



Status, Trends und Potenziale

Leitfaden »Bidirektionales Laden«

BIDIREKTIONALES LADEN

Status, Trends und Potenziale

Dr. Bernhard Wille-Hausmann

Arne Groß

Michelle Antretter

Ansprechpartner

Dr. Bernhard Wille-Hausmann

bernhard.wille-hausmann@ise.fraunhofer.de

Telefon: +49 761 4588-5443

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg.

Datum: 26.06.2023

Diese Studie wurde gefördert aus dem Förderprogramm Sonnencent der Elektrizitätswerke Schönau



Hinweis: Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 4 |
| 2 | Einleitung und Ziel | 5 |
| 3 | Motivation | 6 |
| 3.1 | Elektrofahrzeug als Speicher für die Energiewende | 6 |
| 3.2 | Dezentrale Photovoltaik lohnt sich | 7 |
| 3.3 | Stromspeicher erhöhen die Eigenversorgungsquote | 7 |
| 3.4 | Das E-Fahrzeug als Speicher | 8 |
| 4 | Lohnt sich bidirektionales Laden? | 9 |
| 4.1 | Anwendungsfall – Haushalt, Fahrzeug und Photovoltaik | 9 |
| 4.1.1 | Haushaltstyp | 10 |
| 4.1.2 | Elektrofahrzeug..... | 11 |
| 4.1.3 | PV-Anlage..... | 12 |
| 4.1.4 | Szenarienüberblick und Auswertung | 12 |
| 4.2 | Eigenversorgungsquote..... | 13 |
| 4.2.1 | Eigenversorgung ohne E-Fahrzeug | 14 |
| 4.2.2 | Eigenversorgung mit E-Fahrzeug | 14 |
| 4.3 | Ökonomische Betrachtung..... | 17 |
| 5 | Technische Anforderungen | 18 |
| 5.1 | Stromflüsse Hausenergiesystem | 18 |
| 5.1.1 | Energiemanagement..... | 18 |
| 5.1.2 | Bidirektionale Wallbox und E-Fahrzeug | 19 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 21 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 22 |

Mit E-Fahrzeugen bewegen wir große Batteriespeicher in unserer täglichen Mobilität. Aber in Wirklichkeit stehen E-Fahrzeuge, und damit auch ihre Batterie, wie Verbrenner-Fahrzeuge die meiste Zeit ungenutzt vor der Haustür.

Wie die Fahrzeugbatterie als Speicher für den eigenen Haushalhalt genutzt werden kann, haben wir im Leitfaden »Bidirektionales Laden« untersucht. Dabei werden verschiedene Haushaltstypen und Nutzungsmöglichkeiten betrachtet und miteinander verglichen. Neben der Eigenversorgungsquote wird das ökonomische Potenzial der verschiedenen Szenarien untersucht sowie ein Überblick über die technischen Anforderungen an das bidirektionale Laden gegeben.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Verwendung von E-Fahrzeugen den Strombedarf eines Haushaltes steigern, weshalb große PV-Anlagen sinnvoll sind, um den erhöhten Energiebedarf decken zu können. Gleichzeitig erhöht eine große PV-Anlage die Eigenversorgungsquote und senkt die Stromkosten in allen Szenarien.

Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass durch bidirektionales Laden die Eigenversorgung eines Haushaltes, unabhängig vom Haushaltstyp oder der Kategorie, ab einer PV-Anlagengröße von mehr als 8 kWp, im Vergleich zum Haushalt ohne E-Fahrzeug steigern lässt. Die Eigenversorgungsquote ist dagegen beim unidirektionalen Laden immer niedriger als in den bidirektionalen Fällen.

Im Vergleich zum Szenario ohne E-Fahrzeug sowie beim unidirektionalen weist der bidirektionale Fall höhere Stromkosten auf. Dies lässt sich durch Umwandlungsverluste erklären. Um Verluste zu minimieren und Stromkosten gering zu halten, sollte daher auf eine effiziente Ladeinfrastruktur geachtet werden.

Die technischen Anforderungen können mithilfe der bereits vorhandenen Standards weitestgehend erfüllt werden. Erste Produkte am Markt zeichnen sich hier ab. Aktuell fehlt es vor allem an rechtlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung des bidirektionalen Ladens.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass E-Fahrzeuge generell nach Eigenstrom oder variablen Tarifen gesteuert werden sollten. In Fällen, wo bisher kein stationärer Speicher vorhanden ist, hat bidirektionales Laden Vorteile in Bezug auf Eigenstromnutzung gegenüber unidirektionalem Laden. Man kann sich je nach Haushaltstyp einen stationären Speicher sparen oder diesen wesentlich kleiner dimensionieren.

2

Einleitung und Ziel

Die Energiewende ist nur durch einen erheblichen technologischen Wandel umsetzbar. Die Bereitstellung von Energie wird in großem Maße auf Erneuerbaren Quellen basieren, wobei Wind und Sonne einen großen Anteil unseres Strom- und Energiebedarfs decken sollen. Unter anderem sollen bis 2030 in Deutschland mindestens 80 Prozent des Bruttostroms aus Erneuerbaren Energien stammen (Bundesregierung 2023). Durch die fluktuierende Energieerzeugung wird der Unterschied zwischen Zeiten mit Erzeugungsüberschuss und Zeiten mit Verbrauchsüberschuss aber sehr viel stärker ausgeprägt sein als heute.

Für ein stabiles Energiesystem muss dieser Unterschied durch flexibel steuerbare Verbraucher oder Speicher ausgeglichen werden. Die Elektromobilität hat das Potenzial, als großer Verbraucher, der oft ungenutzt parkt, hier eine große Flexibilität zu bieten. Bidirektionale Elektrofahrzeuge können im Gegensatz zu "normalen" Elektrofahrzeugen Strom wieder zurückspeisen, und so zum Beispiel zur Versorgung des Haushalts genutzt werden.

Aus gesamtsystemischer Sicht ist die Elektromobilität ein wichtiger Baustein, um das Energiesystem stabil zu halten. Doch ergibt ein Speicher auch im eigenen Haushalt Sinn? Dieser Frage kommen wir in unserem Leitfaden »Bidirektionales Laden« nach.

Dafür werden wir zunächst der Motivation einer Einfamilienhausbesitzerin bzw. eines Einfamilienhausbesitzers nachgehen. Sinkende Kosten für Photovoltaiksysteme zusammen mit einem zu erwartenden Strompreisanstieg machen den Eigenverbrauch für Privatpersonen zu einer sinnvollen Ergänzung zum reinen Netzbezug. Auch die Kosten für Batteriespeicher sind über die letzten Jahre gefallen, so dass PV-Batteriesysteme nicht nur für eine hohe Eigenversorgungsquote sorgen, sondern auch für immer mehr Haushalte wirtschaftlich attraktiv werden.

Es ist naheliegend, die Batterie des Elektrofahrzeugs zur Eigenversorgung nutzen zu wollen. Das E-Fahrzeug muss dabei natürlich zu den richtigen Zeiten vor der Tür stehen und eingesteckt sein. Dies führt uns zu der Frage, bei welchem Lastverhalten ist bidirektionales Laden am attraktivsten. Abschließend diskutieren wir, was man technisch für bidirektionales Laden braucht.

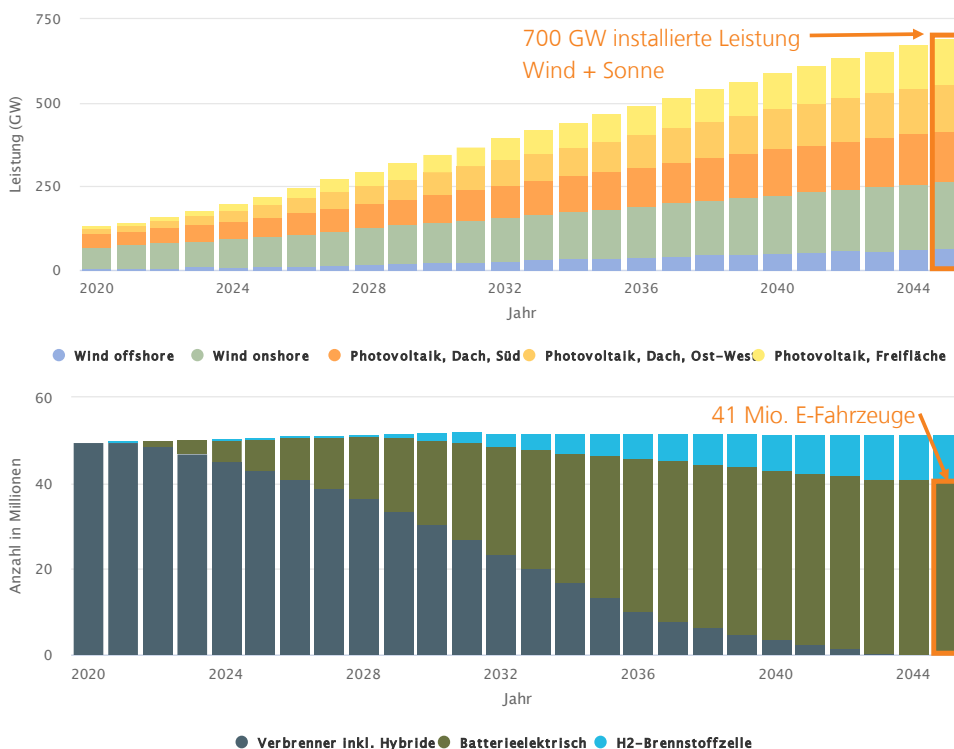
3 Motivation

Gleich mehrere Treiber neben der medialen Präsenz lassen die Aufmerksamkeit für Energiethemen steigen. Von gesetzlicher Seite gibt es immer mehr Regularien, die Energieversorgung umzustellen auf ein System möglichst ausschließlich durch erneuerbare Quellen versorgt. Gleichzeitig sinken weltweit die Investitionskosten für Photovoltaiksysteme, während die Preise für Energie derzeit stark steigen. Dies motiviert viele Haushalte, das Thema Energieversorgung bewusst wahrzunehmen und nach Möglichkeit in die eigene Hand zu nehmen.

Gleichzeitig stehen mit Batteriespeichern, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen immer mehr Technologien zur Verfügung, um die eigene Energieversorgung zu optimieren. Eine erhebliche Elektrifizierung erfährt hierbei die Mobilität. Dies ist Grund genug, um sich die Argumente einmal näher anzuschauen.

3.1 Elektrofahrzeug als Speicher für die Energiewende

Die Energieszenarien-Simulation des Fraunhofer ISE sieht im Jahr 2045 rund 41 Mio. batterieelektrische PKW (vgl. Abb. 1) (Julian Brandes 2021). Unterstellt man für jedes dieser Fahrzeuge eine Wallbox mit einer Anschlussleistung von 11 kW, entspricht dies einer Anschlussleistung von rund 450 GW. Dies entspricht etwa dem fünffachen der deutschen Spitzenlast im Jahr 2022 (Fraunhofer ISE 2023) und verdeutlicht die Notwendigkeit einer intelligenten Steuerung. Demgegenüber steht aber auch eine Erzeugungsleistung aus Wind und Sonne von rund 700 GW (Julian Brandes 2021), mit der der Verbrauch in Einklang gebracht werden muss.



**Abb. 1 Erwarteter Zubau an batterieelektrischen Fahrzeugen und Erneuerbaren Energien
Fraunhofer ISE**

Hier bieten Elektrofahrzeuge ein großes Potenzial, den Verbrauch zu Zeiten hoher erneuerbarer Erzeugung zu verschieben. Unterstellt man eine mittlere Batteriekapazität für einen batterieelektrischen PKW von 50 kWh, bieten alle PKWs eine gesamte Kapazität von etwa 2 TWh. Dies entspricht etwa 0,5 Prozent des deutschen Jahresstromverbrauchs von 549TWh im Jahr 2022 (Umweltbundesamt a 2023), der auf deutschen Parkplätzen steht. Privat-PKW werden nur eine Stunde am Tag genutzt (Umweltbundesamt b 2023, Bundesnetzagentur 2023). In den verbleibenden 23 Stunden könnte ein E-Fahrzeug für das Stromnetz sinnvoll genutzt werden.

Warum dann nicht im eigenen Heim damit anfangen!

3.2

Dezentrale Photovoltaik lohnt sich

Installiert man Anfang 2023 eine Photovoltaik-Anlage (PV) auf seinem Eigenheim, erhält man für jede eingespeiste Kilowattstunde 8,2 Cent (Bundesnetzagentur 2023), was in etwa den Stromgestehungskosten entspricht. Verschaltet man die PV-Anlage für die Eigenverbrauchsnutzung, bedeutet das, dass der Strom zunächst den eigenen Bedarf deckt und nur der Überschuss in das öffentliche Netz eingespeist wird. Damit ersetzt die PV-Erzeugung teuren Strom aus dem Netz für rund 40 Cent/kWh. Nur in Zeiten mit wenig oder geringer Sonneneinstrahlung muss der teurere Strom aus dem Netz bezogen werden. Da liegt es nahe, die sogenannte Eigenversorgung zu erhöhen, in dem man große Verbraucher – und hierzu gehört unser E-Fahrzeug – in Zeiten mit hoher PV-Leistung verschiebt. Zusätzlich kann ein Batteriespeicher die Eigenversorgungsquote steigern.

3.3

Stromspeicher erhöhen die Eigenversorgungsquote

Zusätzlich sind auch die spezifischen Kosten für mittelgroße Batteriespeichersysteme im Bereich zwischen 5 und 10 kWh um 22 Prozent zwischen 2018 und 2021 laut Figgner et al. (2022) gefallen, sodass PV-Batteriesysteme eine vielversprechende Lösung bieten, um PV-Strom tagsüber zu „ernten“ und in sonnenschwachen Stunden zu verbrauchen. Insbesondere Batteriespeicher in dieser Größenordnung sind zu einer interessanten Option geworden, um die Eigenversorgungsquote zu verbessern. Unter Eigenversorgungsquote versteht man das Verhältnis von eigens erzeugtem PV-Strom zum Gesamtstromverbrauch. Wirtschaftlich und technisch sinnvoll darstellbar ist es, den Sonnenstrom über den Verlauf eines Tages zu speichern – also tagsüber beladen und nachts entladen. Um den gesamten Haushaltsstrom auch im Winter zu decken, wären jedoch sehr große Speicher notwendig, was sich weder wirtschaftlich noch technisch umsetzen lässt.

3.4

Das E-Fahrzeug als Speicher

Batterieelektrische Fahrzeuge haben eine mittlere Speicherkapazität von 40 bis 100 kWh und sind damit rund 10-mal größer als normale Heimspeicher. Gleichzeitig wird von der Kapazität bei einer täglichen Nutzung mit einem Stromverbrauch von 15 – 20 kWh/100 km nur ein kleiner Teil der Batteriekapazität genutzt. Darüber hinaus kann die Fahrzeugbatterie auch im Fall eines Stromausfalls als Notstromversorgung dienen und einen Haushalt mehrere Tage lang im Inselbetrieb mit Strom versorgen (Kasnatscheew und Jenter 2023).

Warum das Auto dann nicht auch als Heimspeicher und „Backup-Energiesystem“ verwenden?

Dieser Frage kommen wir in diesem Leitfaden nach, und die Antwort hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Allen voran stellt sich die Randbedingung, wie oft das Auto tagsüber zu Hause ist und mit dem Stromnetz verbunden ist, d.h. in der Wallbox eingesteckt ist.

Darüber hinaus muss das Kriterium, welches Stromnutzungsverhalten unser Haushalt hat, miteinbezogen werden. Der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs eines Singlehaushalt und einer Familie unterscheiden sich deutlich. Diesen Punkt analysieren wir im folgenden Abschnitt 4 .

Um das Auto nicht nur gezielt zu beladen, sondern auch wieder in das heimische System zu entladen, sind einige technische Anforderungen nötig. Diese diskutieren wir in Abschnitt 5.

4

Lohnt sich bidirektionales Laden?

.....
Lohnt sich bidirektionales Laden?
.....

Im Folgenden analysieren wir die unterschiedliche Nutzung eines Elektrofahrzeuges. Wir unterscheiden dabei die folgenden Fälle:

■ Unidirektional:

Das E-Fahrzeug wird ausschließlich geladen und kann den Strom ausschließlich intern zum Fahren nutzen. Das Aufladen ist optimiert im besten Fall auf die PV-Erzeugung oder Netzbezug.

■ Bidirektional:

Das E-Fahrzeug kann den Strom aus der Batterie zusätzlich an das Hausenergiesystem abgeben, wenn es dort angeschlossen ist.

4.1

Anwendungsfall – Haushalt, Fahrzeug und Photovoltaik

Gegenstand der Untersuchung ist ein Einfamilienhaus, das über eigene Dachfläche für eine PV-Anlage verfügt. Zusätzlich ist ein PKW-Stellplatz für die Installation einer Wallbox erforderlich. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, sind die Ergebnisse auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar. Abb. 2 stellt schematisch das betrachtete Energiesystem und die Leistungsflüsse dar. Es gelten folgende ökonomische Randbedingungen:

- Strombezug: 40 Cent/kWh
- Überschusseinspeisung aus der PV-Anlage: 8,2 Cent/kWh

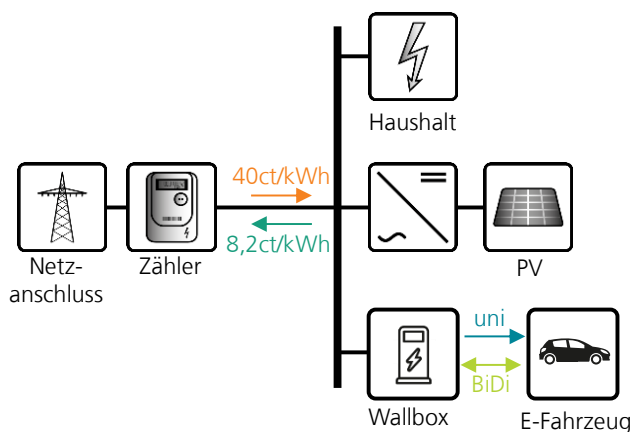


Abb. 2 schematische Darstellung des untersuchten Energiesystems
Fraunhofer ISE

Um den Effekt von bidirektionalem Laden zu bewerten, führen wir Simulationsrechnungen über den Zeitraum eines Jahres durch. Hierfür sind Annahmen für den zeitlichen Verlauf der Verbrauchs- und Erzeugungsleistung sowie für die Einbindung des E-Fahrzeug notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

4.1.1 Haushaltstyp

Das typische Haushaltsprofil ist im Wesentlichen durch die Anzahl der BewohnerInnen und deren Verhalten geprägt. Um eine vergleichbare Aussage treffen zu können, kommt das Werkzeug »synPRO« zum Einsatz. Dieses modelliert das statistische Verhalten der in Tab. 1 zusammengefassten Haushaltstypen.

| Typ | Personen | Beschreibung | Ø Stromverbrauch [kWh/a] |
|---------------|----------|---|--------------------------|
| »Home-Office« | 4 | 2 Homeoffice ArbeiterInnen | 3163 (2784 - 3537) |
| »Office« | 4 | 2 ArbeiterInnen mit externem Büro | 2489 (2179 - 2755) |
| »Mix« | 4 | 2 ArbeiterInnen mit 50% Home-office und 50% Büroarbeitszeit | 2767 (2234 - 3180) |
| »Senior« | 1 | 1 RentnerIn | 1973 (1594 - 2351) |

Tab. 1 unterschiedliche Haushaltstypen

Tab. 1 beinhaltet neben der Beschreibung auch die Personenanzahl der einzelnen Haushaltstypen und darüber hinaus eine Übersicht des jeweiligen mittleren Jahresstromverbrauchs. Dieser Wert stellt den Durchschnitt aller in der Simulation verwendeten Lastprofile dar. Inwiefern der jährliche Stromverbrauch der einzelnen Profile variiert, lässt sich den Angaben hinter den Durchschnittswerten entnehmen.

Abb. 3 visualisiert den zeitlichen Leistungsverlauf für die zuvor beschriebenen Haushaltstypen als das mittlere Leistungsprofil.

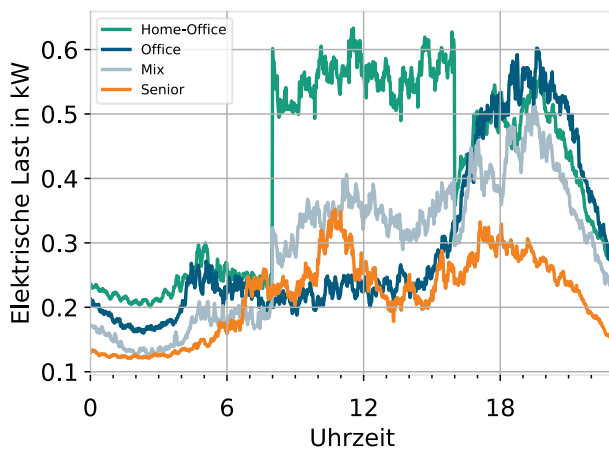


Abb. 3 mittlerer Leistungsverlauf Haushaltstypen
Fraunhofer ISE

Abb. 4 visualisiert darüber hinaus den Anwesenheitsfaktor, der für die vier verschiedenen Haushaltstypen die Anwesenheit zu Hause während Sonnenschein den Gesamtsonnenstunden gegenüberstellt. Dieser Anwesenheitsfaktor ist bei den beiden Haushaltstypen »Home-Office« und »Senior« höher als bei »Office« und »Mix«.

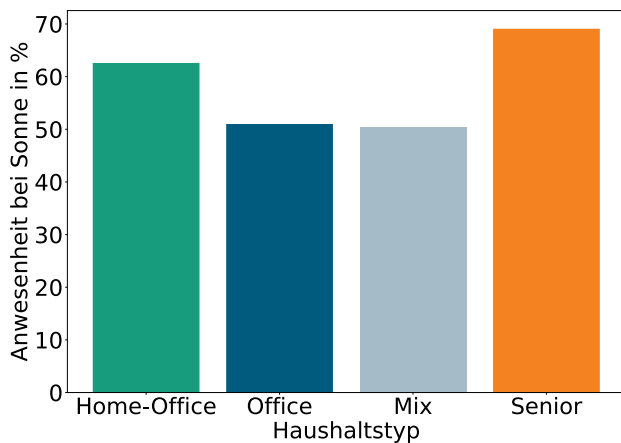


Abb. 4 Anteil der Anwesenheit zuhause bei Sonnenstunden zu Gesamtsonnenstunden für alle vier Haushaltstypen über ein Jahr.
Fraunhofer ISE

Lohnt sich bidirektionales Laden?

Es ist zu erwarten, dass die Haushalte mit einer hohen Anwesenheit mit der damit verbundenen höheren Leistung in den Mittagsstunden gut für eine Versorgung durch Solarenergie geeignet sind. Für eine überwiegend solare Beladung des Fahrzeuges ist es erforderlich, dass das Fahrzeug tagsüber zu Hause eingesteckt ist.

4.1.2 Elektrofahrzeug

Für die Bewertung von solaren Ladekonzepten ist die verfügbare Batteriekapazität des E-Fahrzeuges für die Nutzung als Solarspeicher entscheidend. Diese wird im Wesentlichen durch die Kapazität der in Tab. 2 zusammengefassten Fahrzeugklassen bestimmt.

| Klasse | Batteriekapazität | Verbrauch | Nutzung |
|--------------|-------------------|------------------------|--------------------|
| Kleinwagen | 23,00 kWh | 15,80 kWh/100 km | städtisch/ländlich |
| Mittelklasse | 55,00/62,00 kWh | 18,20/16,60 kWh/100 km | städtisch/ländlich |
| Luxusklasse | 78,10 kWh | 16,30 kWh/100 km | städtisch/ländlich |

Tab. 2 Betrachtete E-Fahrzeug-Klassen¹

Diese sind in drei unterschiedliche Fahrzeugtypen aufgeteilt: Kleinwagen, Mittelklasse und Luxusklasse. Es wird angenommen, dass alle Fahrzeuge rückspeisefähig sind und somit bidirektionales Laden unterstützen.

¹ Batteriekapazität und Verbrauch von EV-Database (2023). Als Beispielmodelle werden für den Kleinwagen der Fiat 500e, für die Mittelklasse der VW ID.3 und ID.4 sowie für die Luxusklasse der Tesla Model 3 verwendet.

Zusätzlich ist aber auch die Fahrleistung der einzelnen Haushalte entscheidend. Je weniger Kapazität zum Fahren benötigt wird, desto mehr Batteriekapazität kann für andere Anwendungen genutzt werden. Abb. 5 stellt die mittleren Wegstrecken der Haushalte dar. Die Gruppe „Office“ hat die längste mittlere Wegstrecke und kommt auf die höchste Jahresfahrleistung.

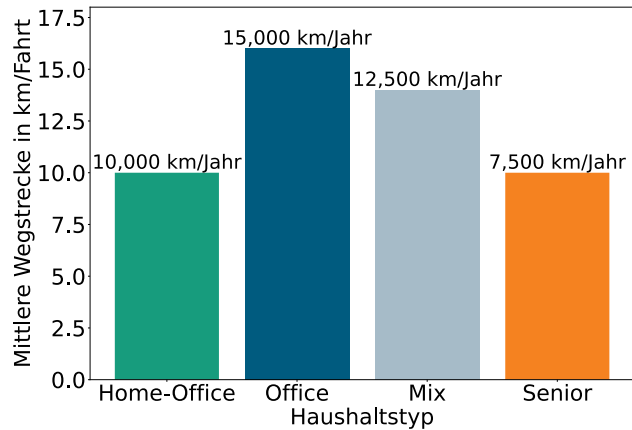


Abb. 5 Mittlere Wegstrecken und Jahresfahrleistung der Haushalte
Fraunhofer ISE

4.1.3

PV-Anlage

Für die Frage, wie gut das Erzeugungsprofil aus Photovoltaik bereits zum Verbrauchsverhalten passt, ist auch die Kurvenform der Erzeugung entscheidend. Hier werden folgende Unterscheidungen vorgenommen:

- **Anlagengröße:** Die Größe der PV-Anlage wird zwischen 5 bis 10 kW variiert.
- **Standort:** Es werden zwei Standorte miteinbezogen: München und Hamburg. Eine Anlage in München hat eine höhere Einstrahlung als eine Anlage in Hamburg und erzeugt damit auch mehr Strom.
- **Ausrichtung:** Die Ausrichtung wechselt zwischen Süd- sowie Ost-West-Ausrichtung. Eine optimal süd-ausgerichtete Anlage erzeugt die meiste Energie, eine ost-west ausgerichtete Anlage weist jedoch ein »breiteres« Einspeiseprofil auf und ist so für Eigenverbrauchsanwendungen meist besser geeignet.

4.1.4

Szenarienüberblick und Auswertung

Abb. 6 fasst die zuvor beschriebenen Varianten für Haushalt, E-Fahrzeug und PV-Anlage zusammen. Um auch eine statistisch sinnvolle Aussage treffen zu können, wurden für jede Kombination 10 Variationen betrachtet. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch Veränderungen im zeitlichen Verlauf der Haushaltslast. In der Simulation wurde ein optimaler Betrieb modelliert. Dessen Ziel ist die Maximierung des Eigenverbrauchs durch gezielte Nutzung der Fahrzeugbatterie.

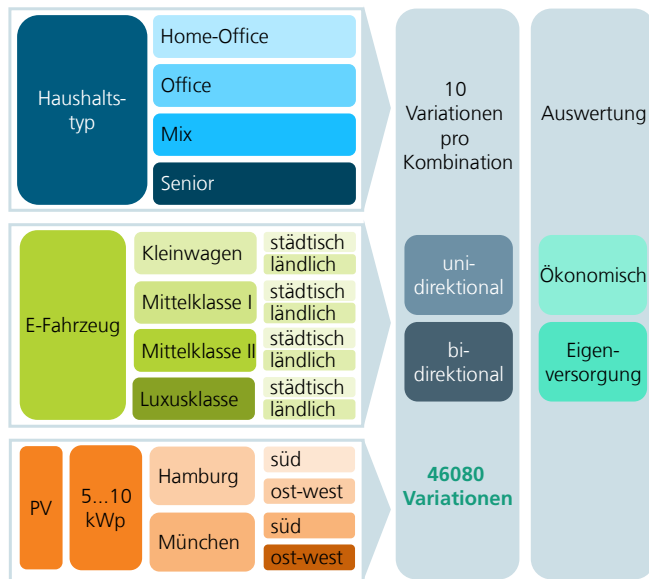


Abb. 6 Zusammenfassung Variationen Fraunhofer ISE

Loht sich bidirektionales Laden?

4.2 Eigenversorgungsquote

Eines der wichtigsten Entscheidungskriterien für Erneuerbare Energien im Haushaltsumfeld ist die Eigenversorgungsquote. Diese ist ein Maß dafür, zu welchem Teil sich ein Haushalt aus der eigenen Erzeugung selbst versorgt. Sie wird berechnet als Quotient von Eigenverbrauch, z.B. von der Erzeugung aus der PV-Anlage durch den Gesamtstrombedarf.

Unsere Simulation zeigt, dass die Eigenversorgungsquote bei einer nach Süden ausgerichteten PV-Anlage nur um circa 1 bis 2 Prozentpunkte höher ist als bei ost-west ausgerichteten PV-Anlage. Darüber hinaus hat die Wahl des Standorts nur einen geringen Einfluss auf die Eigenversorgungsquote. Auch hier liegen zwischen den Anlagen in Nord- und Süddeutschland weniger als 5 Prozentpunkte Unterschied. Generell lässt sich sagen, dass weder der Aufstellungsort noch eine Ausrichtung im Bereich Ost bis West einen signifikanten Unterschied macht und somit keine Begründung gegen eine Photovoltaik-Anlage ist.

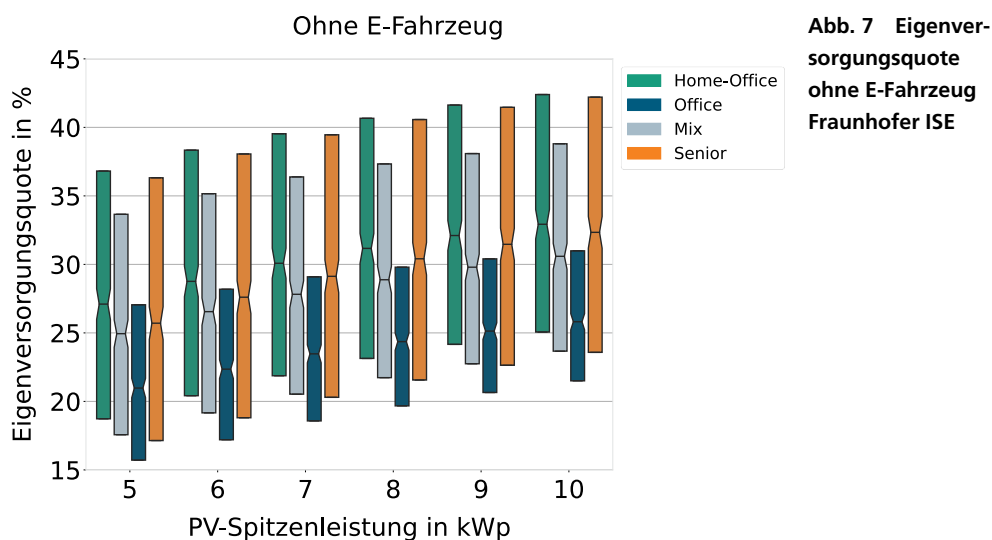
Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die unterschiedlichen Haushaltsgruppen miteinander verglichen.

4.2.1

Eigenversorgung ohne E-Fahrzeug

Im ersten Schritt zeigt Abb. 7 das Ergebnis der Analyse für den Fall ohne Elektromobilität und stellt für alle Kombinationen Haushaltstyp und PV-Anlagengröße die Eigenversorgungsquote dar. Auf der horizontalen Achse ist die Spitzenleistung der PV-Anlage in kWp aufgetragen. Je höher dieser Wert ist, desto mehr Photovoltaik-Strom ist verfügbar. Grundsätzlich ist festzustellen, dass bei größeren PV-Anlagen auch die Eigenversorgungsquote steigt.

Haushaltstypen wie »Home-Office« und »Senior« haben durch ihre in der Regel hohe Anwesenheit zu Hause bei Sonnenstunden (siehe 4.1.1) eine höhere Eigenversorgungsquote als Haushalte der Kategorien »Office« und »Mix«. Die Eigenversorgungsquote steigt darüber hinaus generell mit der installierten Leistung der PV-Anlage.



4.2.2

Eigenversorgung mit E-Fahrzeug

Im zweiten Schritt soll der Einfluss eines E-Fahrzeuges auf die Eigenversorgungsquote analysiert werden. Abb. 8 vergleicht die Eigenversorgungsquote zwischen unidirektional und bidirektional gesteuertem Laden. Gesteuert meint hier, dass die Fahrzeugbatterie zur Maximierung der Eigenversorgung eingesetzt wird, sobald sie angeschlossen ist und Kapazität verfügbar ist.

Generell fällt auf, dass ein Anstieg der Eigenversorgungsquote im Vergleich zum Szenario ohne E-Fahrzeug nur in Fällen hoher PV-Leistung (> 8 kWp) im bidirektionalen Fall zu beobachten ist. Im unidirektionalen Fall ist diese immer niedriger als bei den anderen beiden Fällen. Innerhalb der Haushaltstypen ergeben sich keine Änderungen in der Reihenfolge. Auch mit E-Fahrzeug haben die Haushaltstypen »Home-Office« und »Senior« die höchste Eigenversorgungsquote.

Dass durch das bidirektionale Laden eine im Mittel höhere Eigenversorgungsquote bei großen PV-Anlagengrößen erreicht werden kann, liegt an den neuen Steuermöglichkeiten. Insbesondere profitieren Haushalte, die ohne E-Fahrzeug eine niedrige Eigenversorgungsquote aufweisen. Dies erkennt man an der oberen Grenze des Balkens, die sich kaum verändert. Der untere Wert erhöht sich jedoch für alle Haushaltstypen.

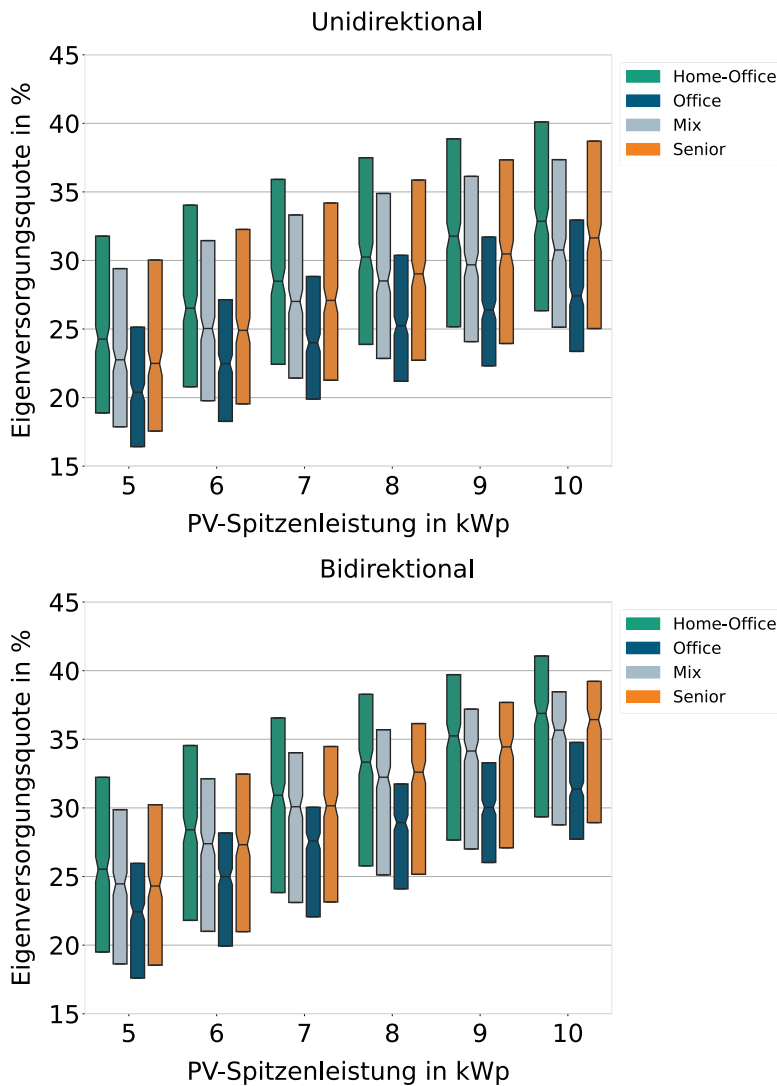
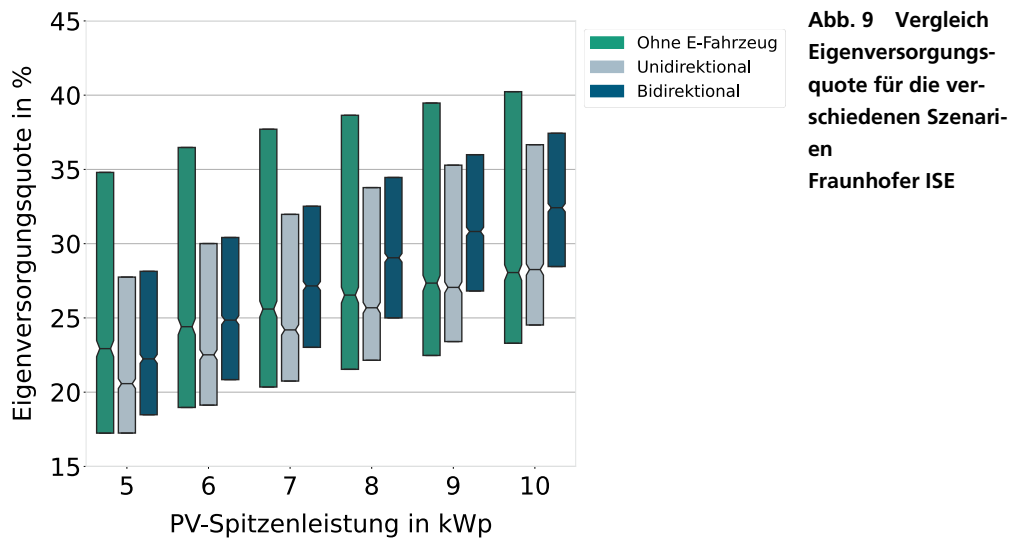


Abb. 8 Vergleich Eigenversorgungsquote für uni- und bidirektionale Fahrzeuge Fraunhofer ISE

Betrachtet man nun die Szenarien untereinander, ohne die Differenzierung in Haushaltstypen, wie in Abb. 9 dargestellt, sieht man, dass die Spannweite der Eigenversorgungsquote im Fall ohne E-Fahrzeug größer ist als im unidirektionalen beziehungsweise bidirektionalen Szenario. Insgesamt liegt der Median, also der mittelste Wert eines Datensatzes, auch in dieser Abbildung beim bidirektionalen E-Fahrzeug am höchsten, dieses hat somit die höchste Eigenversorgungsquote.

Die größere Spannweite des Balkens im Fall ohne E-Fahrzeug lässt sich damit erklären, dass zum einen die Last geringer ist als in den beiden Szenarien mit E-Fahrzeug und somit genauso viel PV-Strom für weniger Last verwendet werden kann. Zum anderen gibt es auch Fälle, in denen eine Speicheroption von Vorteil wäre, da sie überschüssige Energie aufbewahrt, welche in Zeiten hoher Last und geringer PV-Produktion verwendet werden kann.



Betrachtet man die Entwicklung der Eigenversorgungsquote beim Fall ohne E-Fahrzeug und unidirektionalem Laden, sieht man, dass der Wert der Eigenversorgungsquote im letzteren Fall erst bei einer PV-Anlagen-Größe von 10 kWp höher ist als ohne Fahrzeug. Die Eigenversorgungsquote lässt sich demnach durch die Verwendung eines bidirektionalen Fahrzeuges steigern, während sie im unidirektionalen Fall nur bei PV-Anlagen über 10 kWp im Vergleich zum Fall ohne E-Fahrzeug höher ist.

4.3

Ökonomische Betrachtung

Loht sich bidirektionales Laden?

Nach der Betrachtung der Eigenversorgungsquote untersucht dieser Abschnitt die ökonomische Seite. Abb. 10 zeigt die jährlichen Stromkosten der drei Szenarien über der installierten PV-Leistung in kWp.

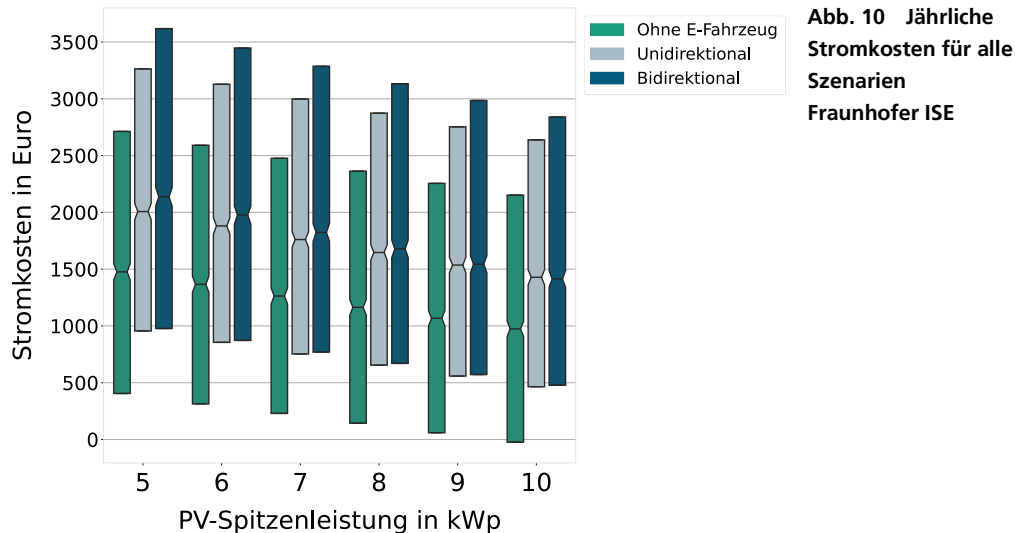


Abb. 10 Jährliche Stromkosten für alle Szenarien Fraunhofer ISE

Als allgemeinen Trend lässt sich hier identifizieren, dass die Stromkosten mit steigender PV-Anlagen-Größe bei allen drei Szenarios sinken. In den Fällen mit E-Fahrzeug sind die jährlichen Stromkosten höher als ohne. Dies lässt sich im unidirektionalen Fall damit erklären, dass die Last durch die zusätzliche Nutzung eines Fahrzeuges höher ist und somit mehr Strom verbraucht wird. Beim bidirektionalen Laden sind die Stromkosten am höchsten im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien. Die Ursache hierfür ist mit dem Wirkungsgrad des Ladegerätes erklärbar. Speist das Fahrzeug den Haushaltsverbrauch wird in aller Regel eine Leistung bereitgestellt, die sehr viel kleiner als die maximale Leistung des Ladegerätes des E-Fahrzeuges ist. Prinzipbedingt weist das Ladegerät in diesem unteren Teillastwirkungsgrad niedrige Effizienzen auf und es muss deutlich mehr Leistung aus der Batterie entnommen werden, die später ggf. teuer wieder eingekauft werden muss.

Ein ähnliches Verhalten ist auch von stationären Batteriespeichern bekannt. Mit der Weiterentwicklung der Systeme wurde auch die Effizienzkurve verbessert. Wird in der Fahrzeugbranche ein Bewusstsein für diese Thematik geweckt, ist hier mit Verbesserungen zu rechnen.

Darüber hinaus fällt auf, dass bei einer hohen PV-Spitzenleistung von 10 kWp die Stromkosten vom bidirektionalen Laden geringer sind als beim unidirektionalen Laden.

Die Stromkosten könnten insbesondere in den E-Fahrzeug Fällen durch zeitvariable Stromtarife gesenkt werden. In diesen Tarifen wird das Laden der Fahrzeugbatterie auf Basis von variablen Stromtarifen optimiert und bei günstigen Tarifpreisen geladen sowie bei hohen Bezugskosten in das Hausnetz entladen (Kasnatscheew und Jenter 2023).

5 Technische Anforderungen

Im Folgenden wird zunächst die generelle Funktionalität von bidirektionalem Laden mit der Einbindung in das eigene Heimenergiesystem beschrieben. Anschließend werden die wesentlichen Komponenten rund um die Ladestation für bidirektionales Laden erläutert.

5.1 Stromflüsse Hausenergiesystem

Um ein E-Fahrzeug als Batterieheimspeicher verwenden zu können, muss sowohl dieses über bidirektionale Ladetechnik verfügen als auch eine geeignete Wallbox verwendet werden, die den Stromfluss in beide Richtungen realisiert. Über diese kann das E-Fahrzeug geladen oder auch ins Hausnetz entladen werden. Somit kann beispielsweise überschüssige Energie, die zu Zeiten hoher Produktion aus der eigenen PV-Anlage jedoch gleichzeitig geringer Last produziert wird, in der Fahrzeugbatterie zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht werden. Alternativ ist auch die Einspeisung ins öffentliche Netz möglich.

In Abb. 11 werden die wichtigsten Komponenten und deren Stromflüsse bei bidirektionalem Laden abbildet. Um die zuvor ermittelten Potenziale zu erreichen, müssen die Stromflüsse über ein Energiemanagement gesteuert werden. Hierfür ist die Überwachung des Leistungsflusses am Netzverknüpfungspunkt notwendig, wofür entweder dedizierte Stromsensoren oder perspektivisch auch Smart Meter eingesetzt werden. Smart Meter dienen nicht nur als moderne Messeinrichtung, sondern auch als Kommunikationsmodul, welches als Schnittstelle zwischen Stromverbrauchern sowie -erzeugern agiert und somit eine wichtige Komponente in einem System mit bidirektionaler Ladetechnik darstellt (BMWK 2023).

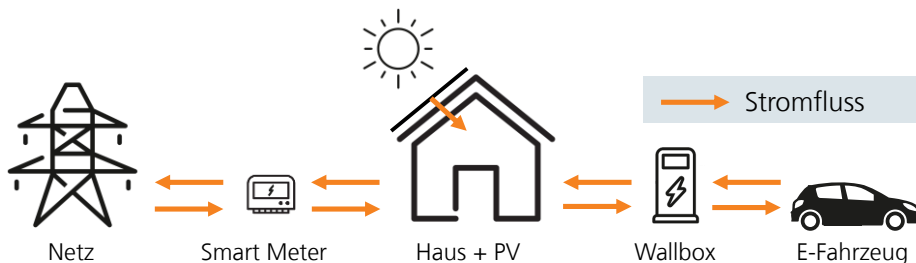


Abb. 11 Stromflüsse bidirektionales Laden
Fraunhofer ISE

5.1.1 Energiemanagement

Um bidirektionales und gesteuertes Laden zu realisieren, ist ein Energiemanagementsystem innerhalb des eigenen Zuhauses unabdingbar, da es die Energieflüsse der steuerbaren Einheiten regelt. In unserem Fall sind das Leistungsvorgaben für die Wallbox des E-Fahrzeuges. Zusätzlich kann dies ein stationärer Batteriespeicher oder eine Wärmepumpe sein (Nymoen, Kimpel und Kaschade 2022).

Abb. 12 zeigt, wie eine bidirektionale Wallbox über ein Energiemanagementsystem eingebunden wird. Für die Leistungssteuerung ist darauf zu achten, dass die Kommunikation von Energiemanagementsystem zu Wallbox miteinander kompatibel ist. Üblicherweise kommen hier Internetbasierte Kommunikationsprotokolle wie modbus-TCP oder OCPP (Open Charge Point Protokoll) zum Einsatz.

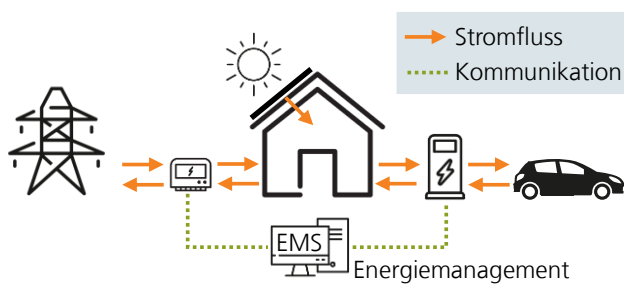


Abb. 12 Einbindung bidirektionale Wallbox über Energiemanagement
Fraunhofer ISE

Ein wichtiger Schritt, um die Implementierung bidirektionaler E-Fahrzeuge zu ermöglichen, war die Finalisierung und Verabschiedung des ISO-Standards 15118-20 im April 2023, in welcher die Kommunikation zwischen dem E-Fahrzeug und der Wallbox für den bidirektionalen Fall definiert wird (ISO 2023, Köllner 2022, ADAC 2023).

Darüber hinaus unterstützt die Verfügbarkeit der Kommunikationsschnittstelle EEBUS die Interoperabilität sowie den Datenaustausch zwischen den einzelnen Komponenten des Energiemanagementsystems (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020). Energiemanagementlösungen, die PV-optimiertes bidirektionales Laden anbieten, sind zwar angekündigt, jedoch noch nicht auf dem Markt verfügbar.

5.1.2 Bidirektionale Wallbox und E-Fahrzeug

Beim Laden eines E-Fahrzeuges lässt sich grundsätzlich zwischen dem Laden mit Wechselstrom (AC) und Gleichstrom (DC) unterscheiden. Abb. 13 zeigt die beiden unterschiedlichen Möglichkeiten zum Beladen eines E-Fahrzeuges.

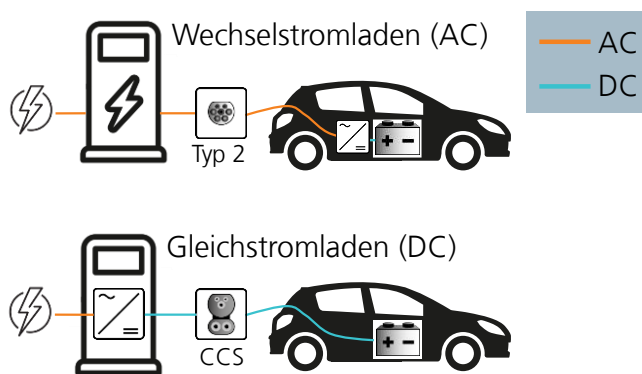


Abb. 13 Unterschied zwischen Ladung mit Wechselstrom (AC) und Gleichstrom (DC)
Fraunhofer ISE

Während eine E-Fahrzeug-Batterie Gleichstrom zum Ent- und Aufladen benötigt, liefert das Stromnetz Wechselstrom. Beim Wechselstromladen ist daher der Gleichrichter im Fahrzeug eingebaut, wobei sich beim Gleichstromladen die Leistungselektronik, sprich der Gleichrichter und der Laderegler, in der Ladestation beziehungsweise Wallbox befindet. Für das Wechselstromladen eignet sich der sogenannte Typ 2 Stecker, welcher in Europa am weitesten verbreitet ist. Für das Gleichstromladen wird häufig das Combined Charging System (CCS) oder der CHAdeMO-Stecker verwendet. Die Erweiterung des CCS-Steckers, auch CCS-Typ 2-Stecker genannt, kann über das Gleichstromladen hinaus, zudem mit Wechselstrom laden (Waffenschmidt 2022).

Welche Ladestandards können nun zum bidirektionalen Laden verwendet werden? Mithilfe des CHAdeMO-Standards können Fahrzeuge tatsächlich schon seit mehreren Jahren bidirektional laden. Dieser Standard unterstützt jedoch ausschließlich Laden mittels Gleichstroms und findet überwiegend, da ursprünglich in Japan entwickelt, in

Fahrzeugen asiatischer Hersteller Anwendung in Form eines eigenen Ladekabels (Waffenschmidt 2022, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020).

Technische Anforderungen

In Europa gilt der CCS-Typ 2 als vorherrschendes Ladekabel, welcher den Vorteil hat, dass sowohl Gleichstrom- als auch Wechselstrom-Laden möglich ist. Die Implementierung des Kommunikationsstandards ISO 15118-20 bietet auch bei diesem Steckertypen die Möglichkeit des Rückspeisens und daher die Erweiterung zum bidirektionalen Laden.

Insbesondere Letzterer gilt aufgrund seiner weitreichenden Verwendung in Europa in Kombination mit der Verabschiedung der ISO 15118-20 als besonders vielversprechend, um einen flächendeckenden Einsatz von bidirektionalen Fahrzeugen zu ermöglichen (Nymoer, Kimpel und Kaschade 2022). Es existieren bereits mehrere Hersteller, die bidirektionale Wallboxen ankündigen.

Bisher ist die Fähigkeit zum bidirektionalen Laden und somit zum Einsatz als Batterie-speicher auf wenige Fahrzeugmodelle beschränkt. Der ADAC veröffentlichte dazu eine Übersicht, in denen neben Herstellern aus dem asiatischen Raum wie Nissan und Mitsubishi, auch europäische Firmen wie VW oder Skoda genannt werden. Hier muss jedoch angemerkt werden, dass laut ADAC die Modelle teilweise noch in der Vorbereitungsphase zum bidirektionalen Laden stecken (ADAC 2023).

Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 erwähnt, wird in Fahrzeugen asiatischer Hersteller überwiegend der CHAdeMO-Stecker verwendet. Zu diesen Fahrzeugen gehört laut ADAC beispielsweise der Nissan Leaf, welcher bereits bidirektional lädt (Waffenschmidt 2022). In europäischen E-Fahrzeugen wird dagegen der CCS-Standard eingesetzt, wie zum Beispiel für die ID-Reihe von Volkswagen oder den Skoda Enyaq. Diese stehen jedoch nach aktuellem Stand noch in der Vorbereitung zur Bidirektionalität.

Während die technischen Anforderungen an die praktische Umsetzung des bidirektionalen Ladens schon weitestgehend erfüllt werden können, liegt die Herausforderung in rechtlichen und regulatorischen Hürden. Aktuell mangelt es noch an der fehlenden Regulatorik, die die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Verwendung von bidirektionalen Laden festlegt (Kasnatscheew und Jenter 2023, Nymoer, Kimpel und Kaschade 2022).

Derzeit gibt es noch keine einheitliche Definition von mobilen Speichern, die Anwendung im nationalen und europäischen Gesetzesrahmen finden könnte. In Gesetzen und Normen fehlt eine klare Abgrenzung, ob sich diese sowohl auf stationäre als auch mobile Speicher beziehen. Die dadurch verursachte Unsicherheit bei der Planung von bidirektionaler Ladeinfrastruktur sowie Implementierung von Geschäftsmodellen könnte durch das Schaffen eines klaren rechtlichen Rahmens überwunden werden (BNE 2022). Laut BNE (2022) fehlt es den beteiligten wirtschaftlichen Akteuren an Rechtssicherheit bezüglich Stromkosten für den zwischengespeicherten Strom. Darunter zählen unter anderem Netzentgelte, Stromsteuer sowie die Konzessionsabgabe.

6 Schlussfolgerungen

- Um die Energie- und Verkehrswende voranzutreiben, ist die Verwendung von gesteuerten Laden, unabhängig ob uni- oder bidirektional, notwendig.
- E-Fahrzeuge steigern den Strombedarf, weshalb große PV-Anlagen erforderlich sind, um eine hohe Eigenversorgungsquote zu erhalten und Stromkosten zu senken.
- Bidirektionales Laden erhöht die Eigenversorgungsquote insbesondere bei großen PV-Anlagen ab einer Größe von 10 kWp.
- Um Verluste zu minimieren und somit ebenso die Stromkosten zu verringern, sollte auf eine effiziente Ladeinfrastruktur geachtet werden.
- Die für die Umsetzung von bidirektionalen Laden notwendigen Technologien und Standards können weitestgehend erfüllt werden.
- Bidirektionale Ladestationen bieten die Möglichkeit einer Notstromsteckdose, um auch bei Ausfall des öffentlichen Stromnetzes ausgewählte Verbraucher betreiben zu können.

- ADAC, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club. 2023. *Das Elektroauto als Stromspeicher fürs Haus: So funktioniert bidirektionales Laden*. 16. 05. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/bidirektionales-laden/>.
- Anatolij Kasnatscheew, Adrian Jenter. 2023. *Factsheet Bidirektionales Laden: Voraussetzungen, Anwendungsfälle, Ausblick*. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/publikationen/Broschueren/Factsheet_Bidirektionales_Laden.pdf.
- BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 2023. *Smart Meter: Intelligente Messsysteme für die Energiewende*. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/smart-meter.html#:~:text=Ein%20Smart%20Meter%2C%20auch%20intelligentes,S mart%2DMeter%2DGateway%E2%80%9C\)%3A](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/smart-meter.html#:~:text=Ein%20Smart%20Meter%2C%20auch%20intelligentes,S mart%2DMeter%2DGateway%E2%80%9C)%3A).
- BNE, Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. 2022. *Positionspapier "Bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen" - Energiepolitische Handlungsempfehlungen, um das Potential von mobilen Speichern zu erschließen*. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.
- Bundesnetzagentur. 2023. „EEG-Registerdaten und -Fördersätze.“ Zugriff am 2. 5 2023. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/artikel.html.
- Bundesregierung. 2023. *EEG 2023 - Ausbau erneuerbarer Energien massiv beschleunigen*. 01. 03. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972#:~:text=Um%20das%20neue%20Ausbauziel%20f%C3%BCr,Verdoppelung%20des%20Anteils%20am%20Gesamtstromverbrauch>.
- EV-Database, Electric Vehicle Database. 2023. *Current and Upcoming Electric Vehicles*. <https://ev-database.org/#sort:path~type~order=.rank~number~desc|range-slider-range:prev~next=0~1200|range-slider-acceleration:prev~next=2~23|range-slider-topspeed:prev~next=110~350|range-slider-battery:prev~next=10~200|range-slider-towweight:prev~next=0~2>.
- Figgner, Jan, David Haberschusz, Christopher Hecht, Sebastian Zurmühlen, und Dirk Uwe Sauer. 2022. „Speichermonitoring BW 2.0.“ Aachen.
- Fraunhofer ISE. 2023. „Energy Charts.“ *Energy Charts*. <https://energy-charts.info/charts/power/chart.html?l=de&c=DE>.
- ISO, International Organization for Standardization. 2023. *ISO 15118-20:2022 - Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements*. <https://www.iso.org/standard/77845.html>.
- Julian Brandes, Markus Haun, Daniel Wrede, Patrick Jürgens, Christoph Kost, Hans-Martin Henning. 2021. *WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM - Update Klimaneutralität 2045*. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>: Fraunhofer.
- Kasnatscheew, Anatolij, und Adrian Jenter. 2023. *Factsheet Bidirektionales Laden - Voraussetzungen, Anwendungsfälle, Ausblick*. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen and Automotive Baden-Württemberg.

- Köllner, Christiane. 2022. *Wann kommt bidirektionales Laden von E-Autos?* 25. 05. <https://www.springerprofessional.de/ladeinfrastruktur/elektrofahrzeuge/wann-kommt-bidirektionales-laden-von-e-autos-/18217570>.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 5 "Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung". 2020. *Factsheet "Vehicle To Grid" - Kundennutzen und Netzintegration*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Nymoer, Håvard, Tim Kimpel, und Christopher Kaschade. 2022. *Initiative „Bidirektionales Laden“ - Positionspapier zu notwendigen regulatorischen Anpassungen im Kontext des bidirektionalen Ladens*. Berlin: nymoer strategieberatung gmbh.
- Umweltbundesamt, a. 2023. *Stromverbrauch*. 22. 03. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>.
- Umweltbundesamt, b. 2023. *Car Sharing*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/car-sharing#umweltvorteile-von-car-sharing>.
- Waffenschmidt, Eberhard. 2022. *Bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen - aktueller Stand der Technik*. 16. 11. <https://www.sfv.de/bidirektionales-laden-aktueller-stand-2022>.