

PV-ÜBERSCHUSSLADEN IN DER PRAXIS: EINE ANALYSE VON LABOR- UND FELDMESSDATEN

Joseph Bergner¹, Nico Orth¹, Bernhard Will-Haussmann²

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin -
Forschungsgruppe Solarspeichersysteme, Wilhelminenhofstr. 75 A 12459 Berlin,
storage-systems@htw-berlin.de, solar.htw-berlin.de

² Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Abteilung Intelligente Netze, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg,

Kurzfassung: Die Vorteile des solaren Überschussladen sind bekannt: Es wird auf der einen Seite als kostengünstige und CO₂-reduzierende Maßnahme zum Laden der Elektrofahrzeuge angesehen. Auf der anderen Seite kann die dezentrale Nutzung der Solarenergie zur Fahrzeugladung Einspeise- und Verbrauchspitzen reduzieren und somit das Stromnetz entlasten [1], [2]. Wie effizient die solare Ladung der Elektrofahrzeuge jedoch erfolgt und wie hoch der Solaranteil an der Fahrzeugladung ausfällt, stand bisher nur sehr oberflächlich im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen [3], [4]. Dieser Beitrag analysiert zum einen die Vermessungen von 5 Wallboxen unter identischen und kontrollierten Laborbedingungen. Zum anderen werden die Monitoringportaldaten von 730 Haushalten aus dem Feld verglichen

Keywords: Labor, Feldmessdaten, Wallbox, Elektromobilität

1 Einleitung

Den größten ökologischen Vorteil bieten Elektrofahrzeuge, wenn sie mit Strom aus erneuerbarer Energie, z. B. von der eigenen Solaranlage, geladen werden [1]–[6]. Da der selbsterzeugte Solarstrom im Gegensatz zum Netzstrom nicht mit Umlagen und Abgaben belegt ist, ist es ökonomisch attraktiv das Elektrofahrzeug mit der eigenen Solarenergie zu laden. Mehrere Studien konnten zeigen, dass im Mittel etwa 70 % bis 75 % der vom Fahrzeug aufgenommenen Energiemenge zuhause geladen wird [7]–[9]. Bei einer Umfrage der NOW GmbH gab die Hälfte der Befragten an, mehr als 90 % an der privaten Wallbox zu laden [12]. Offensichtlich ist: 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 Fahrzeugladung. Neben dem Zeitpunkt beeinflusst auch die Art der Ladesteuerung den Solaranteil. Grundsätzlich kann dabei zwischen vier verschiedenen Konzepten zum Laden von Solarstrom in das Elektrofahrzeug unterschieden werden [10]:

- Ungesteuertes Laden (Laden mit fester Ladeleistung, sobald es angeschlossen wird)
- Zeitgesteuertes Laden (Laden mit fester Ladeleistung in einem vorab definierten Zeitraum)
- Schwellwertladen (Laden mit fester Ladeleistung, sobald ein Schwellwert der Solarstromerzeugung oder der Netzeinspeisung überschritten wurde)
- Überschussladen (Gesteuertes Laden mit dynamischer Anpassung der Ladeleistung)

Der höchste Solaranteil an der Fahrzeugladung lässt sich mit einer automatisierten, dynamischen Wallboxsteuerung erzielen [10]. Grundvoraussetzung für diese Ladestrategie ist jedoch die Messung der Netzleistung am Netzanschlusspunkt. In der Regel wird der überschüssige Solarstrom (Solarerzeugung abzüglich Haushaltsstrom) mit einem digitalen Zähler (Energiezähler, engl. Energy Meter) erfasst. Er liefert dem Energiemanagement die Information, welche Solarleistung dem Elektroauto zur Verfügung steht.

Trotz der klaren Vorteile von solaren Ladestrategien ist bislang wenig bekannt über die Nutzungsmuster der Haushalte und die Effizienz solcher Lösungen. Im Rahmen des Forschungsprojektes WB-Inspektion wurde in mehreren Studien betrachtet, wie der realistische Nutzen sein kann. Hierbei zeigt sich eine Bandbreite, die sowohl technische als auch Verhaltensaspekte berücksichtigt. Ziel der Forschung ist dabei eine mögliche Verbesserung des Energiemanagements und der Effizienz solarer Ladestrategien anzuregen.

In diesem Beitrag werden in Abschnitt 2 und 3 zwei unterschiedliche Datensätze betrachtet, um die folgenden Fragen in Abschnitt 4 zu beantworten:

1. Was unterscheidet reale Wallboxen von idealen Modellen und welche Verlustmechanismen lassen sich beim Vergleich unterschiedlicher Wallboxen beobachten?
2. Was sind typische Anwendungsparameter von Wallboxen in Kombination mit PV-Anlagen und wie sehen die Nutzungsmuster aus?
3. Bis zu welchem Anteil können sich Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe in Deutschland, Österreich und Schweiz mit eigenem Solarstrom versorgen?

2 Labormessdaten

Der ADAC e.V., das Fraunhofer ISE und die HTW Berlin haben im Rahmen des Forschungsvorhabens „WBInspektion“ gemeinsam mit einem Industriebeirat von mehreren Herstellern von Wallboxen eine Prüfrichtlinie zur Charakterisierung von unidirektionalem und solaren Laden für Elektrofahrzeuge entwickelt [11]. Der Leitfaden beschreibt die einheitliche Vermessung zentraler Systemeigenschaften von gesteuerten Wallboxen im Privatbereich, die über die Funktionalität des solaren Überschussladens verfügen. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf den Anwendungstests des Prüfleitfadens. Weitere Auswertungen sind in der Studie „Wallbox-Inspektion“ zu finden [12].

2.1 Labormessdaten - Datenbeschreibung

Die Vermessung erfolgte in einer Power Hardware-in the-Loop (PHIL)-Umgebung im Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE [13]. Das PHIL-System baut eine Echtzeit-Simulationsumgebung auf, in der die Prüflinge einheitlichen und realitätsnahen Bedingungen ausgesetzt sind und vermessen werden. Der Systemaufbau ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Der Haushalt und die Solaranlage werden durch eine elektronische Last emuliert. Sie gibt dem Prüfling eine Überschussleistung als Regelgröße vor. Die Prüflinge setzen sich aus der Wallbox, den Stromsensoren am Netzanschlusspunkt und dem Energiemanagement zusammen. Alle Prüflinge wurden mit ihren Standardeinstellungen im Betriebsmodus zum solaren Überschussladen vermessen. Ein Heimspeicher ist im Prüfaufbau nicht enthalten.

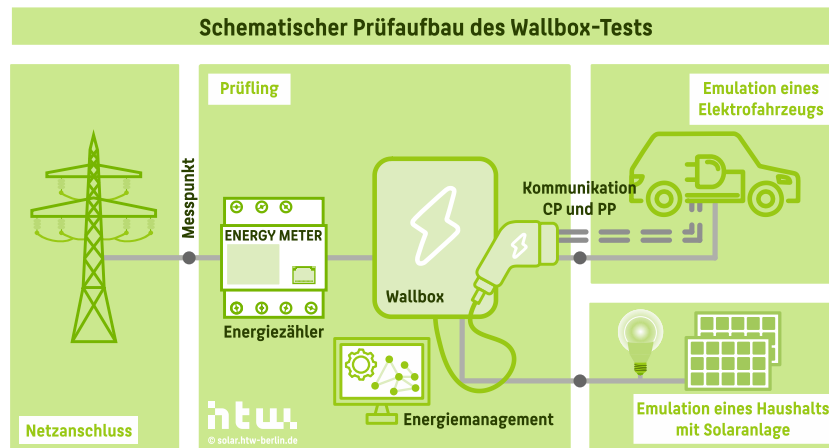


Bild 1 Schematischer Aufbau des Wallbox-Tests in der Power Hardware-in-the-Loop-Umgebung im Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE.

Das Verhalten der Prüflinge wurde über folgende Wirkkette ermittelt:

1. Mit der Emulation eines Haushalts mit Solaranlage wird eine Überschussleistung vorgegeben.
2. Am Netzanschlusspunkt stellt sich ein Leistungsfluss ein.
3. Die Überschussleistung, die potenziell ins Netz eingespeist werden würde, wird mit dem Energy Meter des Prüflings erfasst und an das Energiemanagement weitergegeben.
4. Das Energiemanagement des Prüflings übergibt der Ladestationen einen Sollwert.
5. Unter Berücksichtigung ihrer Systemgrenzen (z. B. minimale und maximale Ladeleistung, Ladestromschrittweite oder Ein- und Ausschaltverzögerungen) stellt die Wallbox dem Elektrofahrzeug einen maximalen Ladestrom bereit.
6. Sofern das Elektrofahrzeug ladebereit ist und diesen Ladestrom aufnehmen kann, wird geladen.

Bei einer idealen Regelung würde die Leistung am Netzanschluss auf eine Leistung von 0 Watt eingestellt und die Wallbox so geregelt werden, dass der komplette Überschuss (Sollwert) ins Fahrzeug geladen wird (Ist-Wert), solange der Ladezustand dies zulässt. Im Rahmen dieses Beitrags werden die Anwendungstests des Prüflitfadens dargestellt. Weitere Details sind in der Prüfrichtlinie zu finden. Die Sollwerte der solaren Überschussleistung wurde auf der Grundlage von realen Messwerten der Haushaltslast und der solaren Erzeugung ermittelt. Die unterschiedlichen Wallboxen werden mit den Kürzeln A1 bis E1 dargestellt.

Die Grundlagen für die verschiedenen Belastungsprofile sind sekundliche Messungen der Haushaltslast und der PV-Erzeugung in Einfamilienhäusern in Berlin, siehe Bild 2. Hier zu sehen ist der Anstieg der Solarenergie an einem sonnigen Morgen (blau). Die Last des Haushalts ist in Rot dargestellt. Die residuale Last bzw. Überschussleistung, die der Wallbox zur Verfügung steht, ergibt sich aus der Differenz der beiden Leistungen (gelb).

Aus den Betriebsdaten unterschiedlicher Haushalte wurden insgesamt 6 verschiedene, kurzzeitige Anwendungstests bis zu einer Länge von 45 min identifiziert (grauer Bereich, für AWT 1). Sie bilden klassische Betriebseffekte in Wohngebäuden nach. Die vier im Rahmen dieses Beitrags dargestellten Belastungsprofile lassen sich grob wie folgt charakterisieren:

- AWT1: Sonniger, unbedeckter Morgen mit Fluktuationen der Überschussleistung, bedingt durch die Haushaltslast
- AWT2: Bedeckter Frühlingstag im Mai, mit schwankender Überschussleistung unterhalb von 4 kW
- AWT3: Stark wechselnd bewölkter Tag mit Wolkendurchzügen und somit schwankender Leistungsabgabe der PV-Anlage
- AWT4: Vorwiegend bedeckter Tag, der die Solarstrahlung auf die Diffusstrahlung begrenzt, durchbrochen von einer temporären Wolkenlücke

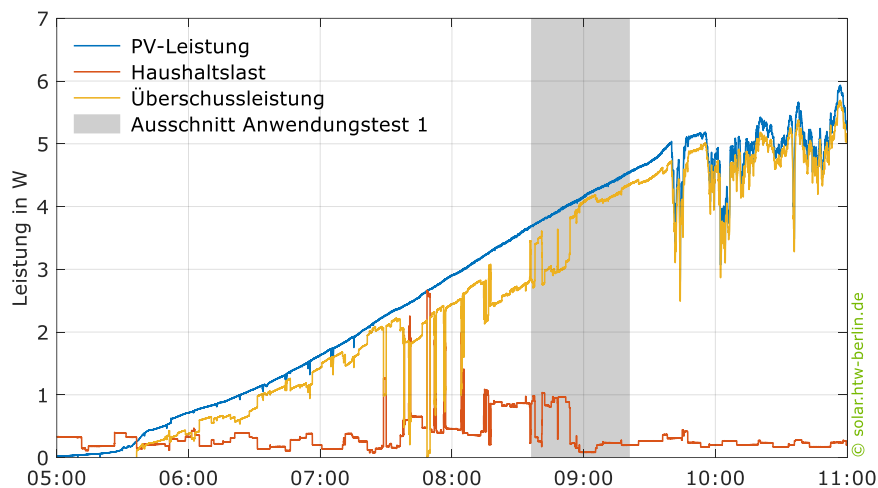


Bild 2 Sekündliche Leistungsmesswerte der PV-Erzeugung und Haushaltslast sowie der resultierenden Überschussleistung in einem Einfamilienhaus in Berlin im Juni 2025.

2.2 Labormessdaten - Auswertung

Wie Bild 2 entnommen werden kann, steigt die solare Erzeugung mit dem Sonnenaufgang im Rahmen des ersten Anwendungstests (AWT 1) kontinuierlich an. Die schwankende Überschussleistung resultiert somit insbesondere durch die zeitlich begrenzte Nutzung unterschiedlicher Haushaltsverbraucher am Morgen. Bild 3 zeigt die Leistung, die die Wallboxen B1, D1 und E1 auf Basis ihrer Messungen am Netzanschlusspunkt abgeben. Die Wallbox B1 kann auch kleinen Änderungen der Sollwertvorgabe gut folgen, da die Anpassung der Leistungsabgabe in sehr kleinen Leistungsstufen realisiert wird. Allerdings sind überwiegend konstante Regelabweichungen von bis zu 150 W zu erkennen, die in zusätzlichem Netzbezug resultieren. Die Wallbox E1 regelt hingegen im einphasigen Betrieb in größeren 230-W-Leistungsstufen, was 1-A-Schritten entspricht. Auf kleinteilige Änderungen reagiert sie ungenauer. Die Wallbox D1 reagiert um etwa 100 s verzögert auf die Änderungen der Überschussleistung, wie gut an den Leistungssprüngen bei Minute 2 und 18 nachvollzogen werden kann. Nach 18 Minuten übersteigt die Überschussleistung die maximale Ladeleistung im einphasigen Betrieb. Die Wallboxen begrenzen daraufhin ihre Leistungsabgabe auf 3,7 kW. Etwa 1 Minute nachdem der solare Überschuss erstmalig den unteren Schwellwert für die dreiphasige Ladung überschritten hat, schaltet die Wallbox E1 automatisch in den dreiphasigen Betrieb um. Dabei erhöht sie die Leistungsabgabe kurzzeitig bis zur maximalen Leistung, bevor die minimale dreiphasige Leistung eingestellt wird. Bei Wallbox B1 erfolgt die automatische Phasenumschaltung 13 Minuten später mit Überschreiten der minimalen dreiphasigen Leistung. Wallbox D1 verbleibt während des Anwendungstests im einphasigen Betrieb.

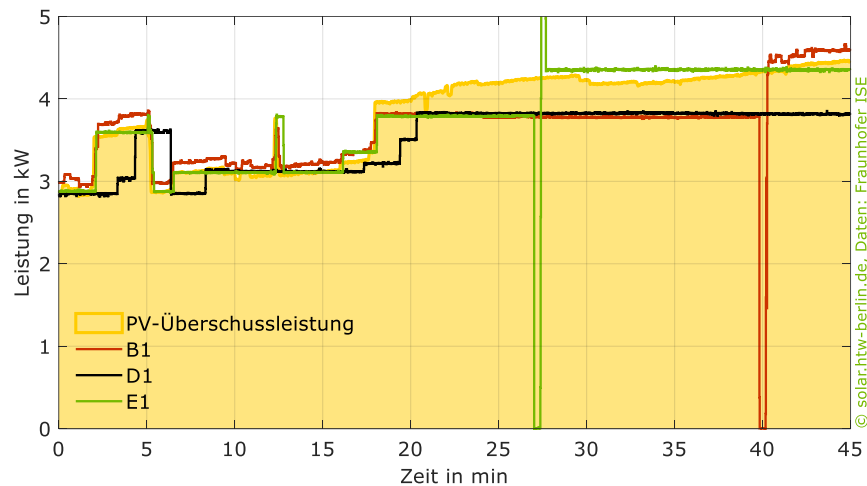


Bild 3 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem sonnigen, unbedeckten Morgen im Sommer (AWT 1). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Bild 4 stellt beispielhaft das Reaktionsverhalten der Wallboxen C1 und D1 im zweiten Anwendungstest dar. Die Überschussleistung liegt dabei vorwiegend im mittleren bis oberen Leistungsniveau der einphasigen Leistungsabgabe der untersuchten Wallboxen. Wie beim ersten Anwendungstest, reagiert die Wallbox D1 stark verzögert auf Änderungen der Überschussleistung. Anpassungen der Leistungsabgabe erfolgen zudem nur im Minutentakt. Durch die Schwankungen der Sollwerte kommt es zu Abweichungen zwischen Überschuss- und Wallboxleistung. Beispielsweise erreicht die Überschussleistung bei Minute 10 einen Wert von 3,2 kW. Die Wallbox stellt diesen Vorgabewert jedoch erst 2 min später ein. Wie bereits im Abschnitt 2.4 beschrieben, reagiert die Wallbox langsamer auf positive als auf negative Leistungssprünge. Dieses Regelverhalten führt hier zu mehr überschüssiger Netzeinspeisung als bei anderen Wallboxen. Um die Minuten 22 und 29 wird die Wallboxleistung hingegen erhöht, obwohl die Überschussleistung kurz zuvor abgefallen ist – Netzstrom wird zur Fahrzeugladung benötigt. Dies ist dem Energiemanagement geschuldet, welches nur jede Minute eine Optimierung durchführt und hierbei auch noch die Messwerte der letzten Minuten berücksichtigt. Mit den Anpassungen im Minutentakt kommt es somit bei starken Schwankungen der Überschussleistung zu erkennbaren Abweichungen der Ladeleistung.

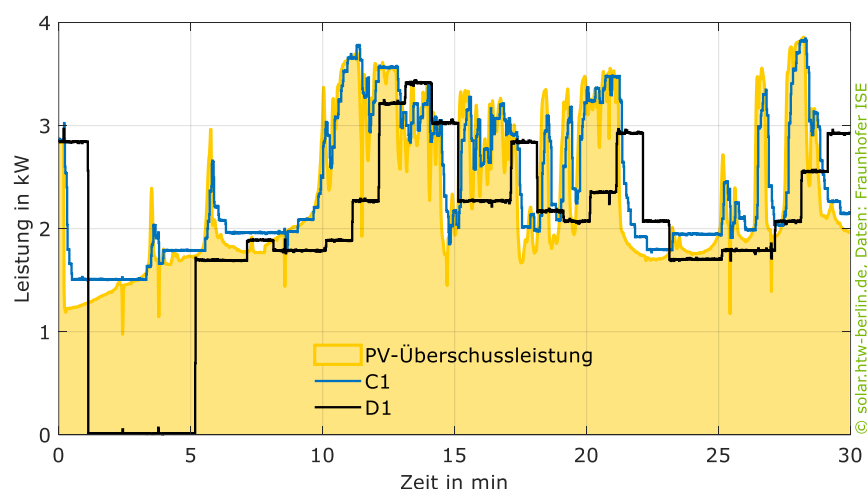


Bild 4 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem bewölkten Mittag im Frühling (AWT 2). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Wallbox C1 kann dem solaren Überschuss deutlich genauer folgen und regelt auch kleine Änderungen der Sollwertvorgabe aus. Im Gegensatz zu anderen Wallboxen verhindert die lange Ausschaltverzögerung der Wallbox zu Beginn des Tests deren Abschalten. Auffällig ist darüber hinaus die über mehrere Minuten konstante Wallboxleistung um Minute 4, 7 und 24 des Anwendungstests, die zusätzlichen Netzbezug verursacht. Dies ist nicht auf eine Ausschaltverzögerung zurückzuführen und wie das restliche, schnelle und präzisere Regelverhalten andeutet, nicht unbedingt notwendig.

In Bild 5 ist die Leistungsabgabe der Wallboxen A1, C1 und E1 beim dritten Anwendungstest mit stark wechselhafter Bewölkung zur Mittagszeit im Sommer zu entnehmen. Unter nahezu stationären Bedingungen - die Überschussleistung ändert sich nur geringfügig - schwingt die Leistungsabgabe der Wallbox A1 in 1-A-Stufen um den Sollwert. Im Mittel liegt die Wallboxleistung somit leicht unterhalb der Überschussleistung. Bedingt durch Schwankungen des solaren Überschusses schaltet die dreiphasige Wallbox mehrmals ein und aus. Eine leichte Verzögerung bei den Einschaltvorgängen soll sicherstellen, dass die Überschussleistung für mehr als 30 s oberhalb des Schwellwerts von 4,2 kW liegt.

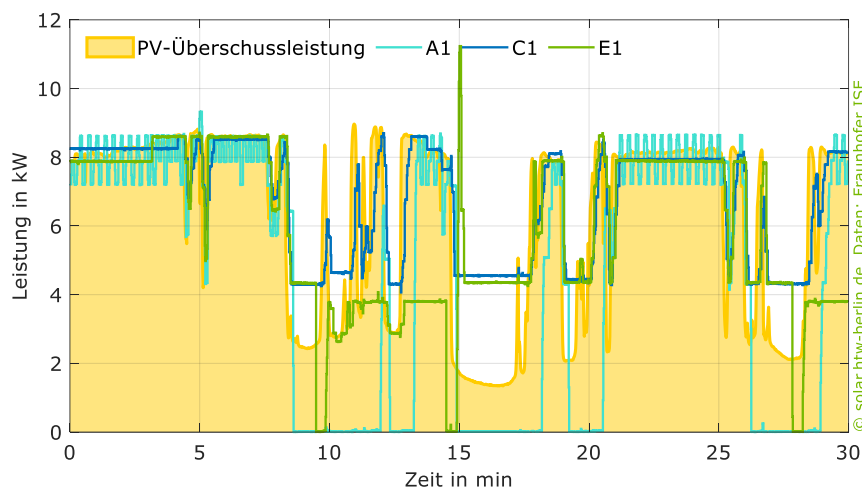


Bild 5 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem stark wechselbewölkten Sommertag (AWT 3). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Das Ladeverhalten der Wallbox C1 ist hingegen von Ausschalt- bzw. Umschaltverzögerungen gekennzeichnet, die ein zu häufiges Schalten der Wallbox verhindern. Die Wallbox verbleibt im gesamten Test im dreiphasigen Betrieb und reduziert die Leistungsabgabe auf etwa 4,2 kW (siehe z. B. Minute 9, 10, 16). Die Verzögerungen führen allerdings zu zusätzlichem Netzbezug. Die Wallbox E1 wechselt hingegen mehrmals zwischen dem ein- und dreiphasigem Lademodus. So schaltet sie z. B. bei Minute 10 und 28 automatisch in den einphasigen und bei Minute 15 in den dreiphasigen Betrieb um. Während dieser zweiten Phasenumschaltung fällt die Überschussleistung unterhalb von 2 kW. Der Befehl für die Umschaltung und der konsequente Start der Leistungsabgabe ist jedoch schon umgesetzt und die Ladung wird nicht verzögert. Dies resultiert in zusätzlichem Netzbezug.

Der vierte Anwendungstest ist zu Beginn und zum Ende des Messzeitraums von einer geringen Überschussleistung geprägt, siehe Bild 6. Die Leistungsabgabe der Wallboxen B1 und E1 erfolgt dort im einphasigen Betrieb. Aufgrund der geringeren Stromschrittweite kann die Wallbox B1 kleinteiligeren Änderungen der Überschussleistung besser folgen. Darüber

hinaus fällt bei diesem und weiteren Anwendungstests auf, dass die Wallbox B1 nach sehr kurzer Zeit eine Phasenumschaltung initiiert. Während die Wallbox E1 nur zwei Phasenwechsel innerhalb dieses Anwendungstests vornimmt, sind es bei der Wallbox B1 vier. Dies ist auf die geringe Haltezeit bzw. Ausschaltverzögerung dieses Systems zurückzuführen. Die dreiphasige Wallbox A1 versucht zweimal einen Ladevorgang zu etablieren, bricht dies jedoch aufgrund der für den dreiphasigen Betrieb zu geringen Überschussleistung schnell wieder ab. Ab Minute 12 überschreitet die Überschussleistung kontinuierlich die minimale dreiphasige Ladeleistung von 4,2 kW. Die Wallboxen reagieren entsprechend und steigern ihre Leistungsabgabe bis zur maximalen Ladeleistung. Das Einschwingverhalten fällt dabei jedoch sehr unterschiedlich aus. Die Wallbox B1 erhöht die Ladeleistung stufenweise und benötigt trotz ausreichenden solaren Überschusses knapp eine Minute um den Maximalwert zu erreichen. Die Wallbox E1 reagiert am schnellsten auf positive Sollwertänderungen und annähernd stufenlos. Bei sinkender Überschussleistung werden die Änderungen der Sollwertvorgabe bei den untersuchten Wallboxen ähnlich schnell umgesetzt. Weiterhin auffällig: Das pulsierende Verhalten der Wallbox A1 ist unter der sich schnell ändernden Überschussleistung kaum zu identifizieren.

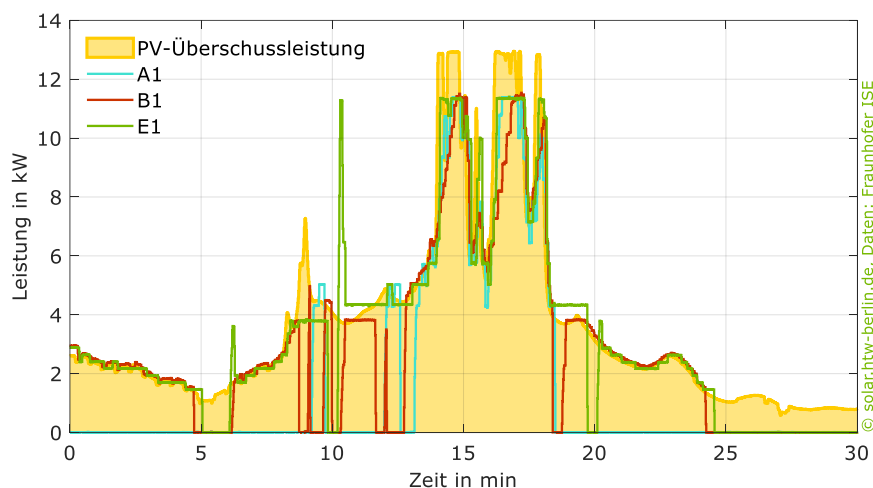


Bild 6 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem vorwiegend bedeckten Tag (AWT 4). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

3 Feldmessdaten

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),
- Haushaltslast, Netzeinspeisung und Netzbezug, Direktverbrauch, Batterieentladeleistung (AC-Werte),
- Direktverbrauch der Wallbox, Batterieentladeleistung zur Wallbox, Netzbezug der Wallbox (AC-Werte) und
- den Ladezustand des Batteriespeichers.

Die, für diese Auswertung anonymen, Betriebsdaten, sind auch im Monitoringportal des Unternehmens für die Kunden einsehbar und wurde hieraus extrahiert. Zunächst erfolgt eine Datenbeschreibung (3.1), anschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse übersichtlich dargestellt (3.2). Die Daten wurden in der Studie „Solares Laden von Elektrofahrzeugen“ erstmalig beschrieben und in Teilen auch im Rahmen des 38. Electric Vehicle Symposium vorgestellt [10], [14].

3.1 Feldmessdaten - Datenbeschreibung

Die zeitliche Auflösung der Datenreihen beträgt 5 min. Sie sind für die Jahre 2022 und 2023 verfügbar und umfassen 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. Wobei nicht alle Daten für alle Analysen geeignet sind, da z. B. die PV-Anlage im Jahresverlauf erweitert wurde.

Die analysierten Wohngebäude liegen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Sie sind somit einem vergleichbaren sozioökonomischen Umfeld zuzuordnen. Mit 65 % liegt der Großteil der analysierten Haushalte in Deutschland, gefolgt von 25 % in Österreich. Der Standort hat somit Auswirkungen auf den spezifischen Solarertrag. Der Median liegt bei 994 kWh pro installiertem Kilowatt Solarleistung. Tabelle 1 vergleicht die Ausstattung der Haushalte der Stichprobe mit dem Bundesdurchschnitt in Deutschland im Jahr 2023.

Tabelle 1 Anteil der Haushaltsausstattung (PV: Solaranlage, EA: Elektroauto, WP: Wärmepumpe, BAT: stationärer Batteriespeicher) nach KfW und der Stichprobe. Daten: KfW [15] und Fronius International.

	KfW Energiewendebarometer 2024		Stichprobe
	Anteil an PV 2023	Anteil PV + EA + ... 2023	Anteil PV + EA + ... 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 %

3.2 Feldmessdaten - Auswertung

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)

Bild 7 stellt den jahresmittleren Tagesgang der Leistungsabgabe von sechs verschiedenen Wallboxen dem mittleren Verlauf aller Wallboxen gegenüber. Hierzu wurde der prozentuale Anteil der 5-minütigen Leistungsabgabe an der jeweiligen Energieabgabe der Wallbox des ganzen Jahres bestimmt. Die Nutzung aller untersuchten Wallboxen entspricht im Mittel etwa einer Normalverteilung um die Mittagszeit. Dies deutet darauf hin, dass viele analysierten Haushalte die Fahrzeugladung an der Verfügbarkeit der Solarenergie ausrichten.

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 Haushalt A erfolgt die Ladung des Fahrzeugs in der Regel direkt nach der Ankunft ab 19:00 Uhr. 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. 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. Anhand der Analyse der Tageslastgänge wurden mittels k-Means-Clusteranalyse vier Ladetypen identifiziert: Solar (n=587), nachmittags (n=123) und abends ladende Haushalte, sowie Haushalte (n=61), die scheinbar preisoptimiert, dynamischen Tarifen folgend laden (n=71, vgl. Wallbox B).

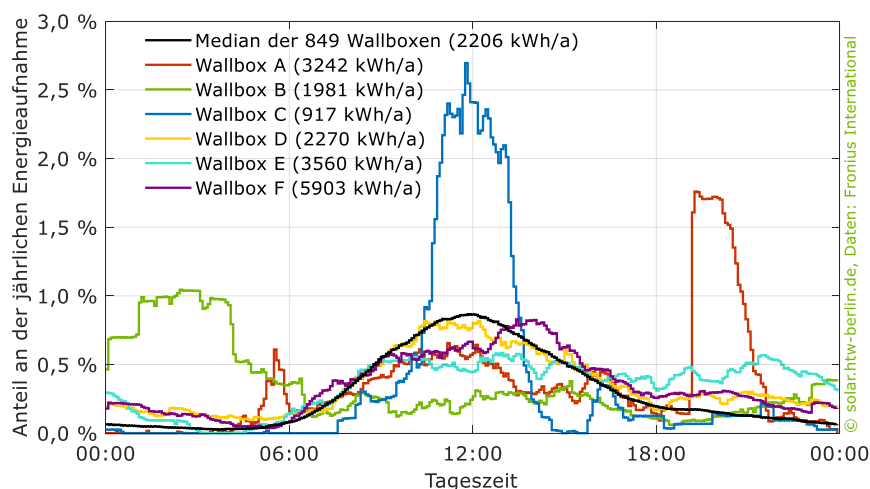


Bild 7 Tagesmittlerer Verlauf der Energieabgabe 6 unterschiedlicher Wallboxen in Wohngebäuden. Daten: Fronius

International, zeitliche Auflösung: 5 min.

Bild 8 zeigt die an der privaten Wallbox geladene Energiemenge für 730 Haushalte und stellt sie dem Solaranteil gegenüber. Die geladene Energie variiert zwischen 231 kWh/a und 6594 kWh/a, der Median liegt bei 2228 kWh/a. 50 % der untersuchten Haushalte laden zwischen 1551 kWh/a und 3097 kWh/a im häuslichen Umfeld. Bei einem mittleren Verbrauch 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. Bild 8 stellt den Solaranteil, ohne Berücksichtigung eines Heimspeichers für die in Abhängigkeit der zu Hause geladenen Energiemenge gegenüber. Die Färbung der Punkte entspricht dabei den oben gefundenen Ladeclustern.

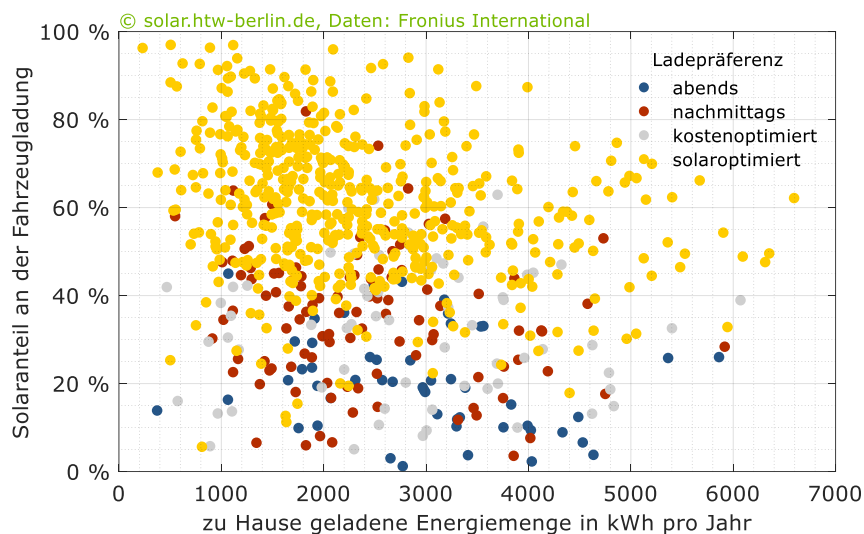


Bild 8 Solaranteil an der Fahrzeugladung über der zu Hause geladenen Energiemenge in Abhängigkeit der Ladepräferenz. Daten: Fronius International.

Zu erkennen ist:

- Es gibt eine große Bandbreite bei den Solaranteilen an der Fahrzeugladung, von nahe 0 % bis nahezu 100 %.
- Ein Großteil der Stichprobe, insgesamt 70 %, der Haushalte lädt solaroptimiert, also tagsüber (gelb). Sie erreichen die höchsten Solaranteile, im Mittel mehr als 60 % Solarstromanteil.
- Wird mehr Energie für die Fahrzeugladung benötigt, sinkt der Solaranteil leicht.
- Fahrzeuge, die meistens in den Abendstunden geladen werden, erreichen in der Regel nur einen Solaranteil von unter 30 %.

Daraus lässt sich schließen, dass dem Nutzerverhalten ein signifikanter Anteil an der Höhe des Solarstromanteils zukommt. Klar ist aber auch, dass auch das Angebot von Solarenergie einen nennenswerten Einfluss hat. Insbesondere wenn die Solarstromproduktion im Winter in einem ausgewogenen Verhältnis zur Last steht sind deutlich höhere Solaranteile als im Mittel zu erwarten. Dies erfolgt in der Regel bei größeren installierten Leistungen, einer optimierten Ausrichtung der Module oder durch die Integration von Solarstromspeichern.

Gerade wenn die Solarstromleistung knapp ist, zeigt sich ein enormer Vorteil der präzisen Regelungen, wie sie in Abschnitt 2 vorgestellt wurden. Gegenüber dem Laden mit maximaler Leistung lassen sich im Mittel der Stichprobe 25 Prozentpunkte mehr Solarenergie ins Fahrzeug laden.

Bild 9 zeigt jedoch, dass der Nutzen dynamischer Ladelogik stark vom Ladeverhalten abhängt. Anhand der vier Cluster ist in einem Boxplot dargestellt, wie sich der Solaranteil durch das dynamische Überschussladen gegenüber dem Laden mit maximaler Leistung verschiebt. Es zeigt sich, dass solar ladende Haushalte im Mittel um 30 Prozentpunkte höhere Solaranteile erreichen, wenn sie die Ladeleistung dynamisch anpassen. Bei abends ladenden Haushalten sind es nur etwa 9 Prozentpunkte. Der Grund ist naheliegend: Meist steht wenig oder keine Solarenergie zur Verfügung, wenn das Fahrzeug geladen wird.

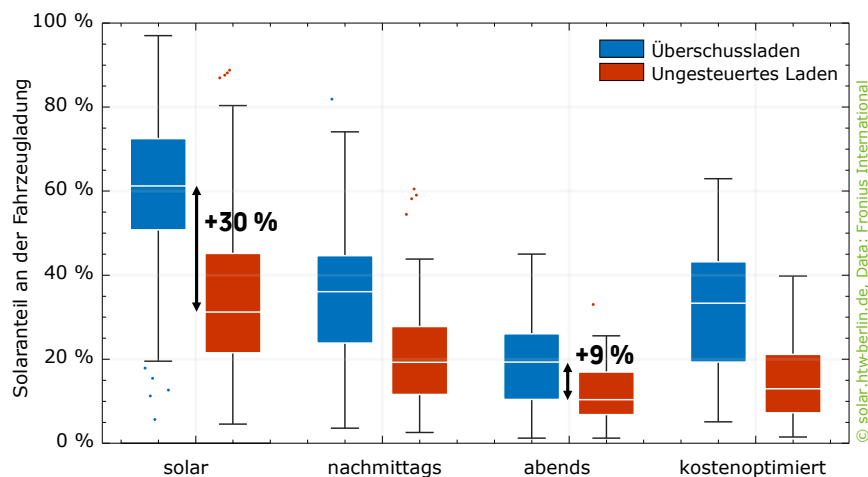


Bild 9 Solaranteil an der Fahrzeugladung in Abhängigkeit der Ladepräferenz für dynamische Fahrzeugladung, die der Überschussleistung folgt und statischer Fahrzeugladung mit fester Leistung. Daten: Fronius International.

Für den Solarstromspeicher gilt genau das Gegenteil zur dynamischen Anpassung. Am stärksten profitieren hier Haushalte, die abends oder in den späten Nachmittagsstunden laden, der Anstieg des Medians des Solarstromanteils beträgt zwischen 15 und 20 Prozentpunkten. Haushalte, die bereits solarstromorientiert laden, können durch den Einsatz eines Speichers im Mittel nur etwa 10 % mehr PV-Energie ins Fahrzeug laden. Im Mittel der Stichprobe steigert der Batteriespeicher den Solarstromanteil um 9 Prozentpunkte. Hierbei ist die ungleiche Verteilung der Cluster zu berücksichtigen. Der Speicher hat prinzipiell zwei Funktionen;

1. Verschiebung der Energiemengen in die Abendstunden,
2. Regelfehler der Wallbox auszugleichen und Einschränkungen, wie z. B. minimale Ladeleistungen der Wallboxen gezielt zu umgehen.

Hierbei muss beachtet werden, dass der stationäre Speicher meist eine deutlich geringere Kapazität als die Fahrzeugbatterie besitzt, was den Nutzen der ersten Funktion begrenzt. Zwei Drittel der Batterien haben jedoch eine Kapazität von mehr als 12 kWh, so dass typische Pendlerladungen durchaus gedeckt werden können.

Ebenso wie beim Solaranteil für das Fahrzeug werden auch beim Solaranteil für den Gesamtstrombedarf (Autarkiegrad) Unterschiede sichtbar. Tabelle 2 zeigt zentrale Einflussgrößen und den Median des Autarkiegrades sortiert nach den bereits bekannten Clustern.

Tabelle 2 Eigenversorgung in Haushalten mit Batterie sortiert nach den Ladeclustern. *Hinweis: Wärmepumpe und Batteriespeicher mit generischem Algorithmus ermittelt; Haushaltslast kann eine Wärmepumpe enthalten. Daten: Fronius International.

Cluster	Solaroptimiert (n=242)	Nachmittags (n=67)	Abends (n=27)	Kostenoptimiert (n=21)
Median PV-Leistung in kW	12,5	9,8	8,0	8,0
Median Gesamtlast in MWh	8,1	7,5	10,6	9,9
Median Batteriekapazität* in kWh	12	11	9	10
Anteil Wärmepumpe*	36 %	31 %	41 %	52 %
Median Autarkiegrad, Haushaltslast	42 %	39 %	34 %	33 %
Median Autarkiegrad, Haushaltslast und Elektrofahrzeug	47 %	38 %	30 %	30 %
Median Autarkiegrad, Haushaltslast, Elektrofahrzeug und stationärer Batterie	72 %	59 %	52 %	55 %

Hinsichtlich der Gebäudeausstattung und dem Energiebedarf kann unterschieden werden zwischen einer stärker solaraffinen Gruppe mit den Clustern der solaroptimiert und nachmittags Ladenden und einer anderen Gruppe mit den abends und kostenoptimiert Ladenden. Die solaraffine Gruppe hat tendenziell größere PV-Anlagen und Batteriespeicher aber auch einen geringeren Verbrauch, u. a. weil hier weniger Wärmepumpen installiert sind. Dies schlägt sich direkt im Autarkiegrad nieder.

Betrachtet man ausschließlich die Haushaltsstromlasten so liegt der Median der Eigenversorgungsanteile, bei der solaraffinen Gruppe zwischen 39 % und 42 %. In der eher spät ladenden Gruppe liegt er mit 33 % bis 34 % etwas darunter und entspricht dem Erwartungswert dieser Systemkonfiguration (siehe u. a. [16]).

Wird darüber hinaus auch das Elektroauto bei der Betrachtung berücksichtigt, dann zeigen sich deutliche Unterschiede. Während die Haushalte im solaroptimierten Cluster mit Elektrofahrzeug den Autarkiegrad noch steigern können, sinkt er in den anderen Gruppen um 1 Prozentpunkte bis 4 Prozentpunkte ab.

Am stärksten betroffen sind, wie zu erwarten, Haushalte die abends laden. Somit gleicht ein zusätzlicher Batteriespeicher vorerst die Defizite bei der Ladung des Elektrofahrzeugs aus. Der Median des Autarkiegrades aller Cluster steigt in ähnlichem Maße bei Berücksichtigung eines Speichers: Zwischen 21 Prozentpunkte und 25 Prozentpunkte mehr der gesamten Haushaltslast können somit durch Solarstrom gedeckt werden. Der Median Autarkiegrad liegt in Summe zwischen 52 % und 72 %. Hierbei hat die Wärmepumpe insbesondere für das solaroptimierte Cluster einen entscheidenden Anteil, wie aus Tabelle 3 hervorgeht.

Tabelle 3 Eigenversorgung in Haushalten mit Batterie sortiert nach den Ladeclustern zur Unterscheidung von Haushalten mit und ohne Wärmepumpe. *Hinweis: Wärmepumpe mit generischem Algorithmus ermittelt. Daten: Fronius International.

Cluster	Solaropt.	Nachmittags	Abends	Kostenopt.	Alle
Median Autarkiegrad ohne Wärmepumpe*	77 %	59 %	51 %	54 %	73 %
Median Autarkiegrad mit Wärmepumpe*	61 %	57 %	45 %	51 %	58 %

4 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen

Abschließend werden die Ergebnisse der Auswertung mit der Beantwortung der Forschungsfragen zusammengefasst.

1. Was unterscheidet reale Wallboxen von idealen Modellen und welche Verlustmechanismen lassen sich beim Vergleich unterschiedlicher Wallboxen beobachten?

In Bild 10 sind Verlustmechanismen für Wallboxen dargestellt, die zentrale Auswirkungen auf die Höhe des Solaranteils an der Fahrzeugladung und die Kosteneinsparung haben.

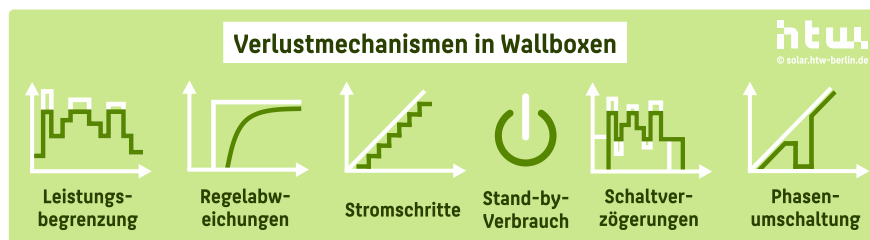


Bild 10 Betriebseffekte von Wallboxen, die den Netz- und Solaranteil an der Fahrzeugladung beeinflussen.

Zentral ist die Leistungsbegrenzung. Kann eine Wallbox das Fahrzeug nicht mit kleinen Leistungen laden, ist es für die Solarladung in vielen Situationen ungeeignet in denen nur geringe PV-Überschüsse zur Verfügung stehen.

Die Regelgenauigkeit von Wallboxen unterscheidet sich je nach Modell. Der Vergleich der Labormessungen zeigt, dass die Wallboxen bis zur ersten Reaktion der Leistungsänderung einige Sekunden benötigen - in Einzelfällen auch länger. Bis die Wallboxen ihre Leistung auf den neuen Sollwert angepasst haben, vergehen zusätzliche Sekunden. Lediglich eine Wallbox zeigt eine lange Einschwingzeit bei größeren positiven Leistungssprüngen, reagiert aber äußerst schnell bei negativer Leistungsänderung.

Der Sollwert wird bei vielen Wallboxen mit wenigen Watt Abweichungen eingestellt. Bei einer Wallbox im Test kann kein stationärer Zustand eingestellt werden, die Wallbox schwingt mit ± 1 A um den Sollwert. Eine andere Wallbox hat höhere Regelabweichungen bei hohen Leistungen, was auf eine Überkompensation der Wallboxverluste hindeutet.

Ein deutlicher Unterschied beim Umgang mit Solarleistungen ergibt sich beim Wechsel des Betriebsmodus der Wallbox, z.B. Startvorgang, Phasenwechsel oder Beendigung der Ladung. Hier hat jeder Hersteller eigene Erfahrungen gesammelt, die die Kompatibilität seiner Wallbox mit unterschiedlichen Elektrofahrzeugen maximiert und eine hohe Regelgüte ermöglicht.

Den größten Einfluss auf potenzielle Kosteneinsparungen liegen somit in einer schnellen Reaktion der Wallbox, der Fähigkeit auch geringe Leistungen bereitstellen zu können – einphasig oder mit Phasenumschaltung – und geringen Haltezeiten für Start und Phasenumschaltung sowie einer geringen Stand-by Leistung, siehe auch [12].

Beim Vergleich der Wallboxen fällt auf, dass sich für die Solarladung noch kein einheitlicher Standard herauskristallisiert hat. Vielmehr beruhen aktuelle Regelkonzepte auf Erfahrungswissen und Heuristiken zur optimalen Interaktion von PV-Anlage und Elektroauto. Viele Wallboxen beherrschen diese Interaktion mit Abstrichen sehr gut. Bei zwei der fünf vermessenen und analysierten Wallboxen konnten deutliche Schwächen in Bezug auf die Solarladung identifiziert werden.

2. Was sind typische Anwendungsparameter für Wallboxen in Kombination mit PV-Anlagen?

Für die Beantwortung dieser Frage wurden mehr als 700 Haushalte in Deutschland, Österreich und der Schweiz ausgewertet. Typische Werte sind in Tabelle 4 zu finden.

Tabelle 4 Median Werte in Haushalten mit PV-Anlage und Elektrofahrzeugen. Daten: Fronius International.

Bezeichnung	Wert	Anmerkung
PV-Leistung in kW	10	
Last in MWh/a	4,5	ohne Wallbox, ohne Wärmepumpe
Wallboxladung in MWh/a	2,2	
Wärmepumpe in MWh	3,1	
Ladungen pro Woche	3,9	
Standby	8146 h	
Solaranteil an Fahrzeugladung	53 %	

3. Bis zu welchem Anteil können sich Haushalte mit Elektroauto und Wärmepumpe in Deutschland, Österreich und Schweiz mit eigenem Solarstrom versorgen?

Für die Erreichung von Klimaneutralität werden viele Haushalte auf einen technologischen Mix aus Solaranlage, Batteriespeicher, Wärmepumpe und Elektrofahrzeug setzen. Anhand einer Stichprobe von 130 Haushalten, die bereits heute diese Technologien nutzen, konnte gezeigt werden, dass die mittleren 50 % Autarkiegrade zwischen 50 % und 65 % erreichen. Der Median des Energiebedarfs des Haushaltes, der durch Solarenergie gedeckt werden kann, liegt bei der Stichprobe bei 58 %. Hierbei gibt es Unterschiede in Bezug auf den Umgang mit der zeitlichen Nutzung, insbesondere des Fahrzeugs, siehe auch Tabelle 3.

5 Ausblick

Die weiteren Arbeiten, zum Teil schon durchgeführten Arbeiten fokussieren sich auf eine quantitative Bewertung realer Ladeeffizienz, um Abweichungen zwischen idealisierten Modellen und realen Wallboxen methodisch belastbar abzubilden. Im Fokus steht dabei der Wallbox-Performanceindex, der elektrische Verluste, Teillastverhalten, Stand-by und Regelungsdynamiken unter standardisierten Betriebsbedingungen vergleichbar macht.

Darauf aufbauend wird das Untersuchungsdesign auf bidirektionale Wallboxen erweitert. Im Fokus stehen deren Wirkungsgrade in beiden Energierichtungen, die Interaktion mit Heimspeichern und Wärmepumpen sowie die Bewertung möglicher Flexibilitäts- und Netzdienstleistungspotenziale. Abschließend erfolgt eine systemische Einordnung des solaren und bidirektionalen Ladens, einschließlich Auswirkungen auf Eigenverbrauch, Lastverschiebung, Netzbelastung und die Integration volatiler Erzeugung.

Dank gilt Fronius International, Fraunhofer ISE, dem ADAC und dem Mittelgeber für die Ermöglichung des Forschungsprojektes. Das 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

6 Literaturverzeichnis

- [1] 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*, vol. 159, p. 112158, May 2022
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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, July 2021
- [5] A. Regett, W. Mauch, U. Wagner: "Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit," Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V., München, 2019
- [6] ADAC e.V.: "Treibhausgas-Bilanz: Welcher Antrieb kann das Klima retten?," 21-Dec-2022. [Online]. Available: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/>. [Accessed: 14-May-2024]
- [7] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Ed.: *Einfach zuhause laden Studie zum Ladeverhalten von Privatpersonen mit Elektrofahrzeug und eigener Wallbox*. NOW GmbH, 2024
- [8] UScale GmbH: "Private Charging-Studie 2023," UScale GmbH, 2023
- [9] M. Wietschel, S. Preuß, R. Kunze, M. Keller: "Laden von Elektrofahrzeugen in Deutschland mit Ökostromverträgen"
- [10] N. Orth, J. Bergner, S. Salehi: "Solares Laden von Elektrofahrzeugen," HTW Berlin, Berlin, 2025
- [11] Dr.-Ing. B. Wille-Hausmann et al.: "Prüfrichtlinie - Unidirektionales und Solares Laden Version 1.1," Dec. 2025
- [12] Joseph Bergner, Nico Orth: "Wallbox-Inspektion 2025," HTW Berlin, Berlin, Studie, 2025
- [13] Fraunhofer ISE: "Digital Grid Lab," 14-July-2021. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/center/zentrum-fuer-leistungselektronik-und-nachhaltige-netze/digital-grid-lab.html>. [Accessed: 31-Oct-2025]
- [14] J. Bergner, N. Orth, L. Meissner, V. Quaschnig: "Solar charging - lessons learned from field observation," presented at the 38th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS38), 2025
- [15] D. Römer, J. Salzgeber: "KfW-Energiewendebarmeter 2024," KfW Research, Frankfurt am Main, 2024
- [16] J. Weniger, T. Tjaden, V. Quaschnig: "Sizing of Residential PV Battery Systems," *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 78–87, 2014