

Solares Laden von Elektrofahrzeugen



STUDIE

Solares Laden von Elektrofahrzeugen

SOLARES LADEN von Elektrofahrzeugen

AUTOREN

Nico Orth, Joseph Bergner, Simon Salehi

Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin

Web: solar.htw-berlin.de



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

VERSION

Version 1.0 (April 2025)

FÖRDERUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTS

WALLBOX-INSPEKTION

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 01MV23027B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PARTNER DES FORSCHUNGSPROJEKTS WALLBOX-INSPEKTION

ADAC e.V.

Fraunhofer ISE

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	4
1 MARKT FÜR ELEKTROFAHRZEUGE UND WALLBOXEN	7
1.1 Analyse des Marktes für Elektrofahrzeuge	7
1.2 Technische Eigenschaften: Elektrofahrzeuge	9
1.3 Technische Eigenschaften: Wallboxen	13
2 EIGENSCHAFTEN INTELLIGENTER UNIDIREKTIONALER AC-WALLBOXEN	18
3 VERGLEICH DER ENERGIEFLÜSSE IN HAUSHALTEN MIT SOLARANLAGE UND ELEKTROFAHRZEUG	28
Welche Messdaten liegen dieser Untersuchung zugrunde?	28
Worin unterscheidet sich das Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge in den verschiedenen Haushalten?.....	30
Wann werden Elektrofahrzeuge geladen?	32
Wie hoch fällt der Solaranteil an der Fahrzeugladung aus?	33
Um wie viel Prozentpunkte steigert ein Batteriespeicher den Solaranteil?	37
Um wie viel Prozentpunkte steigert eine intelligente Ladestrategie den Solaranteil an der Fahrzeugladung?.....	38
Welche Empfehlungen zur Steigerung des Solaranteils an der Fahrzeugladung lassen sich aus den Betriebsdaten ableiten?	41
Wie hoch sind die Autarkiegrade vollelektrifizierte Haushalte mit Elektroauto	

und Wärmepumpe?	42
Um wie viel Prozentpunkte steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad? ..	44
ANHANG	47
A.1 Methodik zur Bestimmung der Steigerung des Solaranteils durch das Überschussladen.....	47
LITERATURVERZEICHNIS	49

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
BAT	Batteriespeicher
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
DOD	Entladetiefe (engl. depth of discharge)
EA	Elektroauto
EMS	Energiemanagementsystem
OBC	On-Board-Charger (deutsch Ladegerät)
WB	Wallbox
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
SUV	Sport Utility Vehicles

Kurzfassung

Im Fokus dieser Studie steht das solare Laden von Elektrofahrzeugen. Die Untersuchung wirft einen umfassenden Blick auf das Marktumfeld und die Technik für Elektrofahrzeuge und Wallboxen in Deutschland und analysiert die Energieflüsse in 730 Haushalten mit Solaranlage und Elektrofahrzeug. Ende 2030 sollen mindestens 15 Millionen vollelektrische PkW auf den deutschen Straßen fahren, so das Ziel der Bundesregierung. Allerdings ist der Markthochlauf der Elektromobilität bisher verhalten. Ende 2024 waren es 1,65 Millionen Elektrofahrzeuge, das sind nur 3 % aller PKW. 381 000 neue Elektroautos wurden im Jahr 2024 zugelassen - 27 % weniger als im Jahr zuvor. So ist die Zielmarke mit den aktuellen Regelungen nicht zu erreichen. Auch auf dem Weg zur effizienten Nutzung der Solarenergie beim Laden der Elektrofahrzeuge gibt es noch einige technische Herausforderungen, wie diese

Studie zeigt. Bei einer minimalen Ladeleistung von 1,4 kW erreichen im Mittel nur 76 % der erzeugten Solarenergie die Fahrzeugbatterie, siehe Bild 1. Bei einer Leistung von 11 kW sind es immerhin 90 %. Damit liegen die Wirkungsgrade der Fahrzeugladegeräte jedoch noch weit hinter den Maßstäben zurück, die ähnlich leistungsstarke Wechselrichter von PV-Speichersystemen setzen. Weiteres Einsparungspotenzial besteht im Eigenverbrauch der Elektrofahrzeuge: 150 W bis 350 W verbraucht die Bordelektronik vollelektrischer PKW. Auf der anderen Seite bieten die großen Batterien in den Fahrzeugen hohe Reichweiten und genügend Flexibilität für die Anpassungen an eine solaroptimierte Ladung. Erfreulich ist, dass die Funktionalität des solaren Ladens mittlerweile zur Standardausstattung vieler aktueller Wallboxen gehört, wie Bild 2 verdeutlicht.



Bild 1 Ausgewählte Kennzahlen von Elektrofahrzeugen. Daten: ADAC [1], [2] und Sevdari et al. [3].

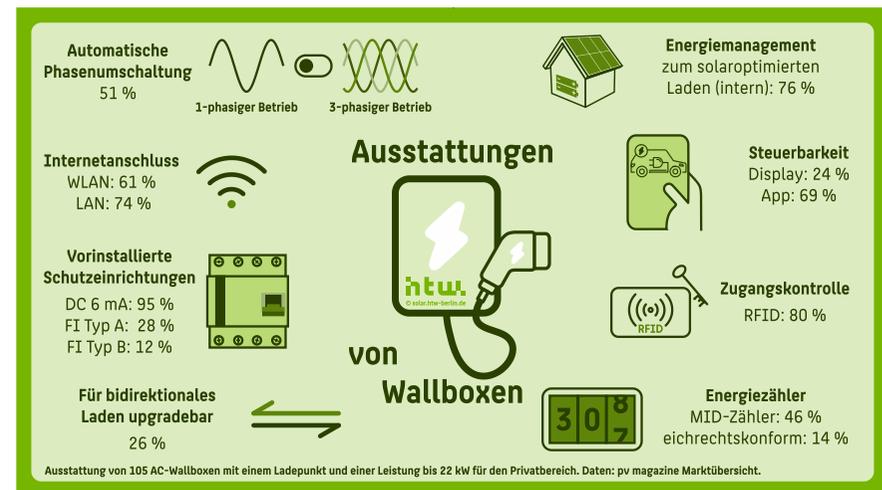


Bild 2 Die Ausstattungen der Wallboxen auf dem Markt variiert stark. Ein Blick in das Datenblatt oder die Betriebsanleitung vor der Auswahl einer Ladelösung lohnt sich. Daten: pv magazine Marktübersicht [4].

Auch die automatische Phasenumschaltung zwischen dem ein- und dreiphasigen Betrieb ist mittlerweile weit verbreitet. Für das bidirektionale Laden sind bisher hingegen nur wenige Wallboxen vorbereitet.

Ein Highlight der Studie ist die Analyse von 730 Haushalten mit Solaranlage und Elektrofahrzeug. Die Messdaten wurden anonymisiert von der Fronius International GmbH bereitgestellt. Der Solaranteil an der Fahrzeugladung beträgt im Mittel 53 %, wie Bild 3 zeigt. Der Batteriespeicher steigert den Solaranteil an der Fahrzeugladung im Durchschnitt um 9 Prozentpunkte. In drei Viertel der Haushalte beträgt die Steigerung des Solaranteils durch einen Heimspeicher weniger als 15 %. Vereinzelt Haushalte profitieren jedoch mit Steigerungen über 30 % deutlich stärker von der Batterie. Erstaunlich ist: In 68 % der analysierten Haushalte wird das Elektrofahrzeug an mehr als 3 Tagen die Woche geladen – und das vornehmlich zur Mittagszeit. Dabei kommt in der Regel die Funktionalität des dynamischen Überschussladens zum Einsatz,

durch die die Ladeleistung von der Wallbox automatisch an den solaren Überschuss angepasst wird. Gegenüber dem herkömmlichen, ungesteuerten Laden des Elektrofahrzeugs direkt bei Ankunft und mit maximaler Leistung, lässt sich mit der Überschussregelung der Solaranteil im Mittel um 25 Prozentpunkte steigern. Welchen Einfluss weitere Faktoren wie das Ladeverhalten oder die Ladehäufigkeit auf die Ergebnisse haben, ist ab Seite 28 nachzulesen.

Empfehlungen für die Steigerung des Solaranteils lassen sich aus den Messdaten ebenfalls ableiten und sind in Bild 4 zusammengefasst. Darunter: Ladungen entsprechend dem solaren Angebot planen, Elektrofahrzeug regelmäßig an die Wallbox anschließen und mit überschüssigen Solarstrom laden sowie die Ladestation nach der Größe der Solaranlage auswählen.

Das mit einer größeren Photovoltaikanlage höhere Solaranteile an der Fahrzeugladung erzielt werden können, zeigt die Analyse der Messdaten in Bild 5 eindrucksvoll: Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 10 000 km/a bis

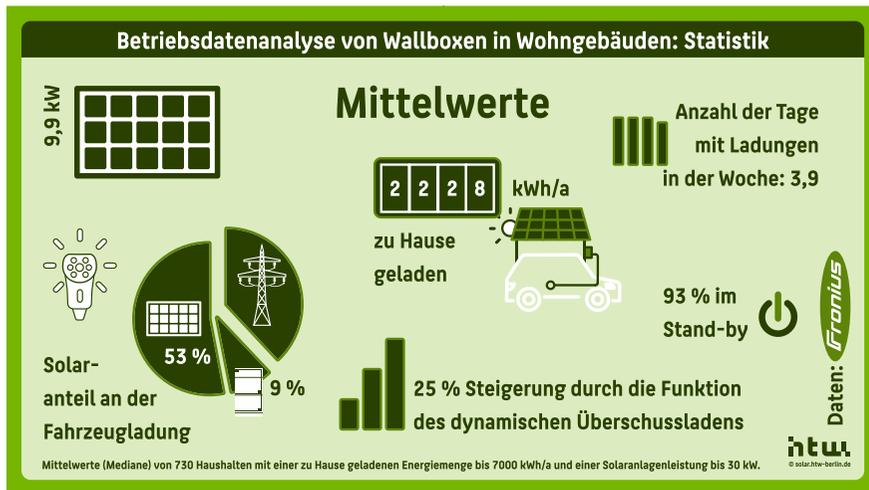


Bild 3 Mittelwerte (Median) unterschiedlicher zentraler Kenngrößen der Betriebsdatenanalyse von Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius International, Stichprobe: 730.



Bild 4 Empfehlungen der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, wie sich der Solaranteil an der Fahrzeugladung steigern lässt.

15 000 km/a können Haushalte mit einer Solaranlage zwischen 5 kW bis 10 kW im Mittel 46 % des zu Hause geladenen Energiebedarfs ihres Elektrofahrzeugs decken. Bietet das Dach hingegen Platz für 15 kW bis 20 kW, erhöht sich der Solaranteil an der Fahrzeugladung im Mittel auf 62 Prozent. Große PV-Anlagen wirken sich daher besonders positiv auf den ökologischen Fußabdruck des Elektrofahrzeugs aus.

Das mit dem selbsterzeugten Solarstrom nicht nur der Energiebedarf des Elektroautos gedeckt werden kann, ist Bild 6 zu entnehmen. Im Durchschnitt deckt die Solaranlage in den untersuchten Wohngebäuden 47 % des Haushaltsstrombedarfs und der Energieaufnahme des Elektroautos. Die Haushalte, in denen zusätzlich ein Batteriespeicher installiert ist, sind im Mittel sogar zu 73 % autark. Damit reduzierten die analysierten Wohngebäude ihren jährlichen Strombezug aus dem Netz durch eine Solaranlage mit Batteriespeicher von durchschnittlich 6900 kWh/a auf 1900 kWh/a.

Ist zusätzlich eine Wärmepumpe installiert, reicht in den Wintermonaten der selbsterzeugte Solarstrom in der Regel zur Deckung des Stromverbrauchs des Haushalts sowie des Elektrofahrzeugs und der elektrischen Heizung nicht aus. Trotzdem lassen sich im Mittel immerhin noch 59 % des jährlichen Strombedarfs über den direktverbrauchten und zeitlich verschobenen Solarstrom decken. In diesen vollelektrifizierten Haushalten steigert der Heimspeicher in 9 von 10 Fällen den Autarkiegrad um mehr als 13 Prozentpunkte. In 10 % der Fälle erhöht sich der Autarkiegrad sogar um mehr als 27 Prozentpunkte. Gerade im Winter, wenn die Wärmepumpe arbeitet und die Solarenergie knapp ist, zählt dabei jedes Solarmodul.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung: Das Laden des Elektrofahrzeugs mit überschüssigem Solarstrom erhöht den Autarkiegrad gegenüber dem ungesteuerten Laden bei Ankunft im Mittel um 6 Prozentpunkte.

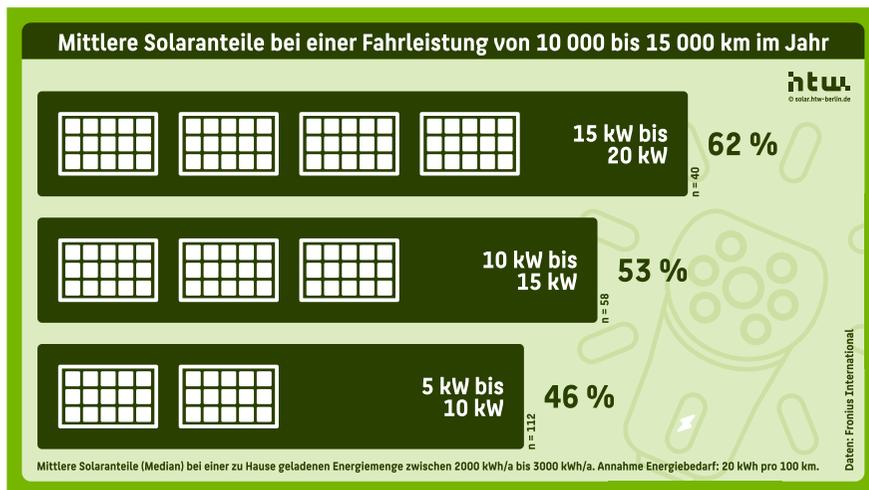


Bild 5 Je größer die PV-Anlage ausgelegt wird, desto höher fällt auch der Solaranteil an der Fahrzeugladung aus. Daten: Fronius International.

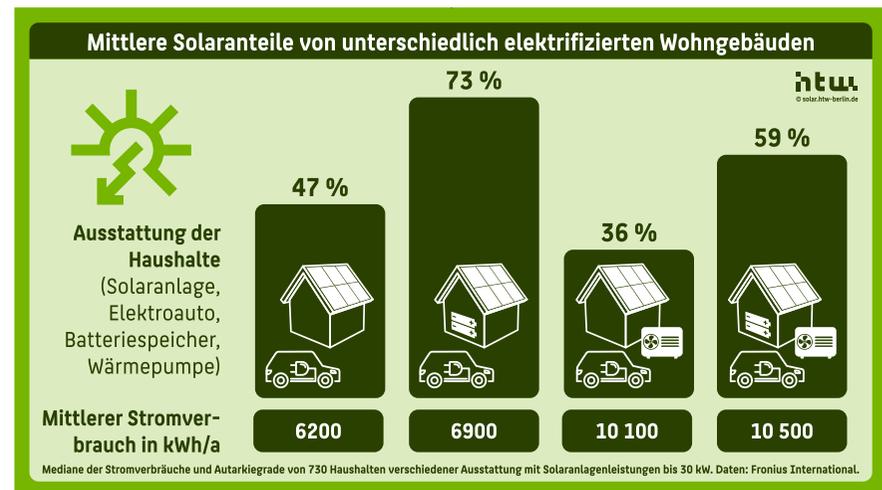


Bild 6 Einfamilienhäuser mit PV-Anlage, Elektroauto, Wärmepumpe und Batteriespeicher erreichen im Mittel einen Autarkiegrad von 59 %. Daten: Fronius International.

1 Markt für Elektrofahrzeuge und Wallboxen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Markt für batterieelektrische Personenkraftfahrzeuge (PKW) in Deutschland und wirft einen Blick auf die Technik der Elektrofahrzeuge. Weiterhin werden technische Eigenschaften von unterschiedlichen AC-Ladelösungen (Wallboxen) präsentiert.

1.1 Analyse des Marktes für Elektrofahrzeuge

Die folgende Analyse ermöglicht einen Einblick in die aktuellen Entwicklungen im Markt für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Sie basiert auf den **Daten des Kraftfahrtbundesamts** (KBA) [5]–[7]. Die Zählungen des KBA umfassen alle Kraftfahrzeuge sowie Kraftfahrzeuganhänger. Diese Analyse fokussiert sich jedoch ausschließlich auf den Markt der deutschen PKW. Bild 7 vergleicht die jährlich neu zugelassenen PKW der vergangenen neun Jahre in Deutschland. Von 2016 bis 2019 wurden jährlich 3,4 Mio. bis 3,6 Mio. neue Fahrzeuge zugelassen. Mit Beginn der COVID-19-Pandemie ist jedoch ein starker Einbruch im Neuwagenmarkt zu beobachten. Die PKW-Neuzulassungen pro Jahr reduzierten sich in den vergangenen fünf Jahren auf 2,6 Mio. bis 2,9 Mio. Fahrzeuge. Darüber hinaus sind Bild 7 die Neuzulassungen der rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge sowie deren Anteil am gesamten PKW-Markt zu entnehmen. Während 2016 nur 11 000 batteriebetriebene PKW neu zugelassen worden sind, waren es 2020 bereits 194 000 und im Jahr 2023 sogar 524 000 Elektrofahrzeuge. **Im Jahr 2024** war die Zahl der Neuzulassungen mit **381 000 Elektrofahrzeugen** erstmalig rückläufig. In Summe sind 2,1 Mio. Elektrofahrzeuge seit 2016 in Deutschland neu zugelassen worden. Während die Elektroautos 2023 noch einen Anteil von 18,4 % der insgesamt neuzugelassenen PKW ausmachten, lag der Anteil 2024 nur noch bei 13,5 %. Zum Vergleich: In anderen europäischen Ländern sind Elektroautos bei den Neuzulassungen deutlich

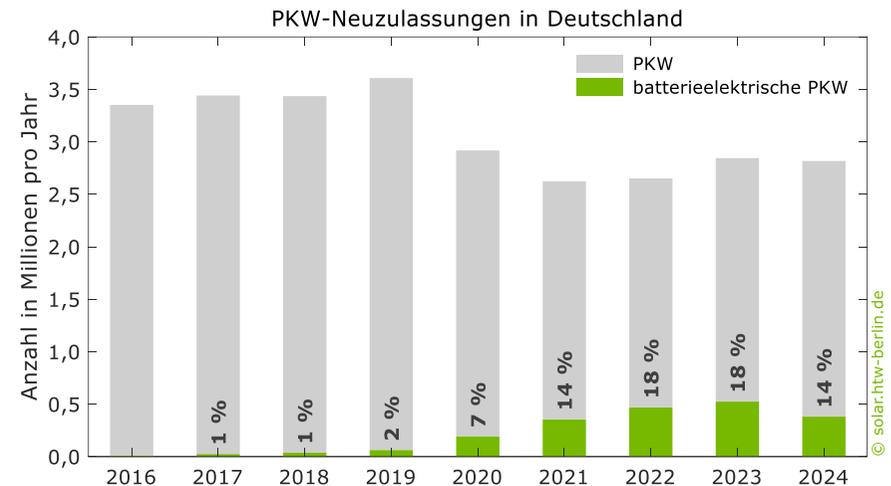


Bild 7 Anzahl der jährlich neu zugelassenen Personenkraftwagen (PKW) in Deutschland. Daten: Kraftfahrtbundesamt.

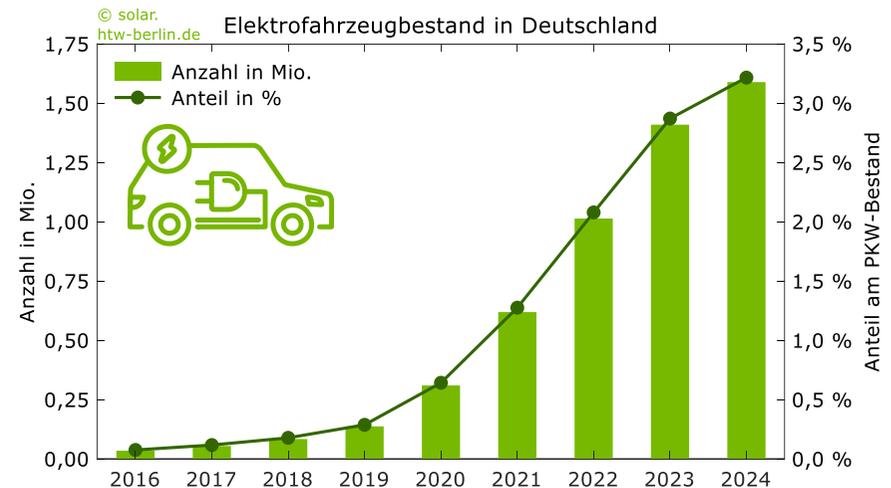


Bild 8 Bestand der batterieelektrischen PKW in Deutschland. Daten: Kraftfahrtbundesamt.

stärker vertreten – Norwegen (88,9 %), Dänemark (51,5 %), Niederlande (28,1 %) oder Frankreich (16,9 %) [8]. Als Hauptgrund für den Einbruch können die hohen Anschaffungskosten und der Wegfall der staatlichen Förderungen für den Erwerb von Elektrofahrzeugen gesehen werden. Hinzu kommt eine insgesamt angespannte politische und wirtschaftliche Situation [9]–[11].

Bild 8 stellt den aktuellen Bestand der Elektrofahrzeuge in Deutschland dar. Wie die Daten des KBA zeigen, ist die Anzahl der batterieelektrischen Bestandsfahrzeuge seit 2016 steigend. Während 2016 gerade einmal 34 000 Elektrofahrzeuge zum Fahrzeugbestand zählten, waren es 2020 bereits 309 000. Den **Elektrofahrzeugbestand** am 01.01.2025 bezifferte das KBA auf **1,65 Millionen batteriebetriebene PKW** [12]. Die Differenz zwischen dem Bestand an Elektrofahrzeugen und den Neuzulassungszahlen ist mit mehreren hunderttausend PKW allerdings beträchtlich. Die Unterschiede sind dabei jedoch nicht primär auf eine vorzeitige Alterung der Fahrzeuge zurückzuführen, sondern vermutlich eher auf Mitnahmeeffekten von Subventionen. Das Center of Automotive Management (CAM) geht bspw. davon aus, dass ein Großteil der im Bestand fehlenden Fahrzeuge nach Einzug der Förderprämie und der Mindesthaltedauer (im Jahr 2022 z. B. bis zu 9000 € und 6 Monate) als junge Gebrauchte gewinnbringend ins Ausland weiterverkauft wurden [13].

Darüber hinaus ist Bild 8 der Anteil der Elektroautos am **deutschen PKW-Bestand** zu entnehmen. Ausgehend von einem Gesamtbestand von 49,4 Millionen PKW in Deutschland ergibt sich bei 1,65 Millionen batteriebetriebenen PKW ein **Anteil von 3,3 %** [12].

Die Daten des KBA erlauben weitere detailliertere Jahresanalysen. Unter den neu zugelassenen batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen dominierten 2024 die sogenannten Sport Utility Vehicles (SUV). Die auch als Geländelimousinen bekannten Fahrzeuge hatten einen Anteil von 51 % an den neuen Elektroautos, wie Bild 10 zeigt. Unter diese Fahrzeugkategorie fallen auch die im Jahr 2024

Realitätscheck: 15 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2030?



Nach den Zielen der Ampelregierung sollten bis 2030 „mindestens 15 Millionen vollelektrische PKW“ auf den deutschen Straßen fahren [14]. Wie sich der deutsche Bestand an Elektrofahrzeugen entwickeln könnte, stellt Bild 9 in 3 Szenarien gegenüber. Ausgehend von Bestands- und Neuzulassungszahlen des Jahres 2024 wurde ein jährlicher Zuwachs an neuen Elektroautos von 20 %, 40 % und 60 % angenommen. Zudem wurde ein maximales Alter von 10 Jahren berücksichtigt sowie die Neuzulassungen auf maximal 3,6 Mio./a beschränkt. Bei einer Wachstumsrate von 20 %/a beträgt der Elektroautobestand Ende 2030 nur 5,5 Mio. Einheiten und liegt damit klar hinter den Zielen zurück. Bei einem sehr ambitionierten Wachstum von 60 %/a müssten bereits im Jahr 2026 fast 1 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen werden. Gleichzeitig dürften 2029 und 2030 keine Verbrenner verkauft werden. Aber auch dann: Die Marke von 15 Mio. Elektrofahrzeugen würde um über 1 Mio. Einheiten verfehlt werden.

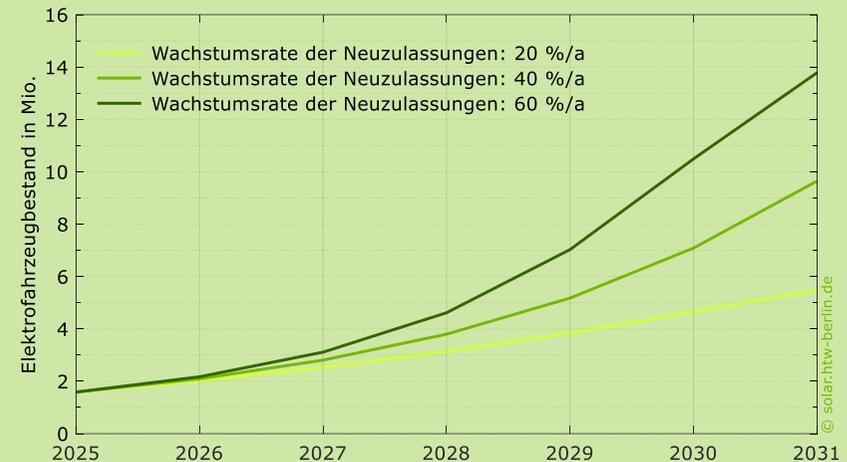


Bild 9 Möglicher Bestand der Elektroautos in Deutschland bis 2030 bei unterschiedlichen Wachstumsraten.

am häufigsten zugelassenen Elektroautomodelle: Tesla Model Y (7,9 %), Skoda Enyaq (6,6 %) und VW ID.4/5 (5,7 %). Zum Vergleich: Der SUV-Anteil an allen neu zugelassenen PKWs im Jahr 2024 beträgt lediglich 30 %. Damit sind die SUV bei den Elektrofahrzeugen überrepräsentiert. Dies kann mit der Nutzungspräferenz oder mit dem Fehlen von attraktiven Klein- und Mittelklasse Fahrzeugen begründet werden. Bei den Top-Marken für batteriebetriebene PKW in Deutschland liegt VW (16,3 %) vor BMW (11,1 %) und Tesla (9,9 %). Auffällig ist, dass der chinesische Hersteller BYD bei den deutschen PKW-Neuzulassungen mit einem Anteil von 0,7 % bisher kaum in Erscheinung tritt. Global sind BYD und Tesla die Marktführer bei batterieelektrischen PKW [15]. Wird die Marketing- und Vertriebsstrategie verbessert, ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren der Anteil von BYD auch in Deutschland noch deutlich steigen wird [15]. Weltweit wurden etwa 11 Mio. Elektrofahrzeuge verkauft, etwa 10 % mehr als im Jahr 2023. Dabei wurden allein in China etwa 7 Mio. (63 %) der batterieelektrischen Fahrzeuge neu zugelassen [16].

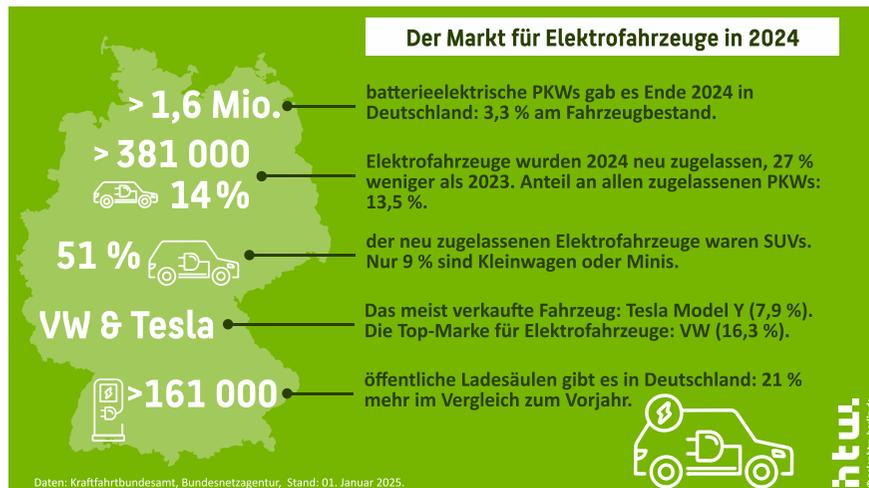


Bild 10 Zahlen und Fakten zum deutschen Markt für Elektrofahrzeuge im Jahr 2024. Daten: Kraftfahrtbundesamt und Bundesnetzagentur, Stand: 01/2025.

1.2 Technische Eigenschaften: Elektrofahrzeuge

Je nach Hersteller und Fahrzeugmodell unterscheiden sich die Lithium-Ionen-Batterien, die häufig in den Unterboden der Elektroautos verbaut sind. Der Energieinhalt der Fahrzeugbatterie entscheidet maßgeblich über die Reichweite der Elektrofahrzeuge mit. Klar ist: Für den Betrieb des Fahrzeugs ist die entnehmbare Energiemenge entscheidend. Sie wird umgangssprachlich auch als Nettokapazität oder **nutzbare Speicherkapazität** bezeichnet. Wie die Analysen des ADAC zeigen, ist allerdings bei der Hälfte der Fahrzeughersteller keine klare Aussage zur nutzbaren Speicherkapazität zu finden. Häufig ist nur die Bruttokapazität oder Nennwerte angegeben [17]. Die Brutto-, Nominal- oder Nennkapazität hat für den Fahrzeugbetrieb allerdings keinen direkten Nutzen und täuscht über den real entnehmbaren Energieinhalt hinweg. Der Grund ist bereits aus der Heimspeicherbranche bekannt: Autohersteller und Batterieanbieter schränken in der Regel bewusst die **Entladetiefe** (engl. Depth of Discharge, DOD) des Systems ein. Dies dient unter anderem als Alterungs- und Tiefenentladungsschutz [18].

Bild 11 zeigt die auf Herstellerangaben basierende Nettokapazität von 88 in der ADAC-Datenbank aufgeführten Elektrofahrzeugen (Stand: 3/2025) [1]. Die aus der Fahrzeugbatterie entnehmbare Energiemenge variiert je nach Fahrzeug und Modell. Mit 21 kWh weist der Fiat 500e die kleinste, der Lucid Air mit 112 kWh die größte nutzbare Speicherkapazität auf. Der Mittelwert beträgt 70 kWh mit einer großen Dichte um 60 kWh und 80 kWh. Der Median liegt bei 75 kWh. Die Batterien in den Elektroautos sind damit im Mittel in etwa um den Faktor 9 größer als die 2024 in den deutschen Privathaushalten verbauten Heimspeicher (Mittelwert: 8,2 kWh) [19].

Die **Reichweite** eines batteriebetriebenen PKW wird neben der nutzbaren Speicherkapazität maßgeblich vom Stromverbrauch des Fahrzeugs bestimmt.

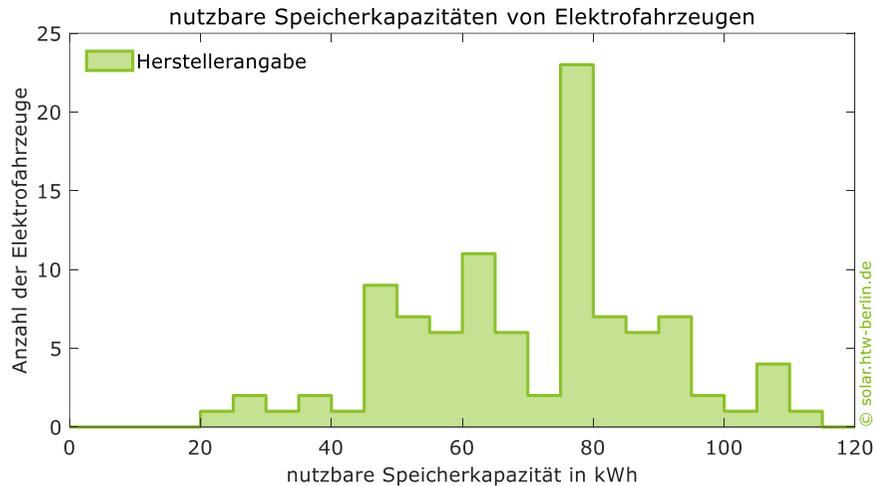


Bild 11 Nutzbare Speicherkapazität der Batterien von 88 unterschiedlichen Elektrofahrzeugen. Mittelwert: 70 kWh, Median: 75 kWh. Daten: ADAC, Stand: 3/2025.

Der Stromverbrauch wird insbesondere von drei Faktoren beeinflusst [20]:

- Fahrverhalten
- Einsatzbedingungen
- Design des Fahrzeugs

Vereinfacht ausgedrückt gilt z. B. folgendes: Je schneller das Auto gefahren wird und je geringer die Außentemperatur ist, desto geringer ist die Reichweite. Die Mehrverbräuche in der kalten Jahreszeit können beachtlich sein. Insbesondere bei Kurz- und Pendelstrecken, wenn die Außentemperatur unter dem Gefrierpunkt liegt [22], [23]. Der höhere Verbrauch liegt zum einen an der Erwärmung des Innenraums, die nicht wie bei Verbrennungsmotoren zum Großteil aus der Abwärme des Motors generiert werden kann, sondern über die Entladung der Batterie realisiert werden muss. Zum anderen lassen sich die Mehrverbräuche durch den Schutz der Batterie vor einer beschleunigten Alterung begründen. Die Batterie wird mitunter vor der Ladung oder im Betrieb

Aufbau und Ladeverfahren eines Elektrofahrzeugs



Die zentrale Komponente des Elektrofahrzeugs stellt die Hochvoltbatterie dar, die sich zwischen den beiden Achsen des PKW befindet und bisher fast ausnahmslos mit Lithium-Ionen-Zellen bestückt ist. Die Batteriespannung der in Reihen geschalteten Zellen beträgt in den meisten Fällen 400 V, in Ausnahmen 800 V [3]. Das Batteriemanagementsystem regelt u. a. die Ladevorgänge, überwacht die Zellen und schützt sie z. B. vor Tiefentladung. Der Elektromotor bezieht den für den Betrieb benötigten Strom über die Leistungselektronik, die den Gleichstrom der Batterie in Wechselstrom umformt. Über den bidirektionalen Wechselrichter kann bei der sogenannten Rekuperation, Bremsenergie zurück in die Batterie gespeist werden. Der Großteil der Energie muss jedoch über die Ladeinfrastruktur zugeführt werden. Beim kabelgebundenen Laden mit Wechselstrom (AC) wird die elektrische Energie aus dem Stromnetz unter Verwendung von üblicherweise einer oder drei Phasen zunächst in das Fahrzeug übertragen [21]. Das im Auto eingebaute Ladegerät (engl. On-Board-Charger, OBC) übernimmt hauptsächlich die Gleichrichtung des Stroms. Das Laden mit Gleichstrom (DC) erfolgt über eine Ladestation, in der der Wechselrichter integriert ist, meist mit höheren Leistungen.

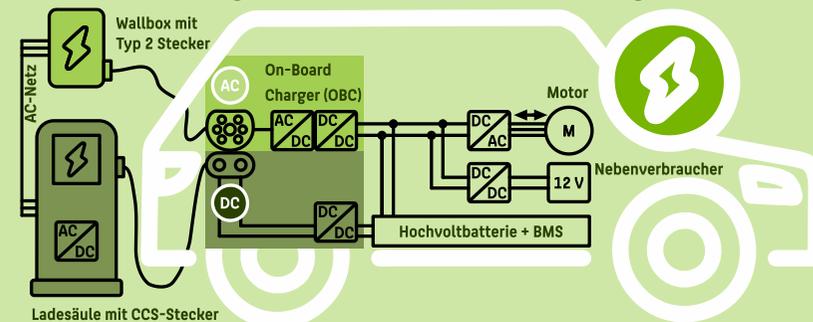


Bild 12 Schematischer Aufbau eines Elektrofahrzeugs.

erwärmt [24], [25]. Darüber hinaus besteht bei niedrigen Temperaturen nur eine begrenzte Fähigkeit zur Rekuperation [23].

Um die Reichweite unterschiedlicher Elektroautos vergleichen zu können, hat der ADAC im Rahmen seines Ecotest die Fahrzeuge unter identischen und kontrollierten Bedingungen geprüft [26]. Damit sind die Unterschiede auf das Fahrzeugdesign zurückzuführen. Bild 13 stellt die auf dem Prüfstand ermittelte **Reichweite** von 88 batteriebetriebenen PKW **in Abhängigkeit der nutzbaren Speicherkapazität und des Verbrauchs** dar. Die Reichweite variiert zwischen 150 km und 610 km. Mit der nutzbaren Speicherkapazität steigt in der Regel auch die Reichweite an. Wie die Einfärbung der Punkte, die den Stromverbrauch des Fahrzeugs widerspiegeln, allerdings zeigt, kann der Stromverbrauch starken Einfluss auf die Reichweite haben. Einige Beispiele:

- Der Hyundai IONIQ 6 kennzeichnet sich durch den effizientesten Antrieb mit einem Stromverbrauch von 15,5 kWh pro 100 km aus. Mit

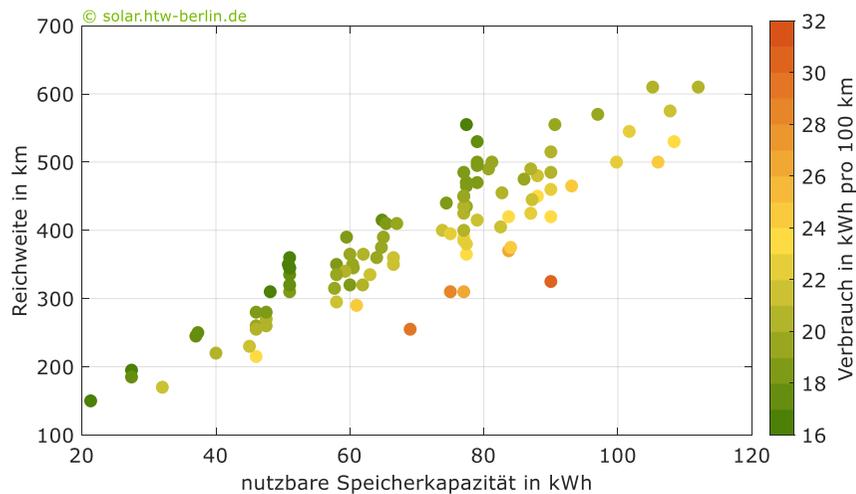


Bild 13 Reichweite von 88 Elektrofahrzeugen in Abhängigkeit der nutzbaren Speicherkapazität und des Verbrauchs. Daten: ADAC.

seiner nutzbaren Speicherkapazität von 77 kWh kommt er unter den Testbedingungen des ADAC insgesamt 555 km weit. Die nutzbare Speicherkapazität der Batterie des VW ID.4 GTX 4Motion beträgt ebenfalls 77 kWh. Aufgrund des höheren Verbrauchs von 26,9 kWh pro 100 km, beträgt die Reichweite allerdings gerade einmal 310 km. Die gleiche Reichweite erreicht der Citroen e-C4 X 136 Shine Pack, allerdings mit einer um fast 40 % kleineren Batterie mit 48 kWh.

Die Beispiele zeigen, dass mit einem sparsamen Antrieb höhere Reichweiten erzielt werden können oder im Umkehrschluss kostenintensive Batteriekapazität eingespart werden kann. Klar ist aber auch, dass große Geländewagen mehr verbrauchen als windschnittige, leistungsschwächere Kleinfahrzeuge. Die Elektroautos benötigen jedoch nicht nur für den Antrieb Energie. Der **Eigenverbrauch** von Nebenaggregaten oder Steuergeräten im 12-V-Boardnetz beträgt im eingeschalteten Zustand zum Teil mehrere hundert Watt, wie die Messungen von Sevdari et al. [3] in Tabelle 1 zeigen. Der hohe Verbrauch der Fahrzeuge von Tesla ist auch auf das eingeschaltete Überwachungssystem, dem sogenannten Sentry Mode, zurückzuführen. Der Verbrauch lässt sich durch das Ausschalten verringern. Die hohen Verbräuche tragen dazu bei, dass das **Laden an einer Haushaltssteckdose** mit einer maximalen Leistung von 2,3 kW deutlich verlustbehafteter ist, als an einer Wallbox oder Ladesäule [27].

Tabelle 1 Messungen von Sevdari et al. bezüglich des Eigenverbrauchs [3].

Fahrzeugmodell	Eigenverbrauch
Nissan Leaf e+	150 W
Renault Zoe 40	200 W
VW ID3 und VW ID4	250 W
Kia EV6 und Kia e-Niro	250 W
Tesla Model 3 und Tesla Model Y	350 W

Durch die geringe Ladeleistung laden die Fahrzeuge über einen langen Zeitraum. Beträgt die Ladezeit bspw. 9 h, bezieht allein die Peripherie bei einem Eigenverbrauch von 333 W, eine Energiemenge von 3 kWh, die nicht in der Fahrzeugbatterie ankommen.

Weitere Verluste beim Laden mit Wechselstrom fallen primär im **Ladegerät des Fahrzeugs**, dem sogenannten **On-Board-Charger (OBC)** an [27]. Der OBC ist das Bindeglied zwischen der Hochvoltbatterie des Fahrzeugs, die Gleichstrom benötigt und dem Stromnetz, das Wechselstrom zur Verfügung stellt, siehe Bild 12. Er ist somit einerseits für die Gleichrichtung des Eingangswchselstroms zuständig. Andererseits muss die Eingangsspannung auf das Niveau der Batteriespannung angepasst werden, die je nach Ladezustand variiert und über einen Hoch- oder Tiefsetzsteller (DC-DC-Steller) realisiert wird. Dieser kann je nach Bauart auch außerhalb des Ladegeräts liegen. In Ausnahmefällen ist der OBC auch direkt im Elektromotor integriert. Dies ist z. B. bei Fahrzeugen von Renault der Fall, die diese Technologie maßgeblich entwickelt haben [28],[29]. Die OBC können ein-, zwei- oder dreiphasig ausgelegt sein. In Europa dominieren die dreiphasigen Produkte, bei denen durch Abregelung von zwei Phasen auch einphasig geladen werden kann [3]. Je nach Modell und Hersteller variiert die **Strombelastbarkeit** der Ladegeräte. Der Ariya von Nissan kann bspw. im ein- als auch dreiphasigen Betrieb bis zu 32 A aufnehmen. Der Model Y von Tesla oder der Enyaq von Skoda können über die AC-Seite hingegen nur mit maximal 16 A geladen werden. Bei den Messungen von Sevdari et al. hat sich bei einigen Fahrzeugen die Fähigkeit gezeigt, im einphasigen Betrieb mehr Strom und damit mehr Leistung aufzunehmen als bei der dreiphasigen Ladung, wie am Beispiel des VW ID4 Pro ersichtlich ist [3]. Möglicherweise wirkt in diesen Ladegeräten eine Leistungsbegrenzung zum Temperaturmanagement, die allerdings erst im dreiphasigen Betrieb aktiv wird. Darüber hinaus können ein-

zelne Fahrzeuge den minimalen Eingangsstrom von 6 A nicht immer verarbeiten und werden erst bei höheren Strömen aktiv [3].

Sevdari et al. haben die Ladeeffizienz von 38 verschiedenen Elektroauto-Modellen der letzten 11 Jahren messtechnisch erfasst und verglichen [3]. Bild 14 ist die Ladeeffizienz von 5 aktuellen, marktrelevanten Fahrzeugen im dreiphasigen und abgeregelten, einphasigen Betrieb zu entnehmen. Wie die Messergebnisse zeigen, fallen die **Ladewirkungsgrade** bei den untersuchten Fahrzeugen im dreiphasigen Betrieb fast ausnahmslos höher als bei der einphasigen Ladung aus. Beim Model Y von Tesla ist der Abfall der Wirkungsgradkurve am stärksten ausgeprägt. Beim minimalen Ladestrom von 6 A ist der Unterschied zwischen dem einphasigen (1,4 kW) und dreiphasigen Betrieb (4,2 kW) in der Ladeeffizienz mit 16 Prozentpunkten beachtlich. Der starke Abfall der Wirkungsgradkurve bei kleinen Strömen und geringen Leistungen lässt sich auch

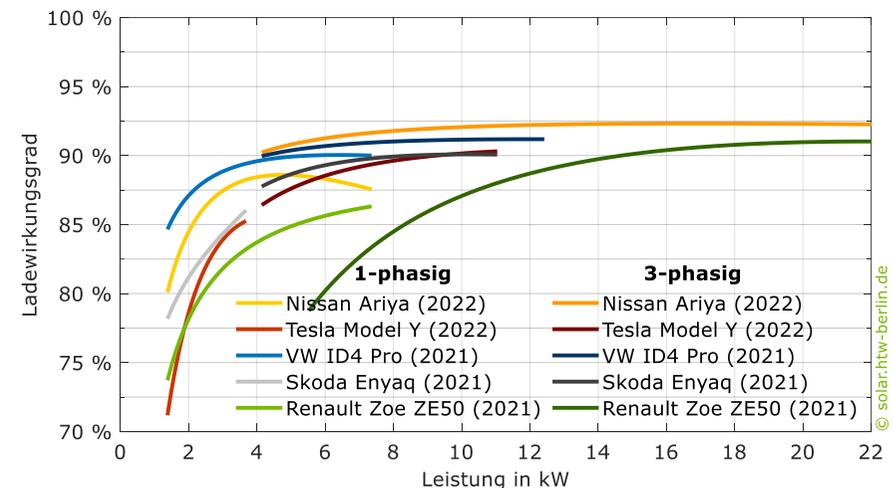


Bild 14 Ladeeffizienz unterschiedlicher Ladegeräte (On-Board-Charger, OBC) von Elektrofahrzeugen in Abhängigkeit des anliegenden Stroms im einphasigen und dreiphasigen Betrieb. Messdaten: Sevdari et. al.

auf die hohen Leerlaufverluste des Fahrzeugs (siehe Tabelle 1) zurückführen, die im unteren Teillastbereich typischerweise dominieren. Die höchste Ladeeffizienz während der einphasigen Ladung erzielt der VW ID4 Pro mit 85 % bis 90 %. Im dreiphasigen Betrieb performt das Ladegerät des Nissan Ariya mit Ladewirkungsgraden zwischen 90 % und 92 % am besten. Darüber hinaus ist auffällig, dass der OBC des Renault Zoe ZE50 R110 bei hohen Strömen eine höhere Umwandlungseffizienz aufweist. So liegt bspw. bei einer Ladeleistung von 5,5 kW der Ladewirkungsgrad im einphasigen Betrieb mit 24 A um fast 7 Prozentpunkte über der Effizienz beim dreiphasigen Betrieb mit 8 A. Dies ist möglicherweise auf die im Motor integrierte Bauweise des OBC zurückzuführen.

Um einordnen zu können, wie hoch die **Energieverluste beim Laden** sind, ein einfaches Rechenbeispiel: Der Verbrauch eines Elektroautos beträgt 20 kWh je 100 km, geladen wird mit einer Ladeleistung von 11 kW. Laut den Messungen von Sevdari et al. variieren die Wirkungsgrade der OBC bei dieser Leistung zwischen 80,7 % und 92,5 % [3]. Aufgrund der Umwandlungsverluste müssen damit 1,5 kWh/100 km bis 3,9 kWh/100 km zusätzlich geladen werden. Die Ergebnisse von Sevdari et al. zeigen eine kontinuierliche Verbesserung der Ladeeffizienz der OBC von 2011 bis 2022 über den gesamten Ladebereich [3]. Im Vergleich zur Ladeeffizienz von Batteriespeichern in Privathaushalten wird allerdings ersichtlich, dass die Wirkungsgrade der OBC deutlich geringer ausfallen. Viele Heimspeichersysteme erzielen über einen großen Leistungsbereich Wirkungsgrade von über 94 % bis 98 % [19], [30]. Würden die Fahrzeughersteller hier aufschließen ließen sich die zusätzlichen Ladeverluste pro 100 km auf weniger als 1,2 kWh/100 km reduzieren.

Einige Wallboxen verfügen über die Funktion, zwischen dem ein- und dreiphasigen Betrieb umzuschalten, dazu mehr in Kapitel 2. Anwender:innen als auch Wallboxhersteller weisen darauf hin, dass die Phasenumschaltung bei

einzelnen Elektroautos wie z. B. Hyundai Kona, Kia eNiro, Peugeot e-208 oder Renault Zoe im eingesteckten Zustand nicht automatisiert funktioniert [31], [32]. Darüber hinaus tolerieren einzelne Fahrzeuge keine Ladeunterbrechungen und setzen die Ladung nicht eigenständig fort.

1.3 Technische Eigenschaften: Wallboxen

Für das Laden von Elektrofahrzeugen über eine Wallbox stehen prinzipiell 2 Möglichkeiten zur Verfügung: **Laden mit Wechselstrom (AC)** und Laden mit Gleichstrom (DC), siehe Bild 12. Während sich das AC-Laden in der Regel auf Leistungen kleiner 22 kW beschränkt und damit dem Normalladen zugeordnet werden kann, besitzen DC-Ladestationen in der Regel eine Ladeleistung zwischen 50 kW und 350 kW [21]. Sie sind damit dem Schnell- und Hochleistungsladen zuzuordnen. Diese Studie beschränkt sich auf das Normalladen mit AC-Wallboxen im privaten Bereich.

Für die folgenden Analysen wurden zum einen mehrere hundert Datenblätter und Betriebsanleitung von AC-Ladelösungen gesichtet. Zum anderen wurden die Ergebnisse der Marktübersicht des pv magazine ausgewertet und zusammengefasst. Das pv magazine veröffentlicht seit 2021 jährlich eine detaillierte Marktübersicht für Elektroauto-Ladelösungen, die auf freiwilligen Herstellerangaben beruht [33]. In ihrer Ausgabe aus dem November 2024 [4] sind 269 AC-Wallboxen von 54 verschiedenen Hersteller aufgeführt – im Markt vertreten sind sogar noch mehr. Der folgende Abschnitt gibt somit einen Überblick über den Stand der Wallboxsystemtechnik.

Unterscheidungsmerkmale

Je nach Ladelösung kann der Anwendungsfall und damit die Zielgruppe variieren. Während einige Produkte für die private Anwendung konzipiert sind,

wurden andere Wallboxen hauptsächlich für das halböffentliche oder öffentliche Laden ausgelegt. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Unterscheidungsmerkmale. Bild 15 stellt einigen von ihnen gegenüber. Zum einen variiert die Leistungsfähigkeit der Wallboxen, die auf die Stromstärke des Anschlusses und die Anzahl der genutzten Leiter für die Ladestation zurückzuführen ist, siehe auch Bild 16. Einige Wallboxen verfügen zudem über die Fähigkeit manuell oder automatisiert zwischen dem **ein- und dreiphasigen Betrieb** umzuschalten. Darüber hinaus werden Wallboxen zum Teil mit oder ohne **Ladekabel** verkauft, die **Anzahl der Lademöglichkeiten** variiert und ob oder wie die Wallbox ans **Internet** angeschlossen ist. Einzelne Hersteller werben mit einer „Kostensparnis bei der Installation dank integriertem DC-Fehlerstromschutz“, allerdings sind 6 mA-Gleichstrom-Fehlerstrom-Schütze mittlerweile standardmäßig in annähernd allen Wallboxen enthalten. Einige Hersteller statten ihre Produkte werksseitig bereits mit den sonst separat zu installierenden

Fehlerstromschutzschalter RCD Typ A oder sogar Typ B aus. **MID- oder eichrechtskonforme Zähler** gehören ebenfalls nicht zur Standardausstattung, da sie nicht immer benötigt werden. Letztere finden vor allem im halböffentlichen und öffentlichen Bereich Anwendung, wo der geladene Strom z. B. zwischen Arbeitgeber:in und Arbeitnehmer:in abgerechnet werden soll. Während einige Wallboxen mit RFID-Modulen zur Zertifizierung ausgestattet sind, setzen andere auf Plug & Charge (PnC), das das **Freischalten** mit Ladekarte erübrigt.

Da sich die Branche noch nicht auf einen Standard geeinigt hat, variieren mit den Wallboxen auch die verwendeten **Kommunikationsprotokolle**. Vertreten sind u. a.: EEBus, SEMP, MQTT, Modbus RTU/TCP (aktiv & passiv), HTTP, OCPP 1.6 bis 2.0.1. Die zur Verfügung stehenden Protokolle können insbesondere dann entscheidend sein, wenn die Wallbox mit einer Solaranlage, einem PV-Speichersystem oder einem Energiemanagementsystem (EMS) kommunizieren soll. Hier haben mitunter Wechselrichter und Energiesystemhersteller wie z. B. Fronius, KOSTAL, sonnen oder SMA einen Vorteil, bei denen die Produkte des heimischen Energiesystems aus einer Hand kommen. Der Grund: Die Kommunikation der Geräte ist untereinander abgestimmt.

Es spricht jedoch auch nichts gegen eine Kommunikation über andere Protokolle, sofern das **Energiemanagement** hierfür geeignet ist. Sehr wichtig für viele Besitzer:innen der Kombination von PV-Anlage, Batteriespeicher, Wallbox und weiteren Großverbrauchern wie Heizstab und Wärmepumpe, ist die Priorisierung von unterschiedlichen Komponenten. Die Priorisierung der Ladung des Heimspeichers oder des Autos ist zum Teil bereits über eine App möglich. Die Einbindung von anderen Großverbrauchern funktioniert häufig nur im Verbund mit Hilfe eines Energiemanagements. Bei einigen Wallboxen besteht zusätzlich die Option dynamische Strompreise automatisiert für die Ladeplanung zu berücksichtigen. Unternehmen wie z. B. Awattar, Octopus oder Tibber bieten bereits heute variable Tarife an, die sich an den Preis-



Bild 15 Auswahl verschiedener Ausstattungsmerkmale, nach denen sich Wallboxlösungen unterscheiden.

schwankungen an der Strombörse orientieren. Das Energiemanagementsystem kann die Ladung des Elektroautos dann in Zeiten günstiger Strompreise verschieben. Seit 2025 muss jeder Energieversorger einen dynamischen Stromtarif anbieten, sodass dies künftig den Normalfall darstellen wird.

Ladeleistung

Die Leistung mit der das Elektrofahrzeug geladen wird definiert die Energiemenge, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums übertragen werden kann. Vereinfacht ausgedrückt: Je höher die Ladeleistung, desto geringer die Ladezeit. Für Schnellladestationen ist dies ein entscheidendes Kriterium, bei längeren Standzeiten wie bspw. beim Arbeitgeber oder am Wohnort ist dies jedoch nur bedingt relevant. Die Leistung wird zum einen durch die Wallbox und zum anderen durch Fahrzeug selbst begrenzt. Stellt die Wallbox z. B. 11 kW bereit, das Fahrzeug kann jedoch lediglich 7 kW beziehen, so fließt auch nur die geringere Leistung. Die Leistung des Fahrzeugs kann zum einen von der begrenzten Leistungsaufnahme durch den OBC eingeschränkt werden. Zum anderen kann das Batteriemanagement z. B. aufgrund sicherheitsrelevanter Einstellungen den Leistungsfluss begrenzen.

Auf die Leistungsfähigkeit der Wallbox wird im Folgenden näher eingegangen. Sie wird von der Strombelastbarkeit der verwendeten Komponenten bestimmt und sollte auf die Elektroinstallation abgestimmt sein. Letzteres hat u. a. den Hintergrund, den Haushaltsanschluss nicht zu überlasten. Wallboxen, die einen sehr hohen Ausgangsstrom abgeben könnten, werden mitunter bereits vor Inbetriebnahme auf niedrigere Ströme entsprechend der maximalen Dauerbelastung der Installation beschränkt.

Der internationale Standard IEC 61851-1 definiert allgemeine Anforderungen an kabelgebundene Ladesysteme für Elektrofahrzeuge. So beträgt der mi-

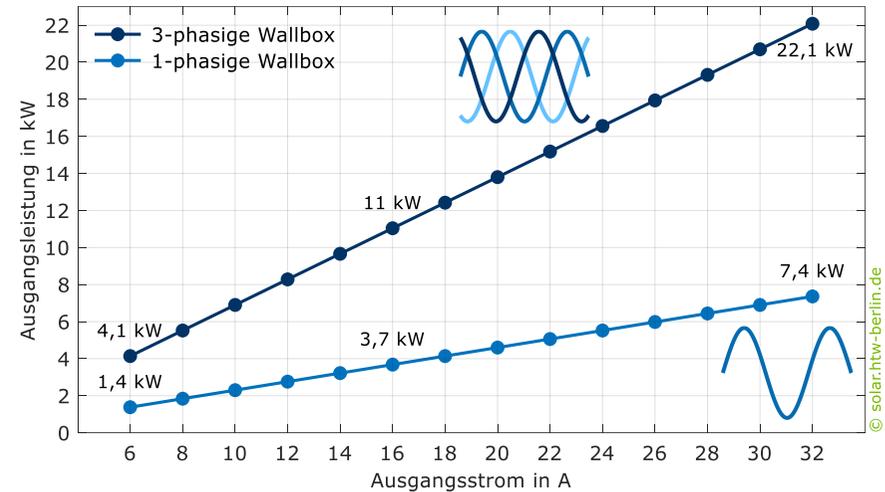


Bild 16 Zusammenhang aus Ausgangsleistung und Ausgangsstrom der Wallbox bei einphasigem Anschluss und dreiphasigen Anschluss mit Sternschaltung.

nimale Ladestrom 6 A und der maximale Strom den die AC-Wallboxen bereitstellen können höchstens 32 A [34]. Weiterhin kann der Anschluss der Wallbox an einer oder drei Phasen erfolgen. Beim dreiphasigen Anschluss erfolgt der Netzanschluss in der Regel in Sternschaltung, die Spannung beträgt 230 V. Mit der Phasenanzahl (n), der Spannung (U) und der Stromstärke (I) lässt sich die Ausgangsleistung der Wallbox (P_{WB}) mit der Formel (1) einfach bestimmen. Für Einphasenwechselstrom ($n = 1$) und Dreiphasenwechselstrom ($n = 3$, Sternschaltung) mit $U = 230 \text{ V}$ gilt:

$$P_{WB} = n \cdot U \cdot I \tag{1}$$

So ergibt sich z. B. bei einer einphasig angeschlossenen Wallbox und einer Stromstärke von 6 A eine Ausgangsleistung von 1,4 kW. Ist sie hingegen dreiphasig in Sternschaltung angeschlossen, beläuft sich die Ausgangsleistung bei gleicher Stromstärke auf 4,1 kW, siehe auch Bild 16. Soll das Elektroauto

mit 22 kW geladen werden, muss die Elektroinstallation auf dreiphasiges Laden mit einer Stromstärke von 32 A ausgelegt sein.

Die maximale Leistung der Wallboxen, auch Nennleistung genannt, variiert je nach Modell. Sie wird meist durch einen Strom von 16 A oder 32 A vorgegeben. Bei einer einphasigen Wallbox beträgt die maximale Netzleistung 3,7 kW bei 16 A. Aufgrund der **Schieflastgrenze** von 4,6 kVA nach der VDE AR 4105, kann keine höhere Netzleistung bezogen werden, da sonst Asymmetrien in der Spannungsversorgung zu erwarten wären. Einige Hersteller wie z. B. SMA setzen bei ihrem EV-Charger aus diesem Grund auf die Kombination von Netz- und Solarstrom. Mit einer integrierten Symmetrieeinrichtung zur Einhaltung der Schieflastgrenze lässt sich eine einphasige Ladeleistung von bis zu 7,4 kW für das Elektroauto realisieren, wenn Solaranlage und Elektroauto auf derselben Phase angeschlossen sind.

Bei dreiphasigen Wallboxen beträgt die maximale Leistung hingegen 11 kW bei 16 A oder 22 kW bei 32 A. In der Praxis ist die Leistung der meisten Wallboxen jedoch auf 11 kW begrenzt. Einerseits sind viele Elektrofahrzeuge nur mit einem 11-kW-Ladegerät ausgestattet, sodass sie eine Leistung von 22 kW über die AC-Schnittstelle nicht aufnehmen könnten [3]. Andererseits musste bis Anfang 2024 eine Anschlussleistung von mehr als 11 kW durch den Netzbetreiber geprüft und genehmigt werden. Die Genehmigung entfällt nun, wenn die Wallbox durch den Netzbetreiber steuerbar ist [35]. Bei den kleineren Wallboxen bis 11 kW besteht hingegen lediglich eine Anmeldepflicht.

Im Betrieb kann unter anderem das **Temperaturverhalten** die Ladeleistung der Wallbox beeinflussen. Während einige Hersteller die Leistung ihrer Ladelösungen mit steigenden Temperaturen kontinuierlich drosseln, schalten andere Hersteller ihre Wallboxen bei Übertemperaturen vollständig ab. Temperatureinflüsse auf die Ladeleistung sind durchaus zu erwarten. Insbesondere, wenn die Ladelösungen im Außenbereich und in Südausrichtung installiert werden,

kann die Sonne diese zusätzlich stark erwärmen. Der Hersteller Hesotec setzt z. B. bei seiner eBox wr30-R, die eine Ladeleistung bis 22 kW ermöglicht, auf einen Axiallüfter. Zusätzlich ist auch ein Heizsystem integriert. Damit lässt sich zwar ein großer Betriebstemperaturbereich ermöglichen, allerdings ist der Betrieb der beiden Systeme mit Verlusten verbunden. Viele Wallboxen haben eine zulässige Betriebstemperatur bis 50 °C, sodass eine verschattete Installation von den Herstellern gefordert wird und notwendig ist. Bei Außentemperaturen bis 40 °C, wie sie auch in Deutschland vorkommen können, kann das Betriebsfenster bei passiver Kühlung stark eingeschränkt sein.

Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb

Klar ist: Ist das Fahrzeug nicht an die Ladestation angeschlossen befindet sich die Wallbox im Bereitschaftsmodus (engl. Stand-by). Im Stand-by-Betrieb kann die Wallbox allerdings auch verweilen, wenn sie mit dem Fahrzeug verbunden ist und z. B. im Rahmen der solaren Ladung oder dem Laden mit dynamischen Stromtarifen auf ein Freigabesignal durch das Energiemanagement wartet. Wie die Analyse von 849 unterschiedlichen Ladeprofilen von Elektrofahrzeugen aus dem Monitoring-Portal des Wallbox-Herstellers Fronius in Kapitel 3 zeigt, werden die Autos nur zwischen 400 h/a bis 1400 h/a aktiv geladen. Anders formuliert: Im Mittel befinden sich die Wallboxen **93 % (8180 h/a) im Stand-by-Betrieb**. Daher sollte der Stand-by-Verbrauch der Wallbox nicht vernachlässigt werden.

Je nach Wallbox, Modell und Ausstattung variiert die Leistungsaufnahme im Bereitschaftsmodus, wie die Marktübersicht für Wallboxen und Ladesäulen des pv magazine zeigt [4]. Bild 17 ist der von 28 Herstellern angegebener Stand-by-Verbrauch von 105 unterschiedlichen Wallboxen zu entnehmen. Die Datenbank des pv magazine wurde dabei nach AC-Wallboxen für den privaten Bereich gefiltert, die eine maximale Leistung von 22 kW aufweisen und nur

über einen Ladepunkt verfügen. Manche Hersteller geben nur für ausgewählte Wallboxen ihres Produktportfolios einen Stand-by-Verbrauch an. Einige Anbieter weisen in ihren Anleitungen darauf hin, dass der Stand-by-Verbrauch mit der Helligkeit des Displays oder von LED-Statusleuchten variieren kann. Sie geben daher häufig einen Leistungsbereich bei einer Helligkeit von 0 % bis 100 % an. In Bild 17 ist bei diesen Produkten der Maximalwert dargestellt. Bei der Angabe zur Leistungsaufnahme „kleiner als“, konnte lediglich der angegebene Wert verwendet werden. Die **Leistungsaufnahme im Bereitschaftsmodus variiert** nach den Herstellerangaben **zwischen 0,6 W und 20 W**. 101 der 105 Wallboxen beziehen gleich oder weniger als 10 W, die Hälfte der Wallboxen sogar weniger als 4 W. Bei 50 % der Wallboxen liegt die Leistungsaufnahmen zwischen 2 W bis 6,5 W.

Ist ein Display, W-Lan-, LTE- oder RFID-Modul verbaut, fällt der Wert tendenziell höher aus. Das jedoch energiesparsamere Komponenten oder intelligente

Abschaltkonzepte eine entscheidende Rolle spielen können, zeigen zwei von der Ausstattung ähnliche Wallboxen. Während die Witty share von Hager 20 W im Stand-by-Betrieb bezieht, sind es bei der Zaptec Pro nur 3 W. Unter Berücksichtigung der Verweilzeit im Bereitschaftsmodus von z. B. 8200 h pro Jahr fällt der Energiebezug mit 164 kWh/a oder 25 kWh/a sehr unterschiedlich aus. Einzelne Hersteller weisen darauf hin, dass sich der Wert auf den Schlaf-Modus bezieht. Das heißt: Die Wallbox hat im Leerlauf-Betrieb eine höhere Leistungsaufnahme, reduziert jedoch den Verbrauch nach einer bestimmten Zeit, solange keine weitere Ladung initiiert wird. Der Enector von Kostal und die Amtron 4 You 310 von Mennekes gehen z. B. nach 10 min in einen Modus mit reduziertem Verbrauch und beziehen laut Hersteller nur noch 1 W. Ist das Auto angesteckt liegt der Stand-by-Verbrauch bei einigen Wallboxen zum Teil deutlich höher. Bei der witty share von Hager steigt er auf 35 W, bei Wallboxen von eSystems MTG GmbH von 1 W auf 8 W [4]. Als einer der wenigen Hersteller differenziert KEBA seinen **Eigenverbrauch in unterschiedlichen Betriebsmodi**. So liegt die Leistungsaufnahme der KeContact P40 laut Hersteller im Stand-by (Leerlauf) ohne angeschlossenes Fahrzeug bei 6,4 W bis 7,2 W. Im angesteckten Betrieb erhöht sich der Eigenverbrauch auf 7,2 W und im ladenden Betrieb auf 10,2 W.

Neben dem Stand-by-Verbrauch der Wallbox können **weitere Komponenten**, die in Verbindung mit der Wallbox installiert wurden, Leistung im Bereitschaftsbetrieb aufnehmen. Darunter zählen z. B. Energiemanager, ein externes Energiemanagementsystem oder auch eine externe Phasenumschaltbox, die das automatische Umschalten zwischen dem ein- und dreiphasigen Betrieb ermöglicht. Während die Phasenumschaltung z. B. bei der Wallbox Gemini von go-e intern realisiert wird, erfolgt die Umschaltung bei einer älteren Wallbox des Herstellers KEBA über den externen Phasenumschalter KeContact S10. Für das Gerät wird ein Eigenverbrauch von 6,1 W angegeben.

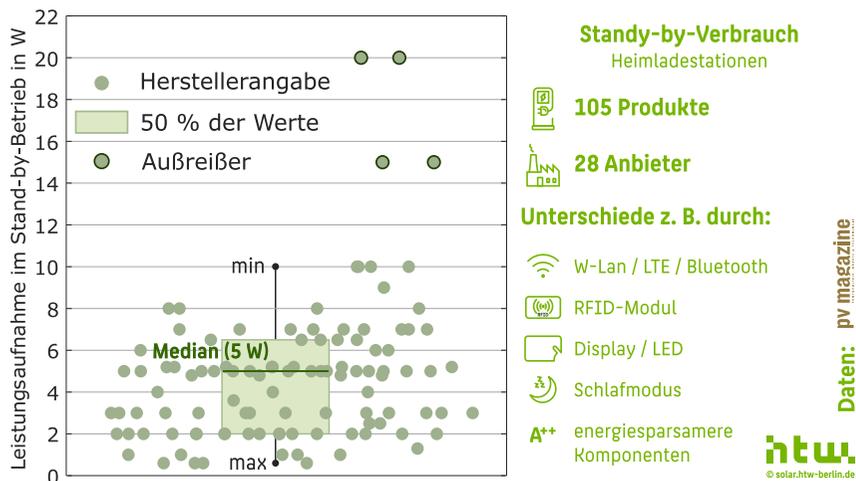


Bild 17 Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb von 105 unterschiedlichen AC-Wallboxen für den Privatbereich bis 22 kW von 28 verschiedenen Anbietern. Datengrundlage: Herstellerangaben in der Marktübersicht des pv magazine.

2 Eigenschaften intelligenter unidirektionaler AC-Wallboxen

Zu den wichtigsten Kaufmotiven der Elektroauto-Besitzer:innen zählen ökologische Gründe, das Fahrerlebnis und die Erwartung niedriger Betriebskosten [36]. Umweltfreundlicher als der Verbrenner ist das Elektrofahrzeug über seine Betriebszeit allemal [37]–[42]. Klar ist aber auch: Den größten ökologischen Vorteil bieten Elektroautos dann, wenn sie mit Strom aus erneuerbarer Energie, z. B. von der eigenen Solaranlage, geladen werden [37]–[42]. Da der eigene Solarstrom im Gegensatz zum Netzstrom nicht mit Umlagen und Abgaben belegt ist, ist es auch ökonomisch attraktiver das Elektrofahrzeug mit sauberem Strom zu laden. Die Korrelation zwischen PV-Anlagenbetreiber:innen und Elektromobilist:innen ist daher besonders ausgeprägt [43]–[47]. Darüber hinaus reduziert die Solarstromanlage das Risiko krisenbedingter Strompreiserhöhungen.

Es gibt **verschiedene Konzepte zum Laden von Solarstrom**. Gemein ist allen: Je öfter und länger das Fahrzeug zwischen Sonnenaufgang und -untergang an

der Wallbox eines Haushalts mit Solaranlage angeschlossen ist, desto höher ist der Solarstromanteil an der Batterieladung. Wer erst in den späten Abendstunden das Fahrzeug laden kann, kann folglich nur wenige solare Kilometer fahren. Das Elektroauto lädt jedoch erst zusätzlichen Sonnenstrom, wenn die Solarstromerzeugung die Last der Haushaltsverbraucher wie Lampen, Kühlschrank oder Waschmaschine übersteigt. Überschüssiger Solarstrom wird dann nicht in das Stromnetz eingespeist, sondern ins Fahrzeug geladen. Wie eine solare Ladung des Elektrofahrzeugs erfolgen kann, lässt sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Ungesteuertes Laden (Bild 18 links)
- Zeitgesteuertes - und Schwellwertladen (Laden mit Freigabesignal, Bild 18 rechts und Bild 19 links)
- Gesteuertes, dynamisches Überschussladen (Bild 19 rechts)

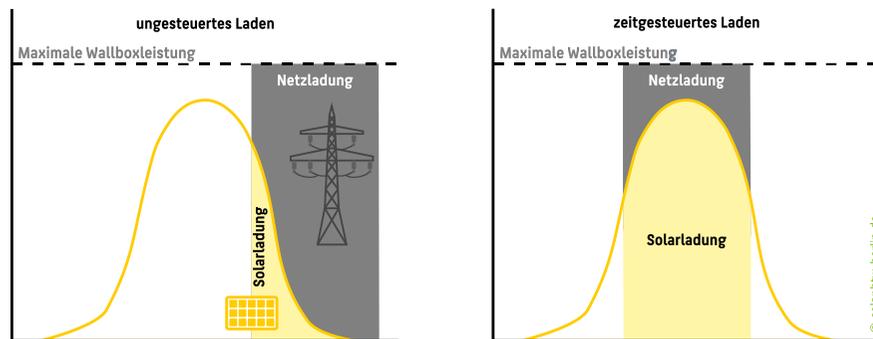


Bild 18 Schematische Darstellung des ungesteuerten Ladens bei Ankunft (links) und gesteuertes Laden nach Zeitschaltuhr (rechts).

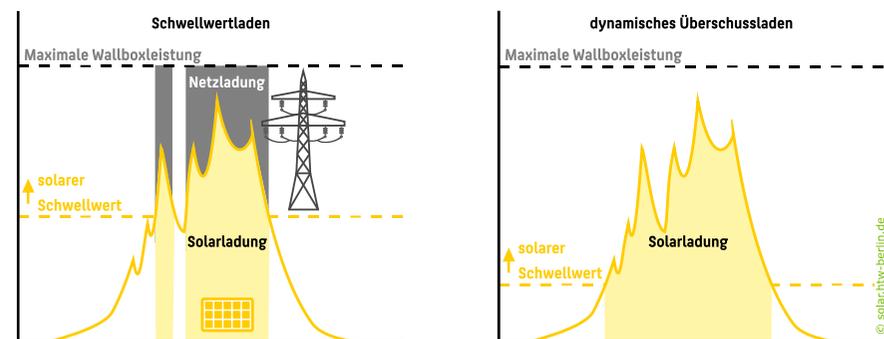


Bild 19 Schematische Darstellung des gesteuerten Ladens bei solarem Überschuss mit Schwellwertregelung (links) und dynamischer, lastfolgender Ladung der solaren Überschussleistung (rechts).

Beim **ungesteuerten Laden** wird das Fahrzeug mit maximaler Leistung geladen, sobald es angeschlossen wird. Ist überschüssiger Solarstrom vorhanden, wird dieser für die Fahrzeugladung genutzt (siehe Bild 18 links). Ein Feldtest der ETH-Zürich zeigt, dass beim ungesteuerten Laden zwischen 5 % und 15 % der Ladung pro Jahr über Solarstrom erfolgen kann [48].

Das Konzept des **zeitgesteuerten Ladens** und des Schwellwertladens ist eng miteinander verknüpft. Beides wird entweder über einen Freigabeschalter (potenzialfreier Kontakt) realisiert oder über das Energiemanagement bzw. die Hausautomatisierung digital angesteuert. So könnte eine Zeitsteuerung die Nutzung der Wallbox stets in die Zeiten günstiger Stromtarife oder hoher Solarstromerzeugung verlagern (siehe Bild 18 rechts). Wird die Ladung bis in die Mittagszeit verzögert, erhöht dies in der Regel den solaren Anteil an der Fahrzeugladung. Solarstromanteile von 10 % bis 50 % bei einem typischen Fahrzeug mit einer Fahrleistung von 15 000 km pro Jahr sind möglich [49].

Ein Beispiel für eine zeitgesteuerte Ladung ist in Bild 20 an einem Wintertag zu

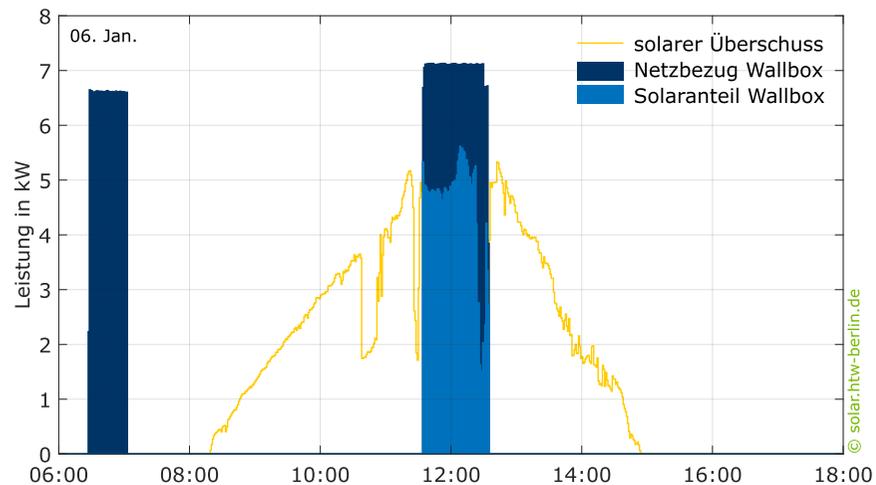


Bild 20 Solare Überschussleistung und Leistungsaufnahme einer Wallbox des Herstellers go-e eines Haushalts. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 min.

sehen. Hier ist die gemessene Leistung des solaren Überschusses, also der Solarerzeugung abzüglich der Haushaltslast, der Ladeleistung eines Fahrzeuges gegenübergestellt. Da die Last gedeckt ist, führt der solare Überschuss um 8:20 Uhr das erste Mal zu einer Netzeinspeisung. Die Überschussleistung steigt bis mittags weiter an und fällt dann, wie für die Solarenergie üblich, zum Ende des Tages ab. Um 10:40 Uhr, 11:30 Uhr und 12:25 Uhr ist ein Einschnitt in der Überschussleistung zu erkennen. Dieser wird entweder durch eine Laständerung oder durch einen Wolkenschatten auf den Solarmodulen hervorgerufen. Das Fahrzeug lädt zum einen in den frühen Morgenstunden und zum anderen in der Mittagszeit jeweils mit einer Leistung zwischen 6,5 kW und 7,2 kW. Grund für die morgendliche Ladung könnte z. B. eine Reserveladung oder ein tarifoptimiertes Laden sein (siehe Dynamische Stromtarife). Die Ladung des Fahrzeugs zur Mittagszeit erfolgt bei höchster Leistung der Solarstromanlage. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Fahrzeugladung scheinbar unabhängig vom solaren Dargebot um 11:34 Uhr mit der maximalen Leistung startet und um 12:35 Uhr beendet wird. Hierbei wird weder die Höhe der Überschussleistung noch der Einbruch der Leistung um 12:25 Uhr berücksichtigt. Nichts destotrotz kommt dieser winterliche Ladevorgang zur Mittagszeit durch die Zeitschaltung auf einen Solarstromanteil von 64 %.

Da eine hohe Solarstromerzeugung nicht immer in den gewählten Zeitraum fällt, kann eine Steuerung auch über einen **„Schwellwert“ der Solarstromerzeugung** oder der Netzeinspeisung erfolgen (siehe Bild 19 links). Die Ladung des Elektroautos würde immer dann starten, wenn das Fahrzeug angeschlossen und der Schwellwert überschritten wird. Beispielsweise dann, wenn mehr als 5 kW in das Stromnetz eingespeist werden. Der Mehrwert einer Schwellwertregelung gegenüber einer ungesteuerten Ladung liegt zwischen 20 % und 70 % bei einem typischen Elektrofahrzeug mit 15 000 km Jahresfahrleistung und einem angenommenen Schwellwert von 50 % der PV-Leistung [49]. Eine

Schwellwertsteuerung der Solarstromerzeugung kann direkt über den Wechselrichter der Solarstromanlage umgesetzt werden, da dieser meist über einen oder mehrere Schaltkontakte verfügt.

Um hingegen auf die Netzeinspeisung reagieren zu können, ist ein **Zähler** als Signalgeber erforderlich. Hierfür kommt der Haushaltsstromzähler in Frage oder ein in Reihe geschalteter digitaler Zähler mit Schaltkontakt. Da der Haushaltsstromzähler erst ausgelesen werden müsste, lohnt sich meist die Installation eines weiteren nicht abrechnungsrelevanten Zählers. In Bild 21 ist eine schematische Darstellung der benötigten Messkonfiguration dargestellt. Der in Reihe geschaltete digitale Zähler (hier Energiezähler, engl. Energy Meter) ist dabei direkt hinter dem Smart Meter angebracht. Ein Energiemanagement wertet die Zählerwerte kontinuierlich aus und steuert die Wallbox. Auch ein Hybridwechselrichter und andere Komponenten des Energiesystems benötigen für die korrekte Regelung diesen Zählerwert. Ferner dienen die Daten der Visualisierung zum einfachen Monitoring des Haushalts. Für die Messung ist

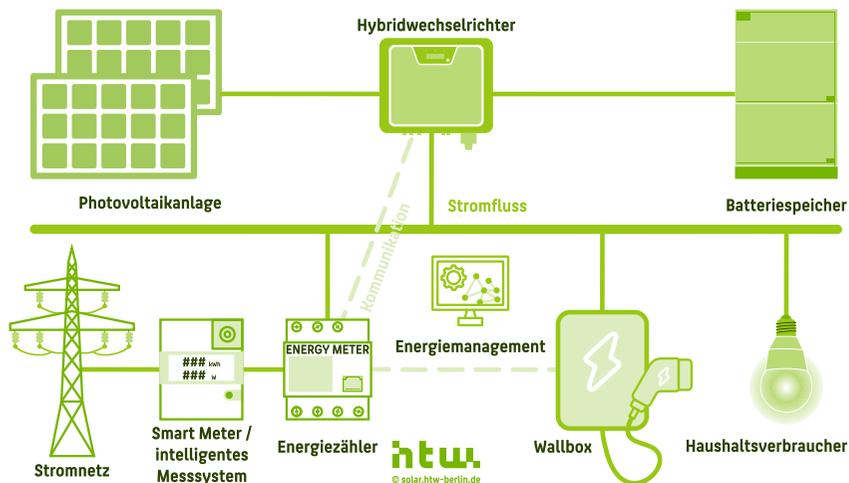


Bild 21 Bestandteile einer dynamischer Wallboxsteuerung.

ein festverbauter Zähler, wie bspw. die Energy Meter von Fronius oder Kostal erforderlich. Alternativ sind auch nichtinvasive Stromsensoren denkbar, wie z. B. der Harvi von myenergyi. Aus dem Produkt des gemessenen Stroms und der Spannung, die bereits in der Wallbox anliegt, ergibt sich die Überschussleistung.

Je nach Wallbox kann ein Energiemanagement nicht nur die Ladung mit fest eingestellter maximaler Leistung freigeben, sondern auch die Höhe der maximalen Leistung der Wallbox kontinuierlich ändern. Somit kann die Wallbox der Überschussleistung dynamisch folgen und auf Schwankungen in der Solarstromerzeugung und der Last reagieren (siehe Bild 19 rechts). Wird ein externes Energiemanagement genutzt, erfolgt die Steuerung in der Regel über Modbus, EEBus oder OCPP. Gerade das webbasierte und weit verbreitete OCPP kann als Schnittstelle für Anwendungen dienen, die entweder einen lokalen Webserver nutzen wie bspw. evcc oder ecar-charge-controller oder cloudbasiert Steuersignale für die Wallbox generieren, wie z. B. clever PV oder eyond. Somit lassen sich auch scheinbar weniger smarte Wallboxen mit etwas Know-how und Eigeninitiative zu leistungsstarken Solarladern erweitern. Im Vergleich zu einer physischen EMS-Lösung ist die cloudbasierte Lösung aufgrund einer zeitlich größeren Verzögerung bei der Datenübertragung nicht in der Lage, so schnell zu regeln [50]. Verschiedene Wallboxen wie z. B. von dem Hersteller open WB können auch selbst die Zählerwerte verarbeiten, so dass ein externes Energiemanagement entfallen kann.

Bild 22 zeigt die Umsetzung einer **dynamischen Überschussladung** anhand der gemessenen Leistungsflüsse eines Einfamilienhauses mit zwei Elektrofahrzeugen und zwei Wallboxen. Im Vergleich zu Bild 20 zeigt sich hier die deutlich höhere Dynamik des solaren Überschusses von bis zu 10 kW binnen weniger Minuten, bedingt durch Wolkendurchzug und Lastwechsel im Haushaltslastprofil. Anhand des Verlaufs der Ladeleistung (blau) der dreiphasig betriebenen

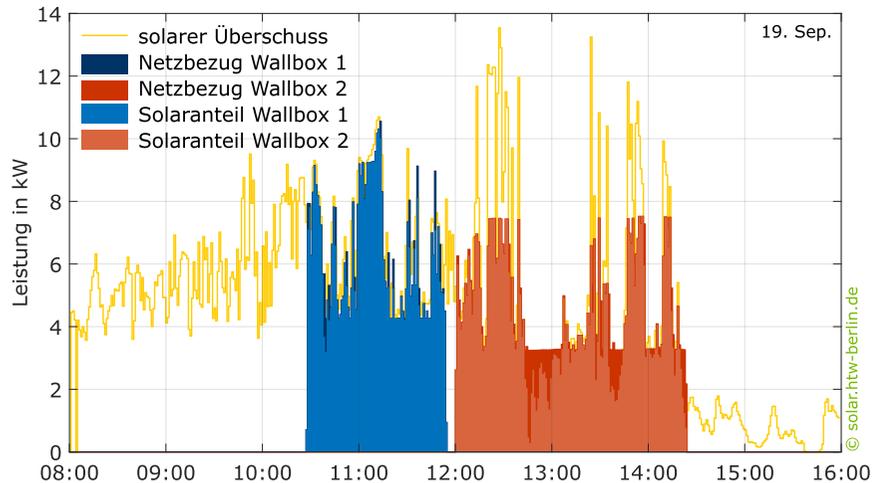


Bild 22 Solare Überschussleistung und Leistungsaufnahme von Wallboxen der Hersteller go-e und open WB. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 min.

Wallbox lässt sich erkennen, dass diese der Dynamik des solaren Überschusses zwischen 4,2 kW und 10,6 kW sehr gut folgen kann. Abweichungen treten lediglich temporär, z. B. aufgrund von Einstellungen im Regelverhalten auf (siehe z. B. Ladeverzögerungen). In Summe stammen 97 % der geladenen 9,2 kWh vom überschüssigen Solarstrom. Das zweite Fahrzeug wird zweiphasig geladen. Daher variiert die Ladeleistung (rot) der zweiten Wallbox zwischen 3,2 kW und 7,4 kW. Einbrüche des solaren Überschusses ab 12:45 und ab 13:35, die zu Unterschreiten der minimalen Ladeleistung führen, müssen mit Netzstrombezug kompensiert werden. Der Solaranteil fällt mit 92 % niedriger aus. Wie die dynamische Überschussladung den solaren Anteil an der Fahrzeugladung steigert, macht folgender Vergleich deutlich: Würde die gleiche Energiemenge mit der maximalen Ladeleistung der beiden Wallboxen ab dem Ladestartzeitpunkt (10:30 Uhr und 12:00 Uhr) geladen werden, würde sich die Ladezeit zwar deutlich reduzieren, allerdings würde gleichzeitig der Solaranteil mit 70 % und 61 % um fast 30 Prozentpunkte geringer ausfallen.

Der Mehrwert einer dynamischen Regelung der Wallbox hängt stark vom Fahr- und Ansteckverhalten sowie dem vorhandenen Solarstromsystem ab. Wie hoch dieser ausfällt und welchen zusätzlichen Nutzen ein Heimspeicher hat, ist im dritten Schwerpunkt der Studie zu lesen. Eine dynamische Regelung kann gut an die Anforderungen des solaren Überschussleistung angepasst werden. Sie führt zu den höchsten solaren Anteilen an der Fahrerenergie der Elektroautos. Anhand des Beispiels zeigt sich jedoch, dass die Regelung den Netzbezug nicht vollständig unterbindet. Je nach Wallbox und Energiemanagement können sich die Fähigkeiten der Regelung unterscheiden.

Tabelle 2 stellt für die zuvor beschriebenen Ladekonzepte die benötigten Komponenten sowie typische Solarstromanteile an der benötigten Fahrerenergie gegenüber.

Tabelle 2 Konzepte und benötigte Komponenten des solaren Ladens sowie der mittlere Anteil der Solarenergie an der Fahrerenergie [49].

Solares Laden	Benötigte Komponenten (Solaranlage + ...)	Solare Fahrerenergie
Ungesteuertes Laden (manuell)	Wallbox	5 % bis 15 %
Zeitgesteuertes Laden (automatisch)	Wallbox mit potenzialfreiem Kontakt oder Wallbox und Energiemanagement	10 % bis 50 %
Schwellwertladen (automatisch)	Wallbox mit potenzialfreiem Kontakt oder Wallbox und Energiemanagement (Stromzähler)	20 % bis 70 %
Dynamisches Überschussladen (automatisch)	Smarte Wallbox und Energiemanagement, Stromzähler	25 % bis 90 %

Im Folgenden wird auf spezifische Eigenschaften der Wallboxen eingegangen, die eine Unterscheidung ermöglichen.

Ladestromschrittweite

Die Wallboxen können aufgrund von regelungstechnischen Beschränkungen der solaren Überschussleistung in der Regel nicht stufenlos folgen. Bei vielen Wallboxen erfolgt die Anpassung der Ladeleistung lediglich in Leistungsschritten, die **1-A-Schritten** entsprechen [4], [51]. Das bedeutet: Im einphasigen Betrieb kann die Ladeleistung lediglich in 230-W-Stufen, im dreiphasigen Betrieb sogar nur in 690-W-Schritten angepasst werden. Bild 23 stellt die summierte Leistungsaufnahme eines Haushalts und der Wallbox Gemini Flex des Herstellers go-e der PV-Leistungsabgabe gegenüber. Wie an dem Ausschnitt des sonnigen Tages zu erkennen ist, folgt die Wallbox der Erzeugung der nach Süd-Osten ausgerichteten Solaranlage nur stufenförmig. Im Leistungsbereich zwischen 8,5 kW bis 4,2 kW lädt die Wallbox dreiphasig, die Unterschiede zwischen der stufenförmig abfallenden Leistung betragen entsprechend 690 W. Gegen 14 Uhr geht die Wallbox in den einphasigen Betrieb über,

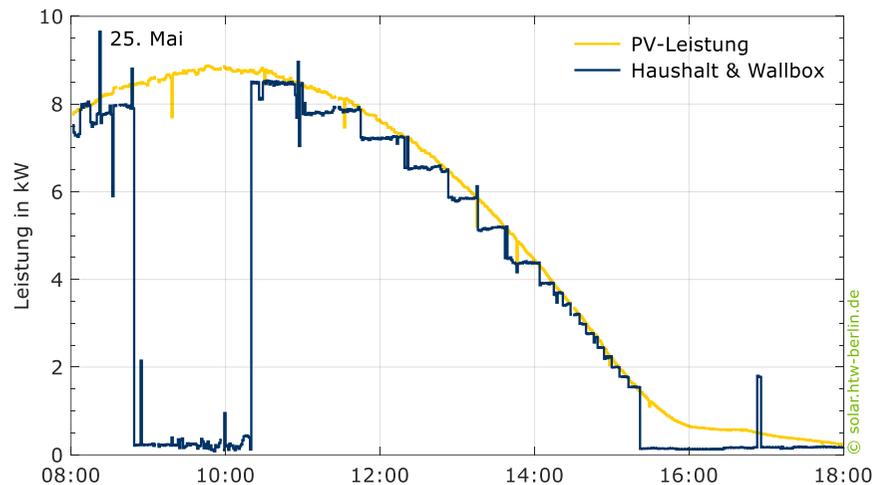


Bild 23 PV-Leistungsabgabe und Leistungsaufnahme eines Haushalts und der Wallbox Gemini flex des Herstellers go-e. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 min.

die Höhe der Leistungsschritte reduziert sich auf ein Drittel. Die Wallbox kann der Überschussleistung damit deutlich besser folgen, woraufhin weniger Energie ins Netz eingespeist wird. Der Hersteller Fronius weist in seiner Betriebsanleitung des Wattpilot (baugleich mit der Gemini-Wallbox des Herstellers go-e) darauf hin, dass es durch die stufenförmige Regelung bei der PV-Überschussladung zu Abweichungen kommen kann. Der Wattpilot bietet allerdings die Möglichkeit das Regelverhalten individuell einzustellen und so z. B. die Netzeinspeisung (wie in Bild 23) oder den Netzbezug zu bevorzugen. Laut der Marktübersicht des pv magazine aus dem Jahr 2024 geben 13 Hersteller an, dass die Ladestromschrittweite unter 0,1 A liegt [4]. Damit sind die Schritte der Ladeleistung sogar selbst im dreiphasigen Betrieb kleiner als 69 W.

Ladeverzögerungen

Viele Wallboxen, die solaroptimiertes Laden ermöglichen, sind mit einer Ein- und Ausschaltverzögerung ausgestattet. Diese sogenannte Hysteresen sollen insbesondere ein ständiges Schalten der Relais der Wallbox verhindern. Somit soll eine höhere Lebensdauer der Wallbox ermöglicht werden. Durch eine **Einschaltverzögerung** wird z. B. trotz bereits vorhandenem Solarüberschuss eine vorgegebene Dauer abgewartet, bevor die Ladung des Elektrofahrzeugs beginnt. Damit kann sichergestellt werden, dass der Überschuss über einen längeren Zeitraum vorliegt. Bricht der Überschuss während des Ladevorgangs hingegen z. B. nur durch eine kurzzeitige, wolkenbedingte Verschattung der PV-Anlage zusammen, kann eine **Ausschalthysterese** eine direkte Abschaltung des Ladevorgangs verhindern.

Bild 24 stellt die Leistungsmesswerte der PV-Anlage, des Batteriesystems und einer Wallbox des Anbieters openWB eines Einfamilienhauses gegenüber. Die maximale Leistung der im dreiphasigen Betriebsmodus arbeitenden Wallbox

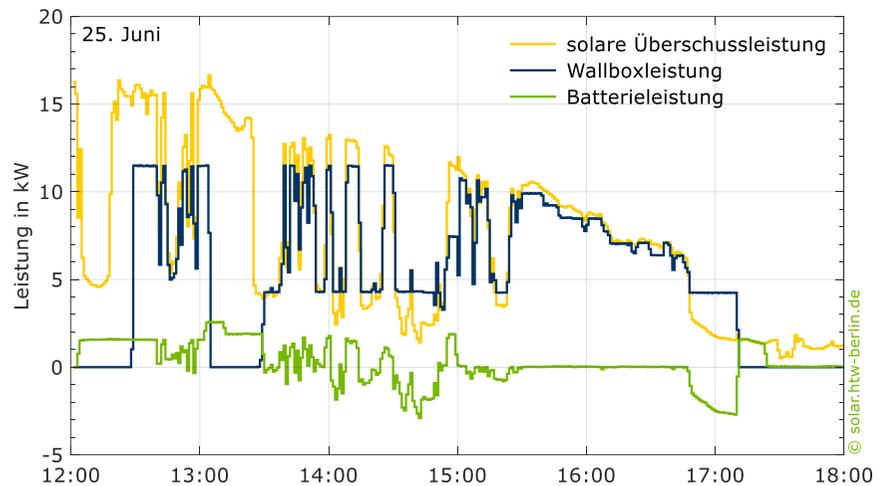


Bild 24 Gemessene Leistungsflüsse eines Einfamilienhauses mit einer Wallbox des Herstellers openWB. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 min.

beträgt 11 kW. Leistungseinbrüche, bedingt durch Wolkendurchzüge oder aufgrund von Leistungsspitzen im Haushaltsverbrauch, kann die Wallbox gut ausregeln. Nach einer kurzen Abwesenheit des Fahrzeugs fällt der solare Überschuss zwischen 13:30 Uhr und 15:30 Uhr vermehrt unter die minimale Ladeleistung der Wallbox von 4,2 kW. Zu diesen Zeitpunkten reduziert die Wallbox ihre Leistung auf den minimalen Grenzwert und verzögert somit das Abschalten um bis zu 8 min. Damit lädt sie zwar ohne Unterbrechungen und nimmt damit mehr Energie auf, allerdings muss die Differenz entweder mit Netzbezug oder mit der Entladung einer Batterie kompensiert werden. In dem im Bild 24 dargestellten Haushalt deckt der Heimspeicher die überschüssige Leistungsaufnahme der Wallbox. Die Hersteller Fronius und Kostal geben für ihre Wallbox z. B. als Standardeinstellung eine Verzögerung von 5 min vor. Bei der Smart von EVTap sind es 2 min bis 3 min. Die Systemintegratoren CleverPV [52] und evcc [53] arbeiten standardmäßig mit 1 min und darunter. Bei einigen Produkten kann die Hysterese von den Nutzer:innen individuell angepasst

werden. Hierbei gilt es allerdings einen Ausgleich zwischen dem zu häufigen Takten und der Anforderung möglichst viel Solarstrom zu laden, zu finden.

Phasenumschaltung

Einige Wallboxen verfügen über die Funktion der automatischen Phasenumschaltung. Damit vereinen diese Produkte das **Konzept einer einphasigen und dreiphasigen Wallbox** in einem Gerät. Bei Über- bzw. Unterschreitung eines Schwellenwerts der verfügbaren Leistung schaltet das System oder das Energiemanagement die Wallbox automatisch in den optimalen Betriebsmodus um. Die maximale Leistung für den einphasigen Betrieb liegt in der Regel bei 3,7 kW (16 A). Soll die Wallbox mit einer höheren Leistung das Fahrzeug laden, z. B. weil mehr PV-Überschuss vorhanden ist, schaltet sie in den dreiphasigen Betrieb um. Soll hingegen mit einer geringeren Leistung als 4,2 kW geladen werden, wird wiederum auf einphasigen Betrieb gewechselt.

Bild 25 stellt beispielhaft die Messwerte der Leistungsabgabe der Wallbox EV-Charger von SMA und einer PV-Anlage eines Einfamilienhauses am 2. April 2024 zwischen 16 Uhr und 18:30 Uhr gegenüber. Gegen 16:04 liegt die Überschussleistung (Differenz aus PV-Leistung und Last) erstmalig über der minimal zulässigen einphasigen Ladeleistung von 1,4 kW (6 A). Knapp 2 Minuten später beginnt die Wallbox das Elektroauto zu laden – zunächst im einphasigen Betrieb, mit einer Leistung von etwa 2,2 kW. Gegen 16:13 überschreitet der solare Überschuss längerfristig den Grenzwert von 3,7 kW. Die Wallbox verbleibt aufgrund einer **Umschaltverzögerung** jedoch weitere 5 min im einphasigen Betrieb. Diese Verzögerung ist in vielen Wallboxen mit automatischer Phasenumschaltung integriert, um ein zu häufiges Schalten zwischen den beiden Betriebsmodi zu verhindern. Während des Wechsels der genutzten Phasen schaltet die Wallbox in der Regel aufgrund mehrerer **Sicherheitsprüfungen** ab. Dies dient laut Herstellerangaben dem Schutz des OBC des Elektrofahrzeugs

[54]. Diese Abschaltdauer kann je nach System variieren - einige Hersteller geben 2 min bis 5 min an. Für die Phasenumschaltung benötigt der EV Charger des Herstellers SMA in dem dargestellten Beispiel in Bild 25 drei Minuten.

Um 16:21 beginnt die symmetrische, dreiphasige Ladung des Systems. Dass die Leistungsabgabe der Wallbox den solaren Überschuss um fast 1,5 kW übersteigt, kann mehrere Gründe haben. Denkbar ist, dass über das Energiemanagement eine Mindestenergiemenge vorgegeben wird, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt geladen werden soll. Um dies zu erreichen, lädt die Wallbox mit einer höheren Leistung als an solarem Überschuss vorhanden ist. Möglich wäre hingegen auch, dass die Endkund:in einen zulässigen, zusätzlichen Netzbezug in Höhe von z. B. 1,5 kW in den Einstellungen der Wallbox hinterlegt hat. Eine dritte Möglichkeit wäre, dass die Solarstromerzeugung - und nicht der Überschuss - für die Regelung genutzt wird. Ab 16:41 Uhr fällt der solare Überschuss vermehrt unter die **minimale Ladeleistung im dreiphasigen Betrieb** von **4,2 kW**. Die Wallbox reagiert verzögert auf den Abfall, reduziert

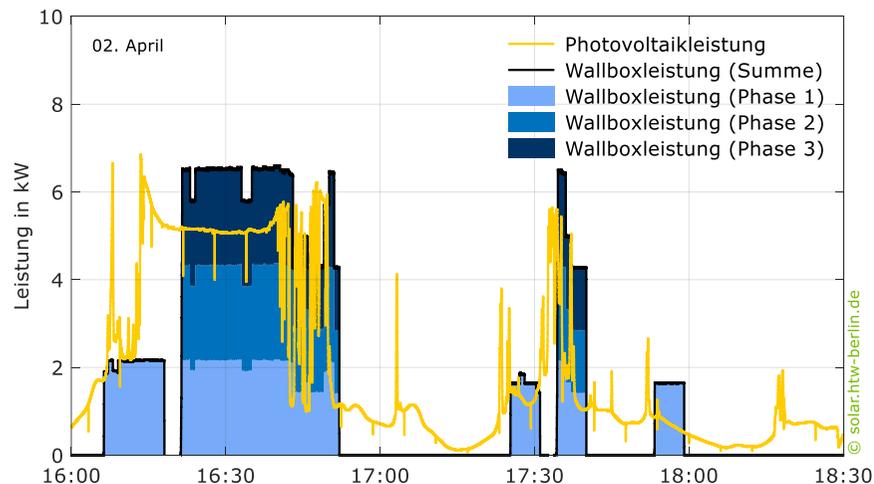


Bild 25 Leistungsabgabe der PV-Anlage und der Wallbox EV Charger des Herstellers SMA. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 s.

dann jedoch zunächst die Ausgangsleistung auf die minimale Leistungsabgabe. Die insbesondere durch einen Wolkendurchzug stark fluktuierende Überschussleistung, führt zu weiteren, kurzzeitigen Anpassungen der Wallboxleistung, bricht dann jedoch gegen 16:50 Uhr fast vollständig ein. Die Wallbox beendet 2 min später ihren Betrieb und geht in den Stand-by-Modus über. Die Ladung wird bis 17:23 pausiert. Da die Überschussleistung im Folgen kurzzeitig ansteigt, erfolgen kurze Wechsel des ein- und dreiphasigen Ladbetriebs. Die Phasenumschaltung wird mitunter über ein zusätzliches externes Schütz realisiert. Sie kann demnach auch nachgerüstet werden, was allerdings mit zusätzlichen Kosten für die Phasenumschaltbox und für die Installation verbunden ist. Der Hersteller cFos eMobility setzt bei seiner Wallboxlösung cFos Power Brain auf eine **manuelle Phasenumschaltung**. Die Phasenumschaltung erfolgt damit nicht automatisch, während das Fahrzeug an der Wallbox angeschlossen ist, sondern nur über eine manuelle Umschaltung am Gerät. Da dieser Vorgang im alltäglichen Betrieb nicht praktikabel ist, ist der Wechsel eher für den Sommer- und Winterbetrieb vorgesehen. Laut der Marktübersicht 2024 des pv magazine verfügen 108 der 225 AC-Ladestationen über die Funktion der Phasenumschaltung. Mitunter ist ein Zusatzmodul notwendig [4].

Dynamische Stromtarife

In Deutschland sind Stromverträge mit einem festen Grund- und Arbeitspreis von z. B. 35 ct pro verbrauchter kWh bisher der Standard. Die verbrauchte Energiemenge wird mit dem Arbeitspreis in einer Jahresabrechnung verrechnet. Mit der Digitalisierung der Stromnetze und mit dem Einzug von intelligenten Stromzählern wird die Energiemenge digital im Viertelstunden-Rhythmus bestimmt. Dies ermöglicht auch die Abrechnung von dynamischen Stromtarifen, die dem Energieverbrauch einer Viertelstunde einen variablen Strompreis zuordnet. Dies soll beispielsweise den Verbrauch in Zeiten hoher erneuerbarer

Stromerzeugung durch eingesparte Kosten anreizen. Seit 2025 müssen alle Energieversorger einen dynamischen Strompreis anbieten. Neben dem monatlichen Grundpreis setzen sich die variablen Tarife aus einem festen Bestandteil wie Steuern, Umlagen und Abgaben sowie dem variablen Beschaffungskosten zusammen. Letzterer ist direkt oder indirekt an die tagesaktuellen Strombörsenpreise gekoppelt und variiert mit dem Angebot der erzeugten Energie und der Nachfrage nach der Energie. Ein dynamischer Strompreis gibt somit die **Preisschwankungen an der Strombörse** an die Kund:innen weiter. Für einen normalen Haushaltsverbrauch ist dies in der Regel wenig relevant, da der Stromanbieter bei einem festen Tarif diese Schwankungen ausgleicht und einen mittleren Arbeitspreis anbietet. Für Kund:innen, die eine größere Energiemenge ihres Haushalts verschieben können, bspw. die Ladung des Elektrofahrzeugs, kann ein dynamischer Stromtarif jedoch attraktiv sein, da die Ladung in Zeiten geringer Strompreise verzögert werden kann. Je nach Anbieter lässt sich der Strompreis für den aktuellen Tag sowie für die nächsten 1 bis 2 Tage online oder per App zumeist in stündlicher Auflösung abrufen und ermöglicht somit eine vorrausschauende Planung.

In Bild 26 ist zum einen der variable Strompreis des Anbieters Tibber als auch der solare Überschuss und die Wallboxleistung für 4 Tage im Frühjahr 2024 zu entnehmen. Der Strompreis schwankt zwischen 26 ct pro kWh und 33 ct pro kWh. Neben der täglichen Variation ist darüber hinaus deutlich der Einfluss des alltäglichen Verbrauchsverhalten zu erkennen. Bei Verbräuchen in den Morgen- und Abendstunden ist der Strompreis in der Regel höher, zur Mittagszeit und in der Nacht fällt er niedriger aus. Das Niveau ist dabei geprägt vom Verlauf des erneuerbaren Dargebots der Energie. An dem sonnigen und sehr windigen 29. Februar fällt Strompreis deutlich niedriger aus als am Folgetag. Hintergrund ist der höhere Anteil erneuerbaren Stroms am Gesamtstrombedarf Deutschlands [55].

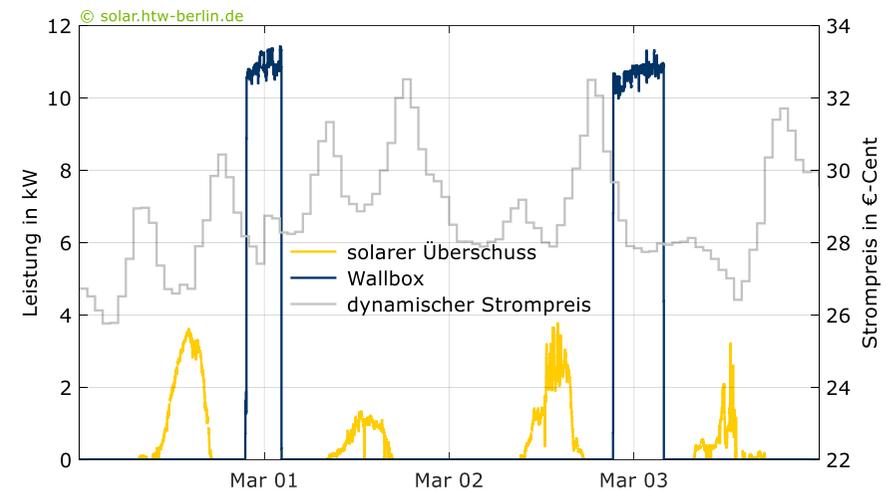


Bild 26 Leistungsflüsse des solaren Überschusses und der Wallbox EV Charger des Herstellers SMA sowie dynamischer Strompreis des Anbieters Tibber in Berlin 2024. Zeitliche Auflösung der Messdaten: 1 min.

Klar ist: Günstiger als der Strom von der eigenen Solaranlage kann das Elektroauto in der Regel nicht geladen werden, da für den Solarstrom keinerlei Abgaben und Umlagen gezahlt werden müssen. Insbesondere in den Wintermonaten sind die Zeiträume mit solarem Überschuss jedoch begrenzt. Hier kann es vorteilhaft sein, das Auto dann zu laden, wenn der Strompreis besonders günstig ist. Dies kann entweder durch eine **manuelle Ladeplanung** oder automatisch durch die Wallbox erfolgen (siehe Bild 18 rechts). Bild 26 ist ein Beispiel für eine manuelle Ladeplanung zu entnehmen. Der Besitzer hat über die App den Verlauf der dynamischen Strompreise verfolgt und die Ladung händisch, mit maximaler Ladeleistung gestartet. In der Nacht auf den 1. März nimmt das Fahrzeug 49 kWh zu einem Preis von etwa 14 € auf, in der zweiten Nacht sind es 69 kWh zu 19 €. Auf den ersten Blick wäre ein um etwa 1,5 h späterer Start der zweiten Ladung sinnvoller gewesen. Die nähere Betrachtung zeigt jedoch: Das gesamte Einsparpotenzial hätte lediglich 20 ct betragen.

Eine **automatisierte Ladeplanung** kann allerdings den manuellen Aufwand deutlich reduzieren und auch Kosten einsparen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass zum einen die Wallbox und das Energiemanagement dafür ausgelegt sind. Zum anderen sollte das Fahrzeug regelmäßig an der Wallbox angeschlossen sein, um die Flexibilität optimal ausnutzen zu können. Die Nutzenden starten den Ladevorgang nicht mit dem Anstecken des Fahrzeugs, sondern in der Regel wird hierfür per App der gewünschte Abreisezeitpunkt definiert und eine Zielladungsmenge eingestellt. Daraufhin entwirft das Energiemanagement entsprechend der prognostizierten Preise einen kostenoptimalen Ladefahrplan. Da der Strompreis keine leistungsabhängigen Bestandteile hat, wird in der Regel mit der maximalen Leistung geladen. Selbstverständlich kann der optimierte Ladefahrplan auch die eigene Solaranlage enthalten, wenn eine Erzeugungsprognose vorliegt.

Betriebsmodi

Viele smarte Wallboxen verfügen über mehrere Betriebsmodi. Neben den unterschiedlichen Lademodi haben die Hersteller zum Teil auch unterschiedliche Bezeichnungen für ähnliche Umsetzungen. Im Folgenden wird die Funktionsweise unterschiedlicher Betriebsmodi für einige beispielhafte Wallboxen kurz vorgestellt, siehe auch Bild 27:

„Power Mode (Kostal Enector)“; „Fast (myenergi Zappi)“; „Schnellladen (SMA eCharger)“; „Boost (clever-pv)“; „now (evcc)“

- Die Ladung erfolgt mit der **maximal möglichen Ladeleistung**. Sofern solare Überschussleistung vorhanden ist, wird diese zur Batterieladung des Elektrofahrzeugs mit genutzt.

„Überschussladen über Freigabesignal (KEBA KeContact P30 c/x-series)“;

- Die Wallbox startet die Ladung des Fahrzeugs mit der maximal verfügbaren Leistung nach **Freigabe durch ein Steuersignal**. Hierbei folgt die Ladung nicht dem Verlauf der Solarleistung (vgl. Bild 24). Typische Freigabesignale können eine Zeitschaltuhr, das Überschreiten einer vorgegebenen Mindesteinspeisung der Solarerzeugung oder eine Smart-Homesteuerung sein. Die maximal verfügbare Leistung kann bei den meisten Wallboxen bereits bei der Installation eingestellt werden, so dass auch eine Ladung mit kleineren Solarstromanlagen erfolgen kann.

„Solar Pure Mode (Kostal Enector)“; „Solar Only (EVtap Smart)“; „Solarladen (Mennekes AMTRON® 4You 500)“; „pv (evcc)“; „clever (clever-PV)“

- Das Elektroauto wird **ausschließlich** mit der **überschüssigen Solarleistung** geladen. In der Regel startet die Ladung, sobald ausreichend solarer Überschuss vorhanden ist, um das Fahrzeug mit 6 A pro Phase



Bild 27 Typische Betriebsmodi von intelligenten Wallboxen, die mit solarem Überschuss Elektrofahrzeuge laden können.

zu laden. Bei der EVtap Smart liegt der Grenzwert bei 7 A um „ein übermäßiges Starten und Stoppen des Ladevorgangs zu vermeiden“. Clever PV unterscheidet im Modus „lässig“ auch noch die Dauer der Hysterese also wann die Ladung gestoppt wird.

„ECO+ (myenergi zappi)“; „Intelligent PV Charging (KEBA KeContact P30 PV Edition)“

- Einige Hersteller verbinden ihre Betriebsmodi mit individuellen Vorgaben wie z. B. einem **Mindestanteil an Solarleistung**. Dieser muss erreicht werden, damit die Wallbox den Ladevorgang startet. Der Mindestanteil kann z. B. zwischen 0 % und 100 % variieren, wobei 100 % in der Regel für eine Ladung nur mit überschüssiger Solarleistung steht. Ein geringerer Anteil senkt den Grenzwert von 6 A Solarstrom, so dass die solare Überschussladung früher startet und später endet. Über diese Einstellung lässt sich somit auch, durch Ergänzung mit Netzstrom, PV-Überschuss ins Fahrzeug laden, ohne dass dieser die minimale Ladeleistung der Wallbox überschreitet. Steigt die Solarstromleistung bei mehr Sonnenschein an, wird der Anteil des Netzbezugs reduziert.

„Solarunterstütztes Laden (Mennekes AMTRON® 4You 300)“; „Solar Assist (EVtap Smart)“; „ECO (myenergi zappi)“; „minpv (evcc)“; „immer Laden (clever PV)“

- Dem Fahrzeug wird immer ein **Mindestladestrom** zur Verfügung gestellt, unabhängig davon, wie viel solarer Überschuss vorhanden ist. Fällt dieser unter den Grenzwert von z. B. 6 A, wird der zusätzlich benötigte Strom aus dem Netz bezogen. Damit wird eine kontinuierliche Ladung zuzüglich des überschüssigen Solarstroms ermöglicht.

„Next/Daily Trip Mode (Fronius Wattpilot / go-e Charger Gemini 2.0)“; „Smart Boost (Growatt Thor)“; „Laden mit Zielvorgabe (SMA eCharger)“

- In diesem Modus wird die Wallbox als „Muss-Verbraucher (SMA)“ definiert. In der Regel gibt es eine **Mindestenergiemenge**, die in das Auto geladen werden soll. Diese wird meistens gemeinsam mit einem **Abfahrtszeitpunkt** vorgegeben. Um die Zielvorgabe zu erreichen, wird der fehlende Strom notfalls aus dem Netz bezogen. Die Wallboxen Gemini und Wattpilot können dynamische Stromtarife mitberücksichtigen, sodass bis zum Abfahrtszeitpunkt mit dem günstigsten Strom (Solarstrom oder dynamischer Stromtarif) geladen wird.

Die Ladung bis zu einem definierten Zielladezustand ist bisher in der Regel nicht ohne weiteres möglich. Der Grund: Der **Ladezustand des Elektroautos** wird noch nicht an die Wallbox weitergegeben. Mit der **ISO15118-20** ist die Kommunikation zwischen Elektroauto und Wallbox seit 2022 geregelt, womit der Batterieladezustand technisch ausgelesen werden kann. Viele Wallboxhersteller geben an, dass sie mittels der Typ-2-Steckerverbindung den Ladezustand der Fahrzeuge ermitteln können, die den Kommunikationsstandard erfüllen oder dies per Software-Update realisieren können [51]. Allerdings müssen auch die Fahrzeughersteller den Standard erst noch flächendeckend umsetzen.

Die fehlende Schnittstelle an der Wallbox wird zum Teil durch eine Programmierschnittstelle zur App des Elektrofahrzeugs kompensiert. Über die App kann dann der Ladezustand ausgelesen werden. Einige Wallbox-Hersteller oder Softwareanbieter nutzen diesen Umweg um an den aktuellen Ladezustand und andere relevanten Daten wie z. B. die Prognose der Reichweite zu kommen [33], [51], [56].

3 Vergleich der Energieflüsse in Haushalten mit Solaranlage und Elektrofahrzeug

Welche Messdaten liegen dieser Untersuchung zugrunde?

Für die nachfolgende Analyse wurden Messdaten von Haushalten mit einer PV-Anlage und einem Elektroauto ausgewertet. Die analysierten Energiedaten der anonymisierten Haushalte wurden von der **Fronius International GmbH** zur Verfügung gestellt. Die Datensätze enthalten folgende Informationen:

- installierte PV-Leistung,
- PV-Erzeugung und Batterieladeleistung (DC-Werte),
- Haushaltlast, Netzeinspeisung und Netzbezug, Direktverbrauch, Batterieentladeleistung (AC-Werte),
- Direktverbrauch der Wallbox, Batterieentladeleistung zur Wallbox, Netzbezug der Wallbox (AC-Werte) und
- den Ladezustand des Batteriespeichers.

Diese **Betriebsdaten** sind auch im Monitoringportal des Unternehmens für die Kunden einsehbar. Die zeitliche Auflösung der für die Analyse exportierten Datenreihen beträgt 5 min, ist für die Jahre 2022 und 2023 verfügbar und umfasst Haushalte mit dynamischer sowie ungesteuerter Ladung. Aus den zufällig bereitgestellten Daten wurden Wohngebäude mit einem Stromverbrauch (ohne Elektrofahrzeug) von weniger als 15 000 kWh/a, einer in das Fahrzeug geladenen Energiemenge von maximal 7000 kWh/a und einer PV-Anlagenleistung von kleiner 30 kW aufbereitet und extrahiert. Die Stichprobe umfasst damit 849 Datensätze. Einige Datensätze der Stichprobe konnten lediglich für die Analyse des Ladeverhaltens der Elektroautos verwendet werden, da z. B. die PV-Anlage im Jahresverlauf erweitert wurde.

Die analysierten Wohngebäude lassen sich der **DACH-Region** (Deutschland, Österreich, Schweiz) und somit einem vergleichbaren sozioökonomischen Umfeld zuordnen. Mit 65 % liegt der Großteil der analysierten Haushalte in Deutschland, gefolgt von 25 % in Österreich, siehe Bild 28. Die Wohngebäude sind somit zwischen Schleswig-Holstein in Norddeutschland und der Steiermark in Süd-Österreich verteilt. Dies hat Auswirkungen auf den spezifischen Solarertrag. Der Median liegt bei 994 kWh pro installiertem Kilowatt Solarleistung. Die Haushalte lassen sich zu 61 % dem ländlichen Raum und damit einer geringen Besiedlungsdichte zuordnen. 12 % der Wohngebäude befinden sich im städtischen Raum, siehe auch Bild 28. Etwa die Hälfte der analysierten Haushalte verfügt über einen stationären Heimspeicher. In 42 % der Wohngebäude erfolgt die Wärmeversorgung elektrisch.

Tabelle 3 vergleicht die **Ausstattung der Haushalte** der Stichprobe mit dem Bundesdurchschnitt in Deutschland im Jahr 2023.

Datengrundlage

Die Betriebsdaten wurden von der Fronius International GmbH im Rahmen des Forschungsprojekts „Wallbox-Inspektion“ der HTW Berlin zur Verfügung gestellt. In den analysierten Haushalten war neben der Wallboxserie Wattpilot ein Wechselrichter und ein Smart Meter von Fronius installiert.



Betriebsdatenanalyse von Wallboxen in Wohngebäuden: Datengrundlage

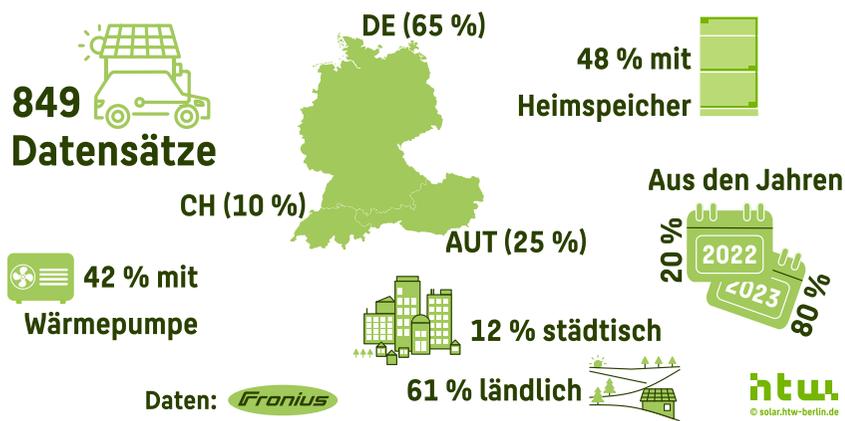


Bild 28 Datengrundlage der Betriebsdatenanalyse von Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius International, Stichprobe: 849.

Während 28 % der analysierten Haushalte lediglich eine PV-Anlage und ein Elektrofahrzeug aufweisen, verfügen 18 % zusätzlich noch über einen Heimspeicher und eine Wärmepumpe. Die häufigste Kombination: Ein PV-Speichersystem und ein Elektroauto. Verglichen mit dem Bundesdurchschnitt in Deutschland nach dem Energiewendebarmeter der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) weist die Stichprobe dieser Untersuchung einen etwas höheren Ausstattungsgrad an Wärmepumpen auf. Es ist daher davon auszugehen, dass es sich tendenziell um sogenannte „Early Adopters“ handelt, die bereits heute Techniken ausprobieren. Da die genutzte Technik mit hohen Anfangsinvestitionen verbunden ist, kann man zusätzlich von einer Stichprobe mit tendenziell höherem verfügbaren Haushaltseinkommen ausgehen.

Im Mittel (Median) verbrauchen die Haushalte der Stichprobe 4100 kWh im Jahr ohne und 6200 kWh pro Jahr mit Elektroauto. Ist zusätzlich eine Wärmepumpe installiert, erhöht der Energiebedarf der elektrischen Heizung den Stromverbrauch des Haushalts im Mittel um mehr als 3200 kWh oder 80 %.

Tabelle 3 Anteil der Haushaltsausstattung (PV: Solaranlage, EA: Elektroauto, WP: Wärmepumpe, BAT: stationärer Batteriespeicher) nach KfW und der Stichprobe. Daten: KfW [3] und Fronius International.

	KfW Energiewendebarmeter 2024		Stichprobe
	Anteil an PV	Anteil PV + EA + ...	Anteil PV + EA + ...
	2023	2023	2022/23
PV+EA	8 %	35 %	28 %
PV+WP+EA	4 %	17 %	24 %
PV+EA+BAT	7 %	30 %	30 %
PV+EA+BAT+WP	4 %	17 %	18 %

Die **installierte PV-Leistung** reicht von 2,8 kW bis 30 kW. Im Vergleich zu den Meldedaten der deutschen Bundesnetzagentur haben die Haushalte etwas größere PV-Anlagen. Insbesondere die Leistungen zwischen 12 kW und 20 kW sind häufiger vertreten. Im Mittel liegt die Leistung, wie auch bei vergleichbaren Meldedaten der Bundesnetzagentur, bei 10 kW.

Das analysierte Ladeverhalten des Elektroautos beschränkt sich auf den Anteil der **zu Hause geladenen Energiemenge**. Mehrere Studien konnten zeigen, dass dies im Mittel etwa 70 % bis 75 % der geladenen Energie abdeckt [45], [57], [58]. Bei einer Umfrage der NOW GmbH gab die Hälfte der Befragten an, mehr als 90 % an der privaten Wallbox zu laden. Weitere 10 % gaben hingegen an, nur bis zu einem Viertel des Gesamtladevolumens zu Hause zu laden [57].

Mehr Verbrauch? Mehr Sonnenstrom!



Im Mittel ist auf den Dächern der untersuchten Haushalte eine 10-kW-PV-Anlage installiert. Fällt der Stromverbrauch durch ein viel gefahrenes Elektroauto oder eine Wärmepumpe höher aus, werden häufig auch größere Anlagen gebaut. Die Größe der Solaranlage steigt um etwa 0,5 kW pro 1000 kWh Stromverbrauch.

Worin unterscheidet sich das Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge in den verschiedenen Haushalten?

Wann und wie viel Energie in das Elektroauto geladen wird, ist ausschlaggebend für den Anteil an der Solarenergie an der Fahrzeugladung. Das Ladeverhalten wird dabei unter anderem von folgenden Einflussfaktoren bestimmt:

- **Anwesenheit des Fahrzeugs** (Standzeit, An- und Absteckzeitpunkt)
- **Ausstattung und Konfiguration der Wallbox und des Elektroautos** (Leistungsfähigkeit der Wallbox und des On-Board-Chargers des Fahrzeugs, Umschaltverhalten der Wallbox)
- **PV-Anlage und Heimspeicher** (Orientierung und Leistung der PV-Anlage sowie Leistung und nutzbare Speicherkapazität eines Heimspeichers)
- **Individuelle Ladepräferenzen** (z. B. minimaler und maximaler Ladezustand des Elektroautos, ökonomische oder ökologische Lademaximierung)

Klar ist: Je höher die Standzeit an der heimischen Wallbox zwischen Sonnenaufgang und -untergang ist, desto höher ist auch das Potenzial, Solarenergie in das Elektroauto zu laden. Bild 29 stellt den **jahresmittleren Tagesgang** der Leistungsabgabe von 6 verschiedenen Wallboxen dem mittleren Verlauf aller Wallboxen gegenüber. Hierzu wurde der prozentuale Anteil der 5-minütigen Leistungsabgabe an der jeweiligen Energieabgabe der Wallbox über das ganze Jahr bestimmt. Der Nutzung aller untersuchten Wallboxen entspricht im Mittel etwa einer Normalverteilung um die Mittagszeit. Dies deutet darauf hin, dass viele analysierte Haushalte die Fahrzeugladung an der Verfügbarkeit von Solarenergie ausrichten (siehe auch NOW-Studie [57]). Die Wallboxen A (rot) und B (grün) zeigen ein abweichendes Ladeverhalten. In Haushalt B wird das Elektroauto unter Berücksichtigung zeitvariabler Stromtarife häufig in der Nacht zwischen 00:00 Uhr und 06:30 Uhr geladen. In Haushalte A erfolgt die Ladung des Fahrzeugs in der Regel direkt nach der Ankunft ab 19:00 Uhr.

Statistische Kenngröße: Median (Zentralwert)



Sortiert man alle Werte nach der Größe, dann steht der Median genau „in der Mitte“. Somit sind 50 % der Werte kleiner und 50 % der Werte größer. Bei einer Normalverteilung entspricht der Median dem Mittelwert.

Auffällig ist, dass dieses Elektroauto in der Regel innerhalb von 2,5 h vollständig geladen wird. Dies ist an der kontinuierlichen, stufenförmigen Reduktion der Energieabgabe, auch Ladeschlussbegrenzung genannt, identifizierbar. Innerhalb dieses Zeitraums nimmt es 37 % der jährlichen Gesamtenergie auf. Der Haushalt mit der Wallbox C (blau) lädt mit 917 kWh/a vergleichsweise wenig Energie in das Fahrzeug. Mit einem Anteil von 79 % ist die geladene Energiemenge zwischen 10:15 Uhr und 14:00 Uhr sehr hoch. Die Wallbox E (türkis) weist mit 3560 kWh/a eine ähnliche Energieabgabe wie Haushalt A (rot) auf. Die Ladung ist nahezu gleichverteilt und folgt keinem erkennbaren Muster.

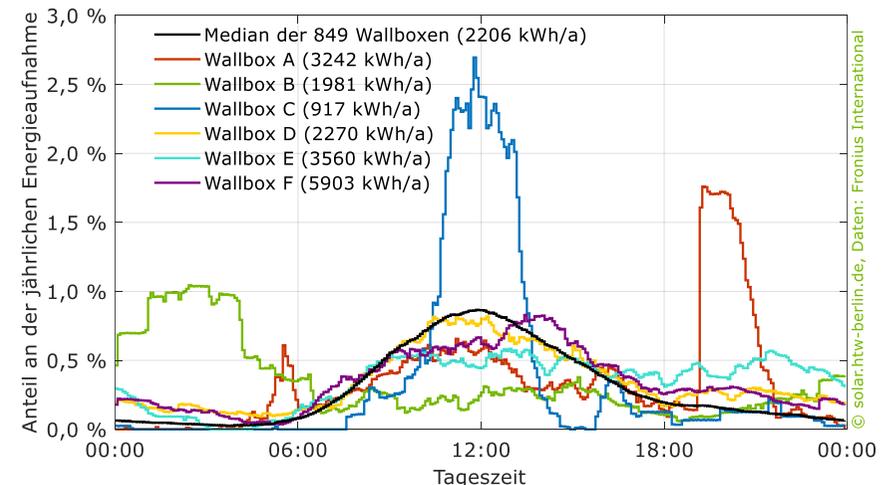


Bild 29 Tagesmittlerer Verlauf der Energieabgabe 6 unterschiedlicher Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius International, zeitliche Auflösung: 5 min.

Der Tagesverlauf der mittleren Wallboxladung des Haushalts D (gelb) ist nahezu identisch mit dem mittleren Tagesverlauf aller untersuchten Haushalte (schwarz). Die mittlere Energieabgabe nimmt zwischen 06:00 Uhr und 11:00 Uhr kontinuierlich zu, bevor sie kurz vor 12:00 Uhr ihr Maximum erreicht. Anschließend fällt sie langsam ab und verweilt auf einem leicht höheren Niveau als zum Tagesbeginn. Was an dem Verlauf der mittleren Energieabgabe der Wallboxen aller untersuchten Haushalte auffällt: **Viele Haushalte laden das Elektroauto tagsüber nach dem solaren Angebot.**

Neben dem tagesmittleren Ladeverlauf lässt die **sortierte Jahresdauerlinie** der Leistungsabgabe Rückschlüsse auf das variierende Ladeverhalten zu. In Bild 30 sind die gleichen Haushalte wie in der Grafik zuvor mit identischer Einfärbung dargestellt. Die ähnlich genutzten Fahrzeuge der Haushalte A (rot) und E (türkis) laden etwa 160 h/a bis 180 h/a mit hohen Ladeleistungen über 10,5 kW. Das Fahrzeug von Haushalt E wird weitere 170 h/a mit Leistungen größer 4,2 kW geladen. Mit 57 % der aktiven Zeit arbeitet die Wallbox somit

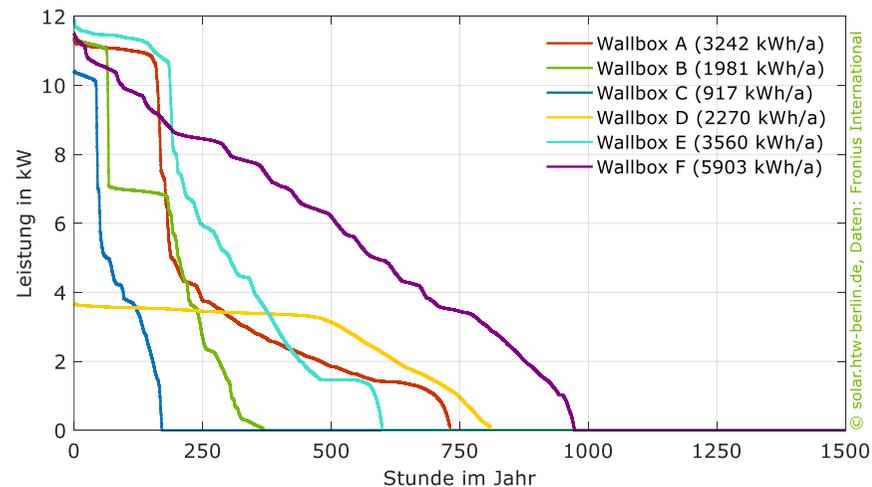


Bild 30 Sortierte Jahresdauerlinie der Leistungsabgabe 6 unterschiedlicher Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius International, zeitliche Auflösung: 5 min.

etwas häufiger im dreiphasigen als im einphasigen Betrieb. Die Wallbox im Wohngebäude A hat hingegen über 480 h/a und damit etwa 68 % der Zeit eine im einphasigen Modus typische Leistungsabgabe, wenn primär solar geladen wird. In beiden Haushalten wird zu etwa 20 % der Ladezeit mit minimaler Ladeleistung von 1,4 kW geladen. Auch bei der Wallbox B (grün) lassen sich zwei Plateaus in der Ladeleistung identifizieren. Über 64 h/a gibt die Wallbox mehr als 11 kW ab. Zwischen 6,8 kW und 7,1 kW wird sie hingegen über 111 h/a betrieben. Ein genauerer Blick in die Daten erklärt die Ursache: Bis September war die maximale Ladeleistung auf 7,1 kW begrenzt. Im Anschluss wurde vermehrt mit höheren Ladeleistungen geladen. Die Gründe können unterschiedlicher Natur sein, wahrscheinlich ist der Wechsel des Elektroautos zu einem Modell mit höherer Ladeleistung.

Die Ladeleistung des Haushalts F (lila) variiert über den Jahresverlauf deutlich stärker als die der anderen Profile. Dies liegt auch daran, dass der Haushalt über eine große PV-Anlage mit einer Leistung von 20 kW verfügt und sehr häufig nach dem solaren Überschuss lädt. Durch die hohe Energieabgabe ist die Wallbox mit 973 h/a vergleichsweise lang in Betrieb. Bei dem ebenfalls sehr solaraffin ladenden Haushalt D (gelb) ist die Wallbox lediglich einphasig angeschlossen. Etwa 57 % der Ladezeit wird das Elektroauto mit nahezu maximaler Ladeleistung von 3,3 kW bis 3,7 kW geladen. Obwohl die aufgenommene Energiemenge niedriger ausfällt als bei den Haushalten A und E, ist die aktive Ladezeit aufgrund der geringeren Leistungsfähigkeit der Wallbox höher.

8182 Stunden pro Jahr im Stand-by

Die Wallboxen befinden sich im Mittel mehr als 93 % pro Jahr im Bereitschaftsbetrieb. Eine geringe Leistungsaufnahme der Wallbox im Stand-by-Modus ist daher sehr entscheidend.

Wann werden Elektrofahrzeuge geladen?

In der Regel definieren Routinen das Ladeverhalten. Dazu zählen unter anderem [44], [57]:

- Laden, nachdem ein bestimmter Ladezustand unterschritten wird,
- Laden nach dem solaren Angebot,
- Laden zu bestimmten Uhrzeiten,
- tägliches Anstecken des Elektrofahrzeugs und Nutzung der Ladeplanung des Energiemanagements.

In der Praxis werden häufig mehrere Ziele verfolgt und unterschiedliche Ladestrategien miteinander kombiniert. Bild 31 stellt die **Ladehäufigkeit** der untersuchten 849 Datensätze gegenüber. In 18 % der Haushalte wird das Elektroauto täglich oder mindestens an 5 Tagen in der Woche mit der Wallbox zur Ladung verbunden. Genau die Hälfte der Haushalte laden ihr Fahrzeug an 3 bis 5 Tagen die Woche. Mit 10 % und 1 % sind 4 Ladungen im Monat oder weniger bei den analysierten Haushalten eher die Ausnahme.

Zu welchem **Zeitpunkt** die Fahrzeugladungen starten, ist Bild 32 auf der linken Seite zu entnehmen. Beinahe Dreiviertel der Ladungen beginnen zwischen 06:00 Uhr und 15:00 Uhr. Im Mittel werden 29 % der Elektroautos zwischen

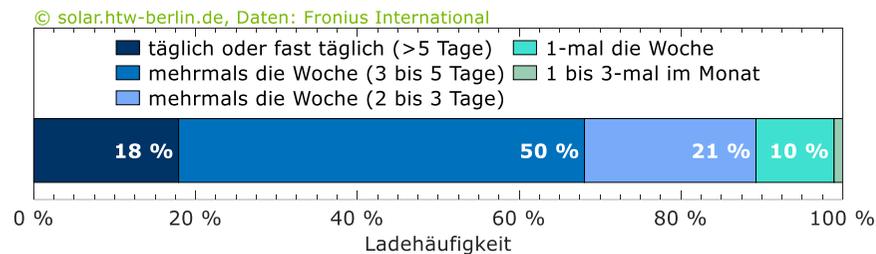


Bild 31 Durchschnittliche Ladehäufigkeit der untersuchten Datensätze. Daten: Fronius International, Stichprobe: 849.

68 % der analysierten Haushalte laden mehr als 3-mal die Woche das Elektroauto



Im Mittel werden 8,2 kWh pro Ladevorgang aufgenommen.

09:00 Uhr und 12:00 Uhr mit der Wallbox verbunden oder erhalten ein Ladesignal. Tendenziell starten die Fahrzeugbesitzer:innen ihre Ladung eher am Vormittag als am Nachmittag. Das bedeutet aber auch, dass die Fahrzeuge tagsüber mit der privaten Ladesäule verbunden werden können. Dass das Elektrofahrzeug nach 18 Uhr an die Wallbox angeschlossen und geladen wird, ist eher die Ausnahme. Die Grafik bestätigt somit: Viele Elektroautobesitzer:innen, die über eine Solaranlage verfügen, laden ihr Fahrzeug vornehmlich tagsüber, um den Netzbezug zu minimieren (siehe auch NOW-Studie).

Bild 32 rechts stellt den mittleren Energieanteil dar, den die Fahrzeuge je nach Uhrzeit aufnehmen. Die Anteile zwischen der geladenen Energiemenge je Zeit-

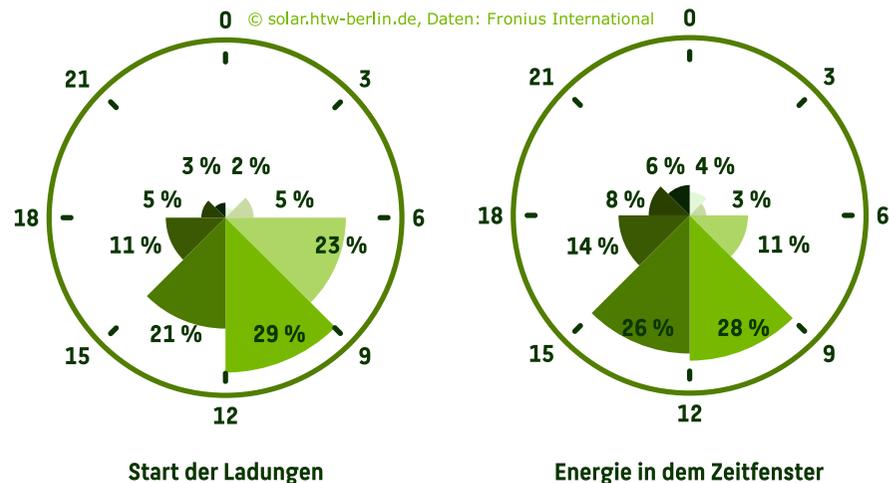


Bild 32 Häufigkeit des Startzeitpunkts der Ladungen (links) und der geladenen Energiemenge (rechts) in unterschiedlichen Zeitfenstern der Betriebsdatenanalyse von Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius International, Stichprobe: 849.

fenster und dem Startzeitpunkt der Ladung variieren, da sich viele Ladungen in das nächste ausgewertete Zeitfenster verschieben. Insbesondere die Anteile im Zeitraum zwischen 06:00 Uhr bis 09:00 Uhr weichen mit 10 Prozentpunkten stark voneinander ab. Entweder sind die Ladungen in diesem Zeitraum besonders kurz und somit energiearm oder sie dauern mehrere Stunden und enden erst am späten Vormittag. Wie das 3-h-Raster zeigt, wird 54 % der Energie von den untersuchten Elektroautos zwischen 09:00 Uhr und 15:00 Uhr aufgenommen. Also genau dann, wenn die private Solaranlage in der Regel am meisten Energie liefert. Zwar werden die Fahrzeuge auch bei Sonnenaufgang und -untergang geladen, allerdings ist die überschüssige Solarleistung, mit dem die Fahrzeuge vornehmlich geladen werden, geringer. Während nur 14 % der Ladungen zwischen 18:00 Uhr und 06:00 Uhr gestartet werden, wird in den Abendstunden 21 % der Energiemenge aufgenommen.

Wie hoch fällt der Solaranteil an der Fahrzeugladung aus?

Die über die private Wallbox in das Elektrofahrzeug geladene Energiemenge der untersuchten Haushalte variiert zwischen 231 kWh/a und 6594 kWh/a, wie die Abbildungen auf Seite 34, 35 und 36 zeigen. Für die folgenden Auswertungen reduziert sich die Größe des analysierten Datensatzes auf 730, da z. B. die PV-Anlage innerhalb des Analysezeitraums erweitert worden ist. Der Median

Solaranteil an der Fahrzeugladung



Der Solaranteil beschreibt, wie viel Prozent der an das Elektroauto abgegebenen Energiemenge von der Solaranlage kommt. Je höher der Solaranteil, desto höher ist auch die Kilometeranzahl, die ökologisch unbedenklich zurückgelegt werden kann. Selbst erzeugter Solarstrom ist zudem in der Regel günstiger als Netzstrom.

der zu Hause geladenen Energiemenge der 730 betrachteten Haushalte liegt bei 2228 kWh/a. 50 % der untersuchten Haushalte laden zwischen 1551 kWh/a und 3097 kWh/a über ihre private Wallbox. Bei einem mittleren Verbrauch des Elektroautos von 20 kWh pro 100 km entspricht das einer Fahrstrecke von etwa 7750 km/a bis 15 500 km/a.

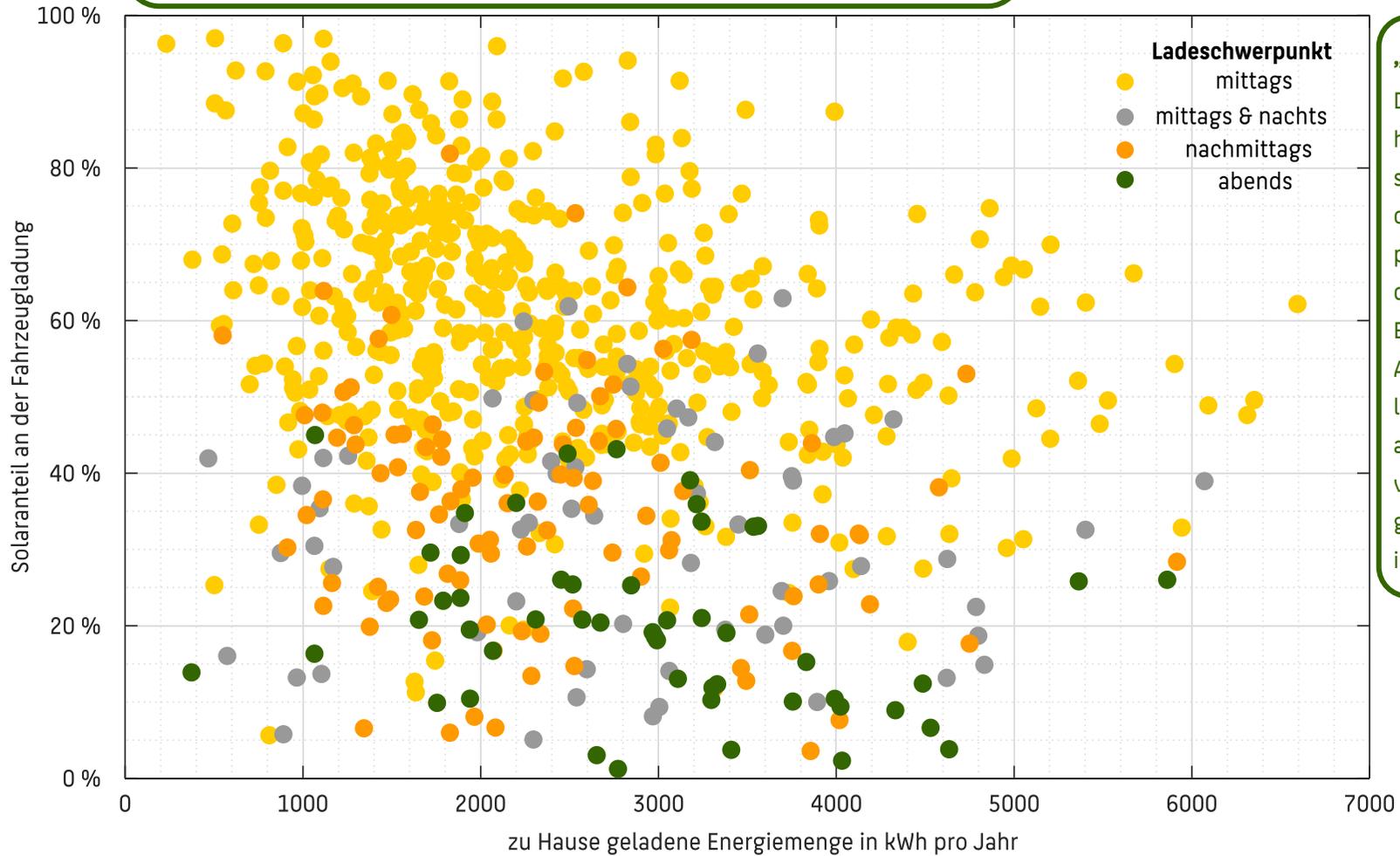
Der **Solaranteil an der Fahrzeugladung** wird direkt vom Ladeverhalten und der Laderoutine beeinflusst. Die Grafiken auf den Seiten 34 bis 36 stellen den Solaranteil, ohne Berücksichtigung eines Heimspeichers, in Abhängigkeit der zu Hause geladenen Energiemenge gegenüber. Die Einfärbung der Punkte visualisiert z. B. die **Ladehäufigkeit pro Woche**. Was direkt auffällt: Die Ergebnisse der 730 Haushalte streuen stark. Beispielsweise variiert der Solaranteil an der Fahrzeugladung bei zwei Haushalten mit einer zu Hause geladenen Energiemenge von 2800 kWh/a um 93 Prozentpunkte. Mit steigender Energieaufnahme sinkt tendenziell der Solaranteil. Gleichzeitig fällt die Bandbreite zwischen dem maximalen und minimalen Solaranteil geringer aus. Der Grund ist einleuchtend: Je mehr das Elektroauto genutzt wird, desto häufiger ist es abwesend und kann tagsüber nicht an die private Wallbox angeschlossen werden. Zudem muss das Fahrzeug häufiger geladen werden, womit der Ladezeitpunkt nicht immer frei gewählt und in Zeiten mit solarem Überschuss verschoben werden kann. Klar ist auch: Je häufiger das Elektroauto in den Wintermonaten geladen wird, desto geringer fällt der Solaranteil aus.

Wie die **Nennleistung der PV-Anlage** mit dem Solaranteil zusammenhängt, ist der Grafik auf Seite 36 zu entnehmen. Die Einfärbung der Punkte stellt die auf den Dächern der Haushalte installierte PV-Leistung dar. Diese steigt mit zunehmender Energieabgabe der Wallbox tendenziell an.

„Große PV-Anlagen wirken sich positiv auf den ökologischen Fußabdruck des Elektrofahrzeugs aus.“

Einflussfaktoren „Ladeschwerpunkt“, „Ladehäufigkeit“ und „PV-Anlagengröße“ auf den Solaranteil individuell analysieren

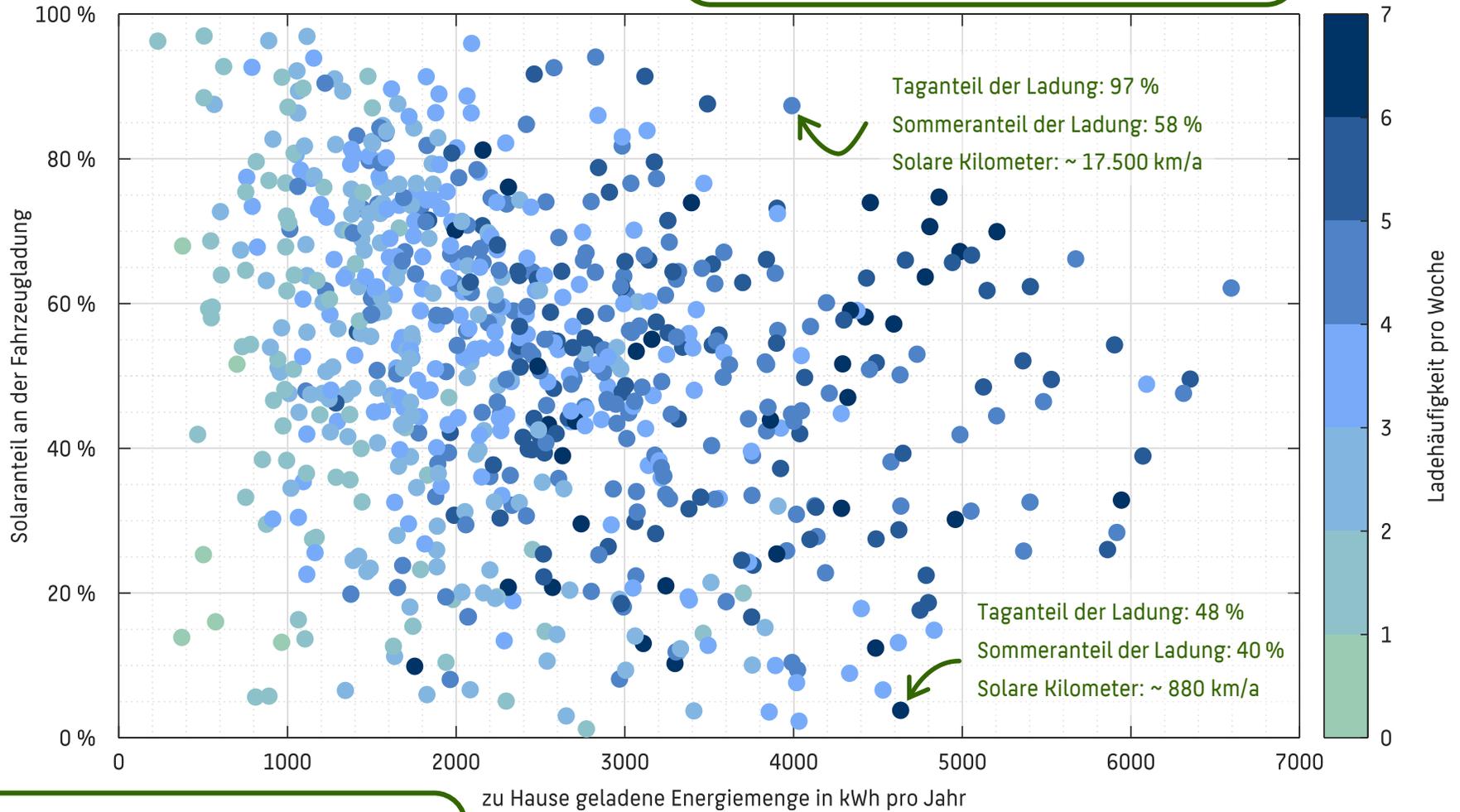
Die Änderungen lassen sich am besten verfolgen, wenn im PDF-Reader unter Bildlaufoptionen die Variante „Einzelne Seite“ ausgewählt ist, z. B. über Strg + Alt + P.



„Cluster“
 Das Ladeverhalten der Haushalte lässt sich grob in 4 unterschiedlich große Gruppen einordnen. Viele Haushalte laden primär tagsüber, darunter auch die Haushalte C, D und F aus Bild 29. Während der Haushalt A in das Cluster „abends“ fällt, lädt Haushalt B zwar vereinzelt auch zur Mittagszeit, allerdings vermehrt unter Berücksichtigung dynamischer Stromtarife in der Nacht.

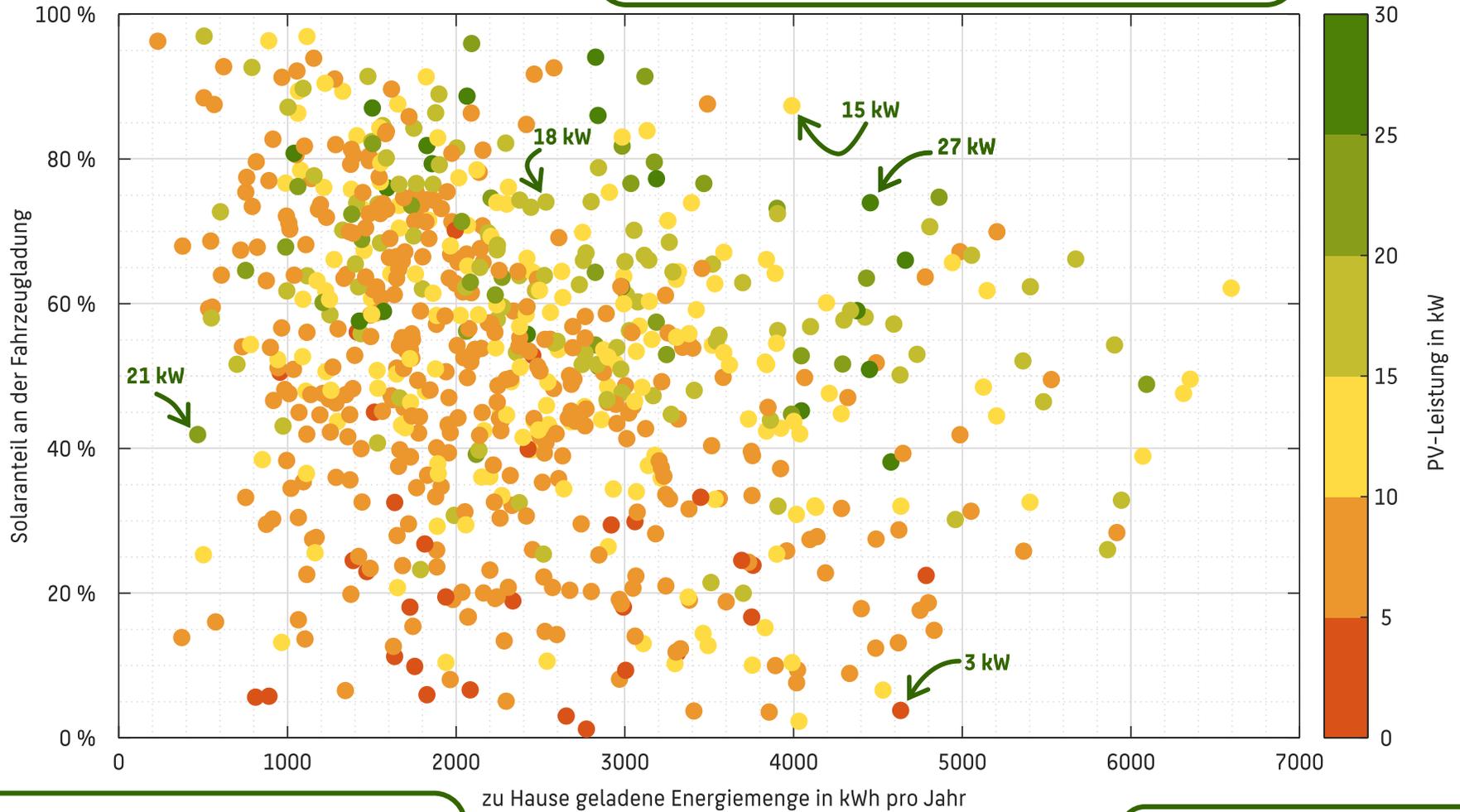
Energiebedarf von Elektrofahrzeugen
 Übers Jahr liegt der Bedarf im Mittel bei etwa 20 kWh pro 100 km: 10 000 km/a ~ 2000 kWh/a

Wer viel fährt, lädt häufiger
 Gibt die Wallbox unter 2000 kWh/a ab, wird im Mittel 2,4-mal die Woche geladen. Sind es mehr als 4000 kWh/a, wird das Elektroauto im Mittel 4,6-mal pro Woche geladen.



Eine Frage des Timings!
 Bei geringen Energiemengen können auch wenige Ladungen pro Woche für hohe Solaranteile ausreichen. Entscheidend ist der Ladezeitpunkt, der möglichst in sonnenreichen Stunden liegen sollte.

Weite Strecken? Große PV-Anlage!
 Haushalte, die weite Strecken mit ihrem Elektroauto fahren, nutzen häufig größere PV-Anlagen. Somit können auch bei über 5000 kWh/a beachtliche Solaranteile an der Fahrzeugladung erzielt werden.



Solarenergie für Haushalt, Mobilität und Heizen
 Große PV-Anlagen steigern nicht nur den Solaranteil an der Fahrzeugladung, sondern können auch bei vollelektrifizierten Haushalten mit Wärmepumpe für eine hohe Eigenversorgung sorgen.

Winter is coming...
 Entscheidend für höchste Solaranteile ist die Stromproduktion im Winter.

Ob Haushalte mit großer PV-Anlage mehr elektrisch fahren oder Vielfahrer:innen sich eine größere PV-Anlage installieren, kann nicht gesagt werden. Jedoch lässt sich festhalten: Je größer die PV-Anlage dimensioniert ist, desto höher ist in der Regel auch der Solaranteil an der Fahrzeugladung.

Wie stark der Solaranteil jedoch trotz ähnlicher Rahmenbedingungen abweichen kann, macht folgendes Extrembeispiel zweier Haushalte mit ähnlichen Randbedingungen deutlich: Die zu Hause geladene Energiemenge (2580 kWh/a und 2540 kWh/a) und die Leistung der PV-Anlage (9,7 kW und 10 kW) sind nahezu identisch. Der Solaranteil variiert allerdings um fast 74 Prozentpunkte. Während der eine Haushalt mit 98 % nahezu ausschließlich zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang lädt, gibt die Wallbox des anderen Haushalts 73 % der Energie ab, wenn keine überschüssige Solarenergie verfügbar ist. Hinzukommt, dass der Solarertrag der PV-Anlage des primär in der Nacht ladenden Haushalts deutlich schlechter ausfällt. Die Performance der Solaranlage ist eher unterdurchschnittlich.

Die 22 Haushalte mit einer geladenen Energiemenge von mehr als 5000 kWh/a erzielen ohne Berücksichtigung eines Heimspeichers bereits einen Solaranteil zwischen 26 % und 70 %. Der geringste Solaranteil, den ein Haushalt mit einer installierten PV-Leistung von mehr als 15 kW erzielt, liegt bei 20 % (4960 kWh/a).

Um wie viel Prozentpunkte steigert ein Batteriespeicher den Solaranteil?

Klar ist: Ein Heimspeicher steigert den Solaranteil des Haushalts deutlich. Aber bringt der vergleichsweise kleine Heimspeicher auch Vorteile für das Elektroauto? Grundsätzlich hilft der **Heimspeicher**, Regelungsungenauigkeiten der Wallbox effizient auszugleichen. Darüber hinaus lassen sich auch in geringem

Ein Heimspeicher steigert den Solaranteil



Im Mittel können 65 % der privat geladenen Energiemenge von der PV-Anlage und aus dem Heimspeicher gedeckt werden. Der Heimspeicher ist dabei durchschnittlich für eine Steigerung des Solaranteils um etwa 10 Prozentpunkte verantwortlich.

Umfang Energiemengen zeitlich verschieben. Klar ist auch: Je größer die nutzbare Speicherkapazität des Heimspeichers ausfällt, desto höher ist in der Regel dessen Beitrag am Solaranteil. Wie sich ein zusätzlicher Heimspeicher auf den Solaranteil der Fahrzeugladung auswirken kann, zeigt Bild 33. Für diese Analyse wurden lediglich die Haushalte berücksichtigt, die über einen Heimspeicher verfügen. Die Stichprobe reduziert sich somit auf 357 Datensätze. In 75 % der Fälle beträgt die Steigerung des Solaranteils durch einen Heimspeicher weniger als 15 %. Allerdings sind auch Steigerungen von bis zu 51 % möglich,

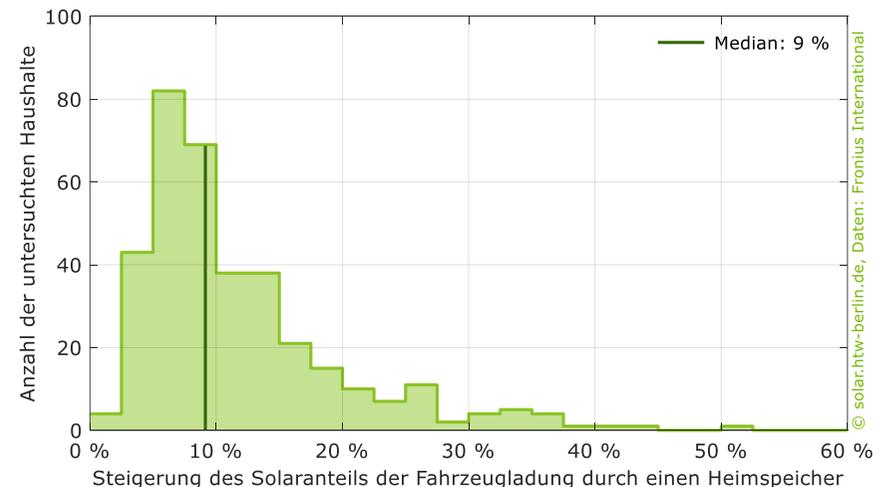


Bild 33 Steigerung des Solaranteils durch einen Heimspeicher. Daten: Fronius International, Stichprobe: 357, Klassenbreite 2,5 Prozentpunkte.

wie die Grafik zeigt. Der Median liegt bei 9 Prozentpunkten, der Mittelwert bei 12 Prozentpunkten. Wie bereits in Bild 29 und Bild 32 dargestellt, lädt die Mehrheit der untersuchten Haushalte ihr Elektroauto primär zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang. Damit wird ein Großteil der Fahrzeugladung bereits direkt über die Solaranlage gedeckt. Der zusätzliche Nutzen eines Heimspeichers ist somit in der betrachteten Stichprobe häufig begrenzt.

Einige **Beispiele**, wie ein Heimspeicher den Solaranteil der Fahrzeugladung positiv beeinflusst: In einem Haushalt wird das Elektroauto zu etwa zwei Drittel zwischen 17:00 Uhr und 24:00 Uhr einphasig geladen. Der Heimspeicher deckt bei annähernd jeder Ladung die Differenz zwischen der Überschussleistung und der Leistungsaufnahme der Wallbox. Er steigert den Solaranteil um 44 Prozentpunkte. Bei einem anderen Haushalt lädt das Elektroauto zu 84 % zwischen Sonnenaufgang und -untergang. Damit wird bereits ein Solaranteil von 27 % erreicht. Die geringe Leistungsabgabe der Solaranlage reicht jedoch nicht aus, um die konstant eingestellte Leistungsabgabe der Wallbox vollständig zu decken. Der Heimspeicher deckt die Differenz und erhöht den Solaranteil auf 68 %. Die höchste Steigerung des Solaranteils der untersuchten Haushalte durch einen Heimspeicher beträgt 51 %. In den Wintermonaten wird das nachmittags ladende Elektroauto fast ausschließlich aus dem Heimspeicher versorgt. Gemeinsam mit der 18-kW-PV-Anlage wird ein Solarbatterieanteil an der Fahrzeugladung (2932 kWh/a) von 85 % erreicht.

Die detaillierte Analyse der Daten zeigt, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen einer hohen Steigerung des Solaranteils an der Fahrzeugladung durch einen Heimspeicher und

- der PV-Anlagenleistung,
- einem hohen Nachtanteil der Fahrzeugladung,
- der Phasenanzahl der Wallbox,
- und der zu Hause geladenen Energiemenge gibt.

Das der Anstieg des Solaranteils an der Fahrzeugladung mit einem Heimspeicher geringer ausfällt als der Anstieg des Autarkiegrads (siehe Bild 40), hat verschiedene Gründe: Viele der untersuchten Elektroautos nehmen bereits tagsüber den Großteil ihrer Energie auf. Weiterhin sind die Heimspeicher deutlich kleiner dimensioniert als die Speicherkapazität des Fahrzeugs, sodass sie auch im vollgeladenen Zustand für ein Elektroauto nur wenige Kilowattstunden bereitstellen können. Erfolgt die Fahrzeugladung in den Abendstunden, sind die Batteriespeicher in der Regel nicht mehr vollständig geladen, da sie bereits einen Teil der Haushaltslast gedeckt haben. Im Mittel beträgt der Anteil an der Fahrzeugladung, der direkt von der Solaranlage und über die Entladung des Heimspeichers erfolgt, 65 %.

Um wie viel Prozentpunkte steigert eine intelligente Ladestrategie den Solaranteil an der Fahrzeugladung?

Wird das Fahrzeug direkt mit Solarenergie geladen, macht dies ökologisch und ökonomisch einen Unterschied.

Wie Bild 18 und Bild 19 sowie Tabelle 2 zeigen, unterscheiden sich die Konzepte zum Laden von Solarstrom und damit auch der solare Anteil deutlich.

Laden bei Ankunft



Lädt die Wallbox ausschließlich mit der maximalen oder einer konstant eingestellten Wallboxleistung, kann sie in kürzester Zeit einen hohen Ladezustand erreichen. Dieses Betriebsverhalten wird häufig auch als ungesteuertes Laden bezeichnet. Übersteigt der selbsterzeugte Solarstrom während der Ladezeit den Haushaltsstrombedarf, wird dieser zur Fahrzeugladung verwendet.

Solares Überschusladen



Hier folgt die Ladeleistung der Wallbox der sogenannten Differenzleistung. Diese setzt sich aus der aktuellen Solarleistung abzüglich des momentanen Strombedarfs des Haushalts zusammen. Auf Änderungen, bspw. bedingt durch einen Wolkendurchzug oder einem Anstieg des Strombedarfs, passt die Wallbox die Ladeleistung entsprechend der neuen Differenzleistung an. Das Ziel: Viel Solarstrom für die Ladung des Elektroautos zu nutzen, um den Netzbezug zu minimieren.

Sofern kein direkter Ladeanlass besteht, wird bei der Mehrheit der untersuchten Haushalte überschüssiger Solarstrom in das Elektroauto geladen. Welche Vorteile das solare Überschusladen im Vergleich zur ungesteuerten Ladung mit maximaler Leistung hat, soll diese Untersuchung zeigen. Wie sich das Laden bei Ankunft und das solare Überschusladen unterscheiden kann, ist Bild 34 zu entnehmen. Der gelbe Verlauf der Solarüberschussleistung wird durch die den Ladeverlauf der blauen Kurve nicht überschritten, da die Ladeleistung kontinuierlich angepasst wird. Die Ladeleistung der roten Kurve stellt dahingegen die ungesteuerte Ladung mit maximaler Leistung dar. Sie hat zwar Schnittmengen mit der Überschussleistung, jedoch wird etwa die Hälfte der Energie aus dem Netz bezogen. Die Abbildung erläutert zudem schematisch die **Methodik** der Untersuchung, die auf 4 zentralen Schritten beruht:

1. Maximale Ladeleistung des untersuchten Datensatzes identifizieren.
2. Startzeitpunkt der Ladung bleibt unabhängig der Lademethodik identisch.
3. Energiemengen bleiben bei beiden Lademethoden unverändert.
4. Der Vergleich der Solaranteile ermöglicht es die Steigerung des Solaranteils durch die Überschussladung zu ermitteln.

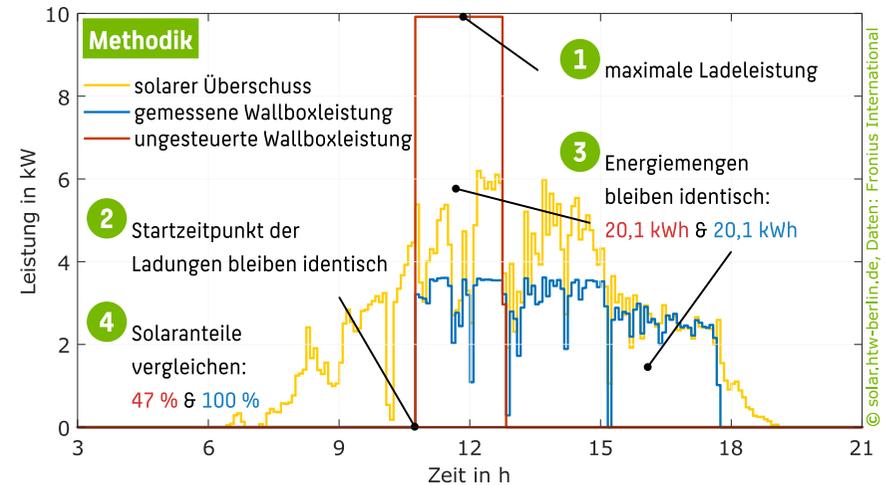


Bild 34 Methodik und Reihenfolge zur Bestimmung der Steigerung des Solaranteils durch die Funktion des Überschusladens. Daten: Fronius International, zeitliche Auflösung: 5 min.

Eine genau Beschreibung der Methodik ist dem Anhang zu entnehmen. Wie Bild 34 an einem Beispieltag zeigt, steigert das solare Überschusladen den Solaranteil an der Fahrzeugladung im Vergleich zur ungesteuerten Ladung um mehr als 50 Prozentpunkte. Aufgrund der höheren Ladeleistung ist die gleiche Energiemenge allerdings erst 5 h später geladen.

Der positive Effekt durch das **dynamische Überschusladen** variiert je nach Haushalt stark, wie die Häufigkeitsverteilung in Bild 35 zeigt. Im Mittel steigert das dynamische Überschusladen den Solaranteil an der Ladung des Elektrofahrzeugs um 25 Prozentpunkte. Während er in einigen Haushalten um bis zu 65 % ansteigt, ermöglicht eine intelligent ladende Wallbox in anderen Haushalten keinen signifikant höheren Solaranteil an der Fahrzeugladung. Gründe sind bspw. eine große PV-Anlage, die eine Anpassung der Ladeleistung häufig überflüssig macht oder ein Fahrzeug, das vornehmlich in Zeiten ohne Solarstrom aus dem Netz geladen wird.

Werden Haushalte, die vermehrt aus dem Netz laden, nicht in der Analyse berücksichtigt, erhöht sich der Median auf 29 Prozentpunkte, wie Bild 35 zeigt.

„Je höher der Anteil der Fahrzeugladung am Tag ausfällt, desto höher ist der Nutzen der Überschussladefunktion.“

Der Nutzen des dynamischen Überschussladens ist in der Regel höher, wenn die zu Hause ins Fahrzeug geladene Energiemenge geringer ist. Auch ist das dynamische Überschussladen bei geringerer **PV-Anlagengröße** vorteilhafter. Mit zunehmender PV-Leistung kann die Ladung mit maximaler Leistung zu unterschiedlichen Zeiten erfolgen, ohne dass der Netzbezug signifikant erhöht wird. Gleiches zeigt sich bei **einphasigen Wallboxen**. Die niedrigere maximale Ladeleistung bewirkt, dass sie bereits häufig durch die überschüssige PV-Leistung bedient werden kann. Der zusätzliche Nutzen einer intelligenten

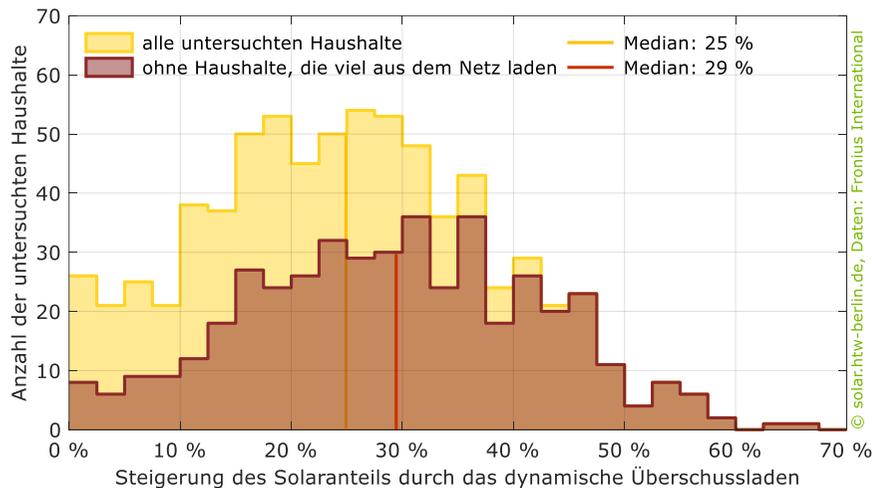


Bild 35 Steigerung des Solaranteils durch das dynamische Überschussladen des Elektrofahrzeugs. Daten: Fronius International, analysierte Gesamtstichprobe: 730, 433 ohne die „Netzlader“, Klassenbreite 2,5 Prozentpunkte.

Überschussladen erfordert längere Ladezeiten



Um hohe Solaranteile zu erreichen, erfordert das Laden mit reinem solarem Überschuss insbesondere bei kleinen Solaranlagen lange Standzeiten des Elektroautos an der privaten Ladestation.

Funktion, die lediglich den solaren Überschuss ins Auto lädt, ist somit geringer.

Ein hoher Energiebedarf korreliert mit vielen gefahrenen Kilometern im Jahr und damit in der Regel auch mit einer längeren Abwesenheit des Fahrzeugs von der privaten Ladestation. Gleichzeitig erhöhen sich die energiereichen Ladungen aus dem Netz, da die Ladeflexibilität geringer ausfällt. Bei Netzladungen hat die Funktion des dynamischen Überschussladens erwartungsgemäß keinen Nutzen.

Klar ist aber auch: Wird das Elektroauto nur sehr selten geladen, lässt sich mit geringer Eigeninitiative, einem Blick auf den Wetterbericht und einer einfachen Ladeplanung auch ohne eine intelligente Ladestrategie ein hoher Solaranteil erzielen.

Wann ist das dynamische Überschussladen besonders vorteilhaft?



Dynamisches Überschussladen ist heute ein Standardfeature von Wallboxen. Besonders vorteilhaft ist es:

- bei kleiner bis mittlerer PV-Anlagengröße.
- bei längerer Anwesenheit des Fahrzeugs am Tag.
- wenn bereits ein auswertbarer Smart-Meter vorhanden ist.
- wenn kein oder nur ein kleiner Speicher vorhanden ist.

Welche Empfehlungen zur Steigerung des Solaranteils an der Fahrzeugladung lassen sich aus den Betriebsdaten ableiten?

1. Solaranlage möglichst groß auslegen

Klar ist: Je größer die Solaranlage dimensioniert ist, desto mehr überschüssiger Solarstrom steht für die Fahrzeugladung zur Verfügung. Solaranteile über 80 % ohne einen Heimspeicher werden in der Regel nur erreicht, wenn das Solarangebot im Winter (November bis Ende Januar) doppelt so hoch ist, wie der Bedarf.

2. Wallbox sollte zur Solaranlage passen

Soll eine einphasige, dreiphasige oder doch eine Wallbox mit Phasenumschaltung installiert werden? Dreiphasige Wallboxen haben eine minimale Ladeleistung von 4,2 kW und erzielen in der Regel erst bei Solaranlagen mit einer Nennleistung von mehr als 15 kW höhere Solaranteile an der Fahrzeugladung als einphasige Wallboxen. Bei Letzteren fallen allerdings die Ladezeit und die Verluste höher aus, siehe Abschnitt 1.2. Eine Wallbox mit Phasenumschaltung ist in den meisten Fällen etwas kostspieliger erhöht jedoch die Flexibilität und ermöglicht höchste Solaranteile.

3. Elektrofahrzeug tagsüber regelmäßig an die Wallbox anstecken

Je häufiger das Elektroauto tagsüber angeschlossen ist, desto mehr Solarstrom kann aufgenommen werden und desto höher fällt der Solaranteil aus. Folgt die Wallbox selbständig der solaren Überschussleistung, kann der Netzbezug minimiert werden. Verfügt die Wallbox nicht über diese Option, kann eine zeitgesteuerte Ladung mit einem Freigabesignal oder eine Schwellwertladung eine Alternative sein.

4. Ladungen steuern und planen

Eine Ladung aus dem Netz bis zum maximalen Ladezustand der Fahrzeugbatterie ist weder aus Sicht der Batterielebensdauer sinnvoll, noch in den meisten Fällen für die Fahrtstrecken des nächsten Tages notwendig. Wird die Verzögerung der Ladung mit einem Blick auf den Wetterbericht kombiniert, lässt sich der Solaranteil einfach erhöhen. Ergänzt wird dies durch eine maßvolle, an der Mobilität orientierten Energieaufnahme an Tagen mit geringen verfügbaren solaren Überschüssen. Hilfreich ist eine gut strukturierte App, in der Betriebsmodi schnell geändert, Ladungen gestartet und gestoppt und den individuellen Bedürfnissen angepasst werden können.

5. Heimspeicher richtig dimensionieren

Soll ein Heimspeicher das private Energiesystem erweitern, gilt es auf eine sinnvolle Dimensionierung zu achten. Ohne Elektrofahrzeug hat es sich als zielführend erwiesen, den stationäre Batteriespeicher so auszulegen, dass er den Haushaltsstromverbrauch in den Nachtstunden decken kann. Ist zusätzlich ein Elektrofahrzeug geplant, kann der Heimspeicher größer dimensioniert werden. Für hohe Solaranteile sollte der Speicher zusätzlich die mittlere Energiemenge pro Ladevorgang speichern können. Dies ist jedoch vom Fahr- und Ansteckverhalten abhängig und sollte wohl überlegt sein.

6. Mobilitätsalternativen prüfen

Klar ist auch: Wird das Elektrofahrzeug weniger bewegt, reduziert sich der Energiebezug, den die Solaranlage decken muss. E-Bike, Mitfahrbörsen und der öffentliche Nahverkehr können helfen die Kilowattstunden im Fahrzeug zu reduzieren. Darüber hinaus kann das Homeoffice einen Ladeanlass für gezielte Solarladungen bieten.

Wie hoch sind die Autarkiegrade vollelektrifizierte Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe?

Als weitere Vergleichsgröße für PV-Batteriesysteme dient der sogenannte **Autarkiegrad**, der häufig auch als Eigenversorgungsanteil oder Eigendeckungsanteil bezeichnet wird [59], [60]. Der Autarkiegrad gibt den Anteil des elektrischen Energieverbrauchs an, der durch das PV-Batteriesystem gedeckt wird. Bild 36 stellt den Autarkiegrad in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung und des jährlichen Stromverbrauchs dar. Kleiner dimensionierte PV-Anlagen sind orange und größere Systeme grün eingefärbt. Der gesamte Haushaltsstromverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch der Haushaltsgeräte zuzüglich

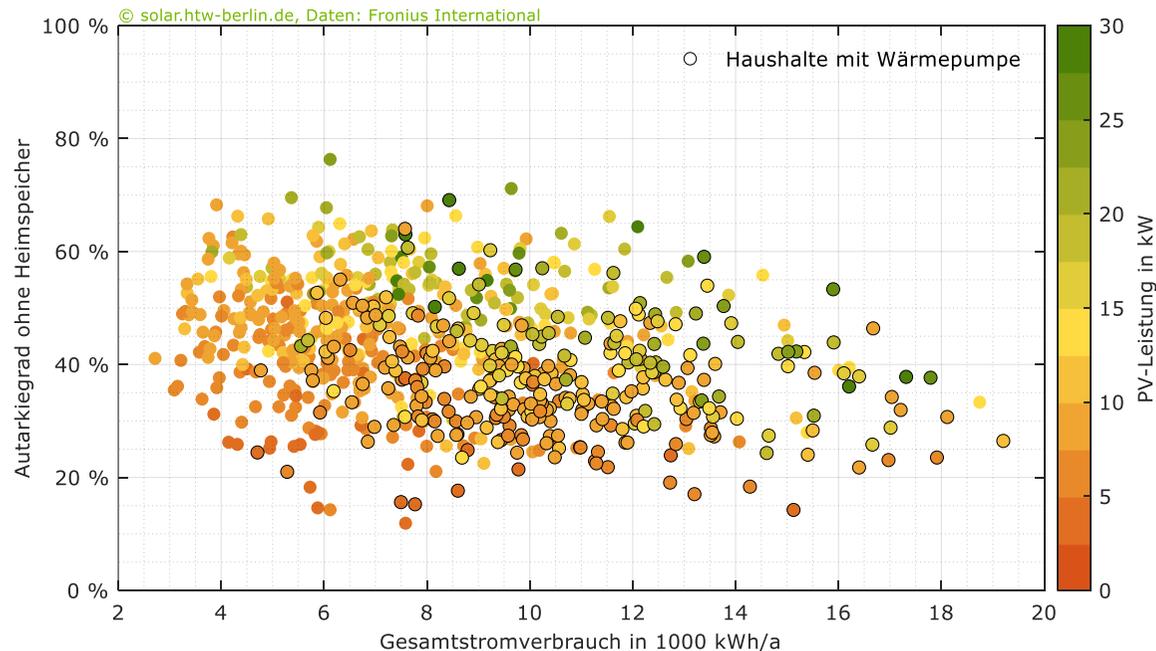


Bild 36 Autarkiegrad ohne Heimspeicher von Haushalten mit Elektroauto und Wärmepumpe in Abhängigkeit des Gesamtstromverbrauchs und der installierten PV-Leistung. Daten: Fronius International, Stichprobe: 730, mit Heimspeicher: 357.

Autarkiegrad



Der Autarkiegrad gibt den Anteil des gesamten elektrischen Stromverbrauchs an, der durch eine PV-Anlage oder ein PV-Batteriesystem gedeckt werden kann. Je größer die PV-Anlage dimensioniert wird, desto höher fällt die Eigenversorgung mit Solarstrom aus.

der Energieaufnahme der Wallbox zusammen. Die Punkte mit einem schwarzen Rahmen markieren vollelektrifizierte Haushalte, in denen zusätzlich noch eine Wärmepumpe installiert ist. Der elektrische Gesamtenergieverbrauch in den 299 Haushalten mit Wärmepumpe liegt im Mittel bei 10 215 kWh/a (Median) und somit mehr als 3000 kWh über dem mittleren Gesamtenergieverbrauch der 433 Haushalte ohne Wärmepumpe.

Der Autarkiegrad variiert zwischen 12 % und 76 % und nimmt in der Regel mit steigender PV-Leistung zu. Die mittlere PV-Leistung (Median) der Haushalte mit einem Autarkiegrad unter 25 % beträgt lediglich 5,9 kW. Die Haushalte, die einen Eigenversorgungsanteil von mehr als 50 % erreichen, haben im Mittel hingegen eine Solaranlage mit 9,9 kW installiert.

Bei der genaueren Analyse fällt auf: Je höher der Gesamtstrombedarf ausfällt, desto größer ist in der Regel auch die Solaranlage dimensioniert. Welchen positiven Effekt eine große PV-Anlage haben kann, zeigt folgendes Beispiel:

Ein Haushalt A verbraucht im Jahr 3338 kWh/a und hat eine

Solaranlage mit 8,4 kW. Haushalt B verbraucht mit einer Wärmepumpe und einem Elektroauto hingegen 15 897 kWh/a, verfügt aber über eine 25-kW-Solaranlage. Die in das Elektrofahrzeug geladene Energie ist mit 622 kWh/a bei Haushalt A um den Faktor 7 kleiner als bei Haushalt B (4367 kWh/a). Beide laden jedoch vermehrt tagsüber, was sich positiv auf den Solaranteil der Fahrzeugladung auswirkt (93 % und 59 %). Während Haushalt A einen Eigenversorgungsanteil ohne Heimspeicher von 54,3 % aufweist, beträgt er bei Haushalt B 53,3 %.

Das der Autarkiegrad von zwei Haushalten mit einem ähnlichen Gesamtstrombedarf auch unterschiedlich ausfallen kann, zeigt der Vergleich der Haushalte

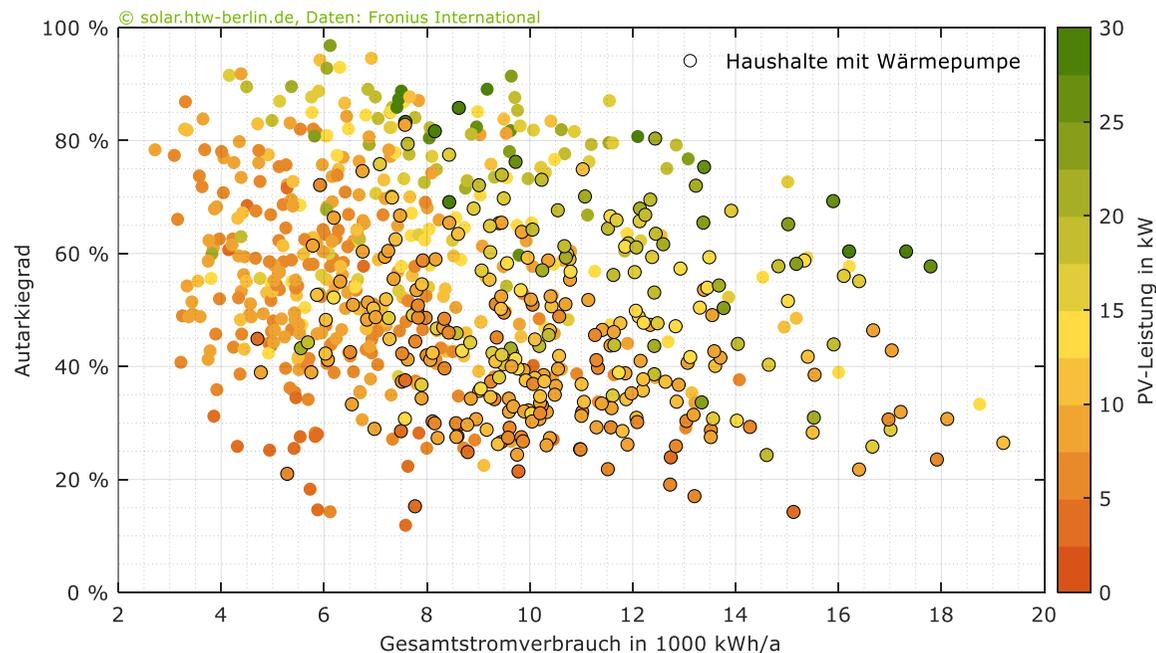


Bild 37 Autarkiegrad von Haushalten mit Elektroauto und sofern vorhanden mit Wärmepumpe und einem Heimspeicher in Abhängigkeit des Gesamtstromverbrauchs und der installierten PV-Leistung. Daten: Fronius International, Stichprobe: 730, mit Heimspeicher: 357.

Autarkiegrad vollelektrifizierter Haushalte



Vollelektrifizierte Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe können sich im Durchschnitt zu 37 % mit ihrem eigenen Solarstrom versorgen. Ein zusätzlicher Heimspeicher steigert den Autarkiegrad in diesen Haushalten im Mittel um 20 Prozentpunkte.

C und D. Beide verfügen über eine Solaranlage mit 12 kW Nennleistung und weisen einen vergleichbaren Gesamtstromverbrauch von ca. 9000 kWh/a auf. Haushalt D lädt mit 4032 kWh/a deutlich mehr Energie in das Fahrzeug als Haushalt E (2299 kWh/a). Die Ladung erfolgt dabei jedoch zu etwa 85 % der Zeit in der Nacht, weshalb den Solaranteil an der Wallbox lediglich 2 Prozentpunkte beträgt. Bei Haushalt C liegt er hingegen bei 74 %. Dies ist einer der Hauptgründe, warum sich der Autarkiegrad ohne Heimspeicher mit 61 % (Haushalt C) und 23 % (Haushalt D) stark unterscheidet.

357 der 732 untersuchten Haushalte (49 %) verfügen über einen Batteriespeicher, sodass der **Autarkiegrad mit einem PV-Speichersystem** ausgewertet werden kann. Während in vollelektrifizierten Haushalten nur 43 % über einen zusätzlichen Heimspeicher verfügen, liegt der Anteil in Wohngebäuden ohne Wärmepumpe bei 52 %. Bild 37 stellt den Autarkiegrad, den die Haushalte erzielten, in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung und des jährlichen Stromverbrauchs dar. In den Haushalten mit Heimspeicher wurde

dieser in der Auswertung berücksichtigt, bei den anderen Haushalten hat sich der dargestellte Autarkiegrad nicht geändert. Der Vergleich zu Bild 36 verdeutlicht, dass die Streuung der Autarkiegrade erwartungsgemäß angestiegen ist. Dabei profitieren insbesondere die Haushalte mit einer großen PV-Anlage von einem Heimspeicher, da entsprechend mehr Solarüberschüsse zur Zwischenspeicherung zur Verfügung stehen.

Bild 38 stellt die **Häufigkeitsverteilung des Autarkiegrads ohne Heimspeicher** für die untersuchten Haushalte gegenüber. Trotz des hohen Strombedarfs und der zeitlichen Unterschiede zwischen einem hohen Solarertrag und einem hohen Energiebedarf der Wärmepumpe, erzielen die vollelektrifizierten Haushalte bereits ohne einen Heimspeicher einen mittleren Autarkiegrad von 37 %. Der Autarkiegrad ist dabei von einer klassischen Normalverteilung gekennzeichnet. Die Ergebnisse streuen zwischen einem Eigenversorgungsanteil von 10 % und 70 %. Wie zu erwarten liegt der mittlere Autarkiegrad in Haushalten

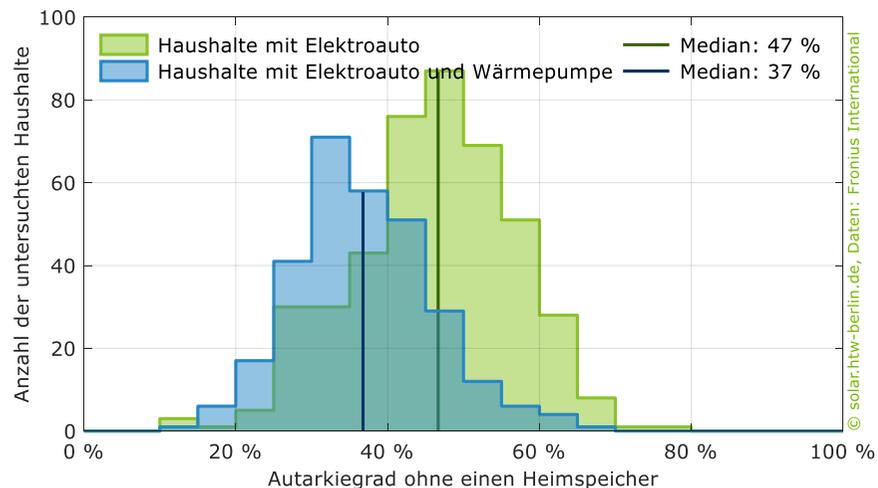


Bild 38 Häufigkeitsverteilung des Autarkiegrads der untersuchten Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe. Daten: Fronius International, Stichprobe: 433 & 297, Klassenbreite 5 Prozentpunkte.

ohne Wärmepumpe mit 47 %, höher. Dabei ist die Normalverteilung jedoch leicht zu höheren Autarkiegraden verschoben. 91 % aller Haushalte erreichen einen Autarkiegrad größer als 30 %. In 9 % der Haushalte liegt er über 60 %. Klar ist: Der Autarkiegrad fällt umso höher aus, je größer die PV-Anlage dimensioniert ist und je höher der Anteil des Strombedarfs (Haushalt, Elektroauto und Wärmepumpe) ist, der tagsüber und in den Sommermonaten anfällt. Das dynamische Überschussladen wirkt sich ebenfalls positiv auf die Autarkiegrade der Haushalte aus:

„Die Funktion „dynamisches Überschussladen“ einer Wallbox erhöht den Autarkiegrad im Mittel um 6 Prozentpunkte.“

Würden die Fahrzeuge ungesteuert laden, würde der Autarkiegrad der 730 analysierten Haushalte ohne Heimspeicher bis zu 31 % geringer ausfallen.

Um wie viel Prozentpunkte steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad?

Wie der Vergleich von Bild 36 und Bild 37 sowie Bild 38 und Bild 39 zeigt, erhöhen die Heimspeicher der analysierten Haushalte deren Autarkiegrade deutlich. Auch hier gilt: Je größer die nutzbare Speicherkapazität des Heimspeichers ausfällt, desto höher auch die Steigerung des Autarkiegrads. Allerdings zeigen Analysen zur Speicherauslegung, dass der Autarkiegrad mit jeder zusätzlichen Kilowattstunde Speicherkapazität nur noch geringfügig zunimmt [61]–[65]. In Privathaushalten dient der Batteriespeicher vorrangig dazu die tageszeitlichen Unterschiede zwischen der Solarstromerzeugung und dem Stromverbrauch in den Abend- und Nachtstunden ausgleichen. Wird der Heimspeicher in der Nacht allerdings nicht leer, kann er am Folgetag weniger

Solarenergie aufnehmen. Eine zu große Überdimensionierung des Heimspeichers ist weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll.

227 der 733 Haushalte verfügen neben der PV-Anlage und dem Elektroauto über einen Heimspeicher. In 130 Haushalten ist neben dem Speicher zusätzlich noch eine Wärmepumpe installiert.

Bild 39 stellt die **Häufigkeitsverteilung des Autarkiegrads der Haushalte mit Heimspeicher** gegenüber. Sie variieren je nach der technischen Ausstattung der Wohngebäude zwischen 38 % und 97 % sowie 29 % und 86 % (mit Wärmepumpe). Bei den Haushalten ohne Wärmepumpe lässt sich auch hier eine leichte Verschiebung der Verteilung zu den höheren Autarkiegraden identifizieren. Bei 91 % dieser Haushalte liegt der Autarkiegrad mit einem Heimspeicher über 55 %. Der geringere Autarkiegrad der anderen 20 Wohngebäude hat vor allem zwei Gründe: Die Fahrzeugladung erfolgt entweder vornehmlich in der Nacht oder die Solaranlage ist zu klein dimensioniert. Im Mittel können die

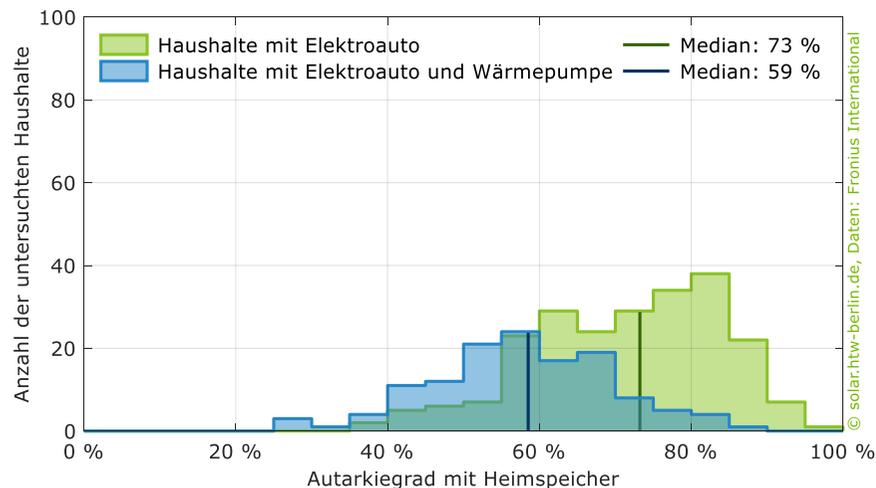


Bild 39 Häufigkeitsverteilung des Autarkiegrads der untersuchten Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe und einem Heimspeicher. Daten: Fronius International, Stichprobe: 227 & 130, Klassenbreite 5 Prozentpunkte.

Solaranlage möglichst groß auslegen



Ist die Solaranlage zu klein, stehen weder genügend Solarüberschüsse zur Versorgung noch zur Speicherung zur Verfügung. Ein Batteriespeicher zur Solarstromspeicherung sollte nur installiert werden, wenn die PV-Leistung 0,5 kW je 1000 kWh/a Stromverbrauch übersteigt. Dimensionierungsempfehlungen finden sich in der Stromspeicher-Inspektion 2021 und 2025 sowie auf solar.htw-berlin.de.

Haushalte mit Elektroauto und einem PV-Speichersystem 73 % ihres Strombedarfs im Jahr decken.

Wie zu erwarten fällt der positive Nutzen des Heimspeichers bei den Haushalten mit Wärmepumpe etwas geringer aus. Der erzeugte Solarstrom reicht in der winterlichen Betriebszeit der Wärmepumpe in der Regel zur Deckung des gesamten Stromverbrauchs des Haushalts, des Elektroautos und der Wärmepumpe nicht aus. Die restlichen solaren Überschüsse sind häufig zu gering, um den Heimspeicher signifikant zu laden. Trotzdem liegt der Autarkiegrad bei vollelektrifizierten Haushalten mit einem Heimspeicher im Durchschnitt bei 59 %.

Welchen zusätzlichen **Anteil der Heimspeicher am Autarkiegrad** hat, zeigt Bild 40. Im Mittel (Median) steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad in vollelektrifizierten Haushalten mit Wärmepumpe um 19 Prozentpunkte. Verfügen die Wohngebäude nur über ein Elektroauto, sind es sogar 7 Prozentpunkte mehr, also 26 %. Wie zu erwarten, streuen die Ergebnisse jedoch stark. Verbrauchen die Haushalte mehr Strom in der Nacht, fällt der positive Nutzen des Heimspeichers höher aus, als bei tagaktiven Haushalten. Das Verhalten der Bewohner:innen hat somit einen starken Einfluss auf die Ergebnisse.

Die Statistik zur Steigerung des Autarkiegrads fällt je nach technischer Ausstattung der Wohngebäude unterschiedlich aus. In vollelektrifizierten Haushalten mit Elektroauto und Wärmepumpe steigert der Heimspeicher

- in 90 % der Fälle den Autarkiegrad um mehr als 13 Prozentpunkte und
- in 10 % der Fälle den Autarkiegrad um mehr als 27 Prozentpunkte.

Ist keine Wärmepumpe installiert und verfügt der Haushalt nur über ein Elektroauto, erhöht der stationäre Batteriespeicher

- in 90 % der Fälle den Autarkiegrad um mehr als 16 Prozentpunkte und
- in 10 % der Fälle den Autarkiegrad um mehr als 32 Prozentpunkte.

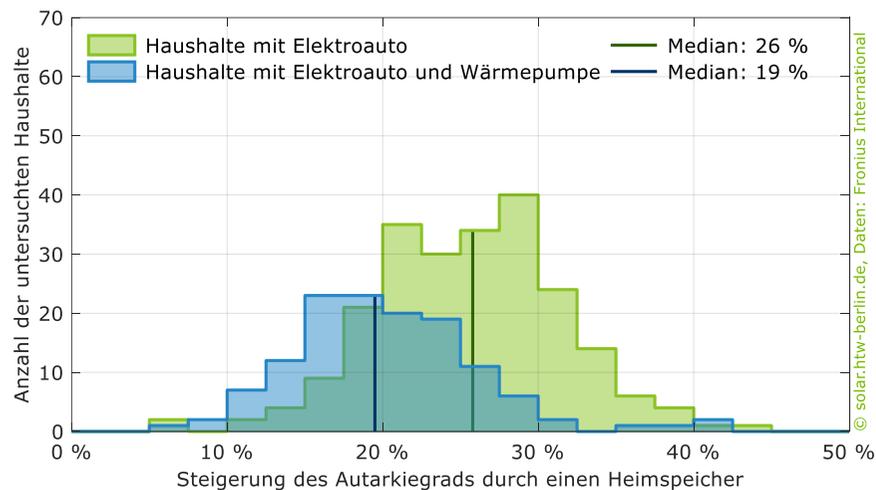


Bild 40 Steigerung des Autarkiegrads durch einen Heimspeicher mit Elektroauto und Wärmepumpe. Daten: Fronius International, Stichprobe: 227 & 130, Klassenbreite 2,5 Prozentpunkte.

Heimspeicher richtig dimensionieren



Ein Heimspeicher sollte immer unter Berücksichtigung der technischen Ausstattung und des individuellen Verbrauchsverhaltens ausgelegt werden. Bisher steht hier vor allem der Stromverbrauch des Haushalts zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang im Fokus. In Kombination mit Elektrofahrzeugen kann der Batteriespeicher größer ausfallen. Die Stromspeicher-Inspektion 2021 zeigt, dass bei Elektroautos mit solargeführter Ladung spätestens ab 1,5 kWh je 1000 kWh/a Gesamtstromverbrauch ein zunehmender Sättigungseffekt auftritt [61]. Der Energiedurchsatz des Batteriesystems lässt sich mit größeren Speicherkapazitäten bei unveränderter PV-Generatorleistung kaum erhöhen. Wird das Elektroauto hingegen vornehmlich in den Abendstunden geladen, ist ein größerer Batteriespeicher durchaus berechtigt [61]. Die Betriebsdaten dieser Studie deuten darauf hin, dass die Haushalte hohe Solaranteile an der Fahrzeugladung und hohe Autarkiegrade erreichen, wenn der Heimspeicher die mittlere Energiemenge pro Ladevorgang speichern können.

Bei der Auslegung des Stromspeichers können unserer Rechner „Solarisator“ und „Solarstromer-Tool“ unter <https://solar.htw-berlin.de/rechner/> helfen.

Forschungsprojekt Wallbox-Inspektion



Die Studie entstand im Rahmen des Forschungsprojekts Wallbox-Inspektion, das gemeinsam mit den Partnern ADAC e.V. und Fraunhofer ISE durchgeführt und vom BMWK gefördert wird.

Anhang

A.1 Methodik zur Bestimmung der Steigerung des Solaranteils durch das Überschussladen

Bild 34 stellt schematisch die Vorgehensweise zur Bestimmung der Steigerung des Solaranteils durch das Überschussladen dar. Ausgangspunkt ist die gemessene Wallbox- und Solarleistung in einer zeitlichen Auflösung von 5 min. Zu erkennen ist, dass der solare Überschuss, der nach der Deckung der Haushaltslast noch zur Verfügung steht, an diesem Beispieltag vorwiegend kleiner als 6 kW ist. Die Wallbox, die über eine Phasenumschaltung verfügt, beschränkt das Laden daher auf den einphasigen Betrieb und auf 3,7 kW. Wie Bild 34 zeigt, wird die Leistungsabgabe der Wallbox kontinuierlich angepasst und folgt dem solaren Überschuss. Mit der nachfolgenden Methodik wird in vier Schritten aufgezeigt, wie sich der Solaranteil bei einer ungesteuerten Ladung bei Ankunft verändern würde. Hierfür wird angenommen, dass das Lade- und Ansteckverhalten identisch bleibt und nur die Ladung selbst auf eine andere Weise erfolgt.

1. Maximale Ladeleistung bestimmen

Die maximale Ladeleistung kann je nach Wallbox, den Einstellungen und dem Elektrofahrzeug variieren. Beispielsweise laden einige Haushalte nur einphasig mit max. 3,7 kW. Bei anderen Haushalten begrenzt das Fahrzeug die Ladung auf 7,2 kW, obwohl die Wallbox mehr Leistung zur Verfügung stellen könnte. Die maximale Ladeleistung muss daher für jeden Haushalt individuell bestimmt werden und ist eine für sein Ladeverhalten charakteristische Größe. Für diese Untersuchung wird die maximale Ladeleistung so ermittelt, dass

99 % aller Ladeleistungen des Haushalts kleiner oder gleich der maximalen Ladeleistung sind. Somit wird die maximale Leistung bestimmt ohne Ausreißer und Messfehler zu berücksichtigen. Beim Beispiel in Bild 34 beträgt die maximale Ladeleistung 9,9 kW. Reduktionen der Ladeleistung, wie sie z. B. bei der Ladeschlussbegrenzung auftauchen, werden nicht abgebildet.

2. Startzeitpunkt der Ladungen bleibt identisch

Zur Bestimmung der geladenen Energiemenge jedes Ladevorgangs muss der Start- und Endzeitpunkt der gemessenen Fahrzeugladung ermittelt werden. Aufgrund eines zu geringen Solarüberschusses, einer Einschaltverzögerung oder auch einer Phasenumschaltung, kann es zu kurzzeitigen Unterbrechungen der Ladung kommen (siehe z. B. auch 15:10 Uhr). Ist diese Pause geringer als 30 min, wird die Leistungsabgabe der Wallbox nicht in zwei Ladungen aufgeteilt, sondern wie in Bild 34 nur als eine Ladung gewertet. Einen Sonderfall bilden Ladeunterbrechungen, die auf Kommunikationseinbrüche beruhen. Hier wird sogar eine 60 min Unterbrechung bei der Zusammenfassung zu einem Ladevorgang zugelassen. Beide Ladevorgänge, sowohl mit maximaler Leistung als auch solargesteuert, starten unter dieser Annahme zum gleichen Zeitpunkt. An dem Beispieltag beginnen somit beide Ladungen um 10:45 Uhr. Aufgrund der höheren Ladeleistung beendet die virtuelle Wallbox ihre Ladung bei gleicher Energiemenge jedoch etwa 5 Stunden früher.

3. Energiemengen bleiben unverändert

Um die Steigerung des Solaranteils durch das Überschussladen korrekt ermitteln zu können, unterliegt die Analyse der Annahme, dass die geladenen Energiemengen identisch bleiben. Die mit maximaler Leistung ladende Wallbox gibt somit genauso viel Energie wie die vermessene Ladestation ab. Allerdings ist die Zeit der Energieabgabe aufgrund der hohen Leistung deutlich kürzer. Um dies korrekt abzubilden, muss die mittlere Leistung der sonst konstanten maximalen Ladeleistung in den letzten 5 min (ein Zeitschritt) reduziert werden (siehe Bild 34 um 12:45 Uhr). An dem Beispieltag betragen die geladenen Energiemengen mit der vermessenen und virtuellen Wallbox jeweils genau 20,1 kWh.

4. Vergleich der Solaranteile

Abschließend lassen sich die Solaranteile an der Fahrzeugladung ermitteln und die Steigerung durch das Überschussladen bestimmen. An dem Beispieltag nutzt die vermessene Wallbox nahezu ausschließlich Solarenergie, um das Elektroauto zu laden. Der Solaranteil beträgt gerundet 100 %. Durch die höhere Ladeleistung überschreitet die mit maximaler Leistung ladende Wallbox den solaren Überschuss deutlich. Der Solaranteil beträgt nur 47 %. Die Funktion des Überschussladens der Wallbox kann den Solaranteil an diesem Tag somit mehr als verdoppeln.

Die Analyse des Verlaufs der gemessenen Wallboxleistungen zeigt jedoch, dass zum einen viele Haushalte die Funktion des Überschussladens auch für sehr geringe Energiemengen nutzen, siehe auch Bild 41 an den Tagen 2 und 3. Dies wäre mit einer hohen Ladeleistung vollkommen unüblich. Zum anderen sind in der gemessenen Wallboxleistung zum Teil auch geringfügige Energie-

mengen erfasst, die keiner Ladung zuzuordnen sind. Sie könnten auf die Kommunikation der Wallbox mit dem Fahrzeug zurückzuführen sein oder auch die Energieaufnahme eines sporadisch angeschalteten Peripherieverbrauchers widerspiegeln. Daher wurden Ladungen, die kleiner sind als 4 kWh nicht direkt ersetzt. Sie wurden aufsummiert und zur nächsten möglichen Ladung addiert. Dies ist auch in Bild 41 bei der Netzladung in der Nacht des dritten Tages identifizierbar. Die Ladung mit maximaler Leistung dauert trotz höherer Leistung etwas länger wie der gemessene Ladeprozess, da die Energie der PV-Ladungen den beiden Tagen vorangegangenen Tage erst zu diesem Zeitpunkt geladen werden kann.

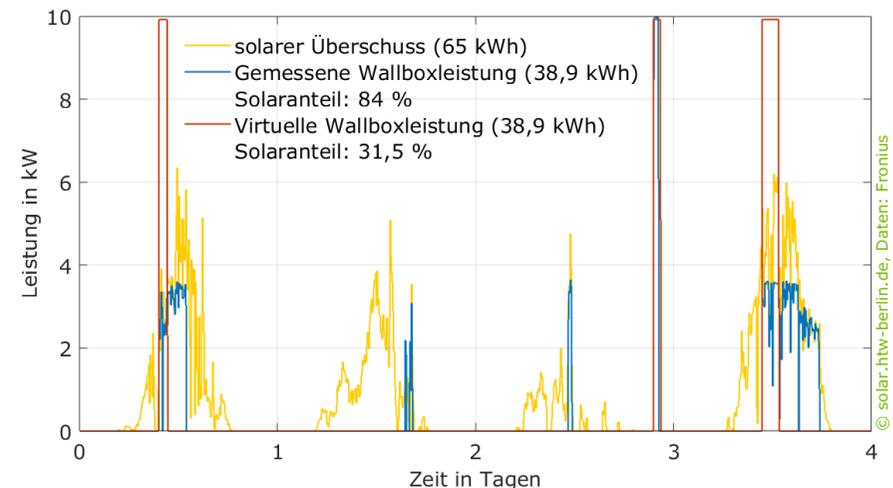


Bild 41 Vergleich der gemessenen und virtuell ermittelten Wallboxleistung zur Bestimmung der Steigerung des Solaranteils durch das Überschussladen. Daten: Fronius International, zeitliche Auflösung: 5 min.

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC e.V.: „Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich“, 02-Jan-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/wallbox-anmelden/>. [Zugegriffen: 19-Jan-2024]
- [2] ADAC e.V.: „Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur“, 25-Okt-2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-batterie/>. [Zugegriffen: 14-März-2024]
- [3] K. Sevdari, L. Calearo, B. H. Bakken, P. B. Andersen, M. Marinelli: „Experimental validation of onboard electric vehicle chargers to improve the efficiency of smart charging operation“, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Bd. 60, S. 103512, Dez. 2023
- [4] pv magazine: „Marktübersicht Wallboxen und Ladesäulen 2024“, *pv magazine Deutschland*, Nov-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/marktuebersicht-elektroauto-ladeloesungen/produkt Datenbank-elektroauto-ladeloesungen-wallboxen-und-ladesaeulen-2024/>
- [5] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg.: „Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb (FZ 28)“. 2025
- [6] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg.: „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen (FZ 27)“. 2025
- [7] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg.: „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, (FZ 13)“. 01-Jan-2025
- [8] ACEA: „ACEA - Driving Mobility For Europe“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-0-8-in-2024-battery-electric-13-6-market-share/>. [Zugegriffen: 01-Apr-2025]
- [9] ARGOBANK Autobank und AUTOHAUS: „Erfolgsfaktoren der Elektromobilität“, 2024
- [10] EnBW: „E-Autos 2024: Verkaufszahlen, Trends und Top-Modelle“, 28-Jan-2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/trends/e-autos-2024-verkaufszahlen-trends-und-top-modelle/>. [Zugegriffen: 01-Apr-2025]
- [11] ZDF - Kevin Schubert: „Wie wir das E-Auto-Zeitalter verschlafen“, 05-Mai-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/elektroauto-deutschland-verkehrswende-mobilitaet-probleme-100.html>. [Zugegriffen: 01-Apr-2025]
- [12] Kraftfahrt-Bundesamt: „Statistik/Fahrzeuge/Umwelt“, 01-Apr-2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Umwelt/umwelt_node.html
- [13] Center of Automotive Management: „Electromobility Report 2023: Exportgeschäft mit gebrauchten Elektrofahrzeugen (BEV)“, 09-März-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://auto-institut.de/automotiveinnovations/emobility/electromobility-report-2023-exportgeschaeft-mit-gebrauchten-elektrofahrzeugen-bev/>. [Zugegriffen: 18-Apr-2024]
- [14] Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen, Freie Demokraten (FDP): „Koalitionsvertrag 2021 - 2025 (Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit)“, Berlin, Nov. 2021

- [15] Roland Irle - EV Volumes: „Which EV manufacturers performed the best in 2024 so far?“, 19-Juli-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ev-volumes.com/news/ev/which-ev-manufacturers-performed-the-best-in-2024-so-far/>
- [16] Tom Wicke - Fraunhofer ISI: „Elektroauto-Verkäufe 2024: Chinesische Hersteller auf dem Vormarsch, Stagnation in Europa“, 23-Jan-2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/elektroauto-verkaeuft-2024-china-vormarsch-stagnation-europa.html>
- [17] ADAC e.V.: „Der Elektroantrieb: So funktioniert ein Elektroauto“, 02-Okt-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tankenkraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/elektroantrieb/>. [Zugegriffen: 14-März-2024]
- [18] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, C. Schlüter, J. Meyne: „Stromspeicher-Inspektion 2023“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2023
- [19] Weniger, Johannes, Orth, Nico, Meissner, Lucas, von Rautenkranz, Johanna: „Stromspeicher-Inspektion 2025“, HTW Berlin, 01-Feb-2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/studien/stromspeicher-inspektion-2025/>. [Zugegriffen: 31-März-2025]
- [20] B. Varga, A. Sagoian, F. Mariasiu: „Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 5, S. 946, März 2019
- [21] Deutsche Kommission Elektrotechnik, Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft (BDEW), Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH), Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI): „Technischer Leitfaden: Ladeinfrastruktur Elektromobilität Version 4“, VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., ETG, Okt. 2021
- [22] ADAC e.V.: „Elektroauto im Winter: So wirkt sich Kälte auf Verbrauch und Reichweite aus“, 10-Jan-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/>. [Zugegriffen: 01-Feb-2024]
- [23] M. Steinstraeter, T. Heinrich, M. Lienkamp: „Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range“, *WEVJ*, Bd. 12, Nr. 3, S. 115, Aug. 2021
- [24] C. von Lüders: „Experimentelle und simulative Untersuchung von Lithium-Plating und Lithium-Stripping in Lithium-Ionen-Zellen“, Dissertation, Technische Universität München, Berlin, 2019
- [25] U. Janakiraman, T. R. Garrick, M. E. Fortier: „Review—Lithium Plating Detection Methods in Li-Ion Batteries“, *J. Electrochem. Soc.*, Bd. 167, Nr. 16, S. 160552, Dez. 2020
- [26] ADAC e.V.: „So funktioniert der ADAC Ecotest: Den Abgasen auf der Spur“, 16-Mai-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/ecotest/adac-ecotest/>. [Zugegriffen: 06-März-2025]
- [27] ADAC e.V.: „Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden“, 13-Sep-2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>. [Zugegriffen: 06-März-2025]
- [28] S. S. G. Acharige, Md. E. Haque, M. T. Arif, N. Hosseinzadeh, K. N. Hasan, A. M. T. Oo: „Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations“, *IEEE Access*, Bd. 11, S. 41218–41255, 2023

- [29] S. Rivera, S. Kouro, S. Vazquez, S. M. Goetz, R. Lizana, E. Romero-Cadaval: „Electric Vehicle Charging Infrastructure: From Grid to Battery“, *EEE Ind. Electron. Mag.*, Bd. 15, Nr. 2, S. 37–51, Juni 2021
- [30] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, C. Schlüter, J. von Rautenkranz: „Stromspeicher-Inspektion 2024“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2024
- [31] cFos eMobility: „Phasenumschaltung zwischen einphasigem und dreiphasigem Laden“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cfos-emobility.de/de/cfos-charging-manager/documentation/phase-switching.htm>. [Zugegriffen: 12-Dez-2023]
- [32] DAfi GmbH: „Bedienungsanleitung: SMARTFOX Pro Charger“. 2022
- [33] pv magazine: „Marktübersicht Wallboxen und Ladesäulen“, *pv magazine Deutschland*, Nov-2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/archiv/marktuebersicht-wallboxen-und-ladesaeulen/>
- [34] International Electrotechnical Commission (IEC): „IEC 61851-1- Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/normen/0100544/din-en-iec-61851-1-vde-0122-1-2019-12.html>. [Zugegriffen: 20-Okt-2023]
- [35] ADAC e.V.: „Wallbox fürs Elektroauto anmelden: So geht es“, 23-Nov-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/wallbox-anmelden/>. [Zugegriffen: 01-Dez-2023]
- [36] UScale GmbH: „eMobility EV Retail-Studie 2023“, UScale GmbH, 2023
- [37] J. Buberger, A. Kersten, M. Kuder, R. Eckerle, T. Weyh, T. Thiringer: „Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 159, S. 112158, Mai 2022
- [38] M. Zapf, H. Pengg, T. Bütler, C. Bach, C. Weindl: *Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile: Bewertung der Klimabelastung und der Gesamtkosten - heute und in Zukunft*, 2., Aktualisierte Auflage. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2021
- [39] H. Helms, J. Jöhrens, C. Kämper, J. Giegrich, A. Liebich: „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, Studie, Apr. 2016
- [40] G. Bieker: „A Global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars“, International Council on Clean Transportation (ICCT), Berlin, Juli 2021
- [41] A. Regett, W. Mauch, U. Wagner: „Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V., München, 2019
- [42] ADAC e.V.: „Treibhausgas-Bilanz: Welcher Antrieb kann das Klima retten?“, 21-Dez-2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/>. [Zugegriffen: 14-Mai-2024]
- [43] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: „Kundenakzeptanz als Schlüssel für den Markthochlauf der Elektromobilität“, Berlin, 2021
- [44] A. Scherrer, U. Burghard, M. Wietschel, E. Dütschke: „Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement“, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Nr. 11–2019, S. 23–26, Nov. 2019
- [45] UScale GmbH: „Private Charging-Studie 2023“, UScale GmbH, 2023
- [46] M. Gezelius, R. Mortazavi: „Effect of Having Solar Panels on the Probability of Owning Battery Electric Vehicle“, *WEVJ*, Bd. 13, Nr. 7, S. 125, Juli

2022

- [47] J. Rode: „Solar Photovoltaics and Battery Electric Vehicles“, *SSRN Journal*, 2024
- [48] H. Martin, R. Buffat, D. Bucher, J. Hamper, M. Raubal: „Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand—A detailed case study“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 157, S. 111969, Apr. 2022
- [49] J. Bergner, N. Orth, Prof. Dr. V. Quaschnig: „How much does the Sun power your EV? Simulation Study on Wallbox Efficiency“, in *Tagungsunterlagen PV-Symposium 2025*, Bad Staffelstein, 2025
- [50] P3 Group GmbH, P3 Energy Lab: „P3 EMS Benchmark - Ausgabe 01 | Energy Management Systeme“, P3 Group GmbH, Juni 2024
- [51] pv magazine: „Marktübersicht Wallboxen und Ladesäulen“, *pv magazine Deutschland*, Nov-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/archiv/marktuebersicht-wallboxen-und-ladesaeulen/>
- [52] Clever PV: „Clever PV - Wallboxsteuerung“, 09-Feb-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.clever-pv.com/wallboxsteuerung>. [Zugegriffen: 10-März-2024]
- [53] evcc: „evcc - Sonne tanken: Dokumentation“, 09-Feb-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.evcc.io/docs/reference/configuration/loadpoints>. [Zugegriffen: 10-März-2024]
- [54] SMA Solar Technology AG: „Datenblatt: SMA EV CHARGER 7.4 / 22 - Elektrofahrzeuge mit Solarstrom laden - intelligent, schnell, kostengünstig“. 24-Apr-2020
- [55] Fraunhofer ISE: „Energy-Charts“, 22-Mai-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.html?l=de&c=DE&week=09&source=publish&legendItems=lyayfyg>. [Zugegriffen: 22-Mai-2024]
- [56] EVCC: „EVCC - solares Laden von Elektrofahrzeugen“, 09-Feb-2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.evcc.io/docs/Home>
- [57] NOW GmbH, Hrsg.: *Einfach zuhause laden Studie zum Ladeverhalten von Privatpersonen mit Elektrofahrzeug und eigener Wallbox*. 2024
- [58] M. Wietschel, S. Preuß, R. Kunze, M. Keller: „Laden von Elektrofahrzeugen in Deutschland mit Ökostromverträgen“
- [59] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden, V. Quaschnig: *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*, 1. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015
- [60] T. Staudacher: „Entwicklung eines Modells zur techno-ökonomischen und ökologischen Analyse dezentraler Stromversorgungssysteme für private Haushalte“, Dissertation, TU München, München, 2016
- [61] J. Weniger, N. Orth, I. Lawaczeck, L. Meissner, V. Quaschnig: „Stromspeicher-Inspektion 2021“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2021
- [62] J. Weniger, N. Orth, S. Maier, V. Quaschnig: „Speicherauslegung in Zeiten aufkommender Elektromobilität“, *pv magazine*, Nr. 06, S. 52–55, 2018
- [63] N. Orth, J. Weniger, L. Meissner: „Empfehlungen zur Auslegung von Solarstromspeichern“, *Sonnenenergie*, Nr. 2, S. 16–17, 2022
- [64] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden, V. Quaschnig: *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015
- [65] V. Bertsch, J. Geldermann, T. Lühn: „What drives the profitability of household PV investments, self-consumption and self-sufficiency?“

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsgruppe

SOLARSPEICHERSYSTEME

htw

© solar.htw-berlin.de

