

# Konsistente Parameterbereiche zur Modellierung intelligenter Elektrofahrzeuge im Energiesystem

Discussion Paper

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



UN | IT | E<sup>2</sup>

# Konsistente Parameterbereiche zur Modellierung intelligenter Elektrofahrzeuge im Energiesystem

Discussion Paper

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**UN|IT|E<sup>2</sup>**

# Impressum

## Herausgeber



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

## Discussion Paper aus dem Projekt

unIT-e<sup>2</sup> - Reallabor für verNETZte E-Mobilität

## Veröffentlicht am

14.06.2024

## Projektleitung

Dr. Simon Köppl  
Michael Hinterstocker  
Elisabeth Springmann  
Daniel Battersby

## Bearbeiter:innen

Philipp Stedem  
Kirstin Ganz  
Patrick Vollmuth

## Stellv. wissenschaftlicher Leiter

Dr.-Ing. Serafin von Roon

## Geschäftsleitung

Dr.-Ing. Serafin von Roon  
Dr.-Ing. Christoph Pellingner  
Dr.-Ing. Anna Gruber  
Dr.-Ing. Andrej Guminski

## Bitte zitieren als

FfE (2024): Konsistente Parameterbereiche zur Modellierung intelligenter Elektrofahrzeuge im Energiesystem.

## Förderkennzeichen 01MV21UN11 / 01MV21UN01



Versionsnummer Vorlage: TL20230613

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Technische Parameter</b>	<b>6</b>
2.1	Batteriekapazität	6
2.2	Reichweite	8
2.3	Nominelle Ladeleistung	10
2.4	Wirkungsgrade beim Laden und Entladen	10
<b>3</b>	<b>Ökonomische Parameter</b>	<b>12</b>
3.1	Investitionskosten	12
3.2	Betriebskosten	13
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>15</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>17</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>20</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>20</b>
	<b>Anhang</b>	<b>21</b>

# 1 Motivation

Die aktuelle deutsche Bundesregierung hat sich in ihrem Koalitionsvertrag /SFGR-01 21/ das Ziel von 15 Millionen vollelektrisch betriebenen PKW (Battery Electric Vehicles – BEVs) bis 2030 gesetzt. Darin sieht die Bundesregierung auch den Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur auf 1 Mio. Ladepunkte bis 2030 vor. Die Studie der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur /NLL-01 20/ kommt in der Simulation mehrerer Szenarien auf eine Zahl von 440.000 bis 843.000 benötigten öffentlichen Ladepunkten bis 2030. Der Szenarierahmen der Studie zeigt zudem, dass mit 5,4 bis 8,7 Millionen privaten Ladepunkten, im Folgenden als Wallboxen bezeichnet, zu rechnen ist.

Bei einer Zahl von etwa 1,4 Millionen BEVs zu Beginn des Jahres 2024 (vgl. /KBA-01 24/) werden bis zum Jahr 2030 im Durchschnitt 1,9 Mio. BEVs jährlich hinzukommen, wenn das Ziel der Bundesregierung erreicht werden soll und man einen linearen Zuwachs des BEV-Bestandes annimmt.

Durch diese zunehmende Elektrifizierung des Individualverkehrs ist mit einem Anstieg des Stromverbrauchs zu rechnen. Wie hoch der projizierte Strombedarf für die Elektrifizierung der deutschen PKW-Flotte ausfallen könnte hängt unter anderem vom Modal Split ab, also der Aufteilung des Mobilitätsbedarfs auf verschiedene Verkehrsmittel. Studien der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur und Agora Verkehrswende (/NLL-01 20/, /AGORA-04 19/) rechnen im Vergleich zum heutigen Stromverbrauch mit einer Erhöhung des jährlichen Strombedarfs von 30 TWh. Zum Vergleich: Insgesamt lag der Bruttostromverbrauch Deutschlands im Jahr 2023 laut /AGEB-01 24/ bei 525,5 TWh. Durch die Elektrifizierung des Individualverkehrs und den gestiegenen Strombedarf könnten zudem Verbrauchsspitzen durch Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen entstehen (vgl. /FFE-03 23/).

Mit den neuen Fahrzeuggenerationen, die ab der Mitte der 2020er Jahre auf den Markt kommen, etablieren sich in der Automobilindustrie und auf dem Fahrzeugmarkt neue intelligente Ladetechnologien, die das gesteuerte und bidirektionale Laden von BEVs ermöglichen werden. Durch diese neuen Fahrzeuge könnte sich das Flexibilitätspotenzial im Stromnetz stark erhöhen. Nimmt man im Durchschnitt über alle BEVs eine Batteriekapazität von 50 kWh an, dann ergibt sich mit dem aktuellen Bestand (siehe oben)

eine Speicherkapazität von theoretisch 50 GWh. Nimmt man zusätzlich das oben skizzierte Wachstum des BEV-Bestandes an, ergibt sich ein jährlicher Zuwachs der Speicherkapazität von 87,5 GWh pro Jahr. Wenn diese Energiemenge durch intelligentes Laden als Flexibilität nutzbar wäre, könnte sich die Möglichkeit ergeben das Stromnetz zu stabilisieren. Auf der anderen Seite besteht durch gewisse Anwendungsfälle das Risiko von Gleichzeitigkeit einer hohen Zahl an Lade- bzw. Entladevorgängen, die die Stromnetze belasten könnten. (vgl. /FFE-03 23/)

Trotzdem könnten sich unter den richtigen Rahmenbedingungen Vorteile für das Stromnetz und die BEV-Nutzer:innen von Elektrofahrzeugen ergeben. Für die BEV-Nutzer:innen ergibt sich in Zukunft die Möglichkeit durch die Nutzung des Batteriespeichers des Fahrzeugs als Flexibilität Erlöse zu generieren durch die Zurverfügungstellung der Flexibilität am Intraday- oder Day-Ahead-Markt.

Durch Simulationen kann der finanzielle Vor- oder Nachteil der BEV-Nutzer:innen, sowie Auswirkungen auf das Energiesystem unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden.

Um jedoch die Vergleichbarkeit unter verschiedenen Simulationen zu gewährleisten ist es notwendig ein konsistentes Parameter-Set zu definieren. Für die Simulation von BEVs ergibt sich so zum Beispiel ein typisches Fahrzeugprofil, das unter anderem von der Fahrzeugklasse (z.B. Klein-, Mittel- oder Oberklasse) abhängt. Für alle Parameter erfolgt neben der Angabe eines realistischen Wertebereichs auch der Vorschlag eines Standardwertes, der zum Beispiel ein typisches Fahrzeug oder eine typische Wallbox bestmöglich repräsentieren soll.

Dieses Paper betrachtet technische, verhaltensspezifische und ökonomische Parameter und ordnet die gewählten Wertebereiche in den aktuellen Stand der Technik in kurzen Zusammenfassungen ein. Dabei werden sowohl die Eigenschaften heutiger Fahrzeuge und Wallboxen, als auch zukünftige techno-ökonomische Entwicklungen der kommenden Jahrzehnte in Betracht gezogen. Im letzten Teil des Papers erfolgt eine Überprüfung, welche Parameter noch nicht im Set enthalten sind und für die eine weitere Spezifizierung als sinnvoll erachtet wird.

## 2 Technische Parameter

### 2.1 Batteriekapazität

In Bezug auf Elektromobilität ist die Kapazität der Batterien eine wichtige Größe. Für BEV-Nutzer:innen ist sie häufig ein wichtiges Kriterium bei der Kaufentscheidung, weil die Reichweite des Fahrzeugs stark von der Batteriekapazität abhängig ist. Eine genauere Betrachtung der Reichweite von BEVs erfolgt in Kapitel 2.2. Über die Annahme von Fahrzeuganzahl und Ansteckverhalten der Nutzer:innen ist die Batteriekapazität der bestimmende Faktor für die im Energiesystem verfügbare Strommenge und Leistung, die als Flexibilität genutzt werden kann.

Im Projekt unIT-e<sup>2</sup> werden in der Modellierung die in der folgenden Tabelle 2-1 angegebenen Parameterbereiche der Batteriekapazität verwendet.

Die Batteriekapazität eines BEVs wird stark vom Fahrzeugtyp beeinflusst. So besitzen Kleinwagen z.B. aufgrund des geringeren Bauraums, der direkt mit der Fahrzeuggröße zusammenhängt, kleinere Speicherkapazitäten als Oberklassefahrzeuge. Einen weiteren

Einfluss auf die Unterschiede der Batteriekapazität zwischen den Fahrzeugklassen könnten Kostengründe haben. Demzufolge könnten die Batteriekapazitäten von Kleinwagen auch deshalb niedriger sein. Die Gewichtung des Einfluss von Bauraum oder Kosten auf die Batteriekapazität wird in diesem Discussion Paper nicht weiter vertieft.

Für die heute zu beobachtende Batteriekapazität über alle Fahrzeugklassen wird im Rahmen dieses Discussion Papers ein Wertebereich von 20 bis 140 kWh angenommen. In einigen SUV, besonders bei großen Pick-Up-Trucks auf dem US-Markt, werden heute jedoch auch schon Speichergrößen um 200 kWh verbaut (z.B. GMC Hummer EV (herausgekommen 2023)).

Neben dem zur Verfügung stehenden Bauraum ist die Batterietechnologie der entscheidende Treiber für die Speicherkapazitäten in BEVs. Je nach Batterietechnologie gibt es relevante Unterschiede hinsichtlich der Energie- und Leistungsdichte.

Den heute am weitest verbreiteten Zelltyp stellen die Lithium-Ionen-Zellen dar. Dabei handelt es sich um

Tabelle 2-1 Batteriekapazität unterschieden nach Fahrzeugklasse heute, 2030 und 2045. (Eigene Daten)

Fahrzeugklasse		Batteriekapazität (Min. – Max.) in kWh
Kleinwagen und Kompaktklasse	Status Quo	20 – 70
	Zukünftig (2030)	30 – 80
	Zukünftig (2045)	30 – 100
Mittelklasse	Status Quo	50 – 100
	Zukünftig (2030)	60 – 120
	Zukünftig (2045)	80 – 140
Oberklasse	Status Quo	80 – 140
	Zukünftig (2030)	90 – 170
	Zukünftig (2045)	90 – 250



eine Reihe unterschiedlicher chemischer Materialzusammensetzungen, die sich im Wesentlichen durch ihr Elektrodendesign unterscheiden.

Das Material für die Anode besteht aktuell meistens aus Graphit /LIN-01 23/. Dabei handelt es sich entweder um reines Graphit oder um Mischungen mit Silizium, sogenannte Silicium-Carbon-Composites. Andere Anodenmaterialien, an deren Anwendung im Automobilbau geforscht wird sind weitere Siliziumverbindungen oder metallisches Lithium. (vgl. /ISI-15 22/, /KOR-01 13/)

Die größte Variantenvielfalt lässt sich heute bei den Materialzusammensetzungen der Kathode beobachten, die vergleichend in der nachfolgenden Tabelle 2-2 aufgeführt sind. Der überwiegende Teil dieser Materialkombinationen ging 2022 auf nickelreiche Zusammensetzungen, wie z.B. NMC oder NCA zurück. In den letzten Jahren ist der Anteil von LFP-basierten Kathoden jedoch stetig zunehmend. /IEA-03 23/

Beim Vergleich der Energiedichten verschiedener Batterietechnologien muss zwischen zwei spezifischen Größen unterschieden werden. Die gravimetrische Energiedichte gibt die speicherbare Energiemenge je Masseneinheit der Batteriezelle an und wird in Wh/kg angegeben. Die zweite Größe ist die volumetrische

Energiedichte, die angibt wie viel Energie pro Volumeneinheit mit einer Zelle speicherbar ist. Die Werte dieser Größe werden in der Regel in Wh/l angegeben. Für beide Größen gilt, dass bei ihrer Beurteilung stets darauf zu achten ist, wie die Berechnung des Wertes stattfindet. Weil bei der Berechnung der Anteil der nicht elektrochemisch aktiven Bestandteile, wie z.B. der Zellverpackung, eingerechnet werden kann oder sich auf das rein theoretische Potenzial der chemisch aktiven Bestandteile bezogen werden kann. Aus Anwendungssicht sollte hier mindestens der Wert für die ganze Zelle herangezogen werden. Noch praxisnäher ist die Verwendung der Energiedichten auf Batteriepackebene, weil dadurch der vollumfängliche Aufbau der Batterie berücksichtigt wird. Dadurch lassen sich insbesondere Konstruktionsunterschiede der Gehäuse (z.B. Leichtbauprinzipien, Konstruktionsmaterialien, Cell-to-Pack-Design) aufzeigen. (vgl. /LIN-01 23/, /KOR-01 13/)

Beim Batteriedesign von BEVs ergibt sich ein Zielkonflikt hinsichtlich der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte. Auf der einen Seite ist der Bauraum in Fahrzeugen nur begrenzt vorhanden und bietet in der Regel wenig Spielraum zur Veränderung, wie dies zum Beispiel insbesondere bei Kleinwagen der Fall ist. Auf der anderen Seite resultiert die Reduktion des Fahrzeuggewichts vor allem in niedrigeren

Tabelle 2-2 Vergleich verschiedener, üblicher Kathodenmaterialien in Traktionsbatterien. Vergleich basierend auf /KOR-01 13/.

Kathodenmaterial	Kurzform	⊕	⊖
<b>(Lithium-)Nickel-Mangan-Cobaltoxid</b>	NMC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gut optimierbare Eigenschaften, z.B.: Energie- und Leistungsdichte, Temperaturabhängigkeit, Sicherheit</li> <li>Hohe Energie- und Leistungsdichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellungskosten</li> </ul>
<b>(Lithium-)Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid</b>	NCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Höchste Energie- und Leistungsdichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellungskosten</li> <li>Sicherheit</li> </ul>
<b>Lithium-Eisen-Phosphat</b>	LFP	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Herstellungskosten</li> <li>Zyklusfestigkeit</li> <li>Sicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringere Energiedichte, als NMC oder NCA</li> <li>Leistungs- und Kapazitätsreduktion bei niedriger Temperatur</li> </ul>
<b>Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat</b>	LMFP	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Energiedichte</li> <li>Zyklusfestigkeit</li> <li>Sicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungs- und Kapazitätsreduktion bei niedriger Temperatur</li> </ul>
<b>Lithium-Cobalt-Oxid</b>	LCO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Energie- und Leistungsdichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sicherheit</li> <li>Herstellungskosten</li> </ul>

Verbrauchskennwerten. Darüber hinaus sind Verbesserungen unter anderem durch höhere erlaubte Zuladung, Verbesserung der Beschleunigung oder die Verkleinerung der Bremsanlage möglich. Eine Erhöhung des Fahrzeugesamtgewichts ist im Gegensatz zur Vergrößerung des Bauraums aus Konstruktionsicht einfacher zu realisieren. Jedoch nur bis zu den regulatorischen Grenzen, wie z.B. der zulässigen Fahrzeugesamtmasse von 3.500 kg für PKW.

Die meisten Hersteller bauen ihre Batteriepacks aus Modulen auf. Im Gegensatz hierzu steht das sogenannte Cell-to-Pack-Design, welches ohne Module auskommt und Batteriezellen direkt im Batteriegehäuse anordnet. (vgl. /ISI-15 22/, /LIN-01 23/) Die Module wiederum enthalten die einzelnen Batteriezellen. Durch die Konfiguration von Modulen auf Packebene lassen sich verschiedene Variationen bilden, um daraus verschiedene Batterien abzuleiten (z.B. mit höherer Systemspannung von bis zu 800 V im PKW-Bereich). Die Verwendung von Modulen ermöglicht die Entwicklung nach dem Baukastenprinzip. Das heißt, dass in einem über verschiedene Fahrzeuge gleichförmigen Batteriepackgehäuse verschiedene Modulkonfigurationen eingesetzt werden können. Bedingt durch die Modularisierung ergibt sich jedoch eine gegenüber der einzelnen Batteriezelle geringere volumetrische und gravimetrische Energiedichte.

Bis zum Jahr 2030 könnten sich die Energiedichten von Lithium-Ionen-Batterien um 100 % im Vergleich zu Werten aus dem Jahr 2021 erhöhen, wie Einschätzungen von /ISI-15 22/ ergeben. Darüber hinaus könnten Feststoffbatterien diese Energiedichten bis zum Jahr 2045 noch deutlich übersteigen. (vgl. /ISI-16 22/) Dadurch könnten insbesondere kleine Fahrzeuge an Kapazität hinzugewinnen, wo heute der geringe Bauraum oft nur wenig Spielraum lässt. Die Markteinführung von Feststoffbatterien könnte ab dem Jahr 2025 durch den Batteriehersteller CATL erfolgen und auch Fahrzeughersteller wie Stellantis, Mercedes und Volkswagen rechnen mit einer Markteinführung in den Jahren 2026, 2028 und 2030. (/ETUI-01 22/) Die oben genannten Studienergebnisse zeigen die aktuell intensive Forschung in den Bereichen Produktionsverfahren, Zelltechnologie und Konstruktion auf Batteriepackebene auf. Auf Basis dieser Studien wird im Rahmen dieses Discussion Papers in den kommenden Jahren mit einer weiteren Steigerung der Batteriekapazitäten gerechnet, wie in Tabelle 2-1 zu sehen ist.

Beim Vergleich von Batteriekapazitäten auf Fahrzeugebene für die Modellierung von BEVs im Stromnetz sollte darauf geachtet werden, dass die Nettobatteriekapazität verwendet wird, weil sie die für BEV-

Nutzer:innen und Use Cases für das intelligente Laden zur Verfügung stehende Energiemenge angibt. Im Rahmen dieses Discussion Papers sind die in Tabelle 2-1 Batteriekapazität unterschieden nach Fahrzeugklasse heute, 2030 und 2045 Tabelle 2-1 angenommenen Werte als Nettobatteriekapazitäten zu verstehen. In Abgrenzung zur Nettobatteriekapazität steht die Bruttokapazität. Damit wird die Batteriekapazität angegeben, die chemisch in den Batteriezellen gespeichert werden kann. (siehe u.a. /KIT-10 20/) Die Abbildung 2-1 stellt Netto- und Bruttobatteriekapazität anschaulich gegenüber.

Die Nettobatteriekapazität ist geringer als die Bruttobatteriekapazität, weil sie durch das Batteriemanagementsystem (BMS) bestimmt wird. Dadurch, dass besonders niedrige oder besonders hohe Ladezustände vermieden werden, kann die Nutzungsdauer der Batterie verlängert werden, indem die Nettobatteriekapazität einen Teil der Batterie nicht nutzt. Das BMS sichert die Funktion der Batterie und kann folgende Aufgaben übernehmen:

- Überwachung der Innenwiderstände und der elektrischen Spannungen der Batteriezellen
- Temperaturüberwachung
- Balancing der Batteriezellen
- Ermittlung des State of Charge (SOC)
- Ermittlung des State of Health (SOH)
- Begrenzung von Lade- oder Entladevorgängen

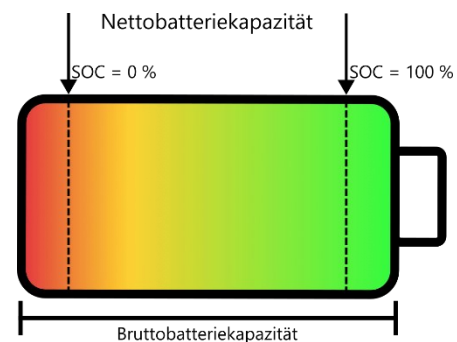


Abbildung 2-1 Zusammenhang von Brutto- und Nettobatteriekapazität (eigene Darstellung).

## 2.2 Reichweite

Die Reichweite von BEVs hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab: der Batteriekapazität, dem spezifischen Verbrauch und von Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel von der Außentemperatur, den Straßenbedingungen und weiteren Fahrwiderständen.



Im Folgenden sollen zwei Reichweitendefinitionen näher betrachtet werden: Die Sicherheitsreichweite und die Mindestreichweite zum geplanten Abfahrzeitpunkt.

Unter der **Sicherheitsreichweite** ist die Strecke zu verstehen, die die BEV-Nutzer:innen **zu jeder Zeit** beim spontanen Benden des Ladevorgangs des Elektrofahrzeugs **fahren könnten**. Die Steuerung des Ladevorgangs erfüllt diese Anforderung dadurch, dass das erste Ziel nach dem Anstecken des Elektrofahrzeugs die schnellstmögliche Erreichung dieses Sicherheits-SOC ist, mit dem die Sicherheitsreichweite zurückgelegt werden könnte.

Die **Mindestreichweite zum geplanten Abfahrzeitpunkt** soll die individuellen Mobilitätsbedürfnisse der BEV-Nutzer:innen widerspiegeln, indem die BEV-Nutzer:innen dem Ladesystem die Information übermitteln, zu welchem geplanten Zeitpunkt das Fahrzeug mit welcher Mindestreichweite bzw. mit welchem geplanten SOC zur Verfügung stehen soll. In /FFE-08 23/ zeigte sich, dass der von den Benutzer:innen gewünschte SOC sich in der Laufzeit der Feldtests um ca. 55 % einstellte. Diese Daten bilden die Grundlage für die in Tabelle 2-4 angegebenen Werte.

Die Mindestreichweite kann vom Ladesystem regelmäßig übererfüllt werden, sollte aber nie unterschritten werden, weil dies dazu führen kann, dass die BEV-Nutzer:innen ihre Fahrten nicht wie geplant durchführen können. Es wird sichergestellt, dass das Fahrzeug bis zum nächsten Einsatz ausreichend Energie in der Fahrzeugbatterie gespeichert hat. Die Erreichung dieses Zielwerts ist damit eine unbedingt zu erbringende Aufgabe des Gesamtsystems zum gesteuerten Laden und bedeutet in der Praxis, dass gegebenenfalls von einem optimierten Ladeplan abgewichen werden muss, um das Ladeziel zum gewünschten Zeitpunkt zu erreichen.

Die Gesamtreichweite von Elektrofahrzeugen liegt heute nach Angaben der Electric Vehicle Database /EVDB-01 23/ in einem großen Bereich von 135 km bis 685 km mit einer durchschnittlichen Reichweite von 353 km.

Der in diesem Discussion Paper angenommene Wertebereich der Sicherheitsreichweite liegt zwischen 70 km und 100 km (Tabelle 2-3). Es entspricht dem Grundbedürfnis der BEV-Nutzer:innen nach flexibler Mobilität, das ihnen zu jeder Zeit zur Verfügung stehen soll, wie für dringende, ad-hoc aufkommende Fahrten (z.B.: Fahrten zu Ärzten und Krankenhäusern), aber auch die Wegstrecke zum Arbeitsort. (vgl. /INFAS-01 19/ oder /RWI-02 18/). Im realen Betrieb von

BEVs kann dies einem SOC von 25 % bis 30 % entsprechen. Die nachfolgende Tabelle 2-3 zeigt den Parameterbereich in unIT-e<sup>2</sup> für die Sicherheitsreichweite heute und in der Zukunft.

Tabelle 2-3 Sicherheitsreichweite in unIT-e<sup>2</sup> basierend auf /INFAS-01 19/, /RWI-02 18/.

Sicherheitsreichweite in km (Min. – Max.)	Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittel- & Oberklasse
<b>Status-Quo</b>			
<b>Zukünftig (2030)</b>	70	85	100
<b>Zukünftig (2045)</b>			

Die Sicherheitsreichweite ist ein verhaltensgesteuerter Parameter, dem das Mobilitäts- und Flexibilitätsbedürfnis der BEV-Nutzer:innen zugrunde liegt, wo grundsätzlich keine Änderungen erwartet werden. Zum Beispiel wird angenommen, dass Fahrten zu Krankenhäusern und andere ad-hoc-Fahrten auch in der Zukunft ein Bedürfnis der Fahrzeugnutzer sein werden. Den unterschiedlichen Werten der Sicherheitsreichweite in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse in Tabelle 2-3 liegt die Annahme zu Grunde, dass bei größeren Fahrzeugen die höheren Reichweiten je Batterieladung und generell höheren Batteriekapazitäten zu einem höheren Grundbedürfnis der Nutzer:innen führen. So könnten diese einerseits an generell höhere Reichweiten gewohnt sein und dies zu einem höheren Grundbedürfnis führen oder andererseits könnte ein niedriger SOC-Wert (z.B. 25 %) einen kognitiven Anker bei der Gewöhnung an SOC-Werte darstellen. Bei großen Fahrzeugen entspricht solch ein SOC-Wert einer höheren Reichweite.

Tabelle 2-4 Mindestreichweite in unIT-e<sup>2</sup> basierend auf /FFE-08 23/

Mindestreichweite in km	Min.	Max.
<b>Status-Quo</b>	130	550
<b>Zukünftig (2030)</b>	130	650
<b>Zukünftig (2045)</b>	100	670

Der angenommene spezifische Verbrauch ist /PICHL-01 22/entnommen. Die verwendeten Werte sind in der folgenden Tabelle 2-5 enthalten.

Tabelle 2-5 Spezifischer Verbrauch nach Fahrzeugklasse in unIT-e<sup>2</sup> basierend auf /PICHL-01 22/.

Spezifischer Verbrauch in kWh/100 km	Klein- & Kompakt-klasse	Mittel-klasse	Ober-klasse
<b>Status-Quo</b>	16,5	18,5	23,0
<b>Zukünftig (2030)</b>	15,1	16,9	21,0
<b>Zukünftig (2045)</b>	12,9	13,6	16,9

In Zukunft ist mit deutlich steigenden Gesamtreichweiten von Elektrofahrzeugen zu rechnen. Dies begründet sich unter anderem in der steigenden Batteriekapazität in Verbindung mit einer weiteren Erhöhung der Energiedichten sowie Effizienzgewinnen bei den Antrieben und Betriebsstrategien der Elektrofahrzeuge. Dies könnte unter den in Tabelle 2-4 angenommenen Werten für die Mindestreichweite dazu führen, dass ein größerer SOC-Bereich für Use Cases des gesteuerten Ladens verwendet werden könnte.

## 2.3 Nominelle Ladeleistung

Im Projekt unIT-e<sup>2</sup> liegt der Fokus auf dem Laden der Fahrzeuge zuhause. Aus diesem Grund werden im Folgenden keine Schnellladesäulen berücksichtigt. Es wird angenommen dass die Ladevorgänge entweder an einer Haushaltssteckdose mit maximal 3,6 kW oder an einer AC-Ladesäule (Wallbox) stattfinden, die über eine Anschlussleistung von 11 oder 22 kW verfügen.

Für die Modellierung ist die Ladeleistung insbesondere aufgrund ihres Einflusses auf die Integration von Elektrofahrzeugen in die Verteilnetze von Bedeutung. Die verhältnismäßig hohen Leistungen im Vergleich zu anderen Haushaltsverbrauchern und die mögliche Gleichzeitigkeit durch Steuersignale beim gesteuerten Laden könnten Netzengpasssituationen aber verschärfen. /MÜL-02 22/

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der Ladeleistungen zur Modellierung von BEVs und Ladestationen.

Tabelle 2-6 Ladeleistung AC-Laden (eigene Annahmen).

Ladeleistung, AC	Min. in kW	Max. in kW
<b>Status-Quo</b>	3,6	22,0
<b>Zukünftig (2030)</b>	11,0	22,0

Auch in Zukunft wird nur mit einem Maximum von 22 kW Ladeleistung gerechnet. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Ladeleistung auch in Zukunft ausreichen wird, um Elektrofahrzeuge an Standorten mit längerer Aufenthaltsdauer (z.B. Wohnort, Arbeitsplatz) ausreichend aufzuladen. Wenn man die oben beschriebenen Batteriekapazitäten zugrunde legt, könnten selbst die größten Batterien während eines Arbeitstages oder während der nächtlichen Standzeit des Fahrzeuges zu großen Teilen geladen werden. Betrachtet man außerdem die durchschnittlichen spezifischen Verbrauchswerte und berücksichtigt eine mögliche Effizienzsteigerung der Fahrzeugantriebe, reicht die übliche Standzeit von Autos für das Wiederaufladen der Batterie für eine Reichweite von mehreren Hundert Kilometern. Für eine Integration ins Stromnetz kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass mit entsprechender Marktdurchdringung des gesteuerten und bidirektionalen Ladens genügend Leistung zur Verfügung steht. Weitere Simulationen könnten diese Annahme stützen oder verbessern. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt auch die Studie /AGORA-04 19/, die davon ausgeht, dass an den meisten Hausanschlüssen eine Ladeleistung von 11 kW installiert werden wird.

## 2.4 Wirkungsgrade beim Laden und Entladen

Beim Laden und Entladen von BEVs treten zwangsläufig Energieverluste auf. Diese Verluste lassen sich anhand von Wirkungsgraden beschreiben. In der praktischen Anwendung wird in unIT-e<sup>2</sup> dazu ein Gesamtwirkungsgrad angenommen, der sich aus verschiedenen Einzelwirkungsgraden zusammensetzen kann. Die Verluste die zum Gesamtwirkungsgrad beim Laden und Entladen von BEVs beitragen sind: Leitungsverlust der Zuleitung zur Wallbox – Stromverbrauch der Wallbox – Stromverbrauch der Fahrzeugsteuergeräte – Umwandlungsverluste im Onboard-Ladegerät des BEV – Umwandlungsverluste in der Batterie des BEV. Der Gesamtwirkungsgrad ist außerdem davon abhängig, wie die Systemgrenzen für seine Ermittlung gewählt werden. So ist es möglich, z.B. die Leitungsverluste der Zuleitung zur Wallbox

oder andere Verluste auszuschließen oder zu berücksichtigen. Weiterhin hängt der Wirkungsgrad auch von der Art des Ladegeräts und der Ladeleistung ab.

Beispielsweise ist der Wirkungsgrad der Ladegeräte bei niedrigen Leistungen schlechter als bei hohen Leistungen, wie später noch genauer erklärt wird.

Die beim Laden bzw. Entladen erreichbaren nominalen Einzel- und Gesamtwirkungsgrade werden für den heutigen Zeitpunkt mit 92,5 % bzw. 92 % angenommen. Für die Zeit nach 2030 wird mit Verbesserung der Wirkungsgrade in beide Laderichtungen auf 94,5 % gerechnet. Die folgende Tabelle fasst die nominalen Wirkungsgrade beim Laden und Entladen von Elektrofahrzeugen nochmal zusammen.

Tabelle 2-7 Wirkungsgrade beim Laden und Entladen von BEVs (eigene Annahmen und vgl. /UBA-27 22/ und /ADAC-04 22/).

Wirkungsgrad	Status-Quo	Zukünftig (2030)
<b>Nur EVSE</b>	94,5 %	95,5 %
<b>Laden Gesamtsystem*</b>	92,5 %	94,5 %
<b>Entladen Gesamtsystem*</b>	92,0 %	94,5 %

\*Gesamtsystem = EV+EVSE, AC-DC

Vergleichbare Daten für die heute üblichen Wirkungsgrade finden sich in /UBA-27 22/. Darüber hinaus ergaben auch Messungen der Ladeeffizienz durch den ADAC (vgl. /ADAC-04 22/), dass bei 11 kW Wallboxen Ladeverluste im Bereich von 5 – 10 % auftreten.

Die hier angenommen Verbesserung der Wirkungsgrade in der Zukunft begründet sich in zwei Punkten. Zum einen wird davon ausgegangen, dass sich im Bereich der Elektrik Fortschritte bemerkbar machen werden und zweitens Verbesserungen bei der Steuerung und Koordinierung der Ladevorgänge erreicht werden können.

Eine der Hauptursachen für niedrige Wirkungsgrade liegt in geringen Ladeleistungen. Niedrige Ladeleistungen können im Kontext des gesteuerten und bidirektionalen Ladens besonders im Use Case PV-Eigenverbrauchsoptimierung beobachtet werden, wo es zu Ladeleistungen im einstelligen kW-Bereich kommen kann (vgl. /FFE-08 23/). Besonderen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben dabei der Stromverbrauch der Fahrzeugsteuergeräte und der Wallbox, die während

des Ladens aktiv sind und einen höheren Anteil am Stromverbrauch des Gesamtsystems haben, als bei hohen Ladeleistungen von 11 oder 22 kW, wo die Ladeleistung die Leistungsaufnahme durch die Steuergeräte deutlich übersteigt.

Durch Verbesserungen in der Fahrzeugelektronik, wie z.B. effizientere Prozessoren und Mikrocontroller, verbesserte Abschaltlogiken von Funktionen und Steuergeräten, sowie einer Reduzierung von Steuergeräten durch Zonalisierung und Zentralisierung der E/E-Architektur wird der Stromverbrauch der Fahrzeugelektronik in Zukunft gesenkt werden können. (vgl. /MCK-03 19/, /MCMU-01 21/)

Weitere Effizienzverbesserungen könnten durch eine angepasste Betriebsführung der Use Cases des gesteuerten Ladens erreicht werden. In dem niedrige Lade- und Entladeleistungen vermieden werden, tritt der Anteil des Stromverbrauchs der Fahrzeugelektronik zurück, was zu einem höheren Systemwirkungsgrad führt. (vgl. /FFE-08 23/)

# 3 Ökonomische Parameter

## 3.1 Investitionskosten

Während durch die Use-Cases des gesteuerten Ladens für die BEV-Nutzer:innen Erlöse erwirtschaftet werden können, stehen auf der anderen Seite Kosten, die für eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt werden müssen.

Unter den Investitionskosten für eine Ladeeinrichtung zur Nutzung von gesteuertem Laden befinden sich neben dem Fahrzeug:

- Investitionskosten für die EVSE selbst,
- Installationskosten für die EVSE mit Mess- und Steuerungstechnik und
- Anschaffung zusätzlicher Mess- und Steuerungsgeräte.

Die Kosten für die EVSE ergeben sich insbesondere aus den im Gerät enthaltenen funktionalen Modulen. Grundsätzlich unterscheiden sich ungesteuerte EVSEs von gesteuerten dadurch, dass sie nicht unbedingt ein Kommunikationsmodul besitzen, das eine Anbindung an den Mobilfunk gewährleistet und das Schnittstellen zu weiteren Systemen anbietet. Dadurch ergeben sich heute noch Aufpreise von 50 % und mehr, wie eigene Marktrecherchen und Experteninterviews (vgl. /FFE-03 22/) zeigen. Ein noch höherer Preisunterschied entsteht zwischen EVSEs die mit AC-Strom laden, zu EVSEs die mit DC-Strom laden. Weil die Batterie des EVs mit DC-Strom geladen wird, muss der AC-Strom des Netzes vorher in DC-Strom umgewandelt werden. Bei AC-EVSEs wird diese Aufgabe vom, in das Fahrzeug eingebaute, Onboard-Ladegerät übernommen. Wird hingegen das Fahrzeug über die EVSE mit DC-Strom geladen, muss der Strom in der EVSE umgewandelt werden. In diesem Fall ist in der EVSE eine mit dem Onboard-Ladegerät vergleichbare Leistungselektronik verbaut. Diese Komponente führt zu deutlich höheren Entwicklungs-, Produktions- und Materialkosten, die sich im Preis für DC-EVSEs zeigen. Die Preisunterschiede zu ungesteuerten AC-EVSEs erreichen heute noch mehr als 200 % (vgl. /FFE-03 22/, /FFE-65 23/). Die Preisentwicklungspfade zu schätzen gestaltet sich schwierig, da dies von vielen Faktoren abhängt. Die Werte in der folgenden Tabelle 3-1 zeigen die bereits oben diskutierten aktuellen Preisbereiche, sowie die möglichen Preise für 2030. Die

Schätzungen für 2030 basieren ebenfalls auf Expertenschätzungen (vgl. FFE-03 22, /FFE-65 23/).

Die nachfolgende Tabelle zeigt die zur Modellierung genutzten Wertebereiche des Anschaffungspreises verschiedener EVSEs.

Tabelle 3-1 Anschaffungskosten von Wallboxen in € (vgl. /FFE-03 22/, /FFE-65 23/)

Wallboxtyp	Status-Quo	Zukünftig (2030)
<b>AC, unidirektional, ungesteuert</b>	400 – 900	300 – 600
<b>AC, unidirektional, gesteuert</b>	800 – 1.500	500 – 1.000
<b>DC, bidirektional, gesteuert</b>	2.500 -4.000	1.200- 2.000

Weitere Investitionskosten für die Nutzung des gesteuerten Ladens sind neben den Anschaffungskosten für die Geräte die Installationskosten, die entstehen, um das System betriebsbereit im Gebäude der BEV-Nutzer:innen aufzubauen.

Zu den kostenverursachenden Arbeiten zählen u.a. Begutachtung und Planung der Installation durch elektrischen Fachbetrieb, Wanddurchbrüche, Verlegung neuer Leitungen oder Tiefbauarbeiten. Die unten stehende Tabelle zeigt die von uns angenommenen Parameterspannweiten. Es wird deutlich, dass es eine große Parameterspannweite gibt. Dies berücksichtigt die hohe Varianz des individuellen Gebäudebestands, weil abhängig von vielen Faktoren die notwendigen baulichen Maßnahmen zur Installation der Systemgeräte des gesteuerten Ladens sich von Gebäude zu Gebäude unterscheiden können. Gebäude ab der Jahrtausendwende besitzen grundsätzlich modernere elektrische Anlagen als Altbauten. Bei Neubauten können heute bereits Leerrohre geplant werden, um eine Nachrüstung neuer elektrischer Geräte deutlich zu erleichtern. Ebenso einflussreich ist der exakte Ort der Installation. Müssen die Kommunikationseinheiten der Geräte zum Beispiel in Kellern

angebracht werden, kann die Abschirmung vom Mobilfunk eine Hürde darstellen, die weitere Leitungen oder einen anderen Standort der Geräte erforderlich macht.

Weil bei Art und Umfang der Bautätigkeiten auch in Zukunft wenig Änderung zu erwarten ist, sind die Parameterbereiche über die nächsten Jahre als gleichbleibend angenommen.

Tabelle 3-2 Installationskosten von Wallboxen in € (eigene Annahmen).

Wallboxtyp	Status-Quo	Zukünftig (2030)
ungesteuert	500 – 3.000	
gesteuert	600 – 3.000	

Zusätzlich zu den bereits genannten Kosten könnten **Anschaffungskosten für zusätzliche Hardware** anfallen. Dazu zählen unter anderem Energy-Management-Systeme oder sogenannte Smart-Energy-Meter, um die Steuerung von Verbrauchern im Haushalt zu koordinieren bzw. Verbrauchswerte zu Steuerungszwecke zu erfassen und weiterzuleiten. In der Modellierung wird angenommen, dass diese Geräte heute **weitere Kosten zwischen 100 und 500 €** verursachen. In Zukunft könnte die untere Wertgrenze auf Null sinken, wenn z.B. diese Geräte in Produktpakete eingepreist werden oder die Funktion dieser Geräte durch die technische Entwicklung in andere Geräte integriert wird.

### 3.2 Betriebskosten

Neben den Investitionskosten fallen auch Betriebskosten an, welche in (quasi) fixe Kosten und variable Kosten aufgeteilt werden können.

Zu den fixen Kosten gehören z.B. die Wartung und Instandhaltung des Fahrzeugs sowie der Wallbox. Für eine Bewertung, in wie weit sich die Wartungskosten von BEVs mit der Funktion des gesteuerten oder bidirektionalen Ladens gegenüber Fahrzeugen ohne diese Option unterscheiden, liegen heute noch keine ausreichenden Informationen vor. Angenommen, dass die elektronischen Baugruppen sich in ihrer Haltbarkeit kaum unterscheiden, werden hier gleiche Kosten angenommen. Zu den Fahrzeugkosten kommen weitere für den Betrieb der Wallbox. Dazu können u.a. die Mobilfunkanbindung und -nutzung (z.B. SIM-Karte

oder Roaming), die Wartung und der Standby-Betrieb gezählt werden. Die folgende Tabelle zeigt die hier für die Modellierung angenommenen Werte.

Tabelle 3-3 Betriebskosten für BEV und EVSE (eigene Annahmen).

Jährliche, fixe Betriebskosten	Status-Quo	Zukünftig (2030)
Wartung Fahrzeug	1 – 3 %	
Wallbox-Betrieb	1 – 3 % (in Ausnahmen 5 %)	
Messstellenbetrieb	0 – 100 €	

Bei den oben gezeigten Werten handelt es sich um jährlich anfallende Kosten. Sie sind relativ zum Anschaffungspreis des Fahrzeugs bzw. der Wallbox angegeben und werden im Standardfall mit 2 % angenommen. Für die zukünftige Entwicklung werden unveränderte Werte angenommen. Über die preisliche Entwicklung von Wallboxen und Fahrzeugen wird so auch eine Verringerung der Betriebskosten unterstellt.

Unter die Kosten des Messstellenbetriebs fallen die Aufwände zur Nutzung des intelligenten Messsystems (iMSys), welches aus der modernen Messeinrichtung und dem Smart Meter Gateway besteht. Sie werden in einem Bereich von 0 – 100 € angenommen.

Zur Bewertung weiterer Fixkosten, wie Kfz-Steuern, Versicherungsprämien oder Abschreibungen durch Wertverlust wurde kein einheitlicher Datensatz innerhalb von unIT-e<sup>2</sup> erstellt. Dies betrifft insbesondere auch einen möglichen schnelleren Wertverlust durch eine beschleunigte Batteriealterung durch eine Erhöhung der Anzahl der äquivalenten Vollzyklen oder die erhöhte Belastung der Fahrzeugelektronik durch insgesamt stark steigende Betriebsstunden mit dadurch bedingter geringerer Nutzungsdauer und höheren Wertverlusten. Ein erhöhter Verschleiß der Fahrzeugelektronik könnte sich jedoch auch in höheren Wartungskosten niederschlagen und keinen relevanten, negativen Einfluss auf die Wertminderungskosten haben.

Zu den variablen, also verbrauchsabhängigen Betriebskosten zählen vor allem die Stromkosten. Sie setzen sich aus dem Haushaltsstrompreis plus staatlich induzierten Preisbestandteilen (SIP), wie z.B. verschiedene Steuern, Abgaben und Umlagen zusammen. (vgl. /FFE-33 23/) Die zur Modellierung

gesteuerter und bidirektionaler Ladestrategien verwendeten Werte für die Jahre 2020 – 2022 können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3-4 Strompreise 2020 – 2022, /BDEW-02 23/

<b>Strompreis, Abgaben &amp; Umlagen</b>	<b>Haushaltsstrompreis in €-ct/kWh</b>	<b>SIP in €-ct/kWh</b>
<b>2020</b>	31,81	22,89
<b>2021</b>	32,16	22,72
<b>2022</b>	38,57	19,93

Die oben dargestellten historischen Strompreise sowie die Werte der zu zahlenden Abgaben und Umlagen sind den Daten der BDEW-Strompreisanalyse /BDEW-02 23/ entnommen. Für die zukünftige Entwicklung werden anhand der Methodik aus /FFE-84 21/ die zukünftigen Strompreise ermittelt (vgl. Tabelle 3-5).

Es handelt sich dabei um den als plausibel eingeschätzten Preispfad, deren Daten für die Stützjahre 2030, 2035 und 2040 hier ausgewählt wurden. Die in der Tabelle separat ausgewiesenen SIP wurden durch Abzug der Strompreisbestandteile für Beschaffung und Vertrieb und der darauf gezahlten Mehrwertsteuer (im Szenario von /FFE-84 21/ mit 19% angenommen) gebildet.

Tabelle 3-5 Strompreisprognosen bis 2040, /FFE-84 21/

<b>Strompreis, Abgaben &amp; Umlagen</b>	<b>Haushaltsstrompreis in €-ct/kWh</b>	<b>SIP in €-ct/kWh</b>
<b>2030</b>	25,80	15,80
<b>2035</b>	26,30	16,30
<b>2040</b>	26,70	16,35



## 4 Zusammenfassung

Das hier vorliegende Discussion Paper zeigt, welche Parameter aktuell für Modellierungen zur Integration von Elektrofahrzeugen ins Stromnetz benutzt werden können. Darüber hinaus enthält es Abschätzung über Parameterbereiche für die Modellierung zukünftiger Entwicklungen.

Voraussagen über zukünftige Entwicklungen sind besonders für die Bereiche Anschaffungskosten und die Verteilung von AC-zu DC-Ladesäulen nicht möglich. Dies liegt vor allem daran, dass bisher kaum Modelle von DC-Ladesäulen am Markt verfügbar sind und hierzu noch wenige Informationen zur Produktion dieser Produkte bestehen. Auch die Marktanteile von AC- oder DC-Laden vorauszusagen ist noch nicht möglich, da sich hier noch nicht abgezeichnet hat, welche Technologie sich durchsetzen könnte.

Sollte sich das DC-Laden durchsetzen, würde dies bedeuten, dass der Onboard-Charger in den Fahrzeugen oftmals entfallen könnte. Für einen kompletten Wegfall dieses Bauteils im Fahrzeug wäre es allerdings notwendig, dass die komplette Ladeinfrastruktur in Deutschland beziehungsweise Europa auf DC-Ladestationen umgestellt wird.

Mit dem Entfall des Onboard-Chargers in Fahrzeugen könnten allerdings Ressourcen gespart werden. Ebenfalls könnte in den Fahrzeugen dadurch Gewicht reduziert werden, was sich unmittelbar auf den Verbrauch der Fahrzeuge auswirken könnte. Des Weiteren könnte der zur Verfügung stehende Bauraum dann auch für weitere Batteriekapazitäten genutzt werden, was zu erhöhten Reichweiten führen würde.

Hinsichtlich der Ladegeschwindigkeit ist eine weitere Erhöhung nicht mehr zu erwarten und auch für die Integration von Elektrofahrzeugen ins Energienetz nicht notwendig. Mit 11 kW beziehungsweise 22 kW steht genug Ladeleistung zur Verfügung, um Elektrofahrzeuge während ihrer üblichen Standzeit zu Hause oder am Arbeitsplatz ausreichend zu laden. Das Leistungsangebot von 22 beziehungsweise 11 kW reicht bei der Vielzahl an vermuteten Fahrzeugen im Netz aus, um die Flexibilitätspotenziale vieler Elektrofahrzeuge zur Stabilisierung des Stromnetzes zu nutzen.

In dem hier beschriebenen Datenset wurden noch keine Werte für die Ansteckwahrscheinlichkeit festgelegt. Mögliche Ansteckwahrscheinlichkeiten wurden jedoch bereits z.B. bei /KERN-02 22/ ermittelt. Die Höhe der Wahrscheinlichkeit, dass das Elektrofahrzeug von den BEV-Nutzer:innen nach dem Parken mit der EVSE verbunden wird, hat aber einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Elektrofahrzeuge als Flexibilität. Bei geringen Ansteckwahrscheinlichkeiten kann es vorkommen, dass Prognosen über die Verfügbarkeit einer Flexibilität erschwert werden, weil die Ansteckzeitpunkte vermehrt zufällig auftreten und die Zeitpunkte, wann die BEV-Nutzer:innen nach Hause kommen oder das Haus verlassen, schwerer zu prognostizieren werden.

Neben der vorherrschenden Lithium-Ionen-Technologie sollten in weiteren Arbeiten auch andere Zelltechnologien für Traktionsbatterien in Betracht gezogen werden. Vor allem Natrium-Ionen-Batterien und Feststoffbatterien könnten in den nächsten Jahren und Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen wie die Roadmap von /ISI-03 23/ zeigt.

Weiterführende Arbeiten könnten sich außerdem mit der Nutzungsdauer von Traktionsbatterien beschäftigen. Die Nutzungsdauer einer Traktionsbatterie entspricht dem Zeitraum, bis zu dem Zeitpunkt an dem die Batterie einen bestimmten Teil ihrer ursprünglichen Kapazität durch die Benutzung im Fahrzeug verloren hat. Typischerweise ist dieser Zeitpunkt erreicht, wenn die nutzbare Kapazität auf 70 – 80 % (abhängig vom BEV-Hersteller) des Wertes nach Auslieferung gesunken ist.

Charakteristische Größen für Modellrechnungen könnten dabei die Zyklenfestigkeit bzw. zyklische Alterung und die kalendarische Alterung sein. Die zyklische Alterung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Anzahl und Höhe der Ladezyklen und dem Verlust der Batteriekapazität, während die kalendarische Alterung die Abhängigkeit des Batteriekapazitätsverlusts vom Alter der Batterie und den Lagerbedingungen der Batterie (z.B. Temperatur und SOC) aufzeigt.

Über die Batterienutzungsdauer könnte sich in Modellen darauf schließen lassen, wie lange Fahrzeugbatterien zur Verfügung stehen und wie hoch Zugang

gebrauchter Batterien in Second-Life-Anwendungen sein könnte und wie viele Batterien endgültig aus Second-Life-Anwendungen entfallen und einem Recyclingprozess zugeführt werden könnten. Für die BEV-Nutzer:innen ist die Nutzungsdauer im Fahrzeug insbesondere aus ökonomischer Perspektive relevant, weil die Fahrzeugbatterie einen erheblichen Teil des Fahrzeugwertes ausmacht. Dadurch ist es entscheidend welchen Wertverlust Nutzende in Kauf nehmen müssen, bei der Verwendung der Use Cases des gesteuerten und bidirektionalen Ladens.

# Literaturverzeichnis

- ADAC-04 22** Rudschies, Wolfgang: Ladeverluste beim Elektroauto - Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden. In <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>. (Abruf am 2024-04-08); München: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC), 2022.
- AGEB-01 24** Buttermann, Hans: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2024.
- AGORA-04 19** Navigant, Kompetenzzentrum Elektromobilität und RE-xpertise: Verteilnetzausbau für die Energiewende - Elektromobilität im Fokus: Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project (RAP), 2019.
- BDEW-02 23** BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023. In <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. (Abruf am 2023-8-08); Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2023.
- ETUI-01 22** Schade W., Haug I., Berthold D. (2022) The future of the automotive sector. Emerging battery value chains in Europe, Report 2022.02, M-Five, ETUI.
- EVDB-01 23** Reichweite von Elektroautos. In <https://ev-database.org/de/cheatsheet/range-electric-car>. (Abruf am 2023-7-7); Amsterdam, Niederlande: EV Database (9-Five-9 Ventures BV), 2023.
- FFE-03 22** Dossow, Patrick et al.: BDL Mehrkosten - Steckbrief. München: FfE München, 2022.
- FFE-03 23** Müller, Mathias et al: Net-zintegration bidirektionaler Elektrofahrzeuge. In: Tagung Zukünftige Stromnetze. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2023.
- FFE-08 23** BDL – Bidirektionales Lademanagement - Abschlussbericht der FfE. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2023.
- FFE-33 23** Jooß, Niklas et al.: Einfluss der Befreiung von Strompreisbestandteilen auf den Use Case vehicle to grid. ETG Kongress 2023, Kassel: FfE, 2023.
- FFE-65 23** Zahler, Jakob: Bidirektionales Laden – Anwendungsfälle aus Nutzersicht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2023.
- FFE-84 21** Dossow, Patrick et al.: FfE Discussion Paper: Entwicklungsrahmen der Haushaltsstrompreise in Deutschland. München: FfE, 2021.
- IEA-03 23** International Energy Agency (IEA): Global EV Outlook 2023 - Catching up with Climate Ambitions. o. O.: International Energy Agency (IEA), 2023. DOI: 10.1787/cbe724e8-en.
- INFAS-01 19** Mobilität in Deutschland 2017 - Datensatz; Bonn: infas Institut für angewandte

- Sozialwissenschaft GmbH, 2019.
- ISI-03 23** Thielmann, Axel: Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2023. DOI: 10.24406/publica-1342.
- ISI-15 22** Neef, Christoph: Development perspectives for lithium-ion battery cell formats. Karlsruhe, Pfinztal, Münster, Stuttgart: Fraunhofer ISI, 2022.
- ISI-16 22** Schmaltz, Thomas: Solid-State Battery Roadmap 2035+. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2022.
- KBA-01 24** Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2024 gegenüber dem 1. Januar 2023. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2024.
- KERN-02 22** Kern, Timo: Assessment of the Added Value of Bidirectionally Chargeable Electric Vehicles for the User and the Energy System. Eingereichte Dissertation. Herausgegeben durch TU München (TUM): München, 2022.
- KIT-10 20** Doppelbauer, Martin: Grundlagen der Elektromobilität - Technik, Praxis, Energie und Umwelt. Karlsruhe, Wiesbaden: Karlsruher Institut für Technologie – KIT, 2020. ISBN: 978-3-658-29730-5.
- KOR-01 13** Korthauer, Reiner: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien - Teil 1: Technische Möglichkeiten heutiger Batterien. Heidelberg: Springer Verlag, 2013
- LIN-01 23** Link, Steffen: Trends in Automotive Battery Cell Design - A Statistical Analysis of Empirical Data. In: Batteries Vol. 9 2023. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2023. DOI: 10.3390/batteries9050261.
- MCK-03 19** Burkacky, Ondrej: Automotive software and electronics 2030 - Mapping the sector's future landscape. o. O.: McKinsey & Company, 2019.
- MCMU-01 21** Bandur, Victor: Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 70, No. 2 February 2021. Hamilton, Ontario, Canada: McMaster University, 2021. DOI: 10.1109/TVT.2021.3054934.
- MÜL-02 22** M. Müller: Netzintegration dezentraler Flexibilitätsoptionen mit Fokus auf ausgewählte Anwendungsfälle für bidirektionale Elektrofahrzeuge. Herausgegeben durch TU München (TUM), geprüft von Wagner, Ulrich und Witzmann, Rolf: München, 2023. <https://mediatum.ub.tum.de/1686443>
- NLL-01 20** Windt, Alexander et al.: Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Berlin: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2020.
- PICHL-01 22** Pichlmaier, Simon: Ecological Assessment of Scenarios for the Energy Supply of the German Transport Sector. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München (TUM): München, 2022.
- RWI-02 18** Augurzky, Boris et al.: Notfallversorgung in Deutschland: Projektbericht im Auftrag der Kassenärztlichen Bundesvereinigung - RWI Projektberichte. Essen: RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, 2018.
- SFGR-01 21** Koalitionsvertrag zwischen SPD, FDP und Grünen- 20. Legislaturperiode - Mehr

Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit.  
Berlin: Koalitionsvertrag zwischen SPD, FDP und Grünen, 2021.

**UBA-27 22**

Helms, Hinrich: Abschlussbericht - Energieverbrauch von Elektroautos (BEV).  
Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2022.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Zusammenhang von Brutto- und Nettobatteriekapazität (eigene Darstellung)...8

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Batteriekapazität unterschieden nach Fahrzeugklasse heute, 2030 und 2045. (Eigene Daten).....	6
Tabelle 2-2	Vergleich verschiedener, üblicher Kathodenmaterialien in Traktionsbatterien. Vergleich basierend auf /KOR-01 13/.....	7
Tabelle 3-1	Sicherheitsreichweite in unIT-e <sup>2</sup> basierend auf /INFAS-01 19/, /RWI-02 18/...	9
Tabelle 3-2	Mindestreichweite in unIT-e <sup>2</sup> basierend auf /FFE-08 23/.....	9
Tabelle 3-3	Spezifischer Verbrauch nach Fahrzeugklasse in unIT-e <sup>2</sup> basierend auf /PICHL-01 22/.....	10
Tabelle 4-1	Ladeleistung AC-Laden (eigene Annahmen).....	10
Tabelle 4-2	Wirkungsgrade beim Laden und Entladen von BEVs (eigene Annahmen und vgl. /UBA-27 22/ und /ADAC-04 22/.....	11
Tabelle 6-1	Anschaffungskosten von Wallboxen in € (vgl. /FFE-03 22/, /FFE-65 23/).....	12
Tabelle 6-2	Installationskosten von Wallboxen in € (eigene Annahmen).....	13
Tabelle 7-1	Betriebskosten für BEV und EVSE (eigene Annahmen).....	13
Tabelle 7-2	Strompreise 2020 – 2022, /BDEW-02 23/.....	14
Tabelle 7-3	Strompreisprognosen bis 2040, /FFE-84 21/.....	14



# Anhang

## Parameter, Teil 1 – Allgemeine Daten, Nutzerparameter

Stand: 20.06.2022

zukünftig = Jahr 2030

Spezifikation					
Bezeichnung	Zeitraum		Werte		
			min	max	default
<b>Allgemein</b>					
Stützjahre/ Zeithorizont	heute/ Status Quo		2020 oder 2021 oder 2022		
	zukünftig		2030, 2035, 2040, 2045		
<b>Nutzerparameter</b>					
Mindestreichweiten bei Abfahrt in km	Kleinwagen	heute	130	550	440
		2030	130	650	425
		2045	100	670	335
	Kompaktklasse	heute	130	550	440
		2030	130	650	325
		2045	100	670	200
	Mittelklasse	heute	130	550	385
		2030	130	650	325
2045		100	670	200	
Oberklasse	heute	130	550	385	
	2030	130	650	360	
	2045	100	670	270	
Sicherheitsreichweite in km (jederzeit)	Kleinwagen	heute	40	100	70
		2030			
		2045			
	Kompaktklasse	heute	40	100	70
		2030			
		2045			
	Mittelklasse	heute	40	100	70
		2030			
2045					
Oberklasse	heute	40	100	70	
	2030				
	2045				
Mittlerer max. Ankunfts-SOC zum Anstecken	heute/ Status Quo		50%	100%	100%
	zukünftig		50%	100%	100%

Parameter, Teil 2 – Technische Parameter, Parameter-Haushalt

Spezifikation					
Bezeichnung	Zeitraum	Werte			
		min	max	default	
<b>Technische Parameter</b>					
Batteriekapazität in kWh	Kleinwagen	heute / Status Quo	20	40	30
		2030	30	50	35
		2035	30	50	40
		2040	30	50	40
		2045	30	50	40
	Kompaktklasse	heute / Status Quo	30	70	40
		2030	40	80	60
		2035	50	90	70
		2040	50	100	80
		2045	50	100	80
	Mittelklasse	heute / Status Quo	50	100	60
		2030	60	120	80
		2035	70	130	90
		2040	80	140	100
		2045	80	140	100
	Oberklasse	heute / Status Quo	80	140	100
2030		90	170	120	
2035		90	200	130	
2040		90	220	140	
2045		90	250	150	
Nominelle Ladeleistung(en) in kW	heute / Status Quo	3,6	22	11	
	zukünftig	11	22	11	
Nominelle Entladeleistung(en) in kW	heute / Status Quo	3,3	20,2	10,1	
	zukünftig	10,4	20,8	10,4	
Verluste EV im Lade- und Entladebetrieb in W	heute / Status Quo		200,0		
	zukünftig		125,0		
Wirkungsgrad EVSE	heute / Status Quo		94,5%		
	zukünftig		95,5%		
Wirkungsgrad single-way (EV+EVSE, AC-DC) laden	heute / Status Quo		92,5%		
	zukünftig		94,5%		
Wirkungsgrad single-way (EV+EVSE, AC-DC) entladen	heute / Status Quo		92,0%		
	zukünftig		94,5%		
Wirkungsgrad roundtrip (AC-AC)	heute / Status Quo		85,5%		
	zukünftig		89,0%		
<b>Parameter-Haushalt</b>					
Elektrischer Jahresverbrauch in kWh	heute / Status Quo		ca. 2.500	ca. 4.500	ca. 3.700
	zukünftig				
Größe PV-Anlage in kW	heute / Status Quo		0,0	15,0	7,0
	zukünftig				

Parameter, Teil 3 – Ökonomische Parameter

Spezifikation				
Bezeichnung	Zeitraum	Werte		
		min	max	default
<b>Anschaffungskosten: Peripherie</b>				
Kosten Wallbox/ EVSE (ungesteuert)	heute/ Status Quo	400 €	900 €	650 €
	zukünftig	300 €	600 €	450 €
Kosten Wallbox/ EVSE (gesteuert/intelligent)	heute/ Status Quo	800 €	1.500 €	1.150 €
	zukünftig	500 €	1.000 €	750 €
Kosten Wallbox/ EVSE (bidirektional)	heute/ Status Quo	2.500 €	4.000 €	3.250 €
	zukünftig	1.200 €	2.000 €	1.600 €
Installationskosten Wallbox/ EVSE (ungesteuert)	heute/ Status Quo	500 €	3.000 €	1.745 €
	zukünftig			1.775 €
Installationskosten Wallbox/ EVSE (gesteuert/intelligent)	heute/ Status Quo	600 €	3.000 €	1.775 €
	zukünftig			1.775 €
Installationskosten Wallbox/ EVSE (bidirektional)	heute/ Status Quo	550 €	3.000 €	1.775 €
	zukünftig			1.775 €
Kosten Messtechnik pro Jahr (ungesteuert)	heute / Status Quo	0 €	80 €	0 €
	zukünftig			0 €
Kosten Messtechnik pro Jahr (gesteuert/intelligent)	heute / Status Quo	0 €	100 €	0 €
	zukünftig			0 €
Kosten Messtechnik pro Jahr (bidirektional)	heute / Status Quo	20 €	100 €	20 €
	zukünftig			20 €
Kosten zusätzliche Hardware (EMS, Smart Energy Meter) (gesteuert/intelligent, bidirektional)	heute / Status Quo	100 €	500 €	100 €
	zukünftig	0 €	500 €	0 €
<b>Fixe Betriebskosten</b>				
Kosten Wartung/ Instandhaltung (Fahrzeug)	heute / Status Quo	1%	3%	2%
	zukünftig			2%
Kosten Wallbox-Betrieb (SIM-Karte, Roaming, Wartung/ Instandhaltung, Standby) (gesteuert/intelligent)	heute / Status Quo	1%	3%	2%
	zukünftig			2%
Kosten Wallbox-Betrieb (SIM-Karte, Roaming, Wartung/ Instandhaltung, Standby) (bidirektional)	heute / Status Quo	1%	5% (fast charger)	2%
	zukünftig			2%
Kosten Messstellenbetrieb	heute / Status Quo	in "Kosten Messtechnik pro Jahr" enthalten		
zukünftig	zukünftig	in "Kosten Messtechnik pro Jahr" enthalten		
<b>Variable Betriebskosten</b>				
Haushaltsstrompreis in ct/kWh	heute / Status Quo (2020)	31,81		
	heute / Status Quo (2021)	32,16		
	heute / Status Quo (2022)	38,57		
	2030	25,80		
	2035	26,30		
	2040	26,70		
Abgaben und Umlagen auf Haushaltsstrompreis in ct/kWh	heute / Status Quo (2020)	22,89		
	heute / Status Quo (2021)	22,72		
	heute / Status Quo (2022)	19,93		
	2030	15,80		
	2035	16,30		
	2040	16,35		
Börsenstrompreis	heute / Status Quo	Historische Werte von EPEX (2020, 2021 oder 2022)		
	zukünftig	Werte aus Energiesystemmodellierung (ISAaR)		

