategorien die Einflussfaktoren des bidirektionalen Systems untersucht (Kapitel 3.1). Anschließend werden mit Referenz-Mobilitätsprofilen die verschiedenen Verlustmechanismen im Detail analysiert und Sensitivitätsanalysen mit ausgewählten Modellparametern durchgeführt (Kapitel 3.2). Den Abschluss des Kapitels bildet die Betrachtung der energetischen und ökonomischen Betriebsergebnisse verschiedener Systemkonfigurationen (Kapitel 3.3).

In Kapitel 4 werden die Möglichkeiten und Grenzen des Simulationsmodells diskutiert. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und hebt offene Fragestellungen hervor.



## 2 Systemmodellierung

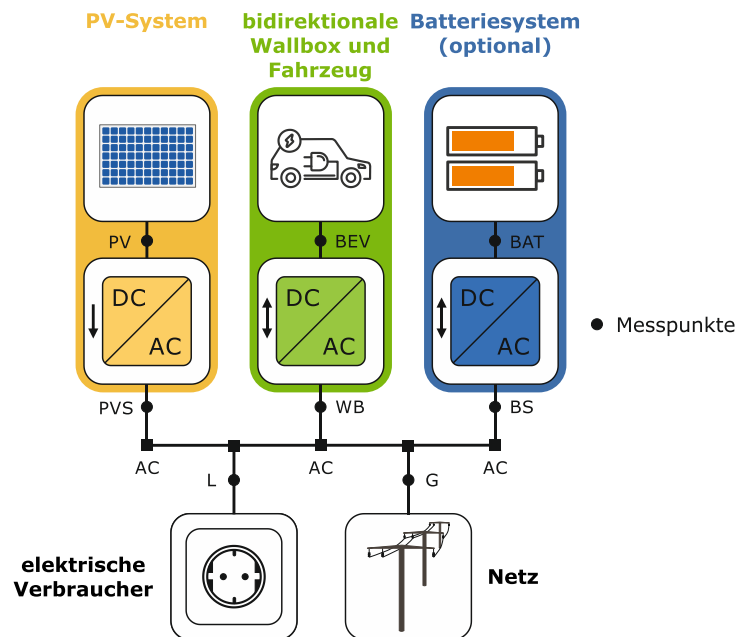
In diesem Kapitel wird das im Rahmen der Arbeit in *MATLAB* entwickelte Simulationsmodell *V2Hsim* vorgestellt. Das Modell bildet die Grundlage für die nachfolgende Simulationsstudie, die die energetischen und ökonomischen Betriebsergebnisse, Einflussfaktoren und Energieeffizienz des bidirektionalen Ladens für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung (V2H) untersucht. Zunächst wird in Kapitel 2.1 die Modellierung des verlustbehafteten bidirektionalen Systems beschrieben und anschließend in Kapitel 2.2 auf die Aufbereitung der Eingangszeitreihen eingegangen. Abschließend wird das Modell in Kapitel 2.3 anhand von Messdaten validiert und in Kapitel 2.4 die Berechnung der für die Bewertung relevanten Effizienzkennzahlen erläutert. Zielsetzungen des entwickelten Simulationsmodells sind:

- Möglichkeit der Simulation von bidirektionalem Laden für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung über einjährigen Betrachtungszeitraum.
- Abbildung wesentlicher Verlustmechanismen des bidirektionalen Ladens über die DC-Schnittstelle des Fahrzeugs.
- Möglichkeit der Einbindung eines AC-gekoppelten Heimspeichersystems.
- Simulation in einsekündiger Zeitschrittweite.
- Abbildung aller Energieflüsse und Berechnung von Effizienzkennzahlen innerhalb des Modells.

### 2.1 Modellbildung

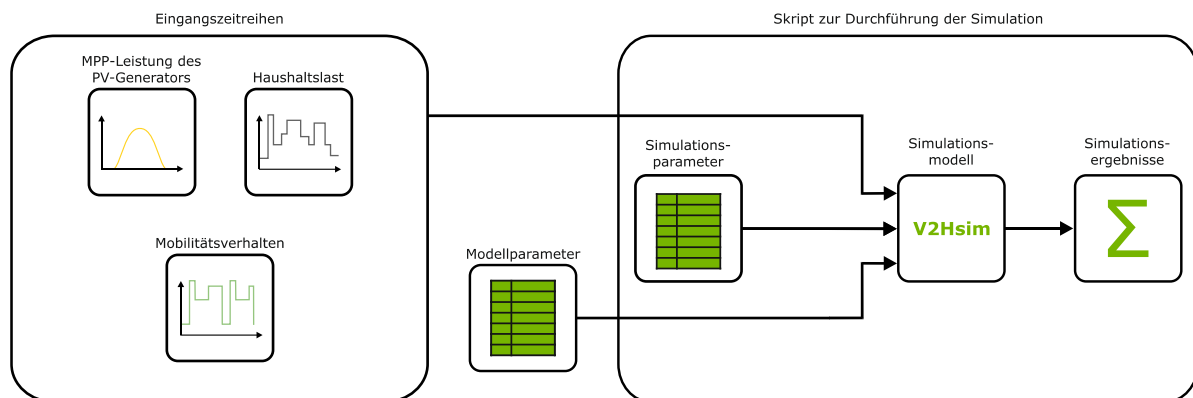
Die Modellbildung basiert auf dem an der HTW Berlin entwickelten Simulationsmodell *PerMod* [35] für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme. *PerMod* wurde für die vorliegende Arbeit um eine AC-gekoppelte bidirektionale Wallbox mit batterieelektrischem Fahrzeug erweitert. Das Modell bietet die Möglichkeit der Simulation über einen einjährigen Betrachtungszeitraum und in einsekündiger Zeitschrittweite, wodurch sich saisonale Unterschiede und Systemdynamiken abbilden lassen. Es werden darin verschiedene Verlustmechanismen berücksichtigt, deren Modellierung nachfolgend vorgestellt wird. Neben der Abbildung des verlustbehafteten bidirektionalen Ladens besteht die Möglichkeit der Einbindung eines Heimspeichersystems. Der zusätzliche Heimspeicher wird, wie die bidirektionale Wallbox, als AC-gekoppeltes System modelliert. Das Simulationsmodell betrachtet bidirektionales Laden über die DC-Schnittstelle des Fahrzeugs.

In Abbildung 2.1 sind die wesentlichen Systemkomponenten und Messpunkte des modellierten bidirektionalen Systems dargestellt. Das Gesamtsystem besteht aus PV-System (PVS), AC-gekoppelter bidirektionaler DC-Wallbox (WB) und Fahrzeug (BEV) sowie einem optionalen AC-gekoppelten Batteriesystem (BS). Des Weiteren wird die Haushaltslast (L) in der Simulation berücksichtigt. Das simulierte Energiesystem ist netzgekoppelt und tauscht bei Bedarf und Überschuss Energie mit dem Stromnetz (G) aus. Die Messpunkte sind mit Kürzeln versehen, die bei der weiteren Beschreibung des Systems verwendet werden. So wird beispielsweise ein Energiefluss von PV-System (PVS) zur Wallbox (WB), englisch *PVS-to-WB* (*PVS-2-WB*) gesprochen, in dieser Arbeit mit  $P_{PVS2WB}$  bezeichnet.



**Abbildung 2.1** Systemkomponenten und Messpunkte des bidirektionalen Systems.

Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten Simulationsmodells *V2Hsim*. Den Kern des Modells bilden eine Reihe verschiedener Simulationsskripte, mit denen sich das bidirektionale System ideal und verlustbehaftet simulieren lässt. Für die Ergebnisbewertung wurden zusätzlich ideale und verlustbehaftete unidirektionale Simulationsmodelle entwickelt, mit denen sich Laden bei Ankunft zuhause und konstanter Ladeleistung simulieren lassen.



**Abbildung 2.2** Schematischer Aufbau des Simulationsmodells *V2Hsim*.

Im Rahmen der Arbeit werden zwei verlustbehaftete bidirektionale Wallboxen betrachtet. Zum einen wird eine reale bidirektionale DC-Wallbox simuliert, deren Parametrierung anhand von Messdaten der TU Dortmund erfolgt [36]. Zum anderen wird eine zukünftige, effizientere Wallbox simuliert, die mit heutigen Batterieumrichtern vergleichbare Effizienzen aufweist. Hierfür wurde auf einen mit *PerMod* zur Verfügung gestellten Datensatz mit Systemeigenschaften von PV-Batteriesystemen zurückgegriffen. Die effizientere Wallbox dient in dieser Arbeit als Referenzsystem. Das zusätzliche AC-gekoppelte Heimspeichersystem basiert ebenfalls auf diesem Datensatz. Die zentralen Modellparameter der betrachteten bidirektionalen Systeme sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Die in der Arbeit angenommene Netzeinspeisevergütung von 7 ct/kWh orientiert sich an den EEG-Vergütungssätzen für das Inbetriebnahmejahr 2024 [37]. Der Netzbezugspreis ist anhand

der Strompreise für Haushaltskunden im Jahr 2022 auf 35 ct/kWh festgelegt [38]. Die Energiekrise 2022 hatte ab dem Folgejahr deutlich höhere Haushaltsstrompreise zur Folge. Der festgelegte Strompreis entspricht dem mittleren Strompreis zu Beginn der Energiekrise. Für externes Laden wird ein Netzbezugspreis von 59 ct/kWh angenommen, der sich an einer Erhebung des ADAC orientiert [39].

**Tabelle 2.1** Modellparameter des Referenzsystems und des realen Systems.

Systemkomponente	Eigenschaft	Symbol	Wert	
			Referenzsystem	reales System
PV-System	Nennleistung des PV-Generators (DC)	$P_{PVG}$	10 kWp	
	Nennausgangsleistung des PV-Wechselrichters (AC)	$P_{PV2AC,OUT}$	10 kW	
	Leistungsaufnahme Standby-Betrieb	$P_{PVS,SB}$	5 W	
bidirektionale Wallbox	Nenningangsleistung im Ladebetrieb (AC)	$P_{AC2BEV,IN}$	11 kW	10,3 kW
	Nennausgangsleistung im Entladebetrieb (AC)	$P_{BEV2AC,OUT}$	11 kW	9,5 kW
	Leistungsaufnahme Standby-Betrieb	$P_{WB,SB}$	20 W	
Fahrzeug	Speicherkapazität	$E_{BEV}$	51 kWh oder 85 kWh	
	Leistungsaufnahme im bidirektionalen Betrieb	$P_{BEV,SELF}$	150 W	
	Batteriewirkungsgrad	$\eta_{BEV}$	96 %	
	Ladewirkungsgrad bei externem Laden	$\eta_{EXTERN}$	93 %	
Batteriesystem (falls vorhanden)	Speicherkapazität	$E_{BAT}$	10 kWh	N/A
	Nenningangsleistung im Ladebetrieb (AC)	$P_{AC2BAT,IN}$	11 kW	N/A
	Nennausgangsleistung im Entladebetrieb (AC)	$P_{BAT2AC,OUT}$	11 kW	N/A
	Leistungsaufnahme Standby-Betrieb	$P_{BS,SB}$	10 W	N/A
	Batteriewirkungsgrad	$\eta_{BAT}$	96 %	N/A
Gesamtsystem	Leistungsaufnahme der Peripheriekomponenten	$P_{PERI}$	5 W	
	Totzeit der Systemregelung	$t_{TOT}$	1 s	
	Zeitkonstante der Systemregelung	$t_{EIN}$	1 s	
	Sicherheitsreichweite	$l_{SAFETY}$	75 km	
	minimale Reichweite bei Ankunft zuhause	$l_{RETURN}$	40 km	
	Netzeinspeisevergütung	$p_{AC2G}$	7 ct/kWh	
	Netzbezugspreis	$p_{G2AC}$	35 ct/kWh	
	Netzbezugspreis externes Laden	$p_{EXTERN}$	59 ct/kWh	

### 2.1.1 PV-Wechselrichter

Die Modellierung des PV-Wechselrichters orientiert sich an *PerMod*. Die Funktion des PV-Wechselrichters ist die Umwandlung des im PV-Generator (PVG) erzeugten Gleichstroms in einen netzkonformen Wechselstrom, der im Haushalt genutzt oder in das Stromnetz eingespeist wer-

den kann. Die in PV-Wechselrichtern auftretenden Umwandlungsverluste lassen sich in Leerlaufverluste, Spannungsverluste und ohmsche Verluste aufteilen [40]. Die Eigenschaften des PV-Wechselrichters basieren auf dem Modell *Sunny Tripower 10.0* der Firma SMA und sind dem mit *PerMod* zur Verfügung gestellten Datensatz entnommen. Der PV-Wechselrichter hat eine nominale Ausgangsleistung von 10 kW.

Die Umwandlungsverluste werden wie in *PerMod* durch die resultierende Verlustleistung abgebildet [41]. Die Leistungsabhängigkeit der Verluste wird durch eine quadratische Gleichung angenähert. Die Verlustleistung des PV-Wechselrichters  $P_{PV2AC}(t)$  berechnet sich aus:

$$P_{PV2AC,V}(t) = a_{PV2AC} \cdot p_{PV2AC}(t)^2 + b_{PV2AC} \cdot p_{PV2AC}(t) + c_{PV2AC} \quad (2.1)$$

Wobei  $p_{PV2AC}(t)$  der spezifischen Eingangsleistung des Wechselrichters entspricht, welche aus der aktuellen PV-Generatorleistung  $P_{PV}(t)$  (vgl. Kapitel 2.2.1) und der nominalen Eingangsleistung des PV-Wechselrichters  $P_{PV2AC,IN}$  berechnet wird:

$$p_{PV2AC}(t) = \frac{P_{PV}(t)}{P_{PV2AC,IN}} \quad (2.2)$$

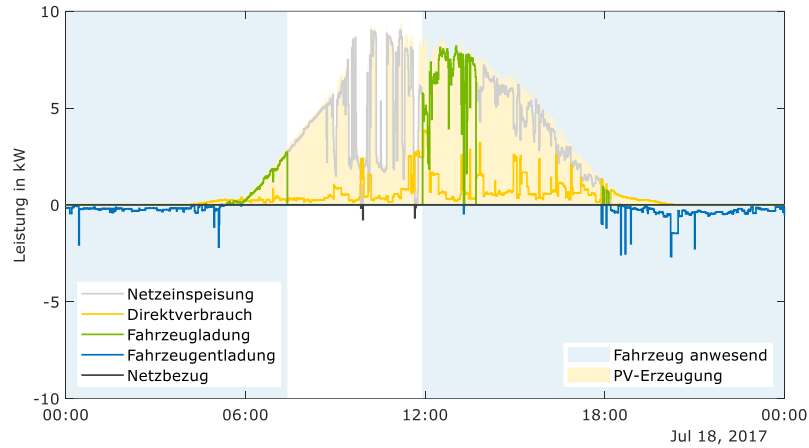
Die Koeffizienten des PV-Wechselrichters ( $a_{PV2AC}$ ,  $b_{PV2AC}$  und  $c_{PV2AC}$ ) sind in Tabelle A.1 aufgeführt. Die Leistungsabgabe des PV-Systems  $P_{PVS}(t)$  berechnet sich aus der aktuellen PV-Generatorleistung  $P_{PV}(t)$  sowie der Verlustleistung  $P_{PV2AC}(t)$  und ist auf die maximale AC-seitige Leistung des PV-Wechselrichters  $P_{PV2AC,OUT}$  limitiert:

$$P_{PVS}(t) = \begin{cases} \min(P_{PV2AC,OUT}, P_{PV}(t) - P_{PV2AC,V}(t)) & \text{für } P_{PV}(t) > P_{PV2AC,V}(t) \\ -P_{PVS,SB} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.3)$$

Übersteigt die PV-Generatorleistung nicht die Verlustleistung des PV-Wechselrichters, befindet sich das PV-System im Standby-Betrieb (SB) und die Standby-Leistungsaufnahme  $P_{PVS,SB}$  fällt an.

### 2.1.2 Bidirektionale Wallbox und Fahrzeug

Für die Simulation des bidirektionalen Ladens wird in *V2Hsim* eine rückspeisefähige AC-gekoppelte DC-Wallbox modelliert. Abbildung 2.3 zeigt den Leistungsverlauf des verlustfreien bidirektionalen Systems ohne Heimspeichersystem an einem beispielhaften Tag. Die Energieabgabe des PV-Systems wird zuerst für die Versorgung des Haushaltsstrombedarfs (Direktverbrauch) verwendet. Bei Anwesenheit des Fahrzeugs werden solare Leistungsüberschüsse für die Fahrzeugladung verwendet, bis das Fahrzeug vollständig geladen ist. Nicht genutzte solare Überschüsse werden in das Stromnetz eingespeist. In der Nacht wird die elektrische Last des Haushalts durch Entladung des Fahrzeugs gedeckt.



**Abbildung 2.3** Beispielhafter Tagesverlauf der Leistungsflüsse eines verlustfreien bidirektionalen Systems ohne Batteriesystem.

Unter der Annahme, dass AC-gekoppelte bidirektionale DC-Wallboxen mit angeschlossenem BEV und AC-gekoppelte Batteriesysteme technologisch ähnlich sind, werden die Verlustmechanismen aus *PerMod* übernommen. In *PerMod* werden im Batteriesystemmodell Regelungsverluste, Umwandlungsverluste, Dimensionierungsverluste und Standby-Verluste abgebildet. Für das bidirektionale Modell werden diese Verluste um die Leistungsaufnahme des Fahrzeugs im bidirektionalen Betrieb erweitert. Es wird angenommen, dass diese im angeschlossenen Zustand dauerhaft anfällt. Die in den Simulationen angenommene Fahrzeugleistungsaufnahme von 150 W orientiert sich an den Leistungsaufnahmen batterieelektrischer Fahrzeuge im eingeschalteten Zustand, die in einer Studie von Sevdari et al. bestimmt wurden [22]. Die in der Studie untersuchten Fahrzeuge verbrauchen im eingeschalteten Zustand zwischen 150 W und 350 W.

Nachfolgend werden die Berechnungsschritte des bidirektionalen Systems beschrieben, welche für jeden Zeitschritt wiederholt werden. Die Modellparameter für das Referenzsystem und das reale System sind Tabelle 2.1 und Tabelle A.1 zu entnehmen.

Zunächst wird die Differenzleistung  $P_D(t)$  zwischen der Leistungsabgabe des PV-Systems  $P_{PVS}(t)$  und der elektrischen Haushaltslast  $P_L(t)$  berechnet. In der Differenzleistung werden auch die Leistungsaufnahmen von Peripheriekomponenten  $P_{PERI}$ , wie beispielsweise Leistungssensoren berücksichtigt. Sofern das Fahrzeug nicht anwesend ist, werden positive Differenzleistungen in das Netz eingespeist und negative Differenzleistungen durch Netzbezug gedeckt. Ist das Fahrzeug dagegen anwesend, dient die Differenzleistung als Sollwertvorgabe für die bidirektionale Wallbox. Positive Differenzleistungen können der solaren Fahrzeugladung dienen und negative Differenzleistungen eine Fahrzeugentladung auslösen.

$$P_D(t) = P_{PVS}(t) - P_L(t) - P_{PERI} \quad (2.4)$$

Die Verzögerung innerhalb der Systemregelung wird durch die Totzeit  $t_{TOT}$  berücksichtigt. Die um die Totzeit  $t_{TOT}$  verzögerte Differenzleistung  $P_D(t)$  ergibt die aktuelle Differenzleistung der Systemregelung  $P_{D,TOT}(t)$ . Die Totzeit kann entsprechend der Simulationszeitschrittweite nur ganzzahlige Werte annehmen.

$$P_{D,TOT}(t) = P_D(t - t_{TOT}) \quad (2.5)$$

Im Modell werden konstante stationäre Regelungsabweichungen im Ladebetrieb  $P_{AC2BEV,STAT}$  und im Entladebetrieb  $P_{BEV2AC,STAT}$  sowie minimale Lade- ( $P_{AC2BEV,MIN}$ ) und Entladeleistungen ( $P_{BEV2AC,MIN}$ ) der bidirektionalen Wallbox mit folgendem Zusammenhang berücksichtigt:

$$P_{D,WB}(t) = \begin{cases} \max(P_{AC2BEV,MIN}, P_{D,TOT}(t) + P_{AC2BEV,STAT}) & \text{für } P_{D,TOT}(t) > P_{AC2BEV,MIN} \\ \min(-P_{BEV2AC,MIN}, P_{D,TOT}(t) - P_{BEV2AC,STAT}) & \text{für } P_{D,TOT}(t) < -P_{BEV2AC,MIN} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.6)$$

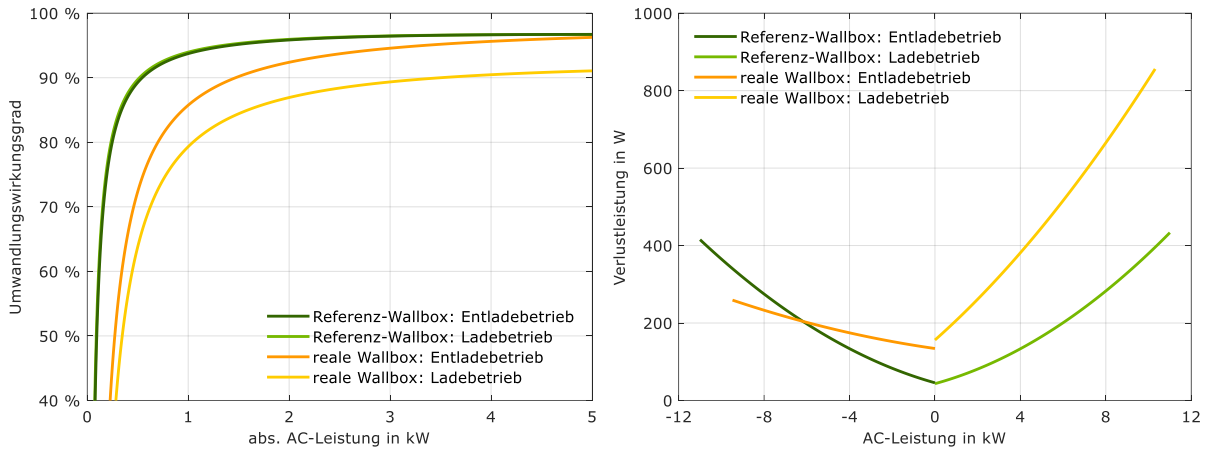
Die aus Gleichung (2.6) resultierende Wallbox-Differenzleistung  $P_{D,WB}(t)$  wird in einem weiteren Berechnungsschritt auf die maximale AC-seitige Lade- ( $P_{AC2BEV,IN}$ ) und Entladeleistung ( $P_{BEV2AC,OUT}$ ) der bidirektionalen Wallbox begrenzt:

$$P_{D,WB}(t) = \begin{cases} \min(P_{AC2BEV,IN}, P_{D,WB}(t)) & \text{für } P_{D,WB}(t) > 0 \\ \max(-P_{BEV2AC,OUT}, P_{D,WB}(t)) & \text{für } P_{D,WB}(t) < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.7)$$

Das Einschwingverhalten der bidirektionalen Wallbox während des Lade- und Entladevorgangs wird analog zu *PerMod* näherungsweise durch ein PT1-Glied dargestellt [41]. Die dem Einschwingverhalten angepasste Wallbox-Differenzleistung  $P_{D,WB}(t)$  berechnet sich aus der Zeitkonstante  $t_{EIN}$ , der Simulationszeitschrittweite  $\Delta t$  und der AC-seitigen Wallboxleistung des vorherigen Zeitschritts  $P_{WB}(t-\Delta t)$ :

$$P_{D,WB}(t) = P_{WB}(t-\Delta t) + (P_{D,WB}(t) - P_{WB}(t-\Delta t)) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_{EIN}}}\right) \quad (2.8)$$

Analog zum PV-Wechselrichter entstehen in der bidirektionalen Wallbox im Lade- und Entladebetrieb leistungsabhängige Umwandlungsverluste. Im Modell werden die aus den leistungsabhängigen Umwandlungsverlusten resultierenden Verlustleistungen durch quadratische Gleichungen angenähert. In Abbildung 2.4 (links) sind die Umwandlungswirkungsgrade der beiden betrachteten bidirektionalen DC-Wallboxen (vgl. Tabelle 2.1) im Lade- und Entladebetrieb in Abhängigkeit der absoluten AC-Leistung dargestellt. Abbildung 2.4 (rechts) zeigt die aus den leistungsabhängigen Umwandlungswirkungsgraden resultierenden Verlustleistungen der betrachteten bidirektionalen Wallboxen. Die Abbildungen zeigen, dass die Wallboxen aufgrund von Leerlaufverlusten im Teillastbetrieb ineffizient sind. Im Vergleich zur Referenz-Wallbox hat die betrachtete reale Wallbox, insbesondere im Teillastbereich, verringerte Umwandlungswirkungsgrade.



**Abbildung 2.4** Umwandlungswirkungsgrad in Abhängigkeit der absoluten AC-Leistung (links) und Verlustleistung in Abhängigkeit der AC-Leistung der betrachteten bidirektionalen DC-Wallboxen (Lade- und Entladebetrieb).

Für die Berechnung der Verlustleistung wird im ersten Berechnungsschritt die spezifische AC-Leistung der Wallbox  $p_{WB}(t)$  aus der Wallbox-Differenzleistung  $P_{D,WB}(t)$  und der Nenneingangsleistung im Ladebetrieb (AC-seitig)  $P_{AC2BEV,IN}$  bzw. Nennausgangsleistung im Entladebetrieb (AC-seitig)  $P_{BEV2AC,OUT}$  bestimmt:

$$p_{WB}(t) = \begin{cases} \frac{P_{D,WB}(t)}{P_{AC2BEV,IN}} & \text{für } P_{D,WB}(t) > 0 \\ \frac{|P_{D,WB}(t)|}{P_{BEV2AC,OUT}} & \text{für } P_{D,WB}(t) < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Ist das Fahrzeug anwesend, werden Fahrzeugladung bzw. -entladung abhängig von der Wallbox-Differenzleistung und des Ladezustands (SOC) initiiert. Der aktuelle Ladezustand des Fahrzeugs  $SOC_{BEV}(t)$  berechnet sich über die Speicherkapazität  $E_{BEV}$  und den verfügbaren Energieinhalt  $E_{BEV,SIM}(t)$ :

$$SOC_{BEV}(t) = \frac{E_{BEV,SIM}(t)}{E_{BEV}} \quad (2.10)$$

Das System hat zu jedem Zeitpunkt der Fahrzeuganwesenheit die Information über den für die Fahrt benötigten Energieinhalt  $E_{TARGET,DRIVE}(t)$  und den genauen Abfahrtszeitpunkt des Fahrzeugs. Diese auf dem Mobilitätsprofil basierenden Informationen (vgl. Kapitel 2.2.3) entsprechen einer perfekten Ladeplanung der Nutzer\*innen. Um externes Laden zu verhindern, wird der für die Fahrt benötigte Energieinhalt um den minimalen Energieinhalt des Fahrzeugs bei Ankunft zuhause  $E_{RETURN}$  erhöht. Der minimale Energieinhalt des Fahrzeugs bei Ankunft zuhause  $E_{RETURN}$  berechnet sich aus der minimalen Reichweite bei Ankunft zuhause  $l_{RETURN}$  und dem mittleren Fahrzeugverbrauch pro Kilometer. Zusätzlich ist der für die Fahrt benötigte Energieinhalt durch die Speicherkapazität der Fahrzeugbatterie  $E_{BEV}$  limitiert:

$$E_{TARGET,BEV}(t) = \min(E_{TARGET,DRIVE}(t) + E_{RETURN}, E_{BEV}) \quad (2.11)$$

Im Modell ist ein Modus implementiert, nachfolgend Notladestrategie genannt, in dem das Fahrzeug bei maximaler Wallboxleistung und gegebenenfalls unter Netzbezug geladen wird. Die

Notladestrategie wird dann verwendet, wenn der Ladezustand der Fahrzeugbatterie  $SOC_{BEV}(t)$  unter dem Sicherheitsladezustand des Fahrzeugs  $SOC_{SAFETY}$  liegt oder der für die Fahrt benötigte Energieinhalt  $E_{TARGET, BEV}(t)$  nur noch durch Laden bei maximaler Wallboxleistung erreicht werden kann. Der Sicherheitsladezustand  $SOC_{SAFETY}$  berechnet sich aus der Sicherheitsreichweite  $I_{SAFETY}$ , dem mittleren Fahrzeugverbrauch pro Kilometer und der Speicherkapazität  $E_{BEV}$ . Bei der Notladestrategie entspricht die Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  der Nenneingangsleistung im Ladebetrieb (AC-seitig)  $P_{AC2BEV, IN}$ . Die resultierende Fahrzeugbatterieleistung  $P_{BEV}(t)$  berechnet sich aus der Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$ , der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs  $P_{BEV, SELF}$  sowie den Koeffizienten  $a_{AC2BEV, IN}$ ,  $b_{AC2BEV, IN}$  und  $c_{AC2BEV, IN}$  (vgl. Tabelle A.1):

$$P_{BEV}(t) = P_{WB}(t) - (a_{AC2BEV, IN} + b_{AC2BEV, IN} + c_{AC2BEV, IN}) \cdot P_{BEV, SELF} \quad (2.12)$$

Zu beachten ist, dass die maximale Wallboxleistung bei der Notladestrategie unmittelbar und unter Vernachlässigung von Regelungsverlusten bereitgestellt wird. Wenn sich das System in Anwesenheit des Fahrzeugs nicht in diesem Modus befindet, läuft es im regulären bidirektionalen Betrieb. Hat die Wallbox-Differenzleistung  $P_{D, WB}(t)$  ein positives Vorzeichen und ist der Ladezustand des Fahrzeugs  $SOC_{BEV}(t)$  kleiner als der maximale Ladezustand, kann das Fahrzeug geladen werden. Die AC-seitige Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  ist dann gleich der Wallbox-Differenzleistung  $P_{D, WB}(t)$ . Ist die Wallbox-Differenzleistung  $P_{D, WB}(t)$  negativ und der Ladezustand des Fahrzeugs  $SOC_{BEV}(t)$  größer als die Summe aus dem Sicherheitsladezustand  $SOC_{SAFETY}$  und dem SOC-Schwellwert im Sicherheitszustand  $SOC_{H, BEV1}$ , wird das System mit  $P_{D, WB}(t)$  entladen. Der SOC-Schwellwert  $SOC_{H, BEV1}$  verhindert, dass durch Notladestrategie geladene Energie bidirektional entladen wird und vermeidet den schnellen Wechsel zwischen Notladestrategie und regulärem bidirektionalen Betrieb. In allen anderen Fällen ist die Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  gleich null.

$$P_{WB}(t) = \begin{cases} P_{D, WB}(t) & \text{für } P_{D, WB}(t) > 0 \wedge SOC_{BEV}(t) < 1 \\ P_{D, WB}(t) & \text{für } P_{D, WB}(t) < 0 \wedge SOC_{BEV}(t) > (SOC_{SAFETY} + SOC_{H, BEV1}) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.13)$$

Ein in den Gleichungen nicht beschriebener, weiterer SOC-Schwellwert ( $SOC_{H, BEV2}$ ) verhindert den Wechsel zwischen Lade- und Entladebetrieb im vollgeladenen Zustand des Fahrzeugs. Nach Erreichen des maximalen Ladezustands erfolgt eine Nachladung des Fahrzeugs erst, nachdem der Ladezustand  $SOC_{BEV}(t - \Delta t)$  den Schwellwert  $(1 - SOC_{H, BEV2})$  unterschreitet. Auch die Leistungsaufnahmen des Fahrzeugs im bidirektionalen Betrieb und der Wallbox im Standby-Betrieb führen zu einer Entladung der Fahrzeugbatterie. Die Schwellwerte  $SOC_{H, BEV1}$  und  $SOC_{H, BEV2}$  werden innerhalb des Modells durch binäre Variablen aktiviert.

Anhand der Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$ , der in (2.9) berechneten spezifischen AC-Leistung der Wallbox  $p_{WB}(t)$ , der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs  $P_{BEV, SELF}$  und der Koeffizienten der Wallbox lässt sich die verlustbehaftete Fahrzeugbatterieleistung (DC-seitig)  $P_{BEV}(t)$  ermitteln:

$$P_{BEV}(t) = \begin{cases} \max(0, P_{WB}(t) - (a_{AC2BEV, IN} \cdot p_{WB}(t)^2 + b_{AC2BEV, IN} \cdot p_{WB}(t) + c_{AC2BEV, IN})) - P_{BEV, SELF} & \text{für } P_{WB}(t) > 0 \\ P_{WB}(t) - (a_{BEV2AC, OUT} \cdot p_{WB}(t)^2 + b_{BEV2AC, OUT} \cdot p_{WB}(t) + c_{BEV2AC, OUT}) - P_{BEV, SELF} & \text{für } P_{WB}(t) < 0 \\ -P_{BEV, SELF} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.14)$$

Die Koeffizienten  $a_{AC2BEV, IN}$ ,  $b_{AC2BEV, IN}$ ,  $c_{AC2BEV, IN}$ ,  $a_{BEV2AC, OUT}$ ,  $b_{BEV2AC, OUT}$  und  $c_{BEV2AC, OUT}$  definieren die Umwandlungsverluste der bidirektionalen Wallbox (vgl. Tabelle A.1).

Im Fall einer negativen Fahrzeugbatterieleistung  $P_{BEV}(t)$  im Ladebetrieb, die auf Umwandlungsverluste zurückzuführen ist, wird die Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  auf null gesetzt. Die resultierende



Fahrzeugbatterieleistung  $P_{\text{BEV}}(t)$  ist in diesem Fall gleich der negativen Leistungsaufnahme des Fahrzeugs  $P_{\text{BEV,SELF}}$ . Ist die Wallboxleistung  $P_{\text{WB}}(t)$  gleich null, fällt zusätzlich die Wallbox-Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb  $P_{\text{WB,SB}}$  an, welche ebenfalls der Fahrzeugbatterie entnommen wird.

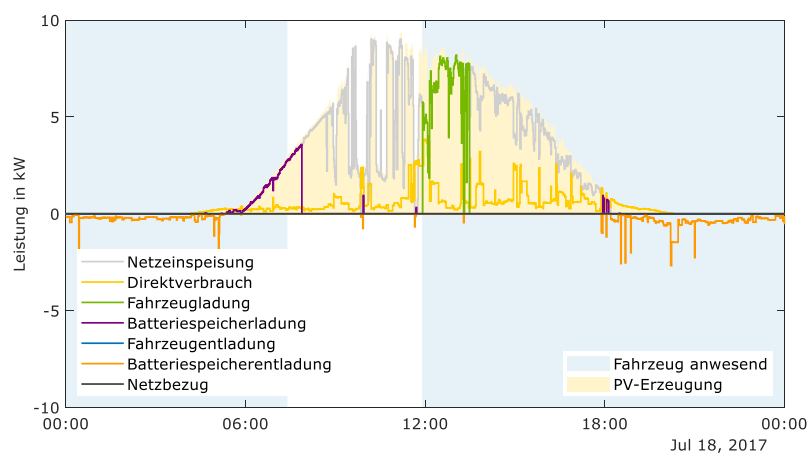
Abschließend wird in jedem Simulationszeitschritt der Energieinhalt der Fahrzeugbatterie unter Berücksichtigung von Batteriespeicherverlusten aktualisiert. Ist die Fahrzeugbatterieleistung  $P_{\text{BEV}}(t)$  größer oder kleiner null, berechnet sich der Energieinhalt der Fahrzeugbatterie im nächsten Zeitschritt  $E_{\text{BEV,SIM}}(t+\Delta t)$  aus dem aktuellen Energieinhalt  $E_{\text{BEV,SIM}}(t)$ , der Fahrzeugbatterieleistung  $P_{\text{BEV}}(t)$ , der Simulationszeitschrittweite  $\Delta t$  und dem Batteriewirkungsgrad  $\eta_{\text{BEV}}$ . Es wird angenommen, dass die Verlustleistung des Batteriespeichers aus der Quadratwurzel des Batteriewirkungsgrads bestimmt und somit gleichmäßig der Ladung und Entladung zugeordnet werden kann [41]:

$$E_{\text{BEV,SIM}}(t+\Delta t) = \begin{cases} E_{\text{BEV,SIM}}(t) + P_{\text{BEV}}(t) \cdot \eta_{\text{BEV}}^{0,5} \cdot \Delta t & \text{für } P_{\text{BEV}}(t) > 0 \\ E_{\text{BEV,SIM}}(t) + P_{\text{BEV}}(t) \cdot \eta_{\text{BEV}}^{-0,5} \cdot \Delta t & \text{für } P_{\text{BEV}}(t) < 0 \\ E_{\text{BEV,SIM}}(t) & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.15)$$

Nach jeder Fahrt des BEV aktualisiert sich der Energieinhalt der Fahrzeugbatterie entsprechend dem Verbrauch des BEV. Wird der minimale Energieinhalt des BEV bei Ankunft zuhause  $E_{\text{RETURN}}$  durch die vorherige Fahrt unterschritten, wird der fehlende Energieinhalt extern, unter Berücksichtigung des konstanten Ladewirkungsgrads  $\eta_{\text{EXTERN}}$  geladen. Der in dieser Arbeit angenommene Ladewirkungsgrad  $\eta_{\text{EXTERN}}$  von 93 % orientiert sich an einer Studie des ADAC [42].

### 2.1.3 Batteriesystem

*V2Hsim* bietet die Möglichkeit der Erweiterung des bidirektionalen Systems um ein Batteriesystem. In Abbildung 2.5 ist ein beispielhafter Tagesverlauf der Leistungen eines verlustfreien bidirektionalen Systems mit Batteriesystem dargestellt. Solare Leistungsüberschüsse werden bei dieser Systemkonfiguration für die Fahrzeugladung und die Batteriespeicherladung verwendet. Leistungsbedarfe des Haushalts können in diesem System durch solaren Direktverbrauch, durch Fahrzeugentladung und durch Batteriespeicherentladung gedeckt werden.



**Abbildung 2.5** Beispielhafter Tagesverlauf der Leistungsflüsse eines verlustfreien bidirektionalen Systems mit Batteriesystem.

Die Verluste des modellierten Batteriesystems werden, abgesehen von der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs, analog zum bidirektionalen System berechnet. Daher wird auf eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritte verzichtet. Die Systemeigenschaften des betrachteten AC-gekoppelten Batteriesystems (Referenzsystem) orientieren sich an einem mit *PerMod* zur Verfügung gestellten Datensatz [35]. Der Datensatz beinhaltet Systemeigenschaften von nach Effizienzleitfaden untersuchten PV-Batteriesystemen. Die Modellparameter des Batteriesystems können Tabelle 2.1 und Tabelle A.1 entnommen werden.

Befindet sich das Fahrzeug nicht zuhause, wird das Batteriesystem wie ein alleinstehendes System betrieben. Sofern der Batteriespeicher (BAT) nicht vollgeladen ist, können solare Energieüberschüsse zwischengespeichert werden. Bei einem Leistungsdefizit und einem Ladezustand größer null kann der Batteriespeicher innerhalb der Leistungsgrenzen entladen werden. Mit zuvor bestimmter Batteriesystemleistung  $P_{BS}(t)$  und der spezifischen AC-Leistung des Batteriesystems  $p_{BS}(t)$  lässt sich die resultierende DC-Batteriespeicherleistung  $P_{BAT}(t)$  unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste berechnen:

$$P_{BAT}(t) = \begin{cases} \max(0, P_{BS}(t) - (a_{AC2BAT} \cdot p_{BS}(t)^2 + b_{AC2BAT} \cdot p_{BS}(t) + c_{AC2BAT})) & \text{für } P_{BS}(t) > 0 \\ P_{BS}(t) - (a_{BAT2AC} \cdot p_{BS}(t)^2 + b_{BAT2AC} \cdot p_{BS}(t) + c_{BAT2AC}) & \text{für } P_{BS}(t) < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.16)$$

Die Verlustkoeffizienten  $a_{AC2BAT}$ ,  $b_{AC2BAT}$ ,  $c_{AC2BAT}$ ,  $a_{BAT2AC}$ ,  $b_{BAT2AC}$  und  $c_{BAT2AC}$  des Systems sind Tabelle A.1 zu entnehmen. Im Ladebetrieb kann die Batteriespeicherleistung keine negativen Werte annehmen und ist in diesem Fall gleich null. Ist die Batteriespeicherleistung gleich null, hat das System die Standby-Leistungsaufnahme  $P_{BS,SB}$ . Diese wird je nach Ladezustand durch Batterieentladung oder durch AC-seitige Leistungsaufnahme gedeckt. Abschließend wird analog zu Kapitel 2.1.2 die Änderung des Energieinhalts des Batteriespeichers unter Beachtung des Batteriewirkungsgrads  $\eta_{BAT}$  berechnet. Um den Wechsel zwischen Lade- und Entladebetrieb im vollgeladenen Zustand des Batteriespeichers zu verhindern, ist im Modell ein SOC-Schwellwert ( $SOC_{H,BAT}$ ) implementiert, der durch eine binäre Variable aktiviert wird.

Bei Fahrzeuganwesenheit werden solare Leistungsüberschüsse bis zur Erreichung des für die Fahrt benötigten Energieinhalts  $E_{TARGET,BEV}(t)$  für die Fahrzeugladung verwendet. Anschließend wird zunächst der Batteriespeicher vollgeladen. Ist der maximale Ladezustand des Batteriespeichers erreicht, wird das Fahrzeug bis zum maximalen Ladezustand geladen. Bei der Notlade-strategie werden solare Leistungsüberschüsse für die Fahrzeugladung verwendet. Zusätzlich kann der Batteriespeicher für die Fahrzeugladung entladen werden.

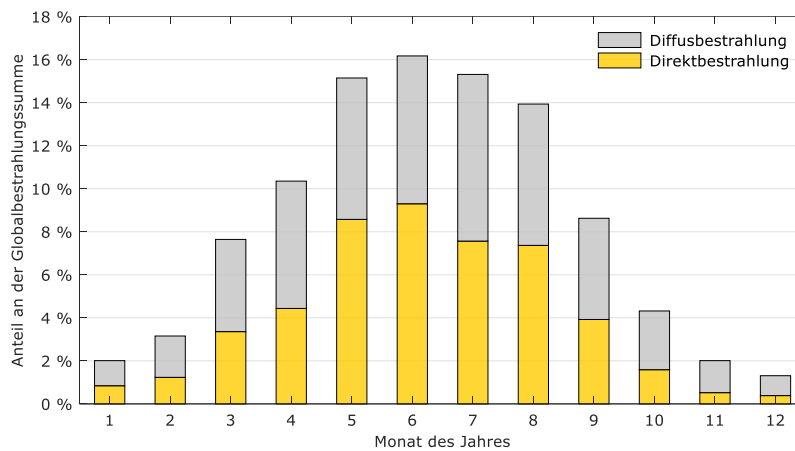
Im Rahmen der Arbeit werden zwei Entladestrategien analysiert, die sich in der Priorisierung von Fahrzeug und Batteriespeicher unterscheiden. Bei der ersten Entladestrategie wird das Fahrzeug gegenüber dem Heimspeicher priorisiert. Das Fahrzeug wird zuerst bidirektional bis zur Ladezustandsgrenze ( $SOC_{SAFETY} + SOC_{H,BEV1}$ ) entladen, bevor der Batteriespeicher zum Einsatz kommt. Die zweite Entladestrategie priorisiert den Heimspeicher, sodass dieser zuerst entladen wird, bevor eine bidirektionale Fahrzeugentladung stattfindet. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den sich unterscheidenden Entladestrategien wird in Kapitel 3.1.3 vorgenommen.

## 2.2 Eingangszeitreihen

Für die Simulation des bidirektionalen Systems sind Eingangszeitreihen der Haushaltslast, des Mobilitätsverhaltens und der PV-Generatorleistung erforderlich, die nachfolgend vorgestellt werden.

### 2.2.1 PV-Generatorleistung

Die PV-Generatorleistung wird auf Basis meteorologischer Messdaten der HTW Berlin berechnet. Die Messdaten enthalten die Global- und Diffusbestrahlungsstärke sowie die Lufttemperatur des Jahres 2017 am Standort Berlin in einsekündiger Auflösung [43]. Die Strahlungsstärken wurden mit Pyranometern des Typs *SMP21* der Firma *Kipp & Zonen* und die Lufttemperatur mit einem Pt100-Widerstandsthermometer gemessen. Im Jahr 2017 wurden eine Globalbestrahlungssumme von 1050 kWh/m<sup>2</sup>, eine Diffusbestrahlungssumme von 535 kWh/m<sup>2</sup> und eine durchschnittliche Lufttemperatur von 11,0 °C erfasst. Die Differenz zwischen Global- und Diffusbestrahlungsstärke auf der horizontalen Ebene ergibt die Direktbestrahlungsstärke. Die monatlichen Anteile der Globalbestrahlungssumme unterteilt in Diffus- und Direktbestrahlung zeigt Abbildung 2.6. Die saisonalen Unterschiede sind deutlich erkennbar. Der Anteil der Direktbestrahlung an der monatlichen Globalbestrahlung ist in den Sommermonaten höher als in den Wintermonaten.



**Abbildung 2.6** Monatliche Diffus- und Direktbestrahlung im Jahr 2017 am Standort Berlin. (Daten: [43])

Anhand der Strahlungsdaten wird die DC-Leistungsabgabe des PV-Generators bestimmt. Es wird angenommen, dass der PV-Generator nach Süden ausgerichtet und um 35° geneigt ist.

Die Globalbestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene setzt sich aus Direkt- und Diffusbestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene sowie der Bodenreflexion zusammen. Mit geometrischen Zusammenhängen, dem Sonnenstand und der Direktbestrahlungsstärke auf der horizontalen Ebene, lässt sich die Direktbestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene bestimmen [44]. Mit dem Modell nach Klucher wird die Diffusbestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene bestimmt [45]. Es wird eine Reflexion mit Bodenalbedo von 0,2 berücksichtigt. Der PV-Generator wird unverschattet und somit ohne Verschattungsverluste angenommen.

Die PV-Modultemperatur beeinflusst die Leistungsabgabe des PV-Generators und wird näherungsweise aus der Lufttemperatur und der Globalbestrahlungsstärke auf Generatorebene nach Quaschnig bestimmt [44]. Der PV-Generator wird in Aufdachmontage mit Proportionalitätskonstante von 29 °C angenommen [44]. Des Weiteren wird eine thermische Trägheit mit einer thermischen Zeitkonstante von 600 s nach Weniger berücksichtigt [41]. Der Modulwirkungsgrad  $\eta_{MPP}(t)$  im Punkt maximaler Leistung (MPP) wird mit dem Modell nach Beyer et al. berechnet [46]. Das Modell berücksichtigt die Globalbestrahlungsstärke auf Generatorebene  $G_{PV}(t)$  und die Modultemperatur  $T_{PV}(t)$ :

$$\eta_{MPP}(t) = (a_1 + a_2 \cdot G_{PV}(t) + a_3 \cdot \ln(G_{PV}(t) \cdot \text{m}^2/\text{W})) \cdot (1 + \alpha_{PV} \cdot (T_{PV}(t) - 25 \text{ °C})) \quad (2.17)$$

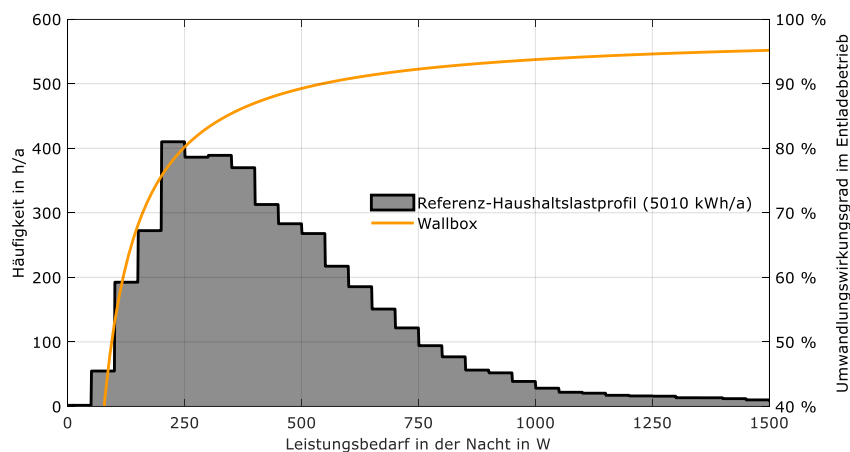
Das Schwachlichtverhalten des Moduls wird mit den Parametern  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  abgebildet (vgl. Tabelle A.1). Der Einfluss der Modultemperatur auf die Moduleffizienz wird durch den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{PV}$  dargestellt und entspricht bei dem monokristallinen Modul  $0,003 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Unter Standardtestbedingungen hat das Modul eine Moduleffizienz  $\eta_{PV}$  von  $20,4 \%$ . Weitere Verluste werden mit einem Wirkungsgrad von  $\eta_{PVG}=90,0 \%$  berücksichtigt. Die Leistungsabgabe des PV-Generators  $P_{PV}(t)$  berechnet sich mit:

$$P_{PV}(t) = \frac{G_{PV}(t) \cdot \eta_{MPP}(t) \cdot \eta_{PVG} \cdot P_{PVG}}{\eta_{PV} \cdot 1000 \text{ W/m}^2} \quad (2.18)$$

## 2.2.2 Haushaltslast

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Haushaltslastprofil ist einem Datensatz mit 74 Lastprofilen in einsekündiger Auflösung entnommen [47]. Die Lastprofile basieren auf in 15-minütiger Auflösung gemessenen Jahresprofilen, die zusammen mit hochaufgelösten Lastdaten zu sekundlich aufgelösten Lastprofilen synthetisiert wurden. Die Auswahl des Referenzprofils wurde in der Studie von Weniger getroffen [41]. Das Referenzprofil (Profil Nr. 31) hat einen jährlichen elektrischen Energiebedarf von  $5010 \text{ kWh}$ , was in etwa dem Mittelwert deutscher Wohngebäude mit PV-Batteriesystem entspricht [41]. Des Weiteren hat das Referenzprofil einen typischen jahreszeitlichen Verlauf. Davon abweichende Haushaltslastprofile werden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht.

Abbildung 2.7 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Leistungsbedarfs des Referenzprofils in der Nacht und den Umwandlungswirkungsgrad der bidirektionalen Wallbox im Entladebetrieb (vgl. Tabelle 2.1, Referenzsystem). Wie in der Abbildung zu sehen, ist der Teillastbetrieb für die nächtliche Energieversorgung von besonderer Relevanz. Aus energetischer Sicht entfallen bei dem Referenzprofil etwa ein Drittel ( $31,5 \%$ ) des nächtlichen Bedarfs auf Leistungen bis  $500 \text{ W}$ . Die Abbildung verdeutlicht die Problematik der Umwandlungswirkungsgrade von Umrichtern. Diese haben in der Regel hohe Wirkungsgrade bei Nennleistung, weisen im Teillastbereich aber deutlich geringere Wirkungsgrade auf.



**Abbildung 2.7** Häufigkeitsverteilung des Leistungsbedarfs in der Nacht (Referenz-Haushaltslastprofil) und Umwandlungswirkungsgrad der bidirektionalen Wallbox (Referenzsystem) im Entladebetrieb. (Daten: [47])

### 2.2.3 Mobilitätsverhalten

Für die Simulation des bidirektionalen Systems sind Eingangszeitreihen des Mobilitätsverhaltens erforderlich. Anforderungen an die Mobilitätsprofile sind neben einer hohen zeitlichen Auflösung die genaue Information über den Verbrauch einzelner Fahrten und der Anwesenheit des Fahrzeugs zuhause. Die Mobilitätsprofile sollten zudem ein gesamtes Kalenderjahr abbilden und saisonale Unterschiede des Fahrzeugverbrauchs berücksichtigen. Des Weiteren ist eine hohe Anzahl an Mobilitätsprofilen erforderlich, um den Einfluss des Mobilitätsverhaltens auf das bidirektionale Laden untersuchen zu können. Gemessene Mobilitätsprofile batterieelektrischer Fahrzeuge, die diese Anforderungen erfüllen, sind nicht verfügbar. Deshalb wird in dieser Arbeit auf synthetische Mobilitätsprofile zurückgegriffen. Es gibt eine Reihe an Modellen, mit denen Mobilitätsprofile batterieelektrischer Fahrzeuge generiert werden können [48]. Für die vorliegende Arbeit werden mit dem Modell *synPRO* generierte, synthetische Mobilitätsprofile verwendet [49]. Insgesamt ist das Modell gut dokumentiert und validiert. Es handelt sich dabei um ein stochastisches Modell, welches die Studie *Mobilität in Deutschland* [13] in den Wahrscheinlichkeiten einbezieht. *synPRO* berücksichtigt auch die Abhängigkeit des Fahrzeugverbrauchs von der Außentemperatur und es besteht die Möglichkeit, Mobilitätsprofile für verschiedene Haushaltskategorien zu generieren. In dieser Arbeit werden die Haushaltskategorien *Familie* und *Rentner\*in* mit jeweils 50 zufällig ausgewählten Profilen berücksichtigt. Die Profile beinhalten zwei Fahrzeugkategorien (*Mittelklasse* und *Oberklasse*), die sich in der Batteriekapazität und im Fahrzeugverbrauch unterscheiden und über beide Haushaltskategorien gleichverteilt vorkommen. Die Eigenschaften der Mobilitätsprofile der beiden Haushaltskategorien sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

**Tabelle 2.2** Eigenschaften der Mobilitätsprofile nach Haushaltskategorie.

Haushaltskategorie	mittlere Fahrleistung	mittlerer Energiebedarf	Verteilung Fahrzeugkategorien	mittlere Anwesenheit zuhause		
				nachts	tagsüber	insgesamt
<i>Familie</i>	15,1 Tkm/a	2,6 MWh/a	25 <i>Mittelklasse</i> 25 <i>Oberklasse</i>	3734 h/a (85,8 %)	2329 h/a (52,8 %)	6063 h/a (69,2 %)
<i>Rentner*in</i>	9,4 Tkm/a	1,6 MWh/a	24 <i>Mittelklasse</i> 26 <i>Oberklasse</i>	3198 h/a (73,5 %)	2921 h/a (66,3 %)	6119 h/a (69,9 %)

Um die Mobilitätsprofile aus *synPRO* für *V2Hsim* verwenden zu können müssen verschiedene Anpassungen vorgenommen werden. Die 15-minütige Zeitschrittweite der *synPRO*-Profile wird für *V2Hsim* in eine Zeitschrittweite von einer Sekunde umgerechnet, ohne dass die Energiebedarfe sowie die Abfahrts- und Ankunftszeiten der ursprünglichen Profile beeinflusst werden. Für die einzelnen Profile werden die täglichen Energiebedarfe zwischen erster Abfahrt und letzter Ankunft des Tages berechnet. Diese Energiebedarfe entsprechen den Ziel-Energiezuständen, die vom bidirektionalen System vor den ersten Abfahrten des Tages gewährleistet werden müssen. Bei zwischenzeitlicher Ankunft zuhause wird der Ziel-Energiezustand neu berechnet, indem die Differenz zwischen Ziel-Energiebedarf und Energiebedarf der vorherigen Fahrt gebildet wird. Dadurch wird ein korrekter Energiezustand bei möglicher Nachladung zwischen den Fahrten gewährleistet. Bei Übernachtfahrten wird der Ziel-Energiezustand bis zur nächsten Ankunft zuhause berechnet. Sofern sich das Fahrzeug zuhause befindet, werden die Zeitschritte bis zur nächsten Abfahrt berechnet. Zusammen mit der Information über den Ziel-Energiezustand, welcher auf die maximale Energiemenge der Fahrzeugbatterie begrenzt wird und dem aktuellen Energieinhalt der Fahrzeugbatterie, kann ein erforderliches Laden bei maximaler Wallboxleistung ausgelöst werden. Der Verbrauch der Fahrzeuge pro Kilometer wird anhand der jährlichen Energiebedarfe und der jährlichen Fahrleistungen berechnet.

## 2.3 Modellvalidierung

Die Parametrierung des realen Systems wird auf Basis von Messdaten einer bidirektionalen DC-Wallbox durchgeführt [36]. Für die Messungen der TU Dortmund wurden verschiedene Fahrzeugmodelle eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit werden die Daten der in Kombination mit dem Fahrzeugmodell *Honda e Advance* gemessenen Wallbox verwendet. Das Modell hat eine nutzbare Batteriekapazität von 28,5 kWh und eine Batteriespannung von 355 V [50].

Die untersuchte Wallbox hat die Besonderheit, dass nur die DC-seitige Leistung gemessen wird, wohingegen der Leistungs-Setpoint AC-seitig vorgegeben wird. Im Messaufbau der TU Dortmund wird zusätzlich die AC-seitige Leistung gemessen. Bei der Analyse der Messdaten kann eine Abweichung zwischen Leistungs-Setpoint und der gemessenen AC-Leistung festgestellt werden, die sich nur durch einen innerhalb der Wallbox konstant angenommenen Umwandlungswirkungsgrad erklären lässt. Um diese Besonderheit der Regelung der Wallbox simulativ abbilden zu können, wird ein angepasstes Simulationsmodell entwickelt.

Ausgehend von der Wallbox-Differenzleistung (vgl. Gleichung (2.8)), welche als der AC-Leistungs-Setpoint verstanden werden kann, wird mit den Lade- ( $f_{AC2BEV,DC}$ ) und Entlade-Offsets ( $f_{BEV2AC,DC}$ ) der DC-seitige Leistungs-Setpoint  $P_{BEV,S}(t)$  berechnet:

$$P_{BEV,S}(t) = \begin{cases} P_{D,WB}(t) \cdot f_{AC2BEV,DC} & \text{für } P_{D,WB}(t) > 0 \wedge SOC_{BEV}(t) < 1 \\ P_{D,WB}(t) \cdot f_{BEV2AC,DC} & \text{für } P_{D,WB}(t) < 0 \wedge SOC_{BEV}(t) > (SOC_{SAFETY} + SOC_{H,BEV1}) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.19)$$

Anschließend wird anhand des DC-seitigen Leistungs-Setpoints  $P_{BEV,S}(t)$  und der Nennausgangsleistung im Ladebetrieb (DC-seitig)  $P_{AC2BEV,OUT}$  bzw. Nenneingangsleistung im Entladebetrieb (DC-seitig)  $P_{BEV2AC,IN}$  die spezifische DC-Leistung der Wallbox  $p_{WB,S}(t)$  bestimmt:

$$p_{WB,S}(t) = \begin{cases} \frac{P_{BEV,S}(t)}{P_{AC2BEV,OUT}} & \text{für } P_{BEV,S}(t) > 0 \\ \frac{|P_{BEV,S}(t)|}{P_{BEV2AC,IN}} & \text{für } P_{BEV,S}(t) < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

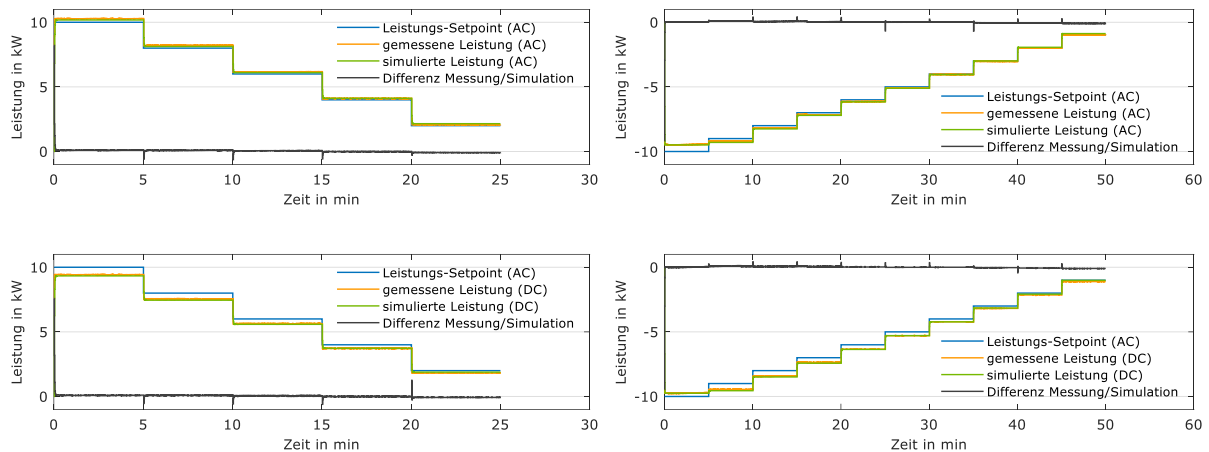
Die resultierende AC-seitige Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  berechnet sich aus dem DC-seitigen Leistungs-Setpoint  $P_{BEV,S}(t)$ , der spezifischen DC-Leistung der Wallbox  $p_{WB,S}(t)$  und den Verlustkoeffizienten (vgl. Tabelle A.1):

$$P_{WB}(t) = \begin{cases} \min(P_{AC2BEV,IN}, P_{BEV,S}(t) - (a_{AC2BEV,OUT} \cdot P_{BEV,S}(t)^2 + b_{AC2BEV,OUT} \cdot P_{BEV,S}(t) + c_{AC2BEV,OUT})) & \text{für } P_{BEV,S}(t) > 0 \\ \max(-P_{BEV2AC,OUT}, P_{BEV,S}(t) - (a_{BEV2AC,IN} \cdot P_{BEV,S}(t)^2 + b_{BEV2AC,IN} \cdot P_{BEV,S}(t) + c_{BEV2AC,IN})) & \text{für } P_{BEV,S}(t) < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.21)$$

Mit der berechneten Wallboxleistung  $P_{WB}(t)$  kann die in Kapitel 2.1.2 beschriebene Vorgehensweise (Gleichung (2.14)) fortgesetzt werden.

Anhand der Messdaten für Fahrzeugladung und -entladung werden die Lade- ( $f_{AC2BEV,DC}$ ) und Entlade-Offsets ( $f_{BEV2AC,DC}$ ) iterativ bestimmt. Der Simulation wird dafür das in der Messung verwendete bidirektionale Profil als negative (Entladen) bzw. positive (Laden) Differenzleistung vorgegeben. Als Vergleichsgröße dient die simulierte und gemessene geladene bzw. entladene Energiemenge. Hieraus ergibt sich ein Ladeoffset  $f_{AC2BEV,DC}$  von 92 % und ein Entladeoffset  $f_{BEV2AC,DC}$  von 105 %.

Abbildung 2.8 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Leistungen für Fahrzeugladung und -entladung mit den iterativ bestimmten Offsets. Es ist zu erkennen, dass es bei Leistungssprüngen zu stärkeren Abweichungen zwischen Messung und Simulation kommt. Diese Abweichungen lassen sich aufgrund der einsekündigen Simulationszeitschrittweite nicht weiter minimieren.



**Abbildung 2.8** Vergleich von gemessenen und simulierten Leistungen bei gleicher Leistungs-Setpoint-Vorgabe (AC-seitig) für Fahrzeugladung (oben links: AC-Leistung, unten links: DC-Leistung) und Fahrzeugentladung (oben rechts: AC-Leistung, unten rechts: DC-Leistung). (Messdaten: [36])

Tabelle 2.3 vergleicht die resultierenden Energiesummen der Messung und der mit *V2Hsim* durchgeführten Simulation. Für den Ladezyklus hat die simulierte Leistung AC-seitig eine absolute Abweichung von -18 Wh (-0,3 %) gegenüber der Messung. DC-seitig beträgt die absolute Abweichung -21 Wh (-0,3 %). Der simulierte Entladezyklus hat AC-seitig eine absolute Abweichung von 14 Wh (0,1 %) und DC-seitig eine absolute Abweichung von 16 Wh (0,1 %).

**Tabelle 2.3** Absolute und relative Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Bezeichnung	Messung	Simulation	abs. Abweichung	rel. Abweichung
Fahrzeugladung AC-seitig	6,84 kWh	6,82 kWh	-18 Wh	-0,3 %
Fahrzeugentladung AC-seitig	10,91 kWh	10,92 kWh	14 Wh	0,1 %
Fahrzeugladung DC-seitig	6,23 kWh	6,21 kWh	-21 Wh	-0,3 %
Fahrzeugentladung DC-seitig	11,30 kWh	11,32 kWh	16 Wh	0,1 %

## 2.4 Effizienzkennzahlen

Für die Bewertung der Effizienz von bidirektionalen Systemen kommen verschiedene Kennzahlen in Frage. Die in dieser Arbeit simulierten Betriebsergebnisse werden mit den Kennzahlen Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad und bilanziellen Kosten bewertet. Im Folgenden wird die Berechnung der Kennzahlen und deren Einschränkungen erläutert.

Der Eigenverbrauchsanteil ist eine gängige Effizienzkennzahl zur Bewertung von Betriebsergebnissen aus PV-Anlagen. Er gibt an, wie viel der solar erzeugten Energiemenge für die Versorgung elektrischer Verbraucher und der Ladung von Speichern verwendet wird. Für das bidirektionale System mit Heimspeicher berechnet sich der Eigenverbrauchsanteil  $e$  aus der direkt Verbrauchten PV-Energie  $E_{PVS2L}$ , der vom Heimspeichersystem verwendeten PV-Energie  $E_{PVS2BS}$ , der von der Wallbox und dem Fahrzeug verwendeten PV-Energie  $E_{PVS2WB}$  sowie der AC-seitig abgegebenen PV-Energie  $E_{PVS}$ :

$$e = \frac{E_{PVS2L} + E_{PVS2BS} + E_{PVS2WB}}{E_{PVS}} \quad (2.22)$$

Für das bidirektionale System ohne Heimspeicher entfällt die für die Heimspeicherladung verwendete PV-Energie  $E_{PVS2L}$  bei der Berechnung.

Bei gegenüber der Netzeinspeisevergütung deutlich höherem Netzbezugspreis ist ein hoher Eigenverbrauchsanteil finanziell erstrebenswert, sofern dieser einen geringeren Netzbezug bedeutet. Nachteil bei der Verwendung des Eigenverbrauchsanteils ist, dass dieser mit der Ineffizienz des Systems ansteigt. Er eignet sich demnach nicht für den Vergleich der Energieeffizienz verschiedener Systeme.

Als weitere Effizienzkennzahl wird der Autarkiegrad verwendet, der auch Eigenversorgungsanteil bezeichnet werden kann. Er entspricht dem Anteil des gesamten elektrischen Energieverbrauchs, der durch das Gesamtsystem aus PV-Anlage, bidirektionalem Fahrzeug und Heimspeichersystem gedeckt wird. Der Autarkiegrad  $a$  berechnet sich für das bidirektionale System mit Heimspeicher aus der für den Haushalt benötigten Energie  $E_L$ , der für die Fahrten des Fahrzeugs benötigten Energie  $E_{BEV}$  und den Netzversorgungen. Die Netzversorgungen unterteilen sich in die Energie für Haushaltslast  $E_{G2L}$ , Heimspeichersystem  $E_{G2BS}$  sowie Wallbox und Fahrzeug  $E_{G2WB}$ . Hinzu kommt die extern geladene Energie des Fahrzeugs  $E_{EXTERN}$ . Bei der für die Fahrten des Fahrzeugs benötigten Energie  $E_{BEV}$  wird ein Ladewirkungsgrad von 93 % berücksichtigt. Bei nichtvorhandenem Heimspeichersystem ist  $E_{G2BS}$  gleich null.

$$a = \frac{E_L + E_{BEV} - E_{G2L} - E_{G2BS} - E_{G2WB} - E_{EXTERN}}{E_L + E_{BEV}} \quad (2.23)$$

Der Autarkiegrad berücksichtigt alle Verlustmechanismen, die den Netzbezug erhöhen, und eignet sich demnach für den Vergleich der Energieeffizienz bidirektionaler Systeme. Zu beachten ist, dass der Autarkiegrad auch stark von der Systemdimensionierung abhängig ist und sich die Energieeffizienz deshalb nicht isoliert betrachten lässt.

Die bilanziellen Kosten  $C$  ergeben sich aus der Differenz zwischen Netzbezugskosten  $C_{G2AC}$  und Netzeinspeiseerlösen  $R_{AC2G}$ . Für die Berechnung der Netzbezugskosten  $C_{G2AC}$  werden die zuhause bezogene Energiemenge ( $E_{G2L}$ ,  $E_{G2BS}$  und  $E_{G2WB}$ ) und die extern geladene Energiemenge  $E_{EXTERN}$  mit den jeweiligen Netzbezugspreisen ( $p_{G2AC}$  bzw.  $p_{EXTERN}$ ) multipliziert. Die Netzeinspeiseerlöse  $R_{AC2G}$  ergeben sich analog aus dem Produkt der eingespeisten Energiemenge ( $E_{PVS2G}$ ,  $E_{BS2G}$  und  $E_{WB2G}$ ) und der Netzeinspeisevergütung  $p_{AC2G}$ .

$$C = C_{G2AC} - R_{AC2G} = (E_{G2L} + E_{G2BS} + E_{G2WB}) \cdot p_{G2AC} + E_{EXTERN} \cdot p_{EXTERN} - (E_{PVS2G} + E_{BS2G} + E_{WB2G}) \cdot p_{AC2G} \quad (2.24)$$

Es ist zu berücksichtigen, dass die bilanziellen Kosten stark von den Annahmen zu Netzbezugspreisen und Netzeinspeisevergütung abhängen.

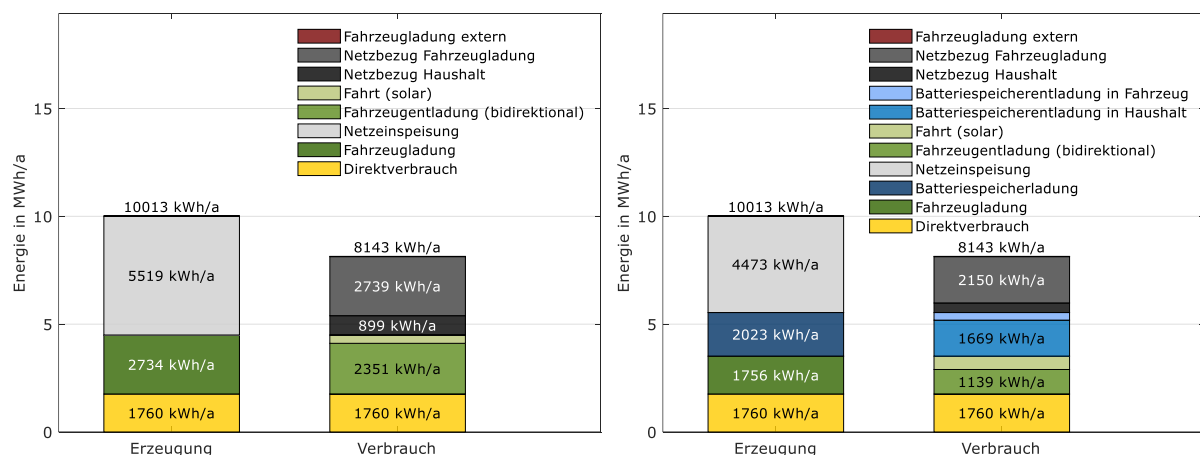


### 3 Ergebnisbetrachtung

Anhand des im vorherigen Kapitel präsentierten Simulationsmodells werden verschiedene simulationsbasierte Untersuchungen durchgeführt. Zunächst werden in Kapitel 3.1 die Einflüsse verschiedener Systemdimensionierungen und Mobilitätsprofile auf das verlustbehaftete Referenzsystem untersucht. Für die Untersuchung werden Simulationen mit jeweils 50 zufällig ausgewählten Mobilitätsprofilen der beiden Haushaltskategorien *Familie* und *Rentner\*in* durchgeführt. Anhand vorheriger Simulationen werden aus den Mobilitätsprofilen für beide Haushaltskategorien jeweils ein Referenzprofil ausgewählt, das für nachfolgende Analysen verwendet wird. In Kapitel 3.2 werden die Einflüsse verschiedener Verlustmechanismen auf die energetische und ökonomische Bilanz der beiden Systemkonfigurationen untersucht (vgl. Tabelle 2.1). Zusätzlich werden mit einer Sensitivitätsanalyse die ökonomischen Bedeutungen verschiedener Modellparameter untersucht. Abschließend wird in Kapitel 3.3 ein Systemvergleich durchgeführt, bei dem verschiedene der Systemkonfigurationen mit Verlusten energetisch und ökonomisch gegenübergestellt werden.

In Abbildung 3.1 sind beispielhaft die Energiebilanzen des verlustfreien Referenzsystems mit *Familien*-Referenzprofil ohne und mit Batteriesystem (10 kWh) dargestellt. Die Simulation zeigt, dass beim System ohne Heimspeicher 2734 kWh/a der PV-Erzeugung für die Fahrzeugladung verwendet werden. 1760 kWh/a werden direkt verbraucht und 5519 kWh/a werden in das Netz eingespeist. Von der solaren Fahrzeugladung werden 2351 kWh/a für die Versorgung der Haushaltslast bidirektional aus dem Fahrzeug entladen. Nur ein geringer Anteil von 383 kWh/a wird für die Mobilität eingesetzt.

Mit Batteriespeicher erhöht sich der solare Eigenverbrauchsanteil insgesamt. 2023 kWh/a entfallen auf die Ladung des Heimspeichers, wovon 354 kWh/a für eine spätere Ladung des Fahrzeugs verwendet werden. Die direkte solare Fahrzeugladung verringert sich dagegen um 978 kWh/a auf 1756 kWh/a. Durch Nutzung des Heimspeichers verringert sich die bidirektionale Entladung des Fahrzeugs deutlich (-1212 kWh/a). Dies führt zu der Erkenntnis, dass ein Heimspeicher sich tendenziell nachteilig auf den Erfolg bidirektionalen Ladens auswirkt.



**Abbildung 3.1** Energiebilanz des verlustfreien Referenzsystems (Referenzprofil: *Familie*) ohne Batteriesystem (links) und mit 10 kWh-Batteriesystem (rechts).

### 3.1 Einflussfaktoren

Der Anteil, den das Fahrzeug zur Deckung der Haushaltslast beitragen kann, ist abhängig von der Systemdimensionierung und dem Mobilitätsverhalten, was bereits in anderen Studien untersucht wurde [51], [52]. Um die Einflüsse unterschiedlicher Systemkonfigurationen und Mobilitätsprofile auf das verlustbehaftete bidirektionale Referenzsystem (vgl. Tabelle 2.1) zu untersuchen, werden Jahressimulationen mit variierenden Systemparametern und Mobilitätsprofilen durchgeführt.

Als zentrale Einflussgröße kann die installierte PV-Generatorleistung gesehen werden, welche im Eigenheimsegment üblicherweise von Dachfläche und -orientierung bestimmt wird. Alle betrachteten Einflussfaktoren werden deshalb über eine variierende Nennleistung des PV-Generators von 6 kWp bis 16 kWp untersucht. Dieser Leistungsbereich orientiert sich an den in Deutschland neuinstallierten PV-Dachanlagen im Jahr 2023 [15]. Der PV-Generator ist südlich orientiert, mit einem Neigungswinkel von 35°. Die Nennleistung des PV-Wechselrichters wird entsprechend der PV-Generatorleistung angepasst.

Für die Bewertung werden die Kennzahl Autarkiegrad und die jährliche Kosteneinsparung herangezogen. Die Kosteneinsparung ist die Differenz der bilanziellen Kosten und bezieht sich auf unidirektionales Laden bei Ankunft zuhause bei gleicher PV-Generatorleistung. Zu beachten ist, dass sich Kosteneinsparungen demnach aus einer intelligenteren, solaroptimierten Ladestrategie und bidirektionalem Laden zusammensetzen. Im Nachfolgenden wird vereinfachend nur von „jährlicher Kosteneinsparung“ anstelle von „jährlicher Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft zuhause bei gleicher PV-Generatorleistung“ gesprochen.

#### 3.1.1 Mobilitätsverhalten

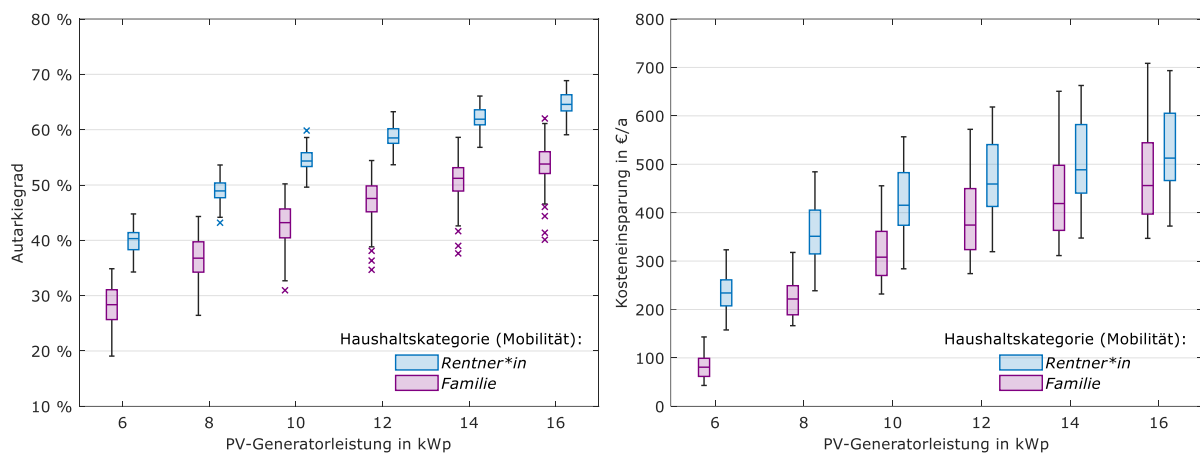
Der Einfluss des Mobilitätsverhaltens auf den Erfolg bidirektionalen Ladens wird anhand von Simulationen mit jeweils 50 zufällig ausgewählten Mobilitätsprofilen der beiden Haushaltskategorien *Familie* und *Rentner\*in* untersucht.

In Abbildung 3.2 ist der Einfluss der Haushaltskategorie auf den Autarkiegrad und die jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung dargestellt. Bei Autarkiegrad und Kosteneinsparung stellen sich für beide Haushaltskategorien Sättigungen mit steigender PV-Generatorleistung ein. Der maximale mittlere Autarkiegrad und die maximale mittlere Kosteneinsparung der beiden Haushaltskategorien werden bei 16 kWp PV-Generatorleistung erreicht. Für die Haushaltskategorie *Familie* betragen diese 53,8 % bzw. 456 €/a, und für die Haushaltskategorie *Rentner\*in* 64,6 % bzw. 513 €/a. Insgesamt ist festzustellen, dass die Haushaltskategorie *Rentner\*in* stärker vom bidirektionalen Laden profitiert als *Familien*-Profile. Über alle PV-Generatorleistungen hinweg hat die Haushaltskategorie *Rentner\*in* einen durchschnittlich 11,3 Prozentpunkte höheren Autarkiegrad und eine um 100 €/a erhöhte Kosteneinsparung. Dies kann mit der ausgeglicheneren täglichen und nächtlichen Anwesenheit gegenüber der *Familien*-Profile begründet werden (vgl. Tabelle 2.2). Eine höhere tägliche Anwesenheit führt zu einer besseren Nutzung von PV-Überschüssen, die sowohl bidirektional als auch für Fahrten genutzt werden können.

Die Analyse zeigt, dass bidirektionales Laden bei niedrigen PV-Generatorleistungen einen geringeren Nutzen hat, wobei hier eine starke Mobilitätsprofilabhängigkeit festzustellen ist. Da die Erzeugung kleiner PV-Anlagen bereits ohne bidirektionales Laden gut ausgenutzt werden kann, fallen die Kosteneinsparungen geringer aus. Bei einer PV-Generatorleistung von 6 kWp beträgt der Autarkiegrad der Haushaltskategorie *Familie* im Mittel 28,4 % und die Kosteneinsparung im Mittel 81 €/a. Demgegenüber haben Profile der Haushaltskategorie *Rentner\*in* bei 6 kWp PV-Generatorleistung im Mittel einen 11,9 Prozentpunkte (40,3 %) höheren Autarkiegrad und bereits eine mittlere Kosteneinsparung von 234 €/a (+153 €/a). Dies führt zu der Erkenntnis, dass

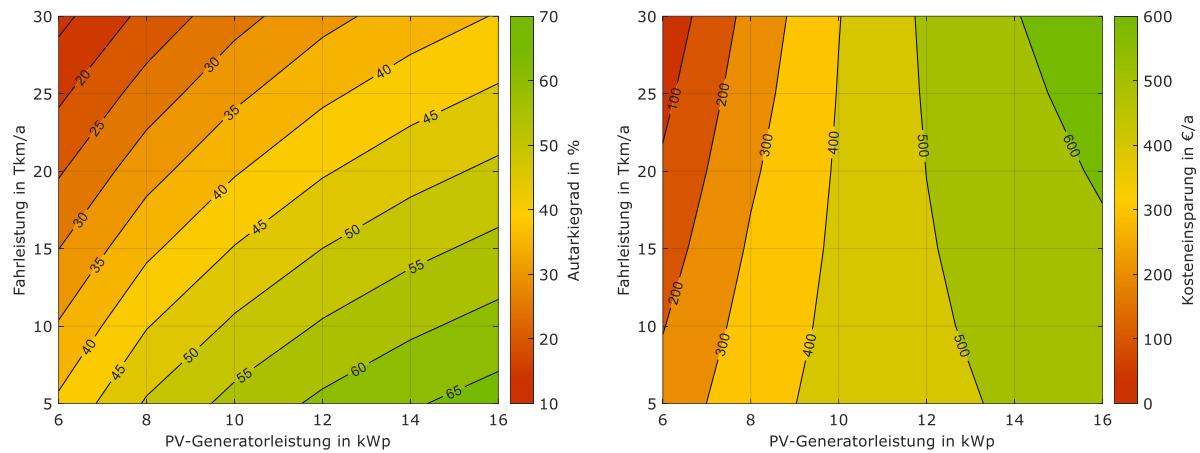
bei niedrigen PV-Generatorleistungen höhere Anwesenheiten der Fahrzeuge gegeben sein müssen, damit bidirektionales Laden nennenswerte Erfolge erzielt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass höhere PV-Generatorleistungen für bidirektionales Laden vorteilhaft sind und zu höheren Kosteneinsparungen führen. Über beide Haushaltskategorien hinweg lassen sich durch eine Erhöhung der PV-Generatorleistung von 6 kWp auf 16 kWp die Kosteneinsparungen im Mittel um 327 €/a steigern. Die bidirektional entladenen Energien in der Haushaltskategorie *Rentner\*in* reichen von 839 kWh/a bei einer PV-Generatorleistung von 6 kWp bis 1766 kWh/a bei einer PV-Generatorleistung von 16 kWp (vgl. Abbildung A.2). Für die *Familien*-Profile reichen die jährlich aus dem Fahrzeug entladenen Energien von 529 kWh (6 kWp) bis 1542 kWh (16 kWp).



**Abbildung 3.2** Einfluss der Haushaltskategorie (Mobilität) auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).

Die untersuchten Mobilitätsprofile unterscheiden sich in An- und Abfahrtszeiten, Routinen und hinsichtlich ihrer jährlichen Fahrleistung. Der Einfluss der jährlichen Fahrleistung in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Eine höhere jährliche Fahrleistung hat einen verringerten Autarkiegrad zur Folge. Ein Grund hierfür ist der mit der Fahrleistung zunehmende Energiebedarf, welcher sich nicht mehr solar decken lässt. Auch auf die Kosteneinsparung wirkt sich eine höhere jährliche Fahrleistung bei niedrigen PV-Generatorleistungen leicht negativ aus. Dies lässt sich mit einer bei höheren Fahrleistungen leicht verringerten Anwesenheit begründen. Des Weiteren wirkt sich eine erhöhte Fahrleistung auch im unidirektionalen Fall positiv auf die Kosten aus, wodurch sich die Kosteneinsparungen verringern. Bei höheren PV-Generatorleistungen (ab 12 kWp) kehrt sich dieser Effekt um, und höhere jährliche Fahrleistungen wirken sich positiv auf die Kosteneinsparungen aus. Aufgrund des mit der Fahrleistung zunehmenden Energiebedarfs können solare Überschüsse durch die bidirektionale Ladestrategie besser genutzt werden.



**Abbildung 3.3** Einfluss der jährlichen Fahrleistung auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).

### 3.1.2 Fahrzeug

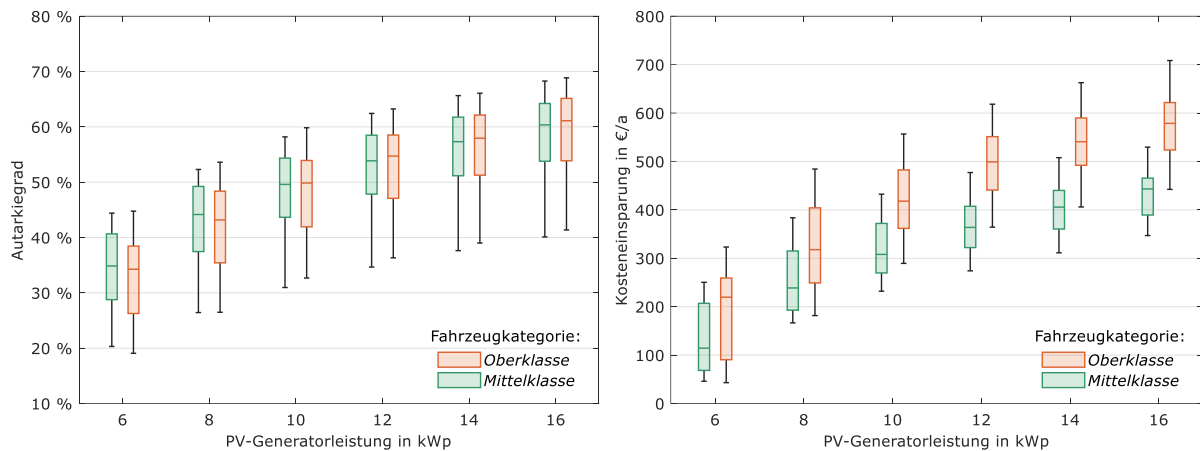
Die verwendeten Mobilitätsprofile beinhalten zwei Fahrzeugkategorien (Fahrzeugmodelle), die sich in der Batteriekapazität und im Fahrzeugverbrauch unterscheiden. Die Eigenschaften der Fahrzeugkategorien sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Fahrzeugkategorie *Mittelklasse* besitzt eine Speicherkapazität von 51 kWh und einen mittleren Verbrauch von 13,7 kWh/100 km. Fahrzeuge der Kategorie *Oberklasse* haben eine Speicherkapazität von 85 kWh und einen mittleren Verbrauch von 21,1 kWh/100 km. Bei mittlerer Fahrleistung und Anwesenheit zuhause sind zwischen den beiden Fahrzeugkategorien nur geringfügige Abweichungen festzustellen. Der höhere Verbrauch pro Kilometer bei *Oberklasse*-Fahrzeugen hat hingegen einen erhöhten Gesamtenergiebedarf zur Folge.

**Tabelle 3.1** Eigenschaften der Fahrzeugkategorien.

Fahrzeug-kategorie	Speicher-kapazität	mittlerer Verbrauch	mittlere Fahrleistung	mittlerer Energiebedarf	mittlere Anwesenheit zuhause
<i>Mittelklasse</i>	51 kWh	13,7 kWh/100 km	12,1 Tkm/a	1,7 MWh/a	6081 h/a (69,4 %)
<i>Oberklasse</i>	85 kWh	21,1 kWh/100 km	12,3 Tkm/a	2,6 MWh/a	6101 h/a (69,6 %)

Abbildung 3.4 zeigt den Einfluss der Fahrzeugkategorie in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung. Bis zu einer PV-Generatorleistung von 8 kWp weisen *Mittelklasse*-Fahrzeuge im Mittel höhere Autarkiegrade auf. Bei größeren PV-Generatorleistungen weisen dagegen *Oberklasse*-Fahrzeuge die höheren Autarkiegrade auf. Hier überwiegt der Effekt der höheren Speicherkapazität der *Oberklasse*-Fahrzeuge gegenüber dem verringerten Energiebedarf von *Mittelklasse*-Fahrzeugen, da genügend Solarenergie erzeugt werden kann. Bei der jährlichen Kosteneinsparung haben *Oberklasse*-Fahrzeuge über den gesamten PV-Generatorleistungsbereich eine bessere Bilanz. Dies lässt sich mit der höheren Speicherkapazität und dem erhöhten Energiebedarf von *Oberklasse*-Fahrzeugen begründen. Es überlagern sich hier Effekte des solaren und des bidirektionalen Ladens, welche im bidirektionalen Algorithmus implementiert sind. Die maximale mittlere Kosteneinsparung beträgt in der Kategorie *Oberklasse* 579 €/a und wird bei einer PV-Generatorleistung von 16 kWp erreicht. Bei *Mittelklasse*-Fahrzeugen wird die maximale mittlere Kosteneinsparung ebenfalls bei einer PV-Generatorleistung von 16 kWp erreicht und beträgt 443 €/a. Über den gesamten PV-Generatorleistungsbereich hinweg weisen *Oberklasse*-

Fahrzeuge gegenüber *Mittelklasse*-Fahrzeugen eine durchschnittlich 117 €/a höhere Kosteneinsparung auf.

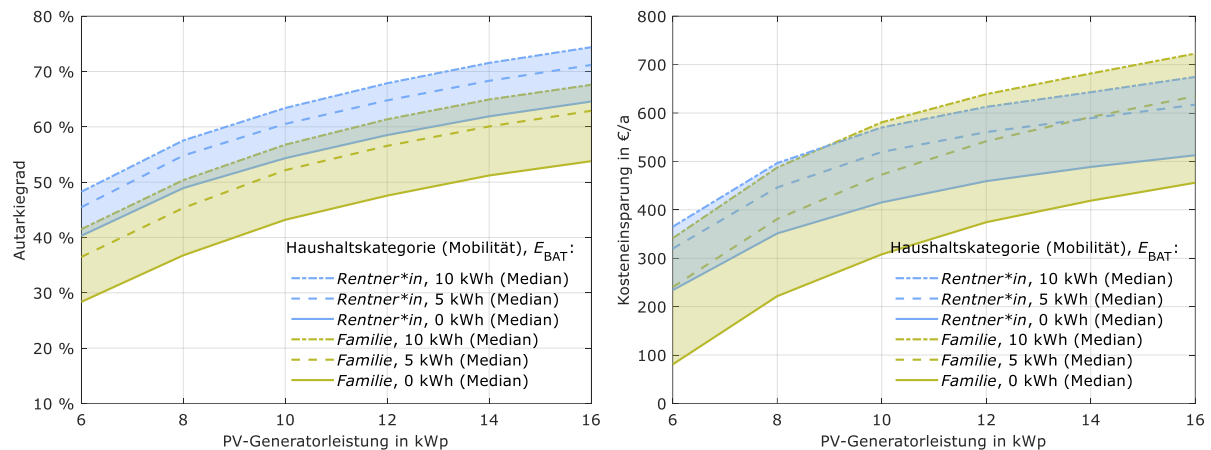


**Abbildung 3.4** Einfluss der Fahrzeugkategorie auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).

### 3.1.3 Batteriesystem

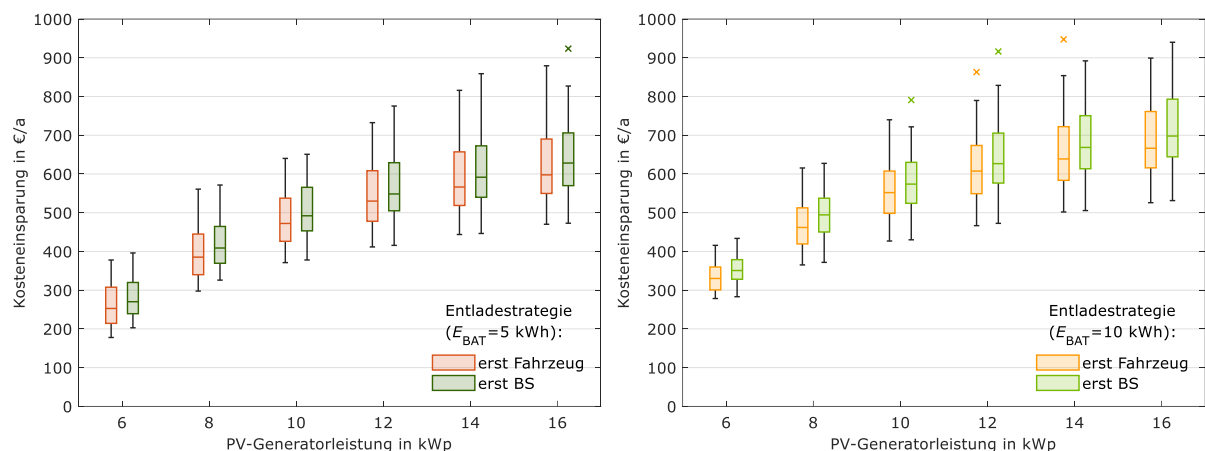
In Deutschland ist die Zahl der installierten Batteriesysteme im Heimbereich stark angestiegen [15]. Um den Effekt des bidirektionalen Ladens in Kombination mit Heimspeichersystemen zu untersuchen, wird das Referenzsystem um Heimspeicherkapazitäten von 5 kWh und 10 kWh ergänzt. Dies entspricht gängigen Speicherkapazitäten im Heimbereich [15]. Die Systemeigenschaften des Referenzsystems orientieren sich an einem verfügbaren AC-gekoppelten Batteriesystem mit einer AC-Nennleistung von etwa 10 kW (vgl. Tabelle 2.1) [35]. Zusätzlich werden zwei Entladestrategien untersucht, die sich in der Priorisierung von Fahrzeug und Heimspeicher unterscheiden (vgl. Kapitel 2.1).

Den Einfluss der Heimspeicherkapazität auf beide Haushaltskategorien der Mobilität in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung zeigt Abbildung 3.5. In der Haushaltskategorie *Rentner\*in* erhöht eine Heimspeicherkapazität von 5 kWh den Autarkiegrad im Mittel um 6,1 Prozentpunkte und die Kosteneinsparung um 99 €/a. Bei einer Heimspeicherkapazität von 10 kWh ist der Autarkiegrad um 9,1 Prozentpunkte und die Kosteneinsparung um 150 €/a erhöht. In der Haushaltskategorie *Familie* sind analog dazu mittlere Autarkiegraderhöhungen von 8,8 Prozentpunkten bzw. 13,6 Prozentpunkten und um 167 €/a bzw. 266 €/a erhöhte Kosteneinsparungen möglich. In beiden Haushaltskategorien zeigt sich, dass die Erhöhung der Heimspeicherkapazität von 0 kWh auf 5 kWh einen größeren Effekt als die Erhöhung von 5 kWh auf 10 kWh hat. Insgesamt lassen sich Autarkiegrade und Kosteneinsparungen durch Heimspeichersysteme bei *Familien*-Profilen besser steigern. Dies lässt sich mit der gegenüber der Haushaltskategorie *Rentner\*in* niedrigeren Anwesenheit tagsüber und einem höheren Energiebedarf erklären. Ein Batteriesystem ist in der Lage geringere Anwesenheiten auszugleichen. Der höhere Energiebedarf der *Familien*-Profile verstärkt den Effekt.



**Abbildung 3.5** Einfluss der Heimspeicherkapazität und Haushaltskategorie (Mobilität) auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (Entladestrategie: erst BS).

Die Analyse der Simulationen mit unterschiedlichen Entladestrategien zeigt, dass die Priorisierung des Heimspeichers gegenüber dem Fahrzeug bei der Entladung Vorteile hat. Über alle simulierten PV-Generatorleistungen und Heimspeicherkapazitäten hinweg können so durchschnittlich zusätzliche 24 €/a eingespart werden. Abbildung 3.6 zeigt den Einfluss der Entladestrategie auf die jährlichen Kosteneinsparungen für beide simulierten Speicherkapazitäten in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung.



**Abbildung 3.6** Einfluss der Entladestrategie auf jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft für  $E_{BAT} = 5$  kWh (links) und  $E_{BAT} = 10$  kWh (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung.

Auch bei den Effizienzkennzahlen Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil sind die Vorteile der Entladestrategie erkennbar (vgl. Abbildung A.6 und Abbildung A.7). Der Eigenverbrauch kann durchschnittlich um 0,7 Prozentpunkte und der Autarkiegrad um 1,3 Prozentpunkte gesteigert werden. Durch die Priorisierung des Heimspeichers können so die Vorteile der dauerhaften Verfügbarkeit des Speichers besser ausgenutzt werden. Die Priorisierung des Fahrzeugs dagegen führt zu einer höheren Verweildauer des Heimspeichers im vollgeladenen Zustand und damit zu einer verminderten Ausnutzung solarer Überschüsse.

## 3.2 Verlustanalyse

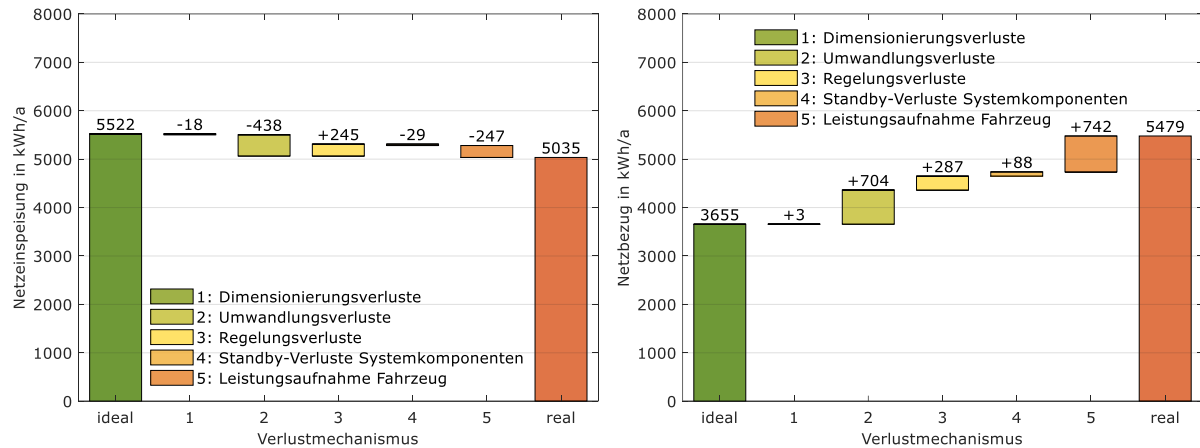
Die Gesamtverluste eines bidirektionalen Systems setzen sich aus verschiedenen Verlustmechanismen zusammen. Um die Verluste im Detail zu analysieren, wird zunächst anhand vorheriger Simulationen aus den beiden Haushaltskategorien der Mobilität *Familie* und *Rentner\*in* jeweils ein Referenzprofil ausgewählt. Die Auswahl der Referenzprofile wird auf Basis der Ergebnisse der Simulationen des verlustbehafteten Referenzsystems ohne Batteriesystem durchgeführt und berücksichtigt den jährlichen Energiebedarf, Netzbezug, Netzeinspeisung und die jährliche Kosteneinsparung. Die Eigenschaften der Referenzprofile sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Beiden Profilen ist die Fahrzeugkategorie *Oberklasse* zugeordnet. Sie unterscheiden sich aber aufgrund der jährlichen Fahrleistung in ihrem Energiebedarf. Das Referenzprofil der Haushaltskategorie *Rentner\*in* hat gegenüber dem *Familien*-Referenzprofil eine ausgeglichene Anwesenheit zwischen Tag und Nacht.

**Tabelle 3.2** Eigenschaften der Referenz-Mobilitätsprofile.

Referenzprofil	Fahrzeug-Speicherkapazität	Energiebedarf	Anwesenheit zuhause		
			nachts	tagsüber	insgesamt
<i>Familie</i>	85 kWh	3,1 MWh/a	3810 h/a (87,5 %)	2317 h/a (52,6 %)	6126 h/a (69,9 %)
<i>Rentner*in</i>	85 kWh	2,2 MWh/a	3161 h/a (72,6 %)	2728 h/a (61,9 %)	5889 h/a (67,2 %)

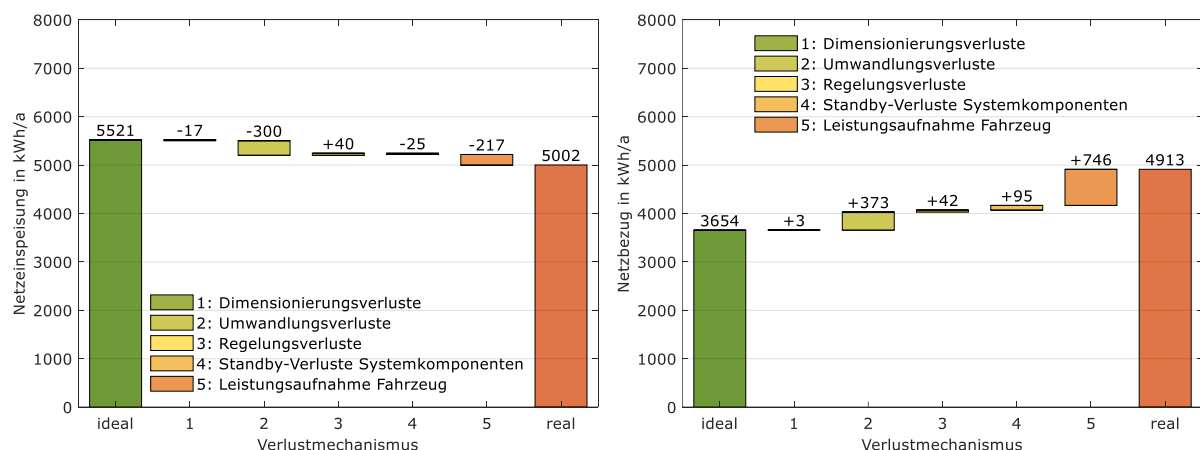
Um den Einfluss verschiedener Verlustmechanismen darstellen zu können, wird zunächst eine Simulation am verlustfreien System durchgeführt. Anschließend wird das verlustfreie System um einzelne Verlustmechanismen erweitert und eine erneute Simulation durchgeführt. Der Einfluss einzelner Verlustmechanismen auf die Netzeinspeisung und den Netzbezug des realen Systems (vgl. Tabelle 2.1) mit Referenzprofil *Familie* ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass alle Verlustmechanismen zu einem Anstieg des Netzbezugs führen und fast alle Verlustmechanismen mit einer geringeren Netzeinspeisung einhergehen. Einzige Ausnahme bilden die Regelungsverluste, die zu einer ungewollten Netzeinspeisung führen. Dimensionierungsverluste haben nur einen geringfügigen Einfluss, was für ausreichende Nennleistungen der Systemkomponenten bezüglich der PV-Generatorleistung und der Last spricht. Umwandlungswirkungsgrade führen dagegen innerhalb des Systems zu hohen Verlusten. Diese werden auf der einen Seite durch Solarenergie gedeckt, die deshalb nicht eingespeist werden kann, und auf der anderen Seite durch zusätzlichen Netzbezug kompensiert. Für das reale System verringert sich die Netzeinspeisung um 438 kWh/a und erhöht sich der Netzbezug um 704 kWh/a. Bei einer realen Regelung reagiert das System nicht optimal bzw. verzögert auf Laständerungen. Dies führt zu höheren Netzeinspeisungen und Netzbezügen. Das reale System hat dadurch um 245 kWh/a bzw. 287 kWh/a erhöhte Netzeinspeisung und -bezug. Standby-Verluste des Systems verringern die Netzeinspeisung um 29 kWh/a und erhöhen den Netzbezug um 88 kWh/a. Es wird angenommen, dass das Fahrzeug für den bidirektionalen Betrieb dauerhaft im eingeschalteten Zustand sein muss. Das Fahrzeug hat dabei eine Leistungsaufnahme von 150 W, wodurch hohe Verluste zustande kommen. Die Netzeinspeisung verringert sich dadurch um 247 kWh/a und der Netzbezug erhöht sich um 742 kWh/a. Dies entspricht mit dem angenommenen Netzbezugspreis und der Netzeinspeisevergütung Verlusten von 277 €/a.

Für das Referenzprofil *Rentner\*in* erhöhen sich die Umwandlungs- und Regelungsverluste, da ein höherer bidirektionaler Energieumsatz stattfindet (vgl. Abbildung A.8). Zusätzlich verschieben sich durch höhere Anwesenheit tagsüber die Verluste von Verlustmechanismus 5 Richtung Netzeinspeisung, wodurch diese deutlich geringere Kosten verursachen (205 €/a).



**Abbildung 3.7** Einfluss einzelner Verlustmechanismen des realen Systems (Referenzprofil: *Familie*, ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41])

Zum Vergleich zeigt Abbildung 3.8 die einzelnen Verluste des Referenzsystems (vgl. Tabelle 2.1) mit Referenzprofil *Familie*. Gegenüber dem realen System hat das Referenzsystem verringerte Umwandlungs- und Regelungsverluste. Die Umwandlungsverluste des Referenzsystems sind bei Netzeinspeisung und -bezug um 138 kWh/a bzw. 331 kWh/a und die Regelungsverluste um 205 kWh/a bzw. 245 kWh/a verringert. Das entspricht einem Kostenvorteil von 226 €/a. Auffällig ist, dass trotz gleicher Fahrzeug-Leistungsaufnahme und Zeit im bidirektionalen Betrieb die Verluste von Verlustmechanismus 5 gegenüber dem realen System abweichen. Durch die Berechnungsmethodik können diese Verluste nicht isoliert von anderen Verlustmechanismen betrachtet werden. Die Fahrzeug-Leistungsaufnahme führt zu erhöhten Ladebedarfen, was bei verringerter Gesamteffizienz wiederum zu höheren Verlusten führt.



**Abbildung 3.8** Einfluss einzelner Verlustmechanismen des Referenzsystems (Referenzprofil: *Familie*, ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41])

Mittels Sensitivitätsanalyse werden die Einflüsse ausgewählter Modellparameter auf Basis des Referenzsystems untersucht. Die Einflüsse der ausgewählten Parameter bezüglich der Kosten-



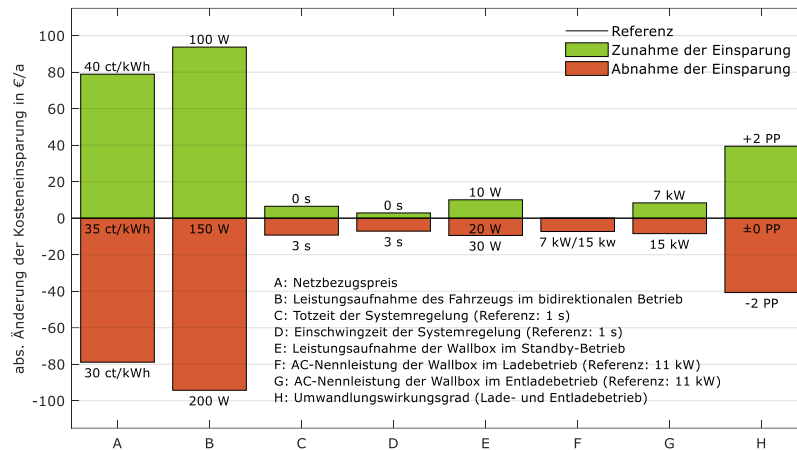
einsparung des Systems mit *Familien*-Referenzprofil sind in Abbildung 3.9 aufgeführt. Die Kosteneinsparung bezieht sich, wie bei vorherigen Analysen, auf unidirektionales Laden bei Ankunft zuhause bei gleicher PV-Generatorleistung. Es ist zu erkennen, dass die größten Sensitivitäten bei den Kostenannahmen, der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs und den Umwandlungswirkungsgraden der Wallbox liegen.

Die Bedeutung des Netzbezugspreises und der Netzeinspeisevergütung für die Rentabilität bidirektionalen Ladens wurde von Kern et al. bereits analysiert [51]. Ein höherer Netzbezugspreis und eine niedrigere Einspeisevergütung wirken sich positiv auf die Kosteneinsparungen aus. Für das Referenzsystem mit *Familien*-Profil geht eine Erhöhung des Netzbezugspreises von 35 ct/kWh auf 40 ct/kWh mit einer um 79 €/a erhöhten Kosteneinsparung einher. Für das Referenzprofil *Rentner\*in* erhöhen sich die Kosteneinsparungen dadurch sogar um 99 €/a (vgl. Abbildung A.10). Bei einer Verringerung um 5 ct/kWh verringern sich die Kosteneinsparungen im gleichen Maße.

Wie schon in der vorherigen Analyse gezeigt, führt die angenommene Leistungsaufnahme des Fahrzeugs im bidirektionalen Betrieb von 150 W zu hohen Verlusten. Eine Verringerung um 50 W erhöht die Kosteneinsparungen um 94 €/a. Die Verringerung der Fahrzeug-Leistungsaufnahme kann sich auch positiv auf das unidirektionale Laden auswirken, was an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird.

Die Erhöhung der Tot- und Einschwingzeit von 1 s auf 3 s wirkt sich nicht signifikant auf die Kosten aus. Die Kosteneinsparungen verringern sich dadurch um 9 €/a bzw. 7 €/a. Eine Halbierung der Wallbox-Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb auf 10 W erhöht die jährliche Kosteneinsparung ebenfalls nur geringfügig um 10 €. Um den Einfluss der AC-Nennleistungen der Wallbox im Lade- und Entladebetrieb zu analysieren, werden die Umwandlungswirkungsgrade den geänderten Nennleistungen angepasst. Dies führt dazu, dass sich der Wirkungsgrad im unteren Leistungsbereich bei einer Verringerung der Nennleistung verbessert. Gleichermäßen führt eine Erhöhung der Nennleistung zu einer Verringerung des Wirkungsgrads im unteren Leistungsbereich. Eine Erhöhung sowie Verringerung der AC-Nennleistung im Ladebetrieb um 3 kW führen so zu um 7 €/a bzw. 6 €/a verringerten Kosteneinsparungen. Die Nennleistung des Referenzsystems von 11 kW stellt demnach den besten der betrachteten drei Fälle dar. Es ist anzumerken, dass die optimale AC-Nennleistung im Ladebetrieb eine Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung aufweist. Bei der AC-Nennleistung im Entladebetrieb wirkt sich eine Verringerung der Nennleistung um 3 kW positiv auf die Kosteneinsparung aus (+8 €/a). Dies verdeutlicht die Bedeutung des Teillastwirkungsgrads für das bidirektionale Laden.

Für eine isolierte Betrachtung des Umwandlungswirkungsgrads, wird dieser über den gesamten Leistungsbereich um 2 Prozentpunkte erhöht sowie verringert. Eine Erhöhung des Wirkungsgrads um 2 Prozentpunkte erhöht die Kosteneinsparung um 39 €/a. Eine Verringerung um 2 Prozentpunkte verringert die Kosteneinsparung dagegen um 41 €/a.



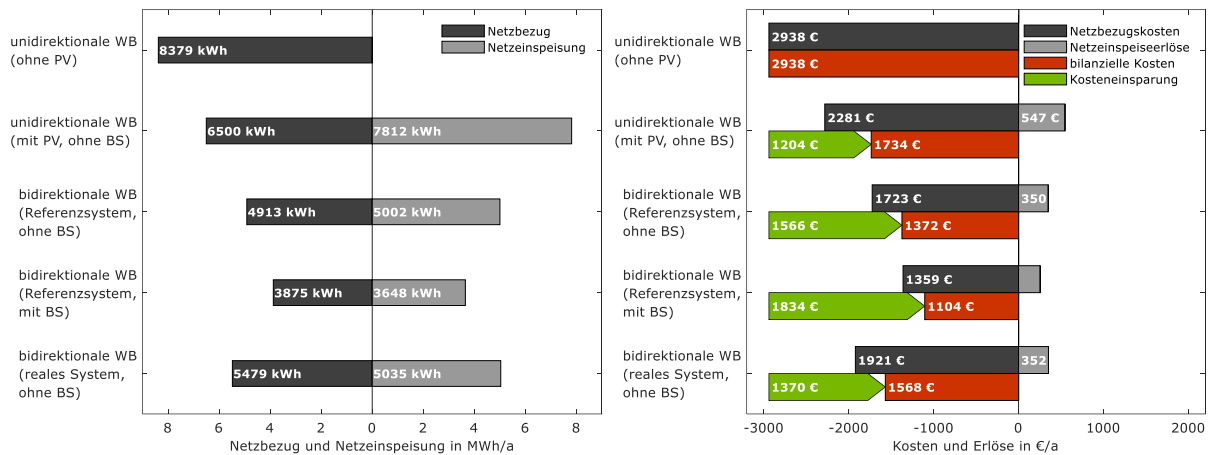
**Abbildung 3.9** Einfluss der Änderung verschiedener Modellparameter auf die absolute Änderung der Kosteneinsparung (gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft) des Referenzsystems (Referenzprofil: *Familie*, ohne Batteriesystem). (Angelehnt an [41])

Es bleibt festzuhalten, dass bei den betrachteten Systemen Umwandlungswirkungsgrade zu hohen Verlusten führen. Eine Verbesserung der Wirkungsgrade würde die Rentabilität bidirektionalen Ladens verbessern. Bei dem betrachteten realen System führen auch Regelungsverluste zu signifikanten Kostensteigerungen. Fahrzeugseitig führt die Leistungsaufnahme im bidirektionalen Betrieb zu hohen Verlusten. In den betrachteten Fällen würde eine Verringerung der Leistungsaufnahme um 50 W die Kosten um mindestens 68 €/a verringern. Für die Rentabilität bidirektionalen Ladens ist ein hoher Netzbezugspreis vorteilhaft. Die Erhöhung um 5 ct/kWh würde die Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden um mindestens 79 €/a steigern.

### 3.3 Systemvergleich

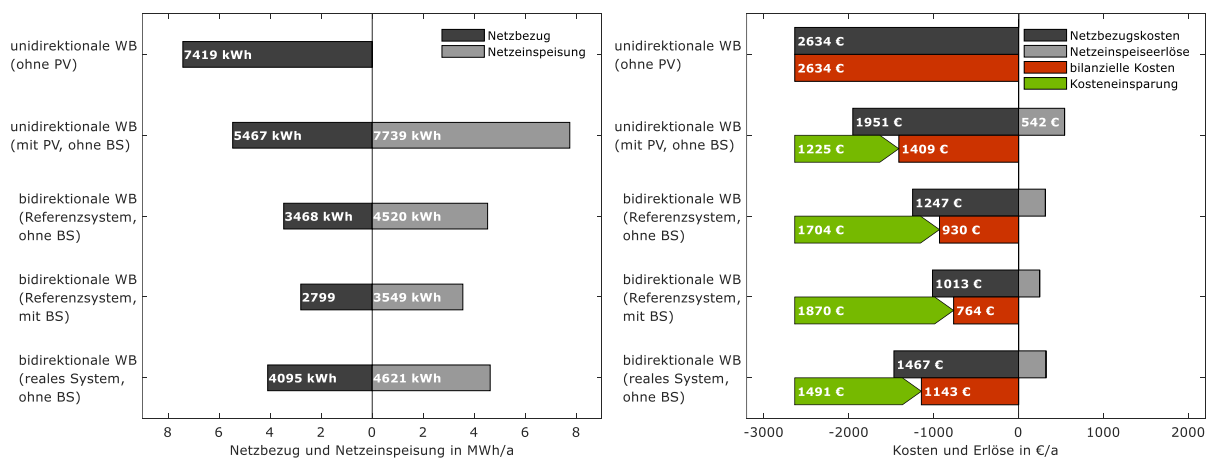
Abschließend werden energetische und ökonomische Betriebsergebnisse verschiedener Systemkonfigurationen analysiert und gegenübergestellt. Abbildung 3.10 (links) vergleicht die jährliche Netzeinspeisung sowie den Netzbezug unterschiedlicher Systemkonfigurationen (vgl. Tabelle 2.1) mit *Familien*-Referenzprofil. In Abbildung 3.2 (rechts) sind die Netzbezugskosten, Netzeinspeiseerlöse, bilanzielle Kosten und Kosteneinsparungen der unterschiedlichen Systemkonfigurationen dargestellt. Im Fall unidirektionalen Ladens bei Ankunft zuhause ohne PV-Anlage wird der gesamte jährliche Energiebedarf von 8379 kWh dem Netz entnommen. Dieser Fall dient im Systemvergleich als Referenzfall. Ein Netzbezug von 8379 kWh/a entspricht unter Berücksichtigung externen Ladens bilanziellen Kosten von 2938 €/a. Ergänzt man das System um eine PV-Anlage mit einer PV-Generatorleistung von 10 kWp, verringert sich der jährliche Netzbezug auf 6500 kWh. Hinzu kommen 7812 kWh/a an Netzeinspeisungen. Die bilanziellen Kosten verringern sich dadurch um 1204 €/a. Für das bidirektionale Referenzsystem ohne Batteriesystem verringert sich der jährliche Netzbezug um weitere 1587 kWh auf 4913 kWh. Gleichzeitig verringert sich die Netzeinspeisung um 2810 kWh/a auf 5002 kWh/a. Dies entspricht weiteren Kosteneinsparungen von 362 €/a. Die Kombination aus bidirektionalem Referenzsystem und Batteriesystem (10 kWh) führt zu einem gegenüber dem einfachen bidirektionalen Referenzsystem um 1038 kWh/a verringerten Netzbezug. Die Netzeinspeisung verringert sich dabei um 1354 kWh/a. Dadurch können weitere 268 €/a eingespart werden. Das reale bidirektionale System weist eine gegenüber dem Referenzsystem schlechtere energetische und ökonomische Bilanz auf. Der jährliche Netzbezug erhöht sich gegenüber dem Referenzsystem um 566 kWh.

Die Netzeinspeisung ist mit 5035 kWh/a nur leicht erhöht (+33 kWh/a). Gegenüber dem Referenzsystem sind die Kosteneinsparungen um 196 €/a verringert. Im Vergleich zu dem unidirektionalen Fall mit PV-Anlage sind die bilanziellen Kosten um nur 166 €/a verringert.



**Abbildung 3.10** Links: Netzeinspeisung und Netzbezug verschiedener Systemkonfigurationen. Rechts: Netzbezugskosten, Netzeinspeiseerlöse, bilanzielle Kosten und Kosteneinsparung verschiedener Systemkonfigurationen mit Referenzprofil *Familie*. (Angelehnt an [41])

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit *Familien*-Referenzprofil weisen die Simulationen mit Referenzprofil *Rentner\*in* trotz geringeren Energiebedarfs in allen Systemkonfigurationen verbesserte Kosteneinsparungen auf. Die verbesserte Bilanz lässt sich auf die höhere Anwesenheit tagsüber zurückführen. Das bidirektionale Referenzsystem ohne Heimspeicher mit Referenzprofil *Rentner\*in* kann gegenüber dem unidirektionalen System die jährlichen Kosteneinsparungen um 479 € steigern. Gegenüber der Simulation mit *Familien*-Referenzprofil sind die Kosteneinsparungen um 138 €/a erhöht. Demgegenüber führt eine Erweiterung um 10 kWh Heimspeicherkapazität nur zu einer zusätzlichen Verringerung der bilanziellen Kosten um 166 €/a (vgl. *Familien*-Referenzprofil: -268 €/a). Auch mit dem realen System können durch das Mobilitätsprofil die Kosteneinsparungen gesteigert werden. Die zusätzlichen Kosteneinsparungen betragen 266 €/a gegenüber unidirektionalem Laden mit PV-Anlage (vgl. *Familien*-Referenzprofil: +166 €/a). Die Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung einer hohen Fahrzeuganwesenheit für die Bilanz bidirektionalen Ladens.



**Abbildung 3.11** Links: Netzeinspeisung und Netzbezug verschiedener Systemkonfigurationen. Rechts: Netzbezugskosten, Netzeinspeiseerlöse, bilanzielle Kosten und Kosteneinsparung verschiedener Systemkonfigurationen mit Referenzprofil *Rentner\*in*. (Angelehnt an [41])

## 4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten und Grenzen des in Kapitel 2 vorgestellten Simulationsmodells *V2Hsim* diskutiert. Die Diskussion bezieht sich dabei auf die verwendeten Eingangsdaten und die innerhalb des Modells vereinfachten Annahmen. Das Modell kann im engen Sinne als eine Erweiterung des Simulationsmodells *PerMod* [35] für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme gesehen werden. Alle darin getroffenen Vereinfachungen lassen sich auch auf *V2Hsim* übertragen. Die in *PerMod* getroffenen Vereinfachungen werden in der Studie von Weniger diskutiert [41].

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Haushaltslastprofil ist einem Datensatz mit 74 Lastprofilen in einsekündiger Auflösung entnommen [47]. Die Lastprofile basieren auf in 15-minütiger Auflösung gemessenen Jahresprofilen, die zusammen mit hochaufgelösten Lastdaten zu sekundlich aufgelösten Lastprofilen synthetisiert wurden. Die Auswahl des Referenzprofils wurde ebenfalls von Weniger getroffen [41]. Das ausgewählte Profil entspricht in etwa dem Mittelwert deutscher Wohngebäude mit PV-Batteriesystem. Davon abweichende Haushaltslastprofile werden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht. Die Mobilitätsprofile sind dagegen rein synthetisch und wurden mit dem Modell *synPRO* generiert [49]. Es handelt sich dabei um ein stochastisches Modell, welches die Ergebnisse der Studie *Mobilität in Deutschland* [13] in den Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Für die Simulationen werden die Haushaltskategorien *Familie* und *Rentner\*in* berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass Wohngebäude mit PV-Batteriesystem für gewöhnlich von diesen beiden Haushaltskategorien bewohnt werden.

Aufgrund der sich unterscheidenden Herkunft der Last- und Mobilitätsdaten ist die Korrelation der Daten nicht gegeben. Ein Zusammenhang von Haushaltslast und Fahrzeuganwesenheit ist deshalb unberücksichtigt. Nach aktuellem Kenntnisstand ist kein hochaufgelöster Datensatz mit korrelierenden Daten verfügbar. Für die beiden Referenz-Mobilitätsprofile fallen zwischen 37 % und 38 % des Haushaltsenergiebedarfs bei Leistungen über 1 kW in Fahrzeugabwesenheit an. Dieser Wert kann mit der Anwesenheit von Bewohner\*innen trotz Fahrzeugabwesenheit begründet werden. Zusätzlich unterscheiden sich die Last- und Mobilitätsdaten in ihren Bezugsjahren, weshalb Arbeitstage und Wochenenden nicht synchronisiert sind. Eine Korrelation zwischen Wetterdaten und Haushaltslast ist aufgrund unterschiedlicher Bezugsjahre und Standorte nicht gegeben. Die Auswirkung der Außentemperatur auf den Fahrzeugverbrauch ist in *synPRO* berücksichtigt [49]. Auch an dieser Stelle ist auf die sich unterscheidenden Bezugsjahre hinzuweisen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationsmodell trifft die Annahme, dass das Fahrzeug bei Anwesenheit zuhause dauerhaft an die bidirektionale Wallbox angeschlossen ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass von Seiten der Nutzer\*innen ein hohes Interesse besteht, den bidirektionalen Nutzen zu maximieren, wodurch sich hohe Anschlusszeiten des Fahrzeugs rechtfertigen lassen. Zusätzlich wird eine perfekte Planung der Fahrten angenommen. Die in der Realität vorhandenen Planungsunsicherheiten werden durch die Sicherheitsreichweite von 75 km berücksichtigt. Das für den Vergleich verwendete unidirektionale Simulationsmodell nimmt eine sofortige Ladung des Fahrzeugs bei Ankunft zuhause an. Ein an die solare Erzeugung angepasstes Ladeverhalten wird demnach nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer positiveren Bilanz bidirektionalen Ladens. Zukünftig könnte ein angepasstes Nutzungsverhalten in das Modell implementiert werden.

Der Ladezustand des Fahrzeugs und des möglicherweise vorhandenen Heimspeichers wird in *V2Hsim* nicht begrenzt. Ladezustände von unter 0 % und über 100 % sind deshalb grundsätzlich möglich. Aufgrund der einsekündigen Simulationszeitschrittweite und der maximalen Leistungen können dadurch entstehende Fehler als vernachlässigbar betrachtet werden. So würden bei einer Lade- bzw. Entladeleistung von 11 kW maximal 3 Wh überladen werden. Ebenfalls

möglich ist eine Abweichung zwischen Anfangs- und End-Ladezustand des Fahrzeugs, was zu einer Verfälschung der energetischen und ökonomischen Bilanz führen würde. Durch den einjährigen Betrachtungszeitraum der Simulationen und geringe solare Überschüsse in den Wintermonaten sind Abweichungen jedoch eher unwahrscheinlich. Die maximale Ladezustandsabweichung ist durch die Speicherkapazität des Fahrzeugs (51 kWh oder 85 kWh) unter Berücksichtigung des Sicherheitsladezustands begrenzt. Auch für das Heimspeichersystem ist eine Ladezustandsabweichung möglich, die durch die Heimspeicherkapazität begrenzt ist (5 kWh oder 10 kWh).

Sich unterscheidende Fahrzeugarchitekturen werden innerhalb des Simulationsmodells nicht berücksichtigt. Jedoch hat die Nennspannung des Fahrzeugs einen nicht unbedeutenden Einfluss auf das Ladeverhalten und die Effizienz des Ladens [26], [36]. Für zukünftige Simulationen mit realen Wallboxen und Fahrzeugen ist dieser Effekt zu berücksichtigen. Der mittels Sensitivitätsanalyse quantifizierte Einfluss des Wallbox-Umwandlungswirkungsgrads dient als Referenz.

Sowohl für die bidirektionale Wallbox als auch das Batteriesystem wird angenommen, dass diese bei einer Lade- bzw. Entladeleistung von 0 W unmittelbar in den Standby-Betrieb wechseln. Vereinzelte Batteriesysteme verweilen in der Praxis jedoch zunächst bei erhöhter Leistungsaufnahme im Leerlauf-Betrieb [41]. Dieses Verhalten wird auch für bidirektionale Wallboxen vermutet. Sofern kein Fahrzeug der bidirektionalen Wallbox angeschlossen ist, wird diese als ausgeschaltet angenommen und hat keine Leistungsaufnahme. Ein Deep-Standby-Modus wurde im Modell für keine der Systemkomponenten implementiert.

Bezüglich der Regelungsverluste werden für die Vereinfachung des Modellansatzes weitere Annahmen getroffen. Basierend auf der Annahme, dass alle Systemkomponenten ein gleiches Regelungsverhalten aufweisen und über ein zentrales Energiemanagementsystem gesteuert werden, ist innerhalb des Modells nur eine Tot- und Einschwingzeit implementiert. Abweichungen der Tot- und Einschwingzeiten einzelner Systemkomponenten können in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Die Totzeit wird durch ein verzögertes Differenzleistungssignal realisiert. Die Steuerung zwischen den Systemkomponenten bleibt deshalb von der Totzeit unbeeinflusst. Wie aus der Sensitivitätsanalyse hervorgeht, ändert sich die Kosteneinsparung mit der Totzeit nur geringfügig. Es ist davon auszugehen, dass der von dieser vereinfachten Annahme ausgehende Fehler ebenfalls gering ist.

Um die Sicherheitsreichweite bzw. die für anstehende Fahrten benötigte Reichweite des Fahrzeugs sicherzustellen, wurde im Modell ein Modus implementiert, in dem das Fahrzeug bei maximaler Wallboxleistung und gegebenenfalls unter Netzbezug geladen wird. Die Wallbox stellt dabei die maximale Ladeleistung unmittelbar und ohne Berücksichtigung von Regelungsverhalten zur Verfügung. Da das System nur selten in diesen Modus eintritt, ist der dadurch entstehende Fehler vernachlässigbar. Für den Fall eines vorhandenen Heimspeichers wird in *V2Hsim* ein idealisiertes Energiemanagementsystem angenommen, dem alle möglichen Leistungsflüsse bekannt sind und das Leistungsflüsse präzise im Wattbereich steuern kann.

## 5 Zusammenfassung

Leitfaden dieser Arbeit ist die Beantwortung der folgenden Fragen, die bereits in der Einleitung vorgestellt wurden:

1. Lässt sich verlustbehaftetes bidirektionales Laden für die PV-Eigenverbrauchsoptimierung wirtschaftlich darstellen?
2. Wie wirken sich verschiedene Systemkonfigurationen und Mobilitätsprofile energetisch und ökonomisch auf das bidirektionale Laden aus?
3. Welchen Effekt hat die Erweiterung des bidirektionalen Systems um ein AC-gekoppeltes Heimspeichersystem?
4. Welche Verluste entstehen in bidirektionalen Systemen und wie wirken sich diese energetisch und ökonomisch aus?

An dieser Stelle wird auf die Beantwortung der Fragen eingegangen und die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammenfassend dargestellt. Abschließend werden offene Fragestellungen diskutiert. Für die Beantwortung der Fragen wurde sich methodisch für eine zeitreihenbasierte Simulation entschieden und ein entsprechendes Simulationsmodell entwickelt. Bei der Entwicklung des Modells wurde großen Wert auf eine realitätsnahe Abbildung der Verlustmechanismen und der Möglichkeit der Einbindung eines zusätzlichen Heimspeichersystems gelegt. Das Simulationsmodell betrachtet bidirektionales Laden über die DC-Schnittstelle des Fahrzeugs, was eine bidirektionale DC-Wallbox erforderlich macht. Die Bewertung erfolgt Anhand der Energieflüsse über einen Betrachtungszeitraum von jeweils einem Jahr.

1. Frage: Über alle Mobilitätsprofile hinweg wurden mit der effizienteren Wallbox (Referenzsystem) und einer PV-Generatorleistung von 10 kWp jährliche Kosteneinsparungen von 232 € bis 557 € simuliert. Mit dem Referenzprofil *Familie* ließen sich bei einer PV-Generatorleistung von 10 kWp bidirektional jährlich 362 € einsparen. Für das Referenzprofil *Rentner\*in* betragen die jährlichen Kosteneinsparungen sogar 479 €. Bei einer angenommenen Wallbox-Lebensdauer von 10 Jahren dürften die zusätzlichen Kosten für eine bidirektionale Wallbox demnach nicht mehr als 3620 € bzw. 4790 € betragen. In diesen Kosten müssten auch die Installation und das Energiemanagementsystem enthalten sein. Aufgrund technologischer Ähnlichkeit zu Batterieumrichtern sind bidirektionale DC-Wallboxen zukünftig auf ähnlichem Preisniveau zu erwarten. Eine wirtschaftliche Darstellung ist dann möglich, hängt aber letztendlich von der Entwicklung des Netzbezugspreises ab. Zusätzlich müsste in diesen Kosten auch der Wertverlust des batterieelektrischen Fahrzeugs berücksichtigt werden. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass bidirektionales Laden zu keiner beschleunigten Batteriealterung des Fahrzeugs führen würde [53], [54]. Unter Umständen wirkt sich der bidirektionale Betrieb sogar positiv auf die Batterie-Lebensdauer aus, da die Fahrzeugbatterie nur mit kleinen Teilzyklen belastet und der mittlere Ladezustand bei Standzeiten gesenkt werden würde [53]. Auch bei eigenen Simulationen konnte eine deutliche Senkung der Verweildauer im Ladezustand außerhalb von 20 % bis 80 % festgestellt werden. Allerdings ist der Referenzfall unidirektionales Laden bei Ankunft zuhause als Negativbeispiel zu sehen. Eine deutliche Erhöhung der Fahrzeug-Betriebsstunden ist durch bidirektionales Laden zu erwarten und stellt eine zusätzliche Belastung für die Bordelektronik des Fahrzeugs dar.

2. Frage: Auf Basis der effizienteren Wallbox (Referenzsystem) wurden im Rahmen der Arbeit unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit bidirektionalen Ladens untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass höhere PV-Generatorleistungen vorteilhaft für bidirektionales La-

den sind. Bei niedrigen PV-Generatorleistungen erzeugt bidirektionales Laden nur einen geringen Mehrwert gegenüber der unidirektionalen Ladung. Der Vergleich der Haushaltskategorien zeigt die Bedeutung des Mobilitätsverhaltens für das bidirektionale Laden. Die Haushaltskategorie *Rentner\*in* kann über alle PV-Generatorleistungen hinweg einen durchschnittlich 11,3 Prozentpunkte höheren Autarkiegrad und eine um 100 €/a gesteigerte Kosteneinsparung erzielen. Diese Verbesserung konnte auf die ausgeglicheneren täglichen und nächtlichen Anwesenheiten gegenüber *Familien*-Profilen zurückgeführt werden. Die jährliche Fahrleistung wirkt sich erst bei höheren PV-Generatorleistungen positiv auf die Kosteneinsparung durch bidirektionales Laden aus. Dieser Effekt kann auf die solaroptimierte Ladestrategie des bidirektionalen Ladens zurückgeführt werden, da sich die Kosteneinsparung auf unidirektionales Laden bei Ankunft zuhause bezieht. Im Vergleich der Fahrzeugkategorien weisen *Oberklasse*-Fahrzeuge durch höhere Speicherkapazität und höheren jährlichen Energiebedarf eine verbesserte jährliche Kosteneinsparung auf. Über den PV-Generatorleistungsbereich hinweg haben *Oberklasse*-Fahrzeuge gegenüber *Mittelklasse*-Fahrzeugen eine durchschnittlich 117 €/a höhere Kosteneinsparung. Zusammengefasst konnten folgende Punkte als für das bidirektionale Laden vorteilhaft identifiziert werden:

- Eine hohe Anwesenheit des Fahrzeugs tagsüber und nachts.
- Eine hohe Speicherkapazität des Fahrzeugs (mit höherem Energiebedarf des Fahrzeugs).
- Eine hohe PV-Generatorleistung.

3. Frage: Im Rahmen der Studie wurde bidirektionales Laden in Kombination mit einem AC-gekoppelten Heimspeichersystem untersucht. Dafür wurde die effizientere Wallbox (Referenzsystem) um Heimspeicherkapazitäten von 5 kWh und 10 kWh ergänzt. Es konnte gezeigt werden, dass ein Heimspeichersystem sich mit *Familien*-Profilen positiver auswirkt als mit Profilen der Kategorie *Rentner\*in*. Das Heimspeichersystem ermöglicht es, geringere Anwesenheiten der *Familien*-Profile auszugleichen. Ein kleiner Speicher hat bereits einen merkbaren Effekt, der mit steigender Speicherkapazität abnimmt. Die Analyse der Simulationen mit unterschiedlichen Entladestrategien zeigt, dass die Priorisierung des Heimspeichers gegenüber dem Fahrzeug bei der Entladung stets vorteilhaft ist. Eine Priorisierung des Fahrzeugs hat eine höhere Verweildauer des Heimspeichers im vollgeladenen Zustand und dadurch eine verringerte Ausnutzung solarer Überschüsse zur Folge. Simulativ konnte gezeigt werden, dass sich die bidirektionale Entladung des Fahrzeugs durch die Nutzung des Heimspeichers verringert. Ein zusätzlicher Heimspeicher wirkt sich demnach tendenziell nachteilig auf den Erfolg bidirektionalen Ladens aus.

Es konnte gezeigt werden, dass durch einfache Energiemanagement-Maßnahmen, wie der Priorisierung des Heimspeichers bei der Entladung, eine Systemoptimierung erzielt werden kann. Weitere Effizienzsteigerungen durch verbessertes Energiemanagement sind deshalb nicht auszuschließen.

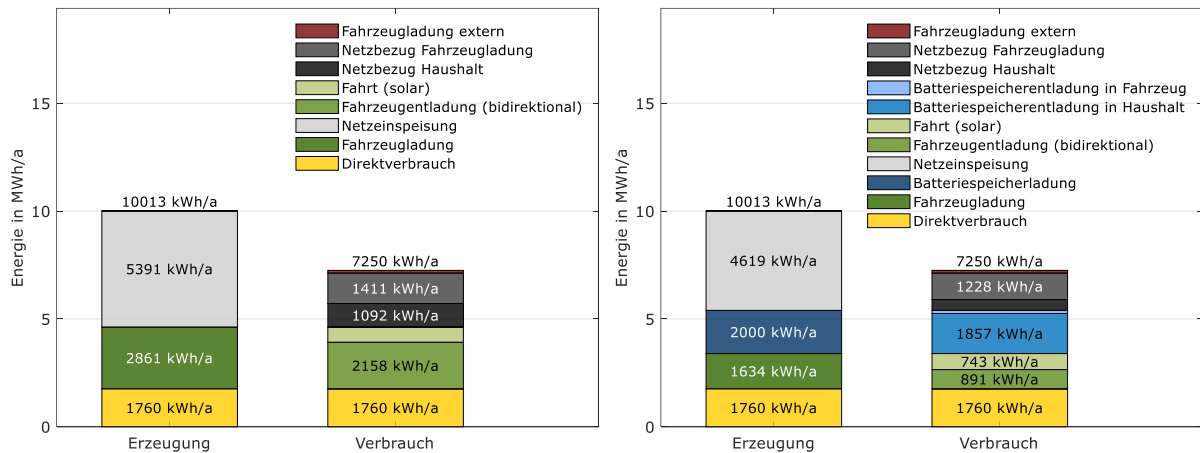
4. Frage: Mittels Verlustanalyse konnte gezeigt werden, dass bei den betrachteten Wallboxen (reales System und Referenzsystem) Umwandlungswirkungsgrade zu hohen Verlusten führen. Eine Verbesserung der Umwandlungswirkungsgrade würde die Kosteneinsparungen durch bidirektionales Laden deutlich steigern. Bei der betrachteten realen Wallbox fallen auch hohe Regelungsverluste an. Fahrzeugseitig führt die Leistungsaufnahme im eingeschalteten Zustand von 150 W zu hohen Verlusten. Laut Sevdari et al. beträgt die Leistungsaufnahme fahrzeugmodellabhängig sogar bis zu 350 W [22]. Hier sind Fahrzeughersteller in der Pflicht, Lösungen zu präsentieren. Ein zusätzlicher bidirektionaler Betriebsmodus mit verringerter Leistungsaufnahme ist denkbar.

Weitere Studien auf Grundlage des in dieser Arbeit vorgestellten Simulationsmodells sind möglich. Beispielsweise könnten zusätzlich dynamische Stromtarife eingebunden oder die Netzurückwirkungen des bidirektionalen Ladens untersucht werden. Der Einfluss des Haushaltslastprofils wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, könnte jedoch Gegenstand zukünftiger Studien sein. Auch die Integration zusätzlicher Verbraucher, wie beispielsweise einer intelligenten Wärmepumpe, ist denkbar.

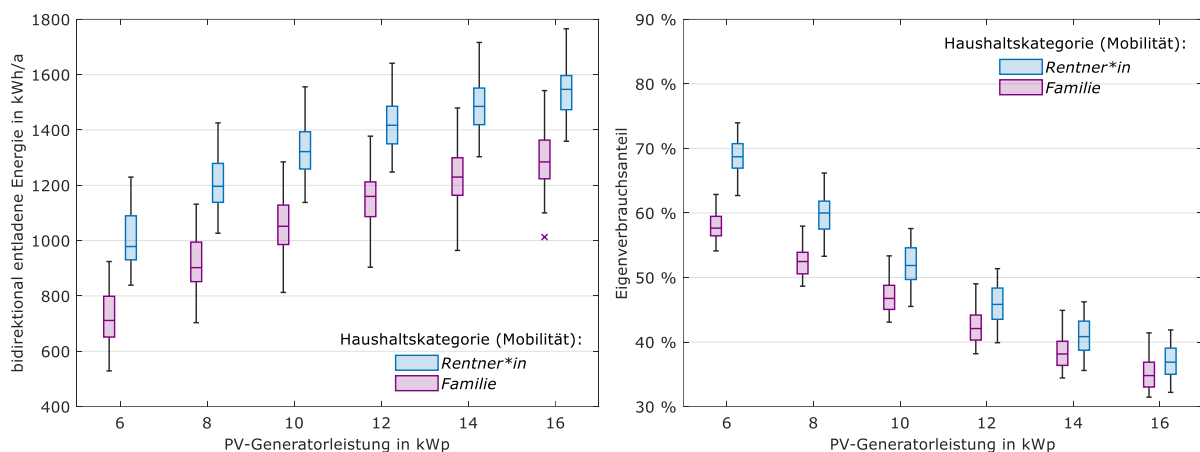


## A Anhang

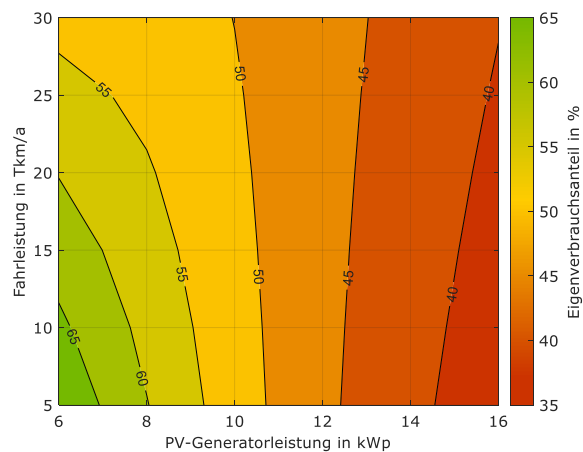
### A.1 Ergänzende Grafiken



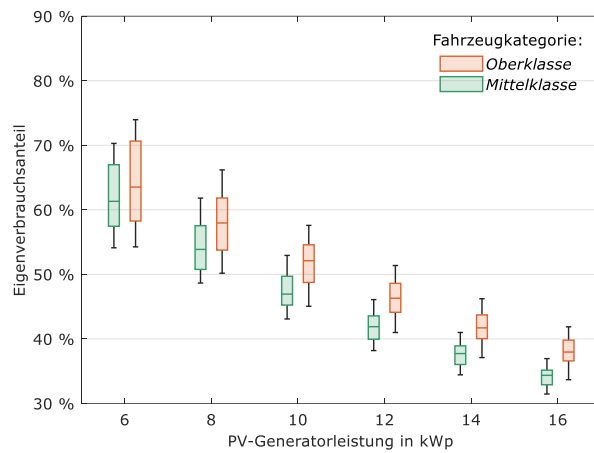
**Abbildung A.1** Energiebilanz des verlustfreien Referenzsystems (Referenzprofil: *Rentner\*in*) ohne Batteriesystem (links) und mit 10 kWh-Batteriesystem (rechts).



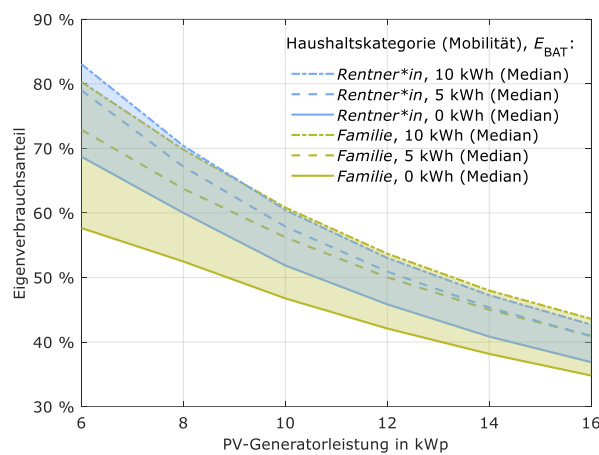
**Abbildung A.2** Einfluss der Haushaltskategorie (Mobilität) auf bidirektional entladene Energiemenge (links) und Eigenverbrauchsanteil (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).



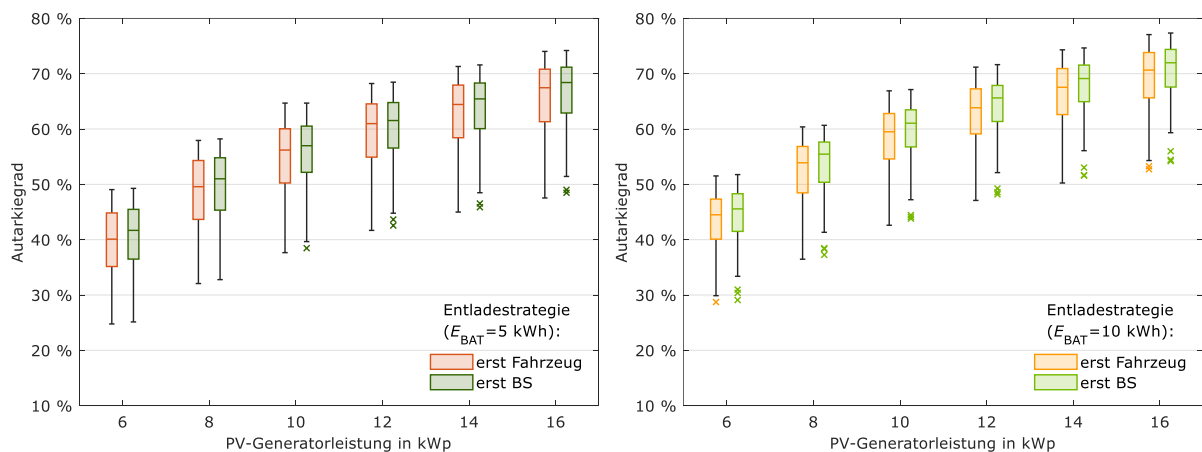
**Abbildung A.3** Einfluss der jährlichen Fahrleistung auf Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).



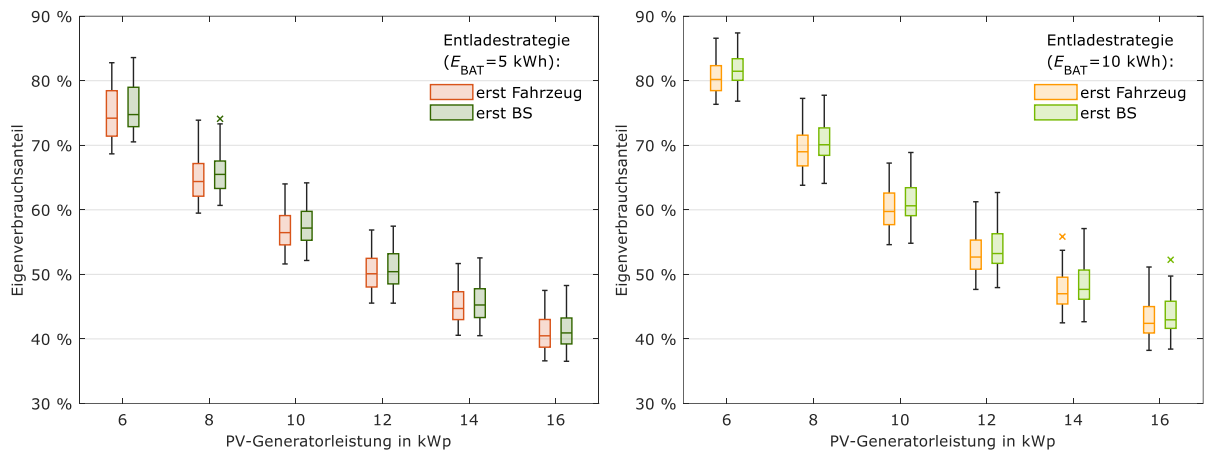
**Abbildung A.4** Einfluss der Fahrzeugkategorie auf Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem).



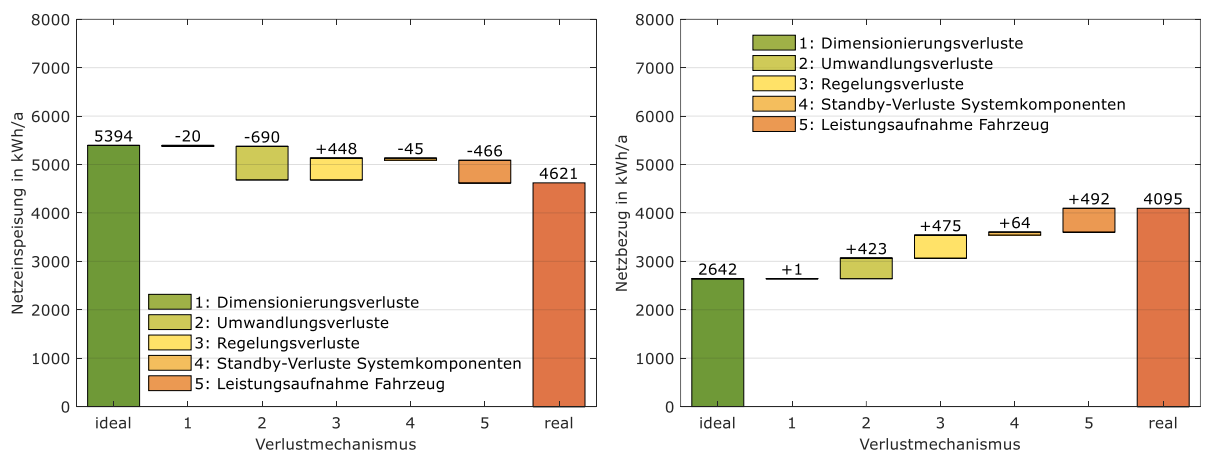
**Abbildung A.5** Einfluss der Heimspeicherkapazität und Haushaltskategorie (Mobilität) auf Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (Entladestrategie: erst BS).



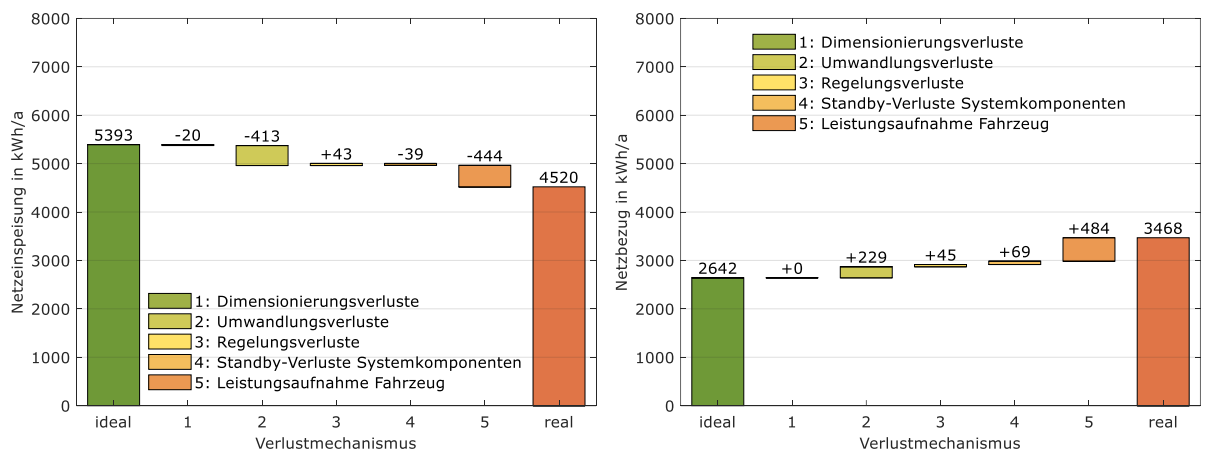
**Abbildung A.6** Einfluss der Entladestrategie auf Autarkiegrad für  $E_{BAT}=5$  kWh (links) und  $E_{BAT}=10$  kWh (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung.



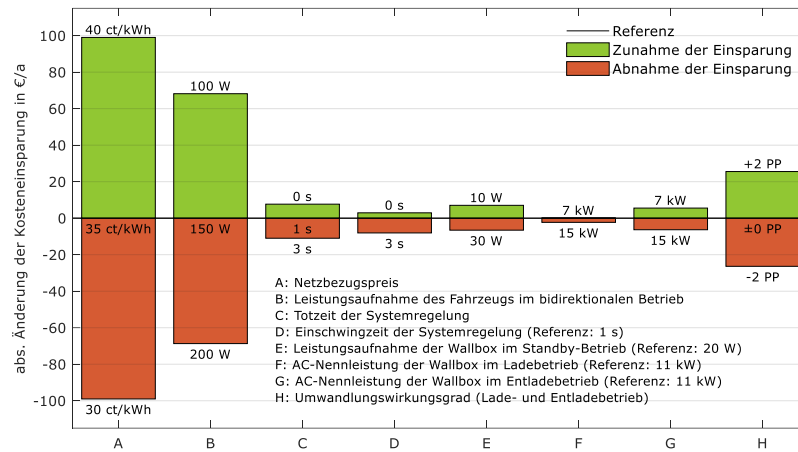
**Abbildung A.7** Einfluss der Entladestrategie auf Eigenverbrauchsanteil für  $E_{BAT}=5$  kWh (links) und  $E_{BAT}=10$  kWh (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung.



**Abbildung A.8** Einfluss einzelner Verlustmechanismen des realen Systems (Referenzprofil: *Rentner\*in*, ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41])



**Abbildung A.9** Einfluss einzelner Verlustmechanismen des Referenzsystems (Referenzprofil: *Rentner\*in*, ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41])



**Abbildung A.10** Einfluss der Änderung verschiedener Modellparameter auf die absolute Änderung der Kosteneinsparung (gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft) des Referenzsystems (Referenzprofil: *Rentner\*in*, ohne Batteriesystem). (Angelehnt an [41])

## A.2 Ergänzende Modellparameter

**Tabelle A.1** Ergänzende Modellparameter des Referenzsystems und des realen Systems.

System-komponente	Eigenschaft	Symbol	Wert	
			Referenz-system	reales System
PV-System	PV-Modul Schwachlichtverhalten	$a_1$	$10,34076 \cdot 10^{-2}$	
		$a_2$	$-0,81444 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{W}$	
		$a_3$	$1,5756 \cdot 10^{-2}$	
	PV-Wechselrichter Umwandlungsverluste	$a_{PV2AC}$	140,6 W	
		$b_{PV2AC}$	43,9 W	
		$c_{PV2AC}$	28,9 W	
bidirektionale Wallbox	Umwandlungsverluste (AC-Seite nach DC-Seite)	$a_{AC2BEV,IN}$	223,4 W	195,0 W
		$b_{AC2BEV,IN}$	116,5 W	505,3 W
		$c_{AC2BEV,IN}$	43,4 W	156,1 W
	(DC-Seite nach AC-Seite)	$a_{AC2BEV,OUT}$	N/A	-265,6 W
		$b_{AC2BEV,OUT}$	N/A	-530,5 W
		$c_{AC2BEV,OUT}$	N/A	-151,4 W
	(AC-Seite nach DC-Seite)	$a_{BEV2AC,OUT}$	199,6 W	50,2 W
		$b_{BEV2AC,OUT}$	170,0 W	74,9 W
		$c_{BEV2AC,OUT}$	45,6 W	134,2 W
	(DC-Seite nach AC-Seite)	$a_{BEV2AC,IN}$	N/A	-49,7 W
		$b_{BEV2AC,IN}$	N/A	-73,4 W
		$c_{BEV2AC,IN}$	N/A	-129,1 W
	Abweichung DC-Leistungssollwert vom AC-Leistungssollwert im Ladebetrieb	$f_{AC2BEV,DC}$	N/A	92 %
	Abweichung DC-Leistungssollwert vom AC-Leistungssollwert im Entladebetrieb	$f_{BEV2AC,DC}$	N/A	105 %
	stationäre Regelungsabweichung im Ladebetrieb	$P_{AC2BEV,STAT}$	2 W	
	stationäre Regelungsabweichung im Entladebetrieb	$P_{BEV2AC,STAT}$	2 W	
	SOC-Schwellwert im Sicherheitszustand	$SOC_{H,BEV1}$	1 %	
	SOC-Schwellwert im vollgeladenen Zustand	$SOC_{H,BEV2}$	2 %	
Batteriesystem (falls vorhanden)	Batterieumrichter Umwandlungsverluste	$a_{AC2BAT}$	223,4 W	N/A
		$b_{AC2BAT}$	116,5 W	N/A
		$c_{AC2BAT}$	43,4 W	N/A
		$a_{BAT2AC}$	199,6 W	N/A
		$b_{BAT2AC}$	170,0 W	N/A
		$c_{BAT2AC}$	45,6 W	N/A
	stationäre Regelungsabweichung im Ladebetrieb	$P_{AC2BAT,STAT}$	2 W	N/A
	stationäre Regelungsabweichung im Entladebetrieb	$P_{BAT2AC,STAT}$	2 W	N/A
	SOC-Schwellwert im vollgeladenen Zustand	$SOC_{H,BAT}$	2 %	N/A

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren und Energieträgern im Jahr 2022. (Daten: [4]) .....	1
Abbildung 1.2 Anzahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen in Deutschland. (Daten: [9]) .....	2
Abbildung 2.1 Systemkomponenten und Messpunkte des bidirektionalen Systems. ....	6
Abbildung 2.2 Schematischer Aufbau des Simulationsmodells <i>V2Hsim</i> . ....	6
Abbildung 2.3 Beispielhafter Tagesverlauf der Leistungsflüsse eines verlustfreien bidirektionalen Systems ohne Batteriesystem. ....	9
Abbildung 2.4 Umwandlungswirkungsgrad in Abhängigkeit der absoluten AC-Leistung (links) und Verlustleistung in Abhängigkeit der AC-Leistung der betrachteten bidirektionalen DC-Wallboxen (Lade- und Entladebetrieb). ....	11
Abbildung 2.5 Beispielhafter Tagesverlauf der Leistungsflüsse eines verlustfreien bidirektionalen Systems mit Batteriesystem. ....	13
Abbildung 2.6 Monatliche Diffus- und Direktbestrahlung im Jahr 2017 am Standort Berlin. (Daten: [43]) .....	15
Abbildung 2.7 Häufigkeitsverteilung des Leistungsbedarfs in der Nacht (Referenz-Haushaltslastprofil) und Umwandlungswirkungsgrad der bidirektionalen Wallbox (Referenzsystem) im Entladebetrieb. (Daten: [47]) .....	16
Abbildung 2.8 Vergleich von gemessenen und simulierten Leistungen bei gleicher Leistungs-Setpoint-Vorgabe (AC-seitig) für Fahrzeugladung (oben links: AC-Leistung, unten links: DC-Leistung) und Fahrzeugentladung (oben rechts: AC-Leistung, unten rechts: DC-Leistung). (Messdaten: [36]) .....	19
Abbildung 3.1 Energiebilanz des verlustfreien Referenzsystems (Referenzprofil: <i>Familie</i> ) ohne Batteriesystem (links) und mit 10 kWh-Batteriesystem (rechts). ....	21
Abbildung 3.2 Einfluss der Haushaltskategorie (Mobilität) auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem). ....	23
Abbildung 3.3 Einfluss der jährlichen Fahrleistung auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem). ....	24
Abbildung 3.4 Einfluss der Fahrzeugkategorie auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (ohne Batteriesystem). ....	25
Abbildung 3.5 Einfluss der Heimspeicherkapazität und Haushaltskategorie (Mobilität) auf Autarkiegrad (links) und jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung (Entladestrategie: erst BS). ....	26
Abbildung 3.6 Einfluss der Entladestrategie auf jährliche Kosteneinsparung gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft für $E_{BAT}=5$ kWh (links) und $E_{BAT}=10$ kWh (rechts) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung. ....	26
Abbildung 3.7 Einfluss einzelner Verlustmechanismen des realen Systems (Referenzprofil: <i>Familie</i> , ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41]) .....	28
Abbildung 3.8 Einfluss einzelner Verlustmechanismen des Referenzsystems (Referenzprofil: <i>Familie</i> , ohne Batteriesystem) auf Netzeinspeisung (links) und Netzbezug (rechts). (Angelehnt an [41]) .....	28
Abbildung 3.9 Einfluss der Änderung verschiedener Modellparameter auf die absolute Änderung der Kosteneinsparung (gegenüber unidirektionalem Laden bei Ankunft) des Referenzsystems (Referenzprofil: <i>Familie</i> , ohne Batteriesystem). (Angelehnt an [41]) .....	30

Abbildung 3.10 Links: Netzeinspeisung und Netzbezug verschiedener Systemkonfigurationen. Rechts: Netzbezugskosten, Netzeinspeiseerlöse, bilanzielle Kosten und Kosteneinsparung verschiedener Systemkonfigurationen mit Referenzprofil *Familie*. (Angelehnt an [41]).....31

Abbildung 3.11 Links: Netzeinspeisung und Netzbezug verschiedener Systemkonfigurationen. Rechts: Netzbezugskosten, Netzeinspeiseerlöse, bilanzielle Kosten und Kosteneinsparung verschiedener Systemkonfigurationen mit Referenzprofil *Rentner\*in*. (Angelehnt an [41]) ...31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Modellparameter des Referenzsystems und des realen Systems. ....	7
Tabelle 2.2 Eigenschaften der Mobilitätsprofile nach Haushaltskategorie. ....	17
Tabelle 2.3 Absolute und relative Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. ....	19
Tabelle 3.1 Eigenschaften der Fahrzeugkategorien. ....	24
Tabelle 3.2 Eigenschaften der Referenz-Mobilitätsprofile. ....	27

## Literaturverzeichnis

- [1] *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*. 2019. Zugriffen: 27. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- [2] Umweltbundesamt, Hrsg., „Energiebedingte Emissionen von Klimagasen und Luftschadstoffen“. 2024. Zugriffen: 26. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen>
- [3] AG Energiebilanzen e. V., Hrsg., „Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2023 (in TWh) Deutschland insgesamt“. 2024. Zugriffen: 26. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/>
- [4] AG Energiebilanzen e. V., „Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2023“. 2024. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/>
- [5] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Verkehrsforschung, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e.V., und Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr in Zahlen 2023/2024“, Berlin, 2023.
- [6] European Commission, Hrsg., „Commission welcomes completion of key ‘Fit for 55’ legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets“. 2023. Zugriffen: 27. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_4754](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_4754)
- [7] A. Kampker und H. H. Heimes, Hrsg., *Elektromobilität: Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2024.
- [8] O. Schulze, *Elektromobilität - ein Ratgeber für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer*. Wiesbaden: Springer, 2022.
- [9] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg., „Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb (FZ 28)“. 2024. Zugriffen: 27. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kba.de/>
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Hrsg., „Umweltbonus endet mit Ablauf des 17. Dezember 2023“. 2023. Zugriffen: 21. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/12/20231216-umweltbonus-endet-mit-ablauf-des-17-dezember-2023.html>
- [11] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg., „Personenkraftwagen am 1. Januar 2024 nach ausgewählten Merkmalen“. 2024. Zugriffen: 27. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kba.de/>
- [12] J. Figgner et al., „The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023)“, 2022, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2203.06762.
- [13] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Verkehrsforschung, IVT Research GmbH, und infas 360 GmbH, „Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht“, Bonn, 2018.
- [14] A. Leippi, F. Otteny, M. Zernickel, und A.-L. Klingler, „Power Transfer Vehicle-to-Home (V2H)“, Stuttgart, 2024.
- [15] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, C. Schlüter, und J. von Rautenkranz, „Stromspeicher-Inspektion 2024“, Berlin, 2024.
- [16] S. Henßler, „JAC Yiwei EV: Erstes Serien-E-Auto mit Natrium-Ionen-Akku“. 2024. Zugriffen: 3. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektroauto-news.net/news/jac-yiwei-ev-natrium-ionen-akku>
- [17] J. Wieler, „Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich“. 2024. Zugriffen: 2. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- [18] M. Steinstraeter, T. Heinrich, und M. Lienkamp, „Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range“, *World Electr. Veh. J.*, Bd. 12, Nr. 3, S. 115, Aug. 2021, doi: 10.3390/wevj12030115.
- [19] E. E. Michaelides, „Thermodynamics and energy usage of electric vehicles“, *Energy Convers. Manag.*, Bd. 203, S. 112246, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112246.



- [20] Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V., Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., und Verband der Automobilindustrie e. V., „Technischer Leitfaden - Ladeinfrastruktur Elektromobilität“, Offenbach am Main, 2023.
- [21] *DIN EN IEC 62196-2 (VDE 0623-5-2): 2024-03, Stecker, Steckdosen und Fahrzeugsteckvorrichtungen – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 2: Maßliche Kompatibilitätsanforderungen an Wechselspannungssteckvorrichtungen mit Stiften und Buchsen.*
- [22] K. Sevdari, L. Calearo, B. H. Bakken, P. B. Andersen, und M. Marinelli, „Experimental validation of onboard electric vehicle chargers to improve the efficiency of smart charging operation“, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, Bd. 60, S. 103512, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103512.
- [23] *DIN EN IEC 62196-3 (VDE 0623-5-3): 2024-03, Stecker, Steckdosen und Fahrzeugsteckvorrichtungen – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 3: Maßliche Kompatibilitätsanforderungen an Fahrzeugsteckvorrichtungen mit Stiften und Buchsen für Gleichstrom und kombiniert für Gleich- und Wechselstrom.*
- [24] EV Database, Hrsg., „Lotus Eletre (2023)“. 2024. Zugriffen: 4. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ev-database.org/car/1767/Lotus-Eletre>
- [25] W. Rudschies, „Schnellladen Elektroauto: Die besten Modelle für die Langstrecke“. 2024. Zugriffen: 4. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/schnellladen-langstrecke-ladekurven/>
- [26] C. Jung, „Power Up with 800-V Systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles“, *IEEE Electrification Mag.*, Bd. 5, Nr. 1, S. 53–58, März 2017, doi: 10.1109/MELE.2016.2644560.
- [27] EV Database, Hrsg., „Electric Vehicle Database“. 2024. Zugriffen: 4. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ev-database.org/>
- [28] J. Yuan, L. Dorn-Gomba, A. D. Callegaro, J. Reimers, und A. Emadi, „A Review of Bidirectional On-Board Chargers for Electric Vehicles“, *IEEE Access*, Bd. 9, S. 51501–51518, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069448.
- [29] Honda Motor Europe Ltd., „Honda technology ready to supply frequency containment reserve for power grid stabilization“. 2022. Zugriffen: 5. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://hondanews.eu/en/cars/media/pressreleases/429858/honda-technology-ready-to-supply-frequency-containment-reserve-for-power-grid-stabilization>
- [30] VOLKSWAGEN AG, Hrsg., „Eigenen Strom clever managen: Erste ID. Modelle unterstützen bidirektionales Laden“. 2023. Zugriffen: 1. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/eigenen-strom-clever-managen-erste-id-modelle-unterstuetzen-bidirektionales-laden-17949>
- [31] F. Kever, „Unterschiedliche Schaltungen, unterschiedliche Effizienzen“, *pV magazine*, Nr. 2/2013, S. 109–112, 2013.
- [32] EVTEC AG, Hrsg., „EVTEC sospeso&charge“. 2024. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.evtec.ch/produkte/sospeso>
- [33] HagerEnergy GmbH, Hrsg., „E3/DC EDISON V2H“. 2024. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.e3dc.com/bidi-laden-erleben/>
- [34] *DIN EN ISO 15118-20: 2022-12, Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 20: Anforderungen der 2. Generation an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll.*
- [35] J. Weniger, T. Tjaden, N. Orth, und S. Meier, „Performance Simulation Model for PV-Battery Systems (PerMod)“. 2023. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/permod/>
- [36] M. Esser, A. Spina, und C. Rehtanz, „Bidirectional and Unidirectional Charging Profiles of Electric Vehicles“. Zenodo, 4. Dezember 2023. doi: 10.5281/ZENODO.10184777.
- [37] Bundesnetzagentur, Hrsg., „EEG-Förderung und -Fördersätze“. 2024. Zugriffen: 1. Oktober 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG\\_Foerderung/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG_Foerderung/start.html)
- [38] Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2023“, Bonn, 2023.
- [39] A. Gieße, „Ladetarife für Elektroautos: Anbieter und Kosten im Vergleich“. 2024. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/>

- [40] D. U. Sauer, „Untersuchungen zum Einsatz und Entwicklung von Simulationsmodellen für die Auslegung von Photovoltaik-Systemen“, 1994. doi: 10.13140/RG.2.1.1833.7366.
- [41] J. Weniger, „Bewertung der Energieeffizienz von netzgekoppelten Photovoltaik-Batteriesystemen in Wohngebäuden“, 2020, *Technische Universität Berlin, Berlin*. doi: 10.14279/DEPOSITONCE-9859.
- [42] W. Rudschies, „Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden“. 2022. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>
- [43] Forschungsgruppe Solarspeichersysteme, „HTW Berlin weather data with a temporal resolution of 1 Hz and 1/60Hz (2017-2021)“. Zenodo, 17. November 2021. doi: 10.5281/ZENODO.6675646.
- [44] V. Quaschning, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz*, 12., Aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2024.
- [45] T. M. Klucher, „Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces“, *Sol. Energy*, Bd. 23, Nr. 2, S. 111–114, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90110-5.
- [46] H. G. Beyer et al., „Identification of a General Model for the MPP Performance of PV-Modules for the Application in a Procedure for the Performance Check of Grid Connected Systems“, in *Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Juni 2004.
- [47] T. Tjaden, J. Bergner, J. Weniger, und V. Quaschning, „Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis“, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.5112.0080/1.
- [48] J. Muessel, O. Ruhna, und R. Madlener, „Simulating charging behavior of electric vehicles: review and comparison with empirical data“, in *2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Lappeenranta, Finland: IEEE, Juni 2023, S. 1–7. doi: 10.1109/EEM58374.2023.10161947.
- [49] D. Fischer, A. Harbrecht, A. Surmann, und R. McKenna, „Electric vehicles’ impacts on residential electric local profiles – A stochastic modelling approach considering socio-economic, behavioural and spatial factors“, *Appl. Energy*, Bd. 233–234, S. 644–658, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.010.
- [50] EV Database, Hrsg., „Honda e Advance (2020)“. 2024. Zugriffen: 26. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ev-database.org/car/1233/Honda-e-Advance>
- [51] T. Kern, P. Dossow, und E. Morlock, „Revenue opportunities by integrating combined vehicle-to-home and vehicle-to-grid applications in smart homes“, *Appl. Energy*, Bd. 307, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118187.
- [52] B. Wille-Haussmann, A. Groß, und M. Antretter, „Bidirektionales Laden - Status, Trends und Potenziale“, Freiburg, 2023.
- [53] C. Hecht, J. Figgner, und D. U. Sauer, „Auto vs. Heimspeicher“, *pv magazine*, Nr. 6/2023, S. 88–91, 2023.
- [54] J. Gong et al., „Quantifying the impact of V2X operation on electric vehicle battery degradation: An experimental evaluation“, *eTransportation*, Bd. 20, Mai 2024, doi: 10.1016/j.etrans.2024.100316.

## Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass

- ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- ich andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe,
- ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe,
- die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegen hat.

Berlin, 28.10.2024