

Wallbox

Inspektion 2025

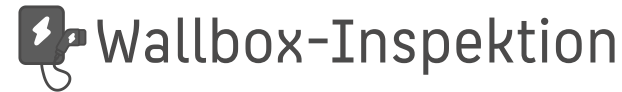
STUDIE
Wallbox-Inspektion 2025

AUTOREN
Joseph Bergner, Nico Orth
Forschungsgruppe Solarspeichersysteme
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin
Web: solar.htw-berlin.de

MESSUNGEN
Dr. Bernhard Wille-Hausmann, Dennis Freiberger, Vishnu Karthik Senthil Kumar
Digital Grid Lab
Fraunhofer-Institute für Solare Energiesysteme ISE
Web: Digital-Grid-Lab
Unterstützung bei der Konzeption des Messleitfadens durch den ADAC e.V.

VERSION
Version 1.0 (Dezember 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

Inhalt

1	SOLARES LADEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN	7
2	VERGLEICH DER SYSTEMEIGENSCHAFTEN.....	11
2.1	Ein- und Ausschaltvorgang	16
2.2	Phasenumschaltung	18
2.3	Stand-by- und Peripherieverbrauch	20
2.4	Dynamische Regelungsabweichungen	21
2.5	Stationäre Regelungsabweichungen	23
2.6	Bandbreite zentraler Systemeigenschaften	26
2.7	Anwendungstest.....	27
3	SIMULATIONSBASIERTE SYSTEMBEWERTUNG.....	31
3.1	Systemsimulation	31
3.2	Wallbox-Performance-Index (WPI)	32
3.3	Systembewertung mit dem WPI.....	35
4	EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE EIGENVERSORGUNG UND DIE SYSTEMBEWERTUNG	38
	LITERATURVERZEICHNIS	54

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
PHIL	Power Hardware-in the-Loop Umgebung
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
SUV	Sport Utility Vehicles
TV	Tastverhältnis (Pulsweite)

Kurzfassung

Die erste Wallbox-Inspektion zeigt **Qualitätsunterschiede im solaren Laden von Elektrofahrzeugen** auf. 5 Wallboxen wurden nach einem von der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und ADAC e.V. neu entwickelten Testverfahren vermessen, analysiert und bewertet. Im Fokus des Systemvergleichs: Die Funktion des solaren Überschussladens. Wie Bild 1 zeigt, stellten sich die Unternehmen **Fronius, Heidelberg Amperfiel, Kostal und SMA** sowie ein namentlich nicht genannter Teilnehmer dem ersten Wallboxtest. Die Ergebnisse überraschen selbst beim kleinen Testfeld: Die Unterschiede können sich über 10 Jahre auf bis zu 540 Euro aufsummieren.

Hinter den Betriebsmodi „Eco“, „Solar Pure“ oder auch „Laden mit PV-Überschuss“ versteckt sich die Funktion des solaren Überschussladens. Eine bis zu

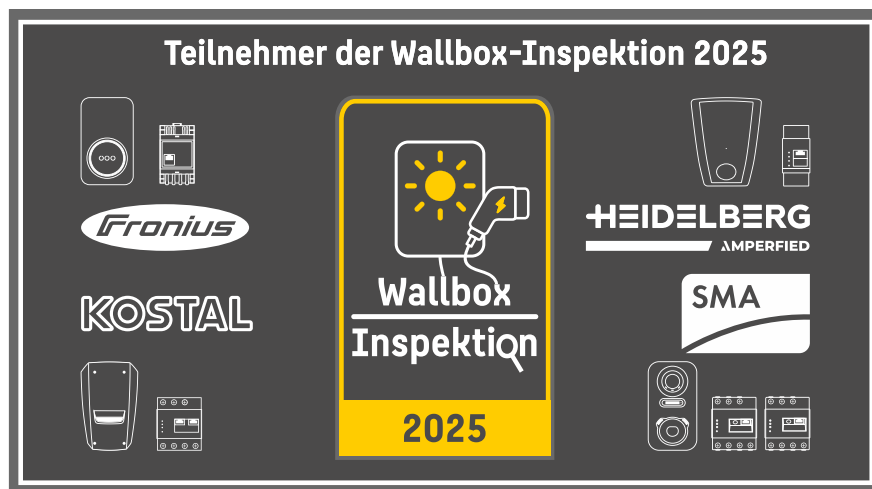


Bild 1 Fronius, Heidelberg Amperfiel, Kostal und SMA unterstützen die erste Wallbox-Inspektion 2025 und beteiligten sich namentlich an dem Vergleich.

dieser Studie unbewertete Standardausstattung heutiger Wallbox. Das Ziel der Ladefunktion: Den Netzstrom zu minimieren und lediglich überschüssige Solarleistung ans Fahrzeug abzugeben. Über einen zusätzlichen Stromzähler am Netzanschluss ermitteln die Wallboxen innerhalb von Millisekunden die solare Überschussleistung, die von anderen Verbrauchern nicht direkt genutzt werden konnte und eingespeist wird. Aufbauend auf diesem Signalwert kann die Wallbox der Überschussleistung dynamisch folgen und auf Schwankungen in der Solarstromerzeugung und der Last reagieren.

Wie schnell und genau die Anpassung der Ladeleistung erfolgt wird im Rahmen der Wallbox-Inspektion 2025 erstmalig analysiert und bewertet. Vermessen wurden die Ladelösungen im Digital Grid Lab am Fraunhofer ISE in Freiburg. Die Prüflinge werden in einer Power Hardware-in the-Loop (PHIL)-Umgebung mit einem digitalen Elektrofahrzeugzwilling getestet. Im Labor wurden die Ladelösungen nach der **Richtlinie zur Charakterisierung von unidirektionalem und solaren Laden für Elektrofahrzeuge** geprüft. Dieser Leitfaden beschreibt die einheitliche Vermessung zentraler Systemeigenschaften, wie zum Beispiel dem Systemverbrauch im Stand-by-Modus, die stationäre und dynamische Regelgüte oder auch die Phasenumschaltung zwischen dem ein- und dreiphasigen Laden. Je Wallbox wurden **16 verschiedene Testzyklen** durchgeführt. Die größten Unterschiede konnten bei der Einschwingzeit und beim Umgang mit der Phasenumschaltung ermittelt werden. Bis die Wallboxen den neuen Signalwert eingestellt haben, vergehen im Mittel zwischen 9,2 und 127 Sekunden. Die beiden schnellsten Geräte, Amperfiel connect.solar mit dem Power-Meter 63 und der Fronius Wattpilot Flex Home 22 C6 mit dem Smart Meter IP, reagieren dabei im Mittel praktisch zeitgleich – Unterschiede sind nur im Bereich von Hundertstelsekunden messbar.

Muss für die Einstellung des neuen Sollwerts ein **Phasenwechsel** durchgeführt werden, verlängert sich die Dauer auf 44 bis 505 Sekunden. Hier haben alle Wallboxhersteller ihren eigenen Weg gefunden, um mit möglichst vielen Fahrzeugen kompatibel zu sein.

Eine langsamer regelnde Wallbox kann dennoch genau sein, wie die Systemkombination aus EV charger, Sunny Home Manager 2 und Energy Meter von SMA zeigt. Die Ladeleistung wird auf 16 Watt genau eingestellt, siehe auch Bild 2. Neben einer schnellen und präzisen Regelung bei Leistungen von bis zu 11 Kilowatt geraten die wenige Watt großen **Stand-by-Verluste** fast in Vergessenheit. Allerdings befinden sich die Wallboxen mehr als 91 Prozent und 8000 Stunden im Jahr im sogenannten Bereitschaftsbetrieb. Die Höhe der Leistungsaufnahme hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtperformance. Die sparsamste Ladelösung, der Enector AC in Kombination mit dem

Smart Energy Meter G2 von Kostal, bezieht in diesem Leerlauf-Betrieb lediglich 3,2 Watt. Im Vergleich zur Wallbox mit dem höchsten Stand-by-Verbrauch im Test ist die Leistungsaufnahme dreimal geringer. Das wirkt sich auf die Stand-by-Verluste und den Netzbezug aus, die um 50 Kilowattstunden und 12 Euro pro Jahr niedriger ausfallen.

Die klassischen Labortests der Prüfrichtlinie wurden um zahlreiche dynamische **Anwendungstestszenarien** ergänzt, die verschiedene typische Ladesituationen repräsentieren. Anhand dieser unterschiedlichen Prüfungen konnten die Forscher*innen der HTW Berlin ein sehr genaues Bild von der Wallbox entwerfen. Das entwickelte Simulationsmodell erlaubt eine Bewertung unter realitätsnahen Bedingungen – ohne aufwendige Langzeitmessungen. Damit lassen sich sowohl saisonale Effekte über ein ganzes Kalenderjahr als auch das Zusammenspiel verschiedener Eigenschaften nachvollziehen. Die Simulation

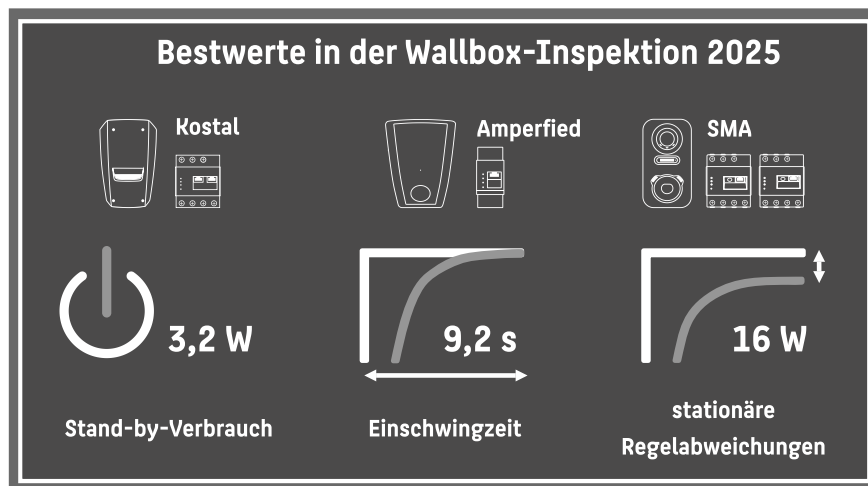


Bild 2 Bestwerte unterschiedlicher Systemeigenschaften in der Wallbox-Inspektion 2025. Median des Stand-by-Verbrauch im abgesteckten Zustand. Einschwingzeit und Regelabweichungen unter konstanten Bedingungen im ein- und dreiphasigen Betrieb.

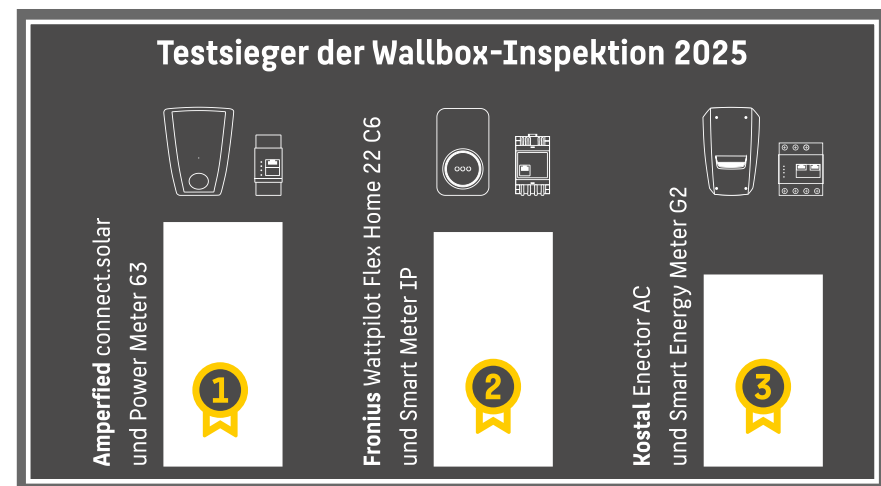


Bild 3 Testsieger der Wallbox-Inspektion 2025 von den Wallboxanbieter Amperfiel, Fronius und Kostal.

ist die Grundlage des neu an der HTW Berlin entwickelten **Wallbox-Performance-Index**. Hierfür tritt der Prüfling virtuell gegen eine ideale, verlustfreie Wallbox mit einer 10-Kilowatt-Photovoltaikanlage an. Ein Pendler kann so, unter Idealbedingungen, etwa 470 Euro jährlich gegenüber einer Wallbox, die ausschließlich Strom aus dem Netz bezieht sparen. In der ersten Wallbox-Inspektion erreichen alle getesteten Geräte mehr als 83 Prozent der Einsparungen der idealen Wallbox. Testsieger ist die Wallbox Amperfied connect.solar

mit 94,8 Prozent, dicht gefolgt vom Fronius Wattpilot Flex Home 22 C6 mit 94,4 Prozent, wie Bild 3 zeigt. Den dritten Platz belegt der Enector AC von Kostal mit 92,7 Prozent. Zwischen dem Spitzenreiter und der ausschließlich dreiphasig ladenden Wallbox auf Platz fünf der Bewertung liegt eine jährliche Kostendifferenz von 54 Euro.

Wissenswertes zur Auswahl einer Wallbox



Auf dem Markt für Ladelösungen gibt es zahlreiche Anbieter mit unterschiedlichsten Wallboxlösungen und Spezifikationen, wie z. B. die Marktübersicht des pv magazine anschaulich zeigt [1]. Das solaroptimierte Laden ist dabei mittlerweile eine Standardfunktionalität, die über proprietäre Lösungen oder in Kombination mit Drittanbietern angeboten wird. Die Wallbox-Inspektion zeigt: Solarenergie sollte effizient zum Laden genutzt werden und der Standby-Verbrauch möglichst gering ausfallen. Allerdings gibt es weitere wichtige Punkte, die bei der Auswahl der richtigen Wallbox relevant sein können. Folgende Fragen können Ihnen bei der Identifikation einer passenden Ladelösung helfen:

- Welche Wallboxen mit Überschussladefunktion haben die lokalen Installateure im Portfolio, die bei der Inbetriebnahme oder im Fehlerfall die ersten Ansprechpartner sind?
- Ist die Wallbox auf zukünftige Anwendungen wie z. B. das bidirektionale Laden, die Nutzung dynamischer Stromtarife oder eine Steuerung nach §14a EnWG mittels Steuerbox ausgelegt?
- Passen die Kommunikationsschnittstellen der Wallbox zu dem (bereits vorhandenen) Energiemanagementsystem oder PV-Speichersystem?
- Hinterlässt der Wallboxhersteller den Eindruck, dass er auch noch in 10 Jahren im Service-Fall weiterhelfen kann?
- Gibt es z. B. in Online-Foren oder weiteren Veröffentlichungen Erfahrungen zum Installationsaufwand und zu den Serviceleistungen des Herstellers im Fehlerfall [2]–[5]?
- Finden sich Informationen zu unterschiedlichen Lademodi und zum Bedienkonzept der Wallbox?
- Ist eine Priorisierung von unterschiedlichen Großverbrauchern möglich, sodass z. B. die Wärmepumpe vor dem Elektroauto betrieben oder der Heimspeicher vorher geladen werden kann?
- Kommen neben der Wallbox weitere Kosten wie z. B. für das Ladekabel oder die elektrische Sicherheit (RCD TypB) auf einen zu?
- Verfügt die Wallbox über Sicherheitsmaßnahmen um die persönlichen Daten zu schützen und unbefugte Zugriffe zu verhindern?
- Soll die Wallbox über eine automatische Phasenumschaltung verfügen um den Solaranteil an der Fahrzeugladung zu maximieren?
- Passt die Wallbox zum Aufstellungsort (Stichwort: WLAN, Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit, Kabellänge ...)?

1 Solares Laden von Elektrofahrzeugen

Den größten ökologischen Vorteil bieten Elektrofahrzeuge, wenn sie mit Strom aus erneuerbarer Energie, z. B. von der eigenen Solaranlage, geladen werden [6]–[11]. 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. Die Korrelation zwischen dem Besitz einer PV-Anlage und einem Elektroauto ist laut Umfragen besonders ausgeprägt [12]–[16]. Mehrere Studien konnten zeigen, dass im Mittel etwa 70 % bis 75 % der vom Fahrzeug aufgenommenen Energiemenge zuhause geladen wird [14], [17], [18]. 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. Wer das Fahrzeug erst in den späten Abendstunden lädt, kann folglich nur wenige solare Kilometer fahren, siehe auch Kapitel 4. 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 [19]:

- **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 [19]. Grundvoraussetzung für diese Ladestrategie ist jedoch die **Messung der Netzleistung am Netzan-schlusspunkt**. 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. Der Energy Meter ist hinter dem Smart Meter des Netzbetreibers in Reihe geschaltet und fest in der Unterverteilung verbaut, siehe auch Bild 4. Vereinzelt Unternehmen erfassen den solaren Überschuss auch mit nichtinvasive Stromsensoren. Aus dem gemessenen Strom und der Spannung, die bereits in dem Gerät anliegt, ergibt sich dann die Überschussleistung.

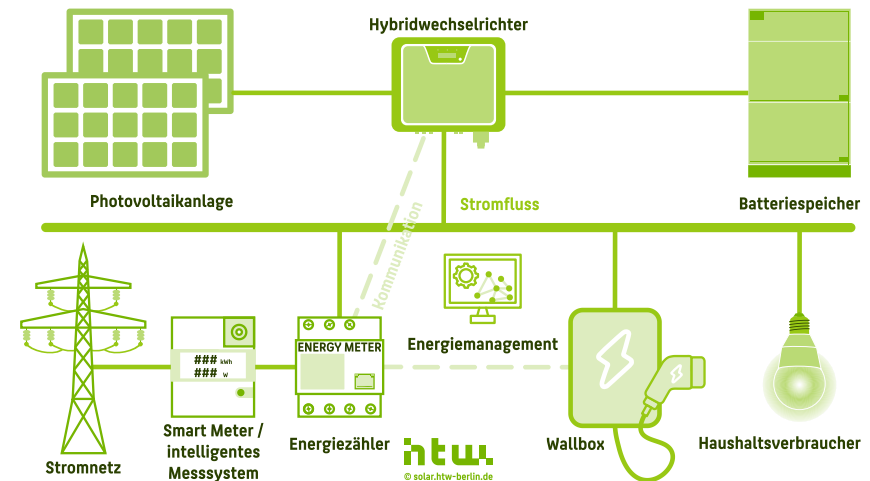


Bild 4 Bestandteile einer dynamischer Wallboxsteuerung.

Sofern die Wallbox dafür ausgelegt ist, kann ein Energiemanagement nicht nur die Ladung mit fest eingestellter maximaler Leistung freigeben. Moderne Wallboxen können auch die Höhe der maximalen Leistung der Wallbox kontinuierlich ändern und dem Elektrofahrzeug vorgeben. Somit kann die Wallbox der Überschussleistung dynamisch folgen und auf Schwankungen in der Solarstromerzeugung und der Haushaltslast kontinuierlich reagieren.

Zur Veranschaulichung zeigt Bild 5 die **Umsetzung einer dynamischen Überschussladung** mit der Wallbox Gemini flex des Herstellers go-e anhand der gemessenen Leistungen eines Einfamilienhauses an einem sonnigen Tag im Mai. Anhand der Grafik werden **typische Betriebseffekte beim solaren Laden** kurz beschrieben. Die PV-Erzeugung der nach Südosten ausgerichteten 11-kW-PV-Anlage in orange ist an diesem Tag von sonnigen Morgenstunden und einer wechselbewölkten Mittagszeit geprägt. Die dargestellte Gesamlast in dunkelblau ergibt sich aus der Summe des Haushaltsstromverbrauchs und der Leistungsaufnahme des Elektrofahrzeugs.

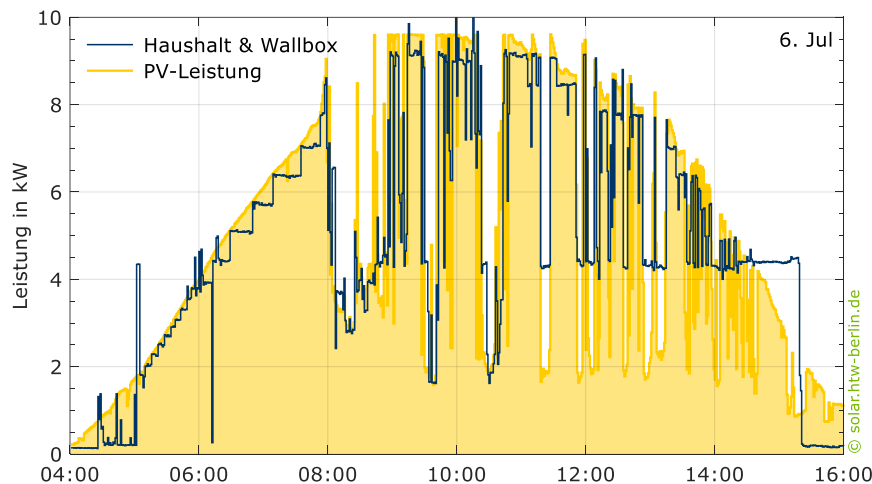


Bild 5 PV-Leistungsabgabe und Leistungsaufnahme eines Haushalts und der Wallbox Gemini flex des Herstellers go-e. Zeitliche Auflösung der dargestellten Messdaten: 1 min.

Bis ca. 05:00 Uhr wird lediglich die Haushaltslast mit der PV-Erzeugung gedeckt. Die Ladung des Elektrofahrzeugs beginnt, sobald der solare Überschuss die minimalen Ladeleistung von 1,4 kW überschreitet. Im Anschluss wird der solare Überschuss zur Deckung der Haushaltslast und zusätzlich zur Ladung des Elektrofahrzeugs verwendet. Dabei erfolgt die Anpassung der Ladeleistung in diskreten Leistungsschritten, die **1-A-Schritten** entsprechen, siehe auch Infobox. Im einphasigen Betrieb kann die Ladeleistung daher etwa in 230-W-Stufen, im dreiphasigen Betrieb ab 06:13 Uhr sogar nur in 690-W-Schritten angepasst werden. Bei der **Phasenumschaltung** um 06:13 Uhr wird automatisch zwischen dem Laden mit einer Phase auf das Laden mit drei Außenleitern gewechselt. Vor dem Phasenwechsel wird die Ladung von der Wallbox kurzfristig unterbrochen. Dass die Leistung im späteren Tagesverlauf keinen weiteren Einbruch aufweist, liegt nicht daran, dass das System nachfolgend ausschließlich dreiphasig arbeitet. Vielmehr ist die Ausschaltzeit der weiteren Phasenumschaltungen zwischen 08:00 Uhr und 11:00 Uhr aufgrund der Mittelung der 1-Minutendaten in Bild 5 nicht erkennbar. So ist die Leistung z. B. zwischen 8:15 Uhr und 9 Uhr so gering, dass nur ein einphasiger Betrieb der Wallbox in Frage kommt.

Im weiteren Tagesverlauf reagiert die Wallbox auf kurzfristige Änderungen der solaren Erzeugung, die aufgrund von Wolkendurchzügen entstehen. Die Wallbox passt die Ladeleistung entsprechend dem solaren Überschuss kontinuierlich an und kann so Netzbezug weitestgehend vermeiden. Bei den kurzzeitigen Einbrüchen der Solarleistung ab 11:00 Uhr verhindert eine sogenannte **Ausschalthysterese** eine direkte Abschaltung bzw. Phasenumschaltung der Wallbox. Die Wallbox verbleibt im dreiphasigen Betriebsmodus und reduziert die Ladeleistung auf den Minimalwert von 4,2 kW. In Verbindung mit der Haushaltslast liegt eine Gesamtleistung von etwa 4,3 kW an. Die Ausschalthyse-

rese soll ein häufiges Schalten der Relais der Wallbox verhindern, die Kompatibilität mit verschiedenen Elektrofahrzeugen erhöhen und eine längere Lebensdauer der Wallbox ermöglichen.

Am Nachmittag gegen 14:30 fällt die solare Erzeugung unter die minimale Ladeleistung im dreiphasigen Betrieb von 4,2 kW. Die Wallbox hält die Ladeleistung jedoch für weitere 50 min konstant. Möglicherweise wurde eine **Mindestenergiemenge oder Mindestleistung** vorgegeben, mit der das Fahrzeug geladen werden soll. Um die Zielvorgabe zu erreichen, wird die fehlende Energie ergänzend aus dem Stromnetz bezogen.

In der Studie „Solares Laden von Elektrofahrzeugen“ werden sechs typische **Betriebsmodi** von Wallboxen gegenübergestellt [19], darunter: [20]

- **„Schnellladen“:** Laden mit maximal möglicher Ladeleistung
- **Laden über Freigabesignal:** Die Ladung wird durch ein Steuersignal freigegeben (z. B. durch eine Zeitschaltuhr)
- **„Nur Solar“:** Ladung nur mit überschüssigem Solarstrom
- **Mindestladerstrom,** der unabhängig vom solaren Überschuss zur Verfügung gestellt wird
- **„Mindestanteil Solarstrom“:** Der prozentual einstellbare Mindestanteil (0 % - 100 %) muss erreicht werden, damit die Ladung startet
- **„Laden mit Zielvorgabe“:** Nach Vorgabe einer zu ladenden Energiemenge und einem Abfahrtszeitpunkt wird die Ladung mit Solar- oder Netzstrom automatisiert geladen.

Im Fokus dieser Studie steht die Effizienz des Lademodus „Nur Solar. Hierfür wird im ersten Teil der Studie die Labormessung von 5 Wallboxen nach der Prüfrichtlinie vorgestellt. Nachfolgend werden die Grundlagen für eine einheitliche Bewertung aufgestellt. Im letzten Kapitel werden Fragen rund um das solare Laden beantwortet.

Exkurs: Ladeleistung vs. Ladestrom



Der Standard IEC 61851-1 definiert allgemeine Anforderungen an kabelgebundene Ladesysteme für Elektrofahrzeuge und die Kommunikation zur Wallbox. Die Ladestation kommuniziert an das Fahrzeug einen maximal erlaubten Ladestrom, der größer 6 A sein muss [20]. Weiterhin kann der Anschluss der Wallbox an einer oder drei Phasen erfolgen. Die Spannung beträgt 230 V. Mit der Phasenanzahl (n), der Spannung (U) und der Stromstärke (I) lässt sich die Ausgangsleistung der Wallbox (P_{WB}) wie folgt bestimmen: $P_{WB} = n \cdot U \cdot I$. Bei einer einphasig angeschlossenen Wallbox und einer Stromstärke von 6 A ergibt sich z. B. eine Ausgangsleistung von 1,4 kW. Ist sie hingegen dreiphasig in Sternschaltung angeschlossen, beläuft sich die Ausgangsleistung bei gleicher Stromstärke auf 4,1 kW. Soll das Elektroauto mit 22 kW geladen werden, muss die Elektroinstallation auf dreiphasiges Laden mit einer Stromstärke von 32 A ausgelegt sein.

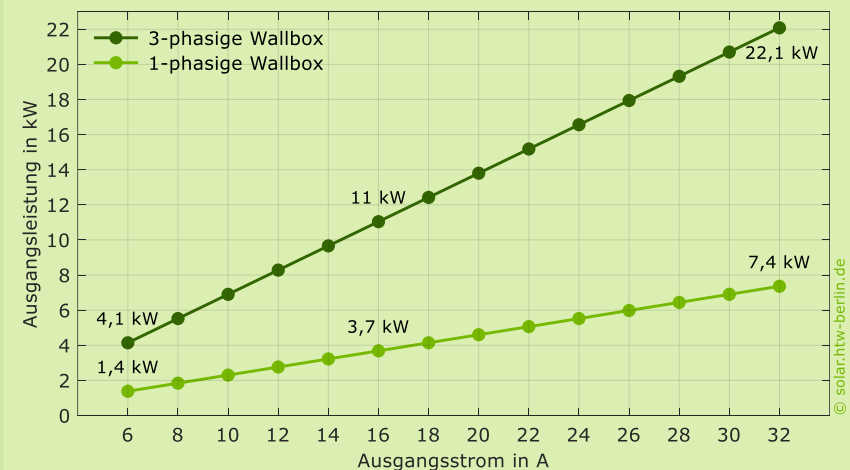


Bild 6 Zusammenhang aus Ausgangsleistung und Ausgangsstrom der Wallbox bei einphasigem Anschluss und dreiphasigen Anschluss mit Sternschaltung.

Wie funktioniert die Kommunikation zwischen dem Elektrofahrzeug und der Ladestation?

Die Kommunikation zwischen dem Elektrofahrzeug und der Ladestation erfolgt analog über das Ladekabel und ist in der **IEC 61851-1** beschrieben [20]. Der in Europa weitverbreitete Typ2-Stecker verfügt zum einen über fünf Leiter zur sicheren Energieübertragung (Schutzleiter PE, Neutralleiter N sowie die drei Außenleiter L1, L2, L3). Zum anderen sind zusätzlich die beiden Signalleiter **CP (Control Pilot)** sowie **PP (Proximity Pilot / Plug Present)** zur **Signalübertragung** integriert.

- 1) **Control Pilot:** Über den CP-Kontakt erfolgt die bidirektionale Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Ladestation. Die Signalleitung dient zum einen der Überprüfung, ob das Elektrofahrzeug und die Ladestation ordnungsgemäß verbunden sind und der Ladevorgang sicher durchgeführt werden kann. Zum anderen wird über den CP-Kontakt der Ladevorgang gesteuert. Die Ladestation informiert das Elektrofahrzeug über den maximalen Ladestrom, den sie zur Verfügung stellen kann. Das Elektroauto sendet hingegen z. B. die Ladefreigabe über diese Schnittstelle.
- 2) **Proximity Pilot:** Mit Hilfe des PP-Kontakts wird dem Elektrofahrzeug und der Ladestation mitgeteilt, für welche Stromstärke das Ladekabel ausgelegt ist.

Die Signalübertragung über den CP-Kontakt erfolgt über eine Kommunikation mit der sogenannten **Puls-Weiten-Modulation (PWM)**. Sobald ein Fahrzeug mit der Ladestation verbunden wird, wird das PWM-Signal in der Ladestation aktiviert, der über den CP-Kontakt spezifizierte Systemzustand wechselt von A nach B, siehe Bild 7. Dabei wird ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 1 kHz erzeugt, das zwischen zwei unterschiedlichen Span-

nungspegeln hin- und herwechselt. Über die Dauer der jeweiligen Pulse (Pulsweite) des Rechtecksignals übermittelt die Ladestation dem Elektrofahrzeug, welcher maximaler Ladestrom zur Verfügung gestellt werden kann. Je höher das Verhältnis der Impulsbreite zur Periodendauer (**Tastverhältnis**) ist, desto höher ist auch der maximal mögliche Ladestrom, siehe Bild 7. Liegt das Tastverhältnis z. B. bei 27 %, kann ein Ladestrom von max. 16 A zur Verfügung gestellt werden. Seine Ladebereitschaft kommuniziert das Elektrofahrzeug, indem die Spannung des PWM-Signals durch einen Widerstand reduziert wird. Dies gibt das Laden bis zum maximal kommunizierten Ladestrom frei (Bild 7, Zustand C). Mehr Austausch über Ladezustand oder sogar die Entladung, erlaubt erst die in Arbeit befindliche ISO 15118-20.

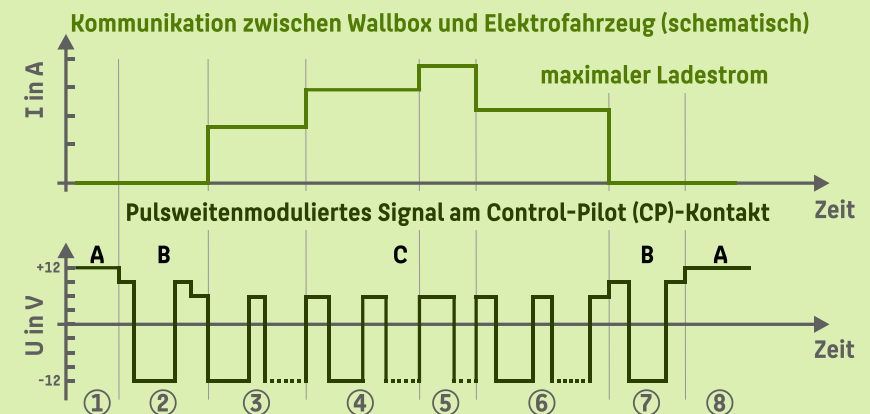


Bild 7 Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation mit Hilfe der Puls-Weiten-Modulation (PWM):
 1) und 8) Fahrzeug nicht mit der Wallbox verbunden; 2) Fahrzeug angeschlossen, nicht ladebereit; 3) Ladevorgang beginnt mit geringem maximalen Strom, codiert als kleine Pulsweite; 4 und 5) maximaler Ladestrom wird erhöht, Pulsweite steigt; 6) maximaler Ladestrom wird reduziert, Pulsweite sinkt; 7) Ladevorgang wird von der Ladestation oder dem Fahrzeug beendet.

2 Vergleich der Systemeigenschaften

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 [21]. Der Leitfaden beschreibt die einheitliche Vermessung zentraler Systemeigenschaften von gesteuerten Wallboxen im Privatbereich, die über die Funktionalität des solaren Überschussladens verfügen. Verlustmechanismen, die zentrale Auswirkungen auf die Höhe des Solaranteils an der Fahrzeugladung und die Kosteneinsparung haben, sind in Bild 8 gegenübergestellt. Im Fokus der Prüfung stehen dabei Tests zur Ermittlung des System- und Peripherieverbrauchs im Stand-by-Modus, Start- und Ausschaltbedingungen, der minimale und maximale Ladestrom der Ladestation, die stationäre und dynamische Regelgüte und die Phasenumschaltung zwischen dem ein- und dreiphasigen Laden. Darüber hinaus kann die Wallbox dem solaren Überschuss nicht stufenlos folgen. Bei vielen Wallboxen erfolgt die Anpassung der Ladeleistung diskret in Leistungsschritten, die Stromstufen in 1-A-Schritten entsprechen. Ebenfalls ermittelt werden Ein- und Ausschaltverzögerungen, die die Häufigkeit der Schaltvorgänge reduzieren sollen. Dies soll die Kompatibilität zum Elektrofahrzeug und die Lebensdauer der Wallbox erhöhen.

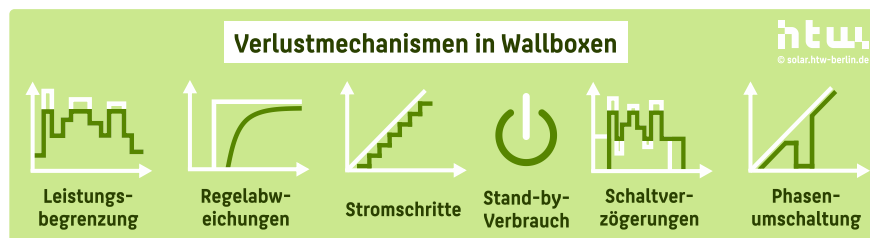


Bild 8 Betriebseffekte von Wallboxen, die den Netz- und Solaranteil an der Fahrzeugladung beeinflussen.

Zum einen lassen sich aus den Ergebnissen der Testverfahren Datenblattangaben ableiten. Zum anderen können Simulationsmodelle zur anwendungsspezifischen Bestimmung der Systemeffizienz parametrisiert werden.

Für diese Wallbox-Inspektion erfolgte die Vermessung der getesteten 5 Wallboxen in der **Power Hardware-in the-Loop (PHIL)-Umgebung** im Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE [22]. 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 9 dargestellt. Der Haushalt und die Solaranlage werden durch eine elektronische Last emuliert. Sie gibt dem Prüfling eine Überschussleistung als Regelgröße vor. Das **Elektrofahrzeug** wurde über den digitalen und frei parametrierbaren Fahrzeugzwilling „ev twin“ nachgebildet [23]–[26]. Dabei wurden der Leistungsteil, bestehend aus Fahrzeugbatterie und Laderegler, als auch die Kommunikation mit dem Fahrzeug gemäß IEC 61851-1 über den CP-Kontakt abgebildet [21]. Weitere Details sind in der Prüfrichtlinie zu finden. Die Systeme werden an den Netzanschluss des Labors angeschlossen.

Die **Prüflinge** setzen sich aus der Wallbox, den Stromsensoren am Netzanschlusspunkt und dem Energiemanagement zusammen, wie Bild 9 ebenfalls zeigt. Über die Stromsensoren wird die Überschussleistung ermittelt, die als Führungsgröße für das gesteuerte Laden gilt. Das Energiemanagement definiert die Ladeleistung, die von der Wallbox codiert als Pulsweiten-Modulationssignal an den digitalen Fahrzeugzwilling weitergegeben wird. Ein Heimspeicher ist im Prüfaufbau nicht enthalten. Alle Prüflinge wurden mit ihren **Standardeinstellungen** vermessen. Für die Messungen wurde für jede Wallbox der **Betriebsmodus zum solaren Überschussladen** gewählt, der dem oben genannten „Nur Solar“-Modus entspricht, siehe auch Tabelle 1. Die entsprechende Firmware-Version der Ladelösungen während des Tests ist im Anhang der Studie zu finden.

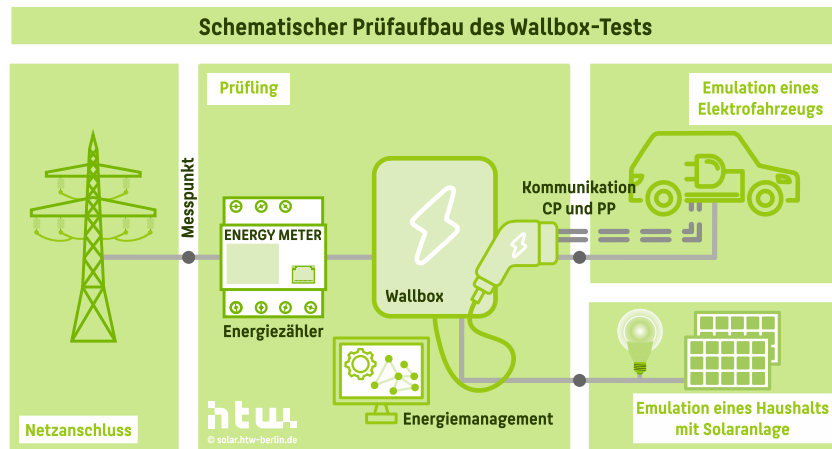


Bild 9 Schematischer Aufbau des Wallbox-Tests in der Power Hardware-in-the-Loop-Umgebung im Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE.

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).

Die Vermessungen der Wallboxen teilten sich in zwei Teilprüfungen auf. Zunächst wurden die **statischen Prüfungen** durchgeführt um z. B. den Deep-Stand-by-Verbrauch, die Tot- und Einschwingzeit oder die Phasenumschaltzeit zu ermitteln. Im Anschluss wurden die Systeme mehreren **Anwendungstests** unterzogen. Die Sollwerte der solaren Überschussleistung wurde auf der Grundlage von realen Messwerten der Haushaltslast und der solaren Erzeugung ermittelt.

Zur vereinfachten Darstellung wird jedem System in dieser Studie ein **Kürzel** zugeordnet, das aus einem Buchstaben und einer Ziffer besteht (zum Beispiel A1, B1, C1). Der Buchstabe variiert je nach Wallboxanbieter. Die Kürzel und Produktbezeichnungen der Ladelösungen und weiterer Komponenten sind auf der folgenden Seite angegeben. Wallbox, Energy Meter und das Energiemanagementsystem (EMS) stammen jeweils vom gleichen Hersteller.

Nach Abschluss der Analysen erhielten die teilnehmenden Unternehmen eine **individuelle Effizienzanalyse, Optimierungsvorschläge** sowie die **anonymisierten Ergebnisse des Wallboxvergleichs**. Im Anschluss entschieden die Hersteller, ob ihre Ergebnisse anonym oder mit Angabe der Produktbezeichnung veröffentlicht werden. Nach der Sichtung der eigenen Ergebnisse entschlossen sich die folgenden 4 Hersteller für die namentliche Erwähnung in der Studie: **Amperfiend, Fronius International, Kostal Solar Electric und SMA Solar Technology**. Der Hersteller des Systems A1 bevorzugte keine namentliche Nennung. Die Ergebnisse der statischen Tests werden unter Angabe der Kürzel in den Abschnitten 2.1 bis 2.6 dieser Studie vorgestellt. Hierbei werden, wenn möglich, in jeder Kategorie die jeweiligen Testsieger ausgewiesen. Das Verhalten der Systeme während der Anwendungstests ist im Abschnitt 2.7 gegenübergestellt. Eine simulative Systembewertung auf Basis der Messdaten ist in Abschnitt 3.3 dargestellt.

A1



B1



C1



D1



E1



Wallbox

-

Amperfied connect.solar

KOSTAL Enector AC

SMA eCharger

Fronius Wattpilot
Flex Home 22 C6

Energy Meter und EMS

-

PowerMeter 63

Smart Energy Meter G2

Sunny Home Manager 2.0
und Energy Meter

Smart Meter IP

Tabelle 1 Ausgewählte Eigenschaften und Funktionalitäten der getesteten Wallboxen. Die Tabelle wurde auf Basis von öffentlich zugänglichen Dokumenten und Informationen der Hersteller erstellt. Vereinzelt beruhen die Angaben auch auf Rückmeldungen der Hersteller.

	A1	B1	C1	D1	E1
HARDWARE					
Nutzbare Phasen	3	1-3	1-3	1-3	1-3
Automatische Phasenumschaltung integriert	-	●	●	●	●
Ladekabel standardmäßig mitgeliefert, Länge	-	●, 5 m oder 7,5 m	●, 7,5 m	optional	●, 6 m
Display	-			●	●
Zähler am Netzanschluss für solaropt. Laden notwendig	●	●	●	●	●
ISO 15118-20-ready ¹⁾ (Bidirektionales Laden)	-			●	●
Ladestromstufen	1 A	≤0,1 A	0,5 A	≤0,1 A	1 A
Systemlösung (WR, Heimspeicher, ...)	-		●	●	●
SOFTWARE					
Kommunikationsschnittstellen (Beispiele)	-	OCPP 1.6 SC Modbus TCP/IP	EEBUS, Modbus TCP / TLS	OCPP 1.6 J SEMP, Modbus	OCPP 1.6 J
Namen der Betriebsmodi	-	Boost, Manuell; Eco ²⁾	Power; Time; Solar Plus; Solar Pure ²⁾	Schnellladen; Laden mit PV-Über- schuss (0-100 %) ²⁾ ; Laden mit Zielvorgabe, Laden mit Kostenlimit	Standard; Eco ²⁾ ; Next Trip
Integration von Prognosen zur Ladung möglich	-			●	●
Automatisierte Nutzung dynamischer Stromtarife möglich	-			●	●
App und Monitoringportal vorhanden	-	●/●	●/●	●/●	●/●
Ladeplanung / Priorisierung von Großverbraucher (bspw. Elektrofahrzeug, Wärmepumpe, Heimspeicher oder Heizstab) mit App möglich	-	●/●	●/●	●/●	●/●

1) ISO 15118-20 definiert den Kommunikationsstandard keine Netzanschlussbedingungen. 2) Betriebsmodus, indem die Wallboxen während der Labor- und Anwendungstests vermessen wurden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über einige **Eigenschaften und Funktionalitäten der getesteten Ladelösungen**. Bei dem System A1 handelt es sich um eine dreiphasige Wallbox – eine automatische Umschaltung auf den einphasigen Betrieb, wie bei den anderen Probanden, ist nicht möglich.

Die Wallboxen C1, D1 und E1 sind Teil eines „**Herstellerökosystems**“. Die Produkte des Energiesystems wie z. B. Wechselrichter, Heimspeicher und Heizstab kommen somit aus einer Hand und lassen sich vorteilhaft kombinieren.

Die Wallboxen D1 und E1 sind standardmäßig mit einem **Display** ausgestattet. Für das solaroptimierte Laden benötigen alle analysierten Wallboxen einen **externen Leistungssensor** am Netzanschlusspunkt. Hier können Synergien mit Messungen eines eventuell vorhandenen Heimspeichers genutzt werden. Wenn der PV-Wechselrichter nicht vom Hersteller der Wallbox D1 stammt, wird ein zusätzlicher Energy Meter zur Überwachung der Erzeugung benötigt. Der Grund: Das Energiemanagement integriert Prognosen der Erzeugung und des Verbrauchs in die Ladeplanung der Wallbox und weiterer Systemkomponenten.

Für das **bidirektionale Laden** über die AC-Schnittstelle sind die Wallboxen D1 und E1 vorbereitet. Vorbehaltlich der Standardisierung kann das Be- und Entladen des Elektrofahrzeugs per Software-Update freigeschaltet werden. Bei System D1 ist die Funktionalität als kostenpflichtiges eProdukt geplant.

Alle Wallboxen können über **LAN und WLAN** ans Internet angeschlossen werden und sind werksseitig mit einer 6 mA-Gleichstrom-Fehlerstrom-Überwachung ausgestattet, so dass eine Installation mit dem RCD Typ A möglich ist. Bei der Wallbox B1 kann gegen Aufpreis eine Variante mit dem sonst separat zu installierenden Fehlerstromschutzschalter RCD Typ A gewählt werden.

Die Wallboxen können aufgrund von Beschränkungen des CP-Signals der solaren Überschussleistung in der Regel nicht stufenlos folgen. Bei den Wallboxen A1 und E1 wird die Ladeleistung lediglich in 1-A-Schritten angepasst. Das

bedeutet: Im einphasigen Betrieb kann die Ladeleistung lediglich in etwa 230-W-Stufen, im dreiphasigen Betrieb sogar nur in etwa 690-W-Schritten angepasst werden. Bei den Systemen B1 und D1 ist die **Ladestromschrittweite** mit $\leq 0,1$ A geringer, so dass diese in 12 W bzw. 36 W genau regeln könnten. Das System C1 regelt mit einer Ladestromschrittweite von 0,5 A.

Das Open Charge Point Protocol (OCPP) ist ein offener **Kommunikationsstandard**, der unter anderem den Datenaustausch mit einem Energiemanagementsystem regelt. Die Wallboxen A1, B1, D1 und E1 sind über OCPP somit in unabhängige Energiemanagementsysteme integrierbar. Bei der Wallbox C1 wäre dies über EEBus oder per Modbus TCP / TLS möglich.

Dynamische Stromtarife lassen sich automatisiert bei den Wallboxen D1 und E1 einbinden. Die Ladung kann isoliert mit Netzstrom zu den Zeitpunkten mit dem günstigsten Netzstrom erfolgen oder alternativ in Kombination mit überschüssigem Solarstrom. In den Betriebsmodi „Laden mit Zielvorgabe“ und „Next Trip“ wird zum einen eine Mindestenergiemenge vorgegeben, die in das Elektrofahrzeug geladen werden soll. Zum anderen wird ein Abfahrtszeitpunkt definiert. Das Energiemanagement plant daraufhin die Ladung mit dem günstigsten Strom (Solarstrom oder Netzstrom). Bei den anderen Wallboxen kann dies über eine Freigabesignal erfolgen, das zeitgesteuert ist oder manuell vorgegeben wird.

Alle Wallboxen verfügen über eine App, mit der die **Ladeplanung** realisiert werden und die Informationen über die Ladungen abgerufen werden können. Bei den Wallboxen B1 bis E1 kann zudem die Ladung eines Heimspeichersystems vor der Fahrzeugladung priorisiert werden.

2.1 Ein- und Ausschaltvorgang

Der erste Test der Prüfrichtlinie beschreibt die **Prüfung des Einschaltens sowie das Anfahren maximaler und minimaler Betriebspunkte** bei der Nutzung von einer oder drei Phasen [21]. Ausgelöst durch das Einstecken des Ladesteckers und starten des Ladevorgangs soll die Wallbox nach einer **Startzeit** die Ladeleistung auf den Sollwert erhöhen. Sowohl im ein- als auch im dreiphasigen Betrieb wird zunächst der maximale Ladestrom bzw. die maximale Ladeleistung in Form eines Sollwerts vorgegeben, siehe auch Bild 10. Die **Einstellzeit** beschreibt die Zeit, bis die Wallbox einen eingeschwungenen Zustand nahe dem Sollwert erreicht und eine konstante und stabile Leistungsabgabe realisiert hat. Im Labor hat die Wallbox E1 nach 15 s ihre maximale Leistungsabgabe eingestellt, die Wallbox B1 folgt 3 s später. Nach 5 min wird das Abstecken der Wallbox simuliert, indem über den CP-Kontakt der Systemzustand A (Leerlauf, nicht verbunden, dunkelgrauer Hintergrund) kommuniziert wird. Die

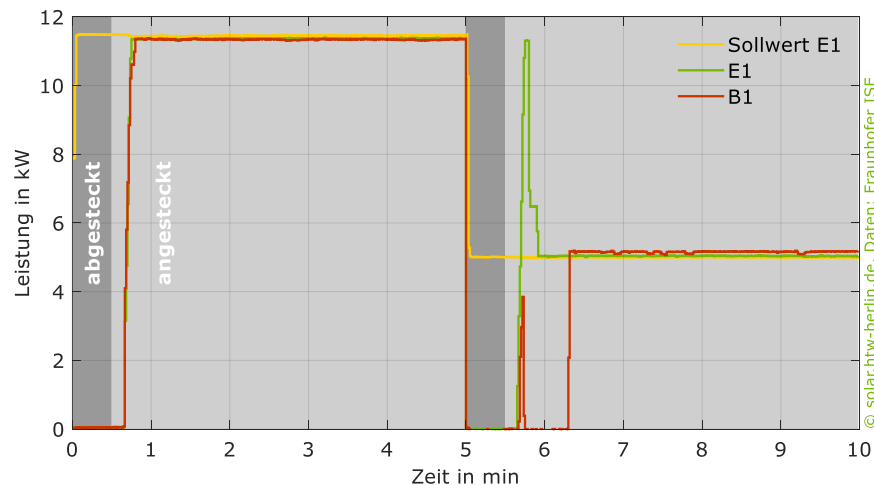


Bild 10 Leistungsflüsse des Sollwerts bei zwei aufeinanderfolgenden Einschaltvorgängen im dreiphasigen Betrieb und einem vorgegebenen Strom von 16 A und 7 A. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Einschaltverhalten bei unterschiedlichen Fahrzeugen



In der Praxis hat das Elektrofahrzeug einen Einfluss auf das Einschaltverhalten der Wallbox, wie verschiedene Untersuchungen bereits zeigten [26], [28]. Bei fünf verbreiteten Fahrzeugmodellen mit gleicher Wallbox wurde die Ladung nach 6 s bis 15 s gestartet. Somit unterschieden sich die Fahrzeugreaktionen um bis zu 9 Sekunden. Der Einschaltvorgang ist um bis zu 25 s länger als mit dem generischen idealen Fahrzeugmodell im Labortest. Siehe auch FAQ in Kapitel 4.

Leistungsabgabe wird unterbrochen. Gleichzeitig wird der Sollwert im Test auf eine deutlich geringere Ladeleistung reduziert. Hier ein Ladestrom von 7 A. Nach weiteren 30 s wird der Wallbox über den CP-Kontakt der Systemzustand C (angesteckt, ladebereit) kommuniziert und das System beginnt mit der Ladung. Die Einstellzeit der Wallbox E1 liegt mit 25 s nun höher. Der Grund: Die Wallbox erhöht bei der vermessenen Firmwareversion beim Einschalten die Ladeleistung bis zum Maximalwert, bevor sie sich dem neuen Sollwert annähert. Dieses Verhalten ist reproduzierbar, wie sich Bild 12, Bild 26 und Bild 27 entnehmen lässt und wurde laut Hersteller Fronius bereits durch ein Update behoben. Das System B1 reagiert zum gleichen Zeitpunkt wie E1, allerdings scheint die Wallbox einen einphasigen Ladebetrieb etablieren zu wollen. Da die Leistungsabgabe nicht ausreicht, um den Sollwert decken zu können, schaltet die Wallbox in den dreiphasigen Betrieb um. Sie erreicht den Sollwert 48 s nach dem Einstecksignal.

Das Überspringen bis zum maximalen Strom konnte bei diesem Test auch bei der Wallbox C1 identifiziert werden, die bei jedem Anstecken die maximale Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs prüft. Im Vergleich zu E1 reagiert sie 9 s später auf die Sollwertvorgabe. Die maximale Ladeleistung wurde dabei für

21 s gehalten, bevor sie auf den Sollwert reduziert wurde. Die Einstellzeit betrug somit 68 s. In einem vorgelagerten Test mit 6 A haben die Wallboxen A1 und B1 mehrmals versucht die minimale Ladeleistung einzustellen, konnten während des Versuchszeitraums allerdings keine konstante Leistungsabgabe bei minimalem Ladestrom etablieren. Bei einem Ladestrom von 7 A starteten alle Wallboxen die Ladung hingegen problemlos.

Neben der Ladeleistung ist die **Zeitverzögerung beim Starten und beim Beenden**, beispielsweise während der Pausierung der solaren Ladung des Elektrofahrzeugs, von Bedeutung. Die Wallboxen reagieren dabei unterschiedlich schnell auf verfügbare und fehlende Überschussleistung, siehe Tabelle 2. Die Hersteller der Wallboxen B1, E1 und C1 reagieren mit 6 s bis 10 s Verzögerung umgehend auf überschüssige Solarleistung. Mit 27 s wartet die Wallbox A1 länger, bevor sie die Ladung startet. So soll vermieden werden, dass die Wallbox bereits bei einer kurzen Leistungsspitze die Ladung aufnimmt und gleich wieder beendet. Bei Wallbox D1 muss mit zwei Minuten für einen Startvorgang gerechnet werden. Dies ist dem Energiemanagement geschuldet, welches nur jede Minute eine Optimierung durchführt und hierbei auch noch die Messwerte der vergangenen Minuten berücksichtigt. Trotz einer Haltezeit von etwa 10 s kann der Startvorgang von Wallbox C1 jedoch im Betrieb deutlich länger dauern. Der Grund ist, dass der Hersteller einen Startvorgang nur zulässt, wenn die letzte Abschaltung länger als 5 min zurückliegt [29].

Tabelle 2 Haltezeit beim Ladungsbeginn und -ende.

System	Haltezeit Ladungsbeginn	Haltezeit Ladungsende
A1	27 s	14 s
B1	6 s	4 s
C1	10 s	308 s
D1	111 s	138 s
E1	8 s	41 s

Vor dem Ausschalten setzt dieser Hersteller ebenfalls auf lange Wartezeiten. Das System C1 hält über einen Zeitraum von 5 min die minimale Leistung. Das Aus- und Wiederanschalten an wechselnd bewölkten Tagen kann somit einen längeren Zeitraum von mehr als 10 min beanspruchen. Anders bei der vergleichsweisen konstanten Regelung von D1, die im Mittel nach 138 s die Ladung beendet. Diese ist jedoch aufgrund der internen Optimierung deutlich langsamer als die Wallbox E1 mit 41 s. Nahezu ohne Zeitverzögerung, sobald die minimalen Ladeleistungen unterschritten werden, schalten die Wallboxen A1 (14 s) und B1 (4 s) ab. Die schnelle Reaktion kann Netzbezug vermeiden, aber auch zu ungewollt häufigem An- und Ausschalten führen, wie Bild 11 bei den Minuten 10 und 55 zeigt. Darüber hinaus muss eine lange Haltezeit nicht immer von Nachteil sein, da meist noch anteilig Solarstrom geladen werden kann (C1 bei Minute 30). Neben den Haltezeiten vor dem Beginn und dem Ende der Ladung, ist auch eine Haltezeit vor dem Phasenwechsel bei System E1 und C1 ersichtlich. Diese werden im nachfolgenden Kapitel näher betrachtet.

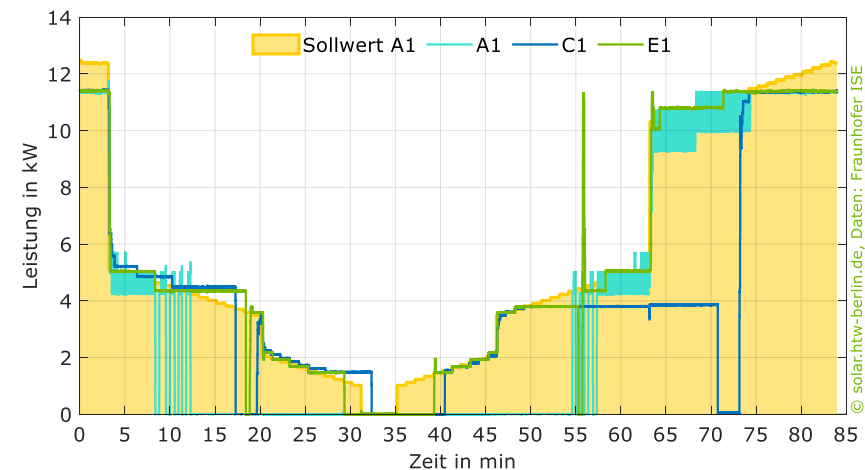


Bild 11 Reaktion drei verschiedener Wallboxen auf die Sollwertvorgaben im Test zur Bestimmung der Haltezeiten. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

2.2 Phasenumschaltung

Mit der Ladesteuerung über das Control-Pilot (CP)-Signal (siehe oben), kann die Wallbox nur einen minimalen Ladestrom von 6 A einstellen. Ein kleinerer Strom kann über das PWM-Signal nicht kommuniziert werden. Der maximale Ladestrom wird hingegen häufig von der Dimensionierung des Ladegeräts im Fahrzeug, von der Wallbox, der Elektroinstallation oder dem Netzbetreiber auf 16 A begrenzt [19]. Die **minimalen und maximalen Ladeleistungen** betragen somit i.d.R. 1,4 kW und 3,7 kW (einphasiger Betrieb) bzw. 4,2 kW und 11 kW (dreiphasiger Betrieb). Einphasige Wallboxen können keine großen Leistungen übertragen und dreiphasige Wallboxen können geringeren Überschussleistungen nicht folgen. Mit der automatischen Phasenumschaltung vereinen viele aktuelle Wallboxen das Konzept einer einphasigen und dreiphasigen Wallbox in einem Gerät [30]. Bei Über- bzw. Unterschreitung des Schwellenwerts der verfügbaren Leistung schaltet das System oder das Energiemanagement die Wallbox automatisch in den optimalen Betriebsmodus um. Soll die Wallbox z. B. mit einer höheren Leistung als 3,7 kW das Fahrzeug laden, weil viel PV-Überschuss vorhanden ist, schaltet sie in den dreiphasigen Lademodus um. Soll hingegen mit einer geringeren Leistung als 4,2 kW geladen werden, wird wiederum auf einphasigen Betrieb gewechselt. Um eine Fehlfunktion zu vermeiden, wird bei der Phasenumschaltung das Laden unterbrochen, leistungsfrei mit der gewünschten Phasenanzahl wieder zugeschaltet und die Ladung fortgesetzt. Um eine Trennung sicherstellen zu können, wird in der Regel zwischen Ladeunterbrechung und Zuschaltung eine Umschaltzeit implementiert. Anwender:innen sowie Wallboxhersteller weisen darauf hin, dass die Phasenumschaltung bei einzelnen Elektrofahrzeuge 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, da z. B. ein elektrischer Fehler unterstellt wird und setzen die Ladung nicht eigenständig fort.

Um die Funktionalitäten der automatischen Phasenumschaltung zu testen definiert der **Prüfleitfaden** mehrfache Wechsel zwischen dem ein- und dreiphasigem Laden [21]. Die 8 Sollwerte sind dabei so vorgegeben, dass die Ladung klar im ein- oder dreiphasigen Betrieb erfolgen sollte, siehe auch Bild 12.

Die Ladung startet im Test im dreiphasigen Betrieb. Bereits nach 2 min wird jedoch die erste Phasenumschaltung provoziert, indem der Sollwert von 5,7 kW auf 2,8 kW reduziert wird. Beide in Bild 12 dargestellten Wallboxen C1 und E1 reduzieren umgehend ihre Ladeleistung auf die minimale Leistungsabgabe im dreiphasigen Betrieb von etwa 4,2 kW. Die minimale Leistung wird für eine kurze Zeit gehalten, um zu prüfen, ob die Leistungsänderung nur kurzfristig erfolgte. Somit soll ein zu häufiges Umschalten vermieden werden. Während die Wallbox C1 diesen Wert etwa 5 min hält, erfolgt die Phasenumschaltung bei der Wallbox E1 bereits nach etwa 70 s. Während dieser Haltezeit

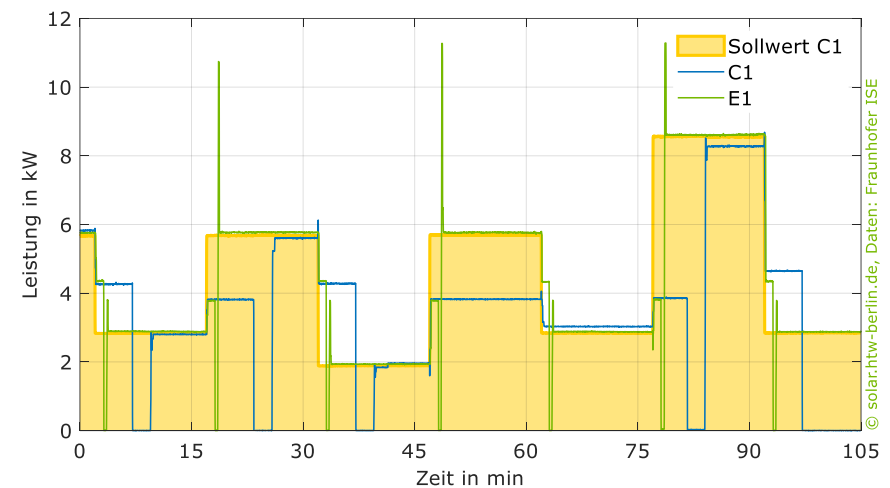


Bild 12 Reaktion zweier Wallboxen mit automatischer Phasenumschaltung auf sprunghafte Änderungen der Sollwertvorgabe. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

weicht die Überschussleistung zum Teil deutlich von der Wallboxleistung ab. Die Folge: Es wird zusätzlich Leistung aus dem Netz bezogen oder eingespeist. Einzelne Hersteller weisen zusätzlich darauf hin, dass nur eine gewisse Anzahl an Phasenwechseln während eines Ladevorgangs oder Zeitintervalls erlaubt sind (siehe z. B. [33]). Hierfür überprüft beispielsweise das System C1 lediglich in festen Zeitabständen von 15 min, ob die Bedingungen für einen Phasenwechsel erfüllt sind. Daher verbleibt die Wallbox C1 nach dem dritten Phasenwechsel im einphasigen Betrieb und schaltet nicht wie die Wallbox E1 erneut um. Parameteränderungen der maximalen Anzahl der Phasenwechsel oder der Phasenwechselverzögerung können mitunter zu einem Garantiausschluss führen [33]. Bei den getesteten Geräten ist dies nicht der Fall. Alle Hersteller bestätigten, dass sämtliche Einstellungen, die der Endnutzer vornehmen kann, bedingungslos vorgenommen werden können.

Damit sollen zum einen die Laderegler der Fahrzeuge geschützt werden. Zum anderen könnten zu viele Umschaltungen zu einer schnelleren Alterung der Schütze und somit zu einem Ausfall der Wallbox führen [34].

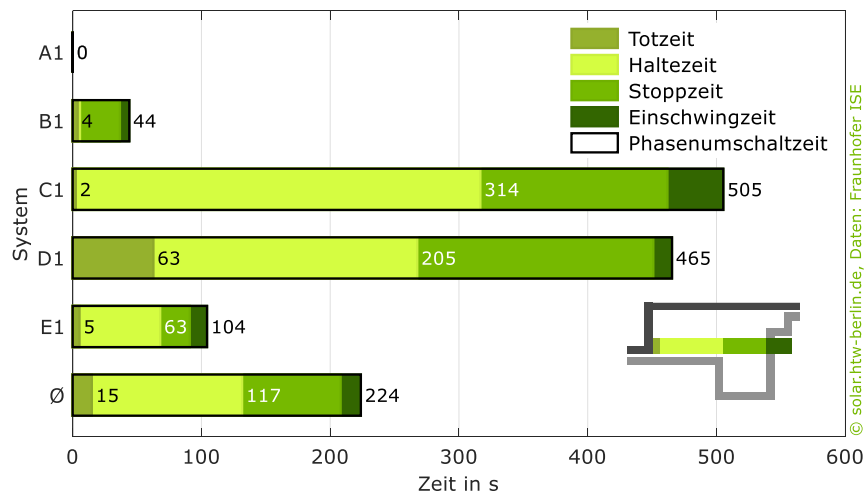


Bild 13 Zusammensetzung der Phasenwechselzeit (Mittelwert) der untersuchten Systeme. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Während des Zu bzw. Abschaltens der Außenleiter wird die Ladung aufgrund mehrerer **Sicherheitsprüfungen** auf 0 W reduziert und pausiert. Dies dient laut verschiedenen Herstellerangaben dem Schutz des Ladereglers des Elektrofahrzeugs [33], [35]. Die Zeit, indem die Ladung unterbrochen wird, unterscheidet sich bei den Wallboxen ebenfalls deutlich. Bei der Wallbox D1 beträgt sie etwa 3 min, bei der Wallbox E1 hingegen nur 23 s. Bis der neue Sollwert erreicht und der Umschaltprozess der Phasen somit abgeschlossen ist, vergehen bei der Wallbox C1 in Summe im Mittel mehr als 8 min, siehe auch Bild 13. Bei der Wallbox D1 liegt die **Phasenumschaltzeit** auf einem ähnlichen Niveau, allerdings unterscheidet sich die Zusammensetzung. Während die Totzeit deutlich länger ausfällt, ist die Haltezeit um 2 min geringer. Das Umschalten zwischen dem ein- und dreiphasigen Betrieb dauert bei der Wallbox E1 in Summe durchschnittlich 104 s je Phasenumschaltung. Bei der Wallbox B1 liegt die gesamte Phasenumschaltzeit nach den Messungen im Labortest sogar nur bei 44 s. Umschaltungen werden sehr schnell und somit auch sehr häufig initiiert, wie beispielhaft auch im Anwendungstest in Bild 27 unten zu sehen ist. Wenn Fahrzeuge mit dieser Regelgeschwindigkeit nicht mithalten können, kann die Ladung mitunter nicht wie geplant durchgeführt werden und ein händisches Eingreifen durch die Nutzer*in kann notwendig werden, siehe auch grüne Box. Die Wallbox A1 ist ein rein dreiphasiges System – eine Phasenumschaltung kann somit nicht realisiert werden.

Häufigkeit und Dauer der Phasenumschaltung



Die Kompatibilität mit möglichst allen Fahrzeugherstellern ist bei einigen Wallboxanbietern ein Argument für eine zurückhaltende Nutzung der Phasenumschaltung. Die teilnehmenden Unternehmen bestätigen unabhängig voneinander, dass längere Halte- und Stoppzeit die Kompatibilität erhöhen können. Allgemeine Aussagen sind jedoch schwer möglich, da die Laderegler der Elektrofahrzeuge unterschiedlich konfiguriert sind.

2.3 Stand-by- und Peripherieverbrauch

Wie die Analyse von Feldmessdaten von 849 unterschiedlichen Ladeprofilen von Elektrofahrzeugen zeigt, werden die Autos nur zwischen 400 h/a und 1400 h/a aktiv geladen [19]. Im Mittel befinden sich die Wallboxen somit **93 % (8180 h) im Jahr im Stand-by-Betrieb**. Dabei haben Lade- und Fahrverhalten einen großen Einfluss auf die Zeit der Wallbox im Bereitschaftsbetrieb. Neben der Wallbox müssen sogenannte Peripherieverbraucher, wie z. B. der Leistungssensor (Energy Meter) am Netzanschlusspunkt, über das gesamte Jahr hinweg versorgt werden. Der Systemverbrauch der Komponenten kann durch das Netz oder, sofern solarer Überschuss vorhanden ist, durch die PV-Anlage gedeckt werden.

Bei der Ermittlung des Systemverbrauchs im Stand-by der Wallboxen wurden drei Messungen durchgeführt. Somit wird zwischen **verschiedenen typischen Betriebszuständen** unterschieden. Für den Stand-by-Verbrauch sind gemäß der Norm IEC 61851-1 folgende Zustände relevant:

- C1 (Fahrzeug ladebereit – die Wallbox kann jederzeit durch Aktivierung eines PWM-Signals ein Laden initiieren)
- B2 (Fahrzeug nicht ladebereit – die Wallbox ist zwar grundsätzlich ladebereit, jedoch kann ein Ladevorgang nur starten, wenn die Freigabe fahrzeugseitig wieder aktiviert wird)
- A1 (Fahrzeug nicht eingesteckt, Leerlauf – Fahrzeug wird vollständig getrennt bzw. ausgesteckt)

Damit Änderungen in der Stand-by-Leistungsaufnahme identifiziert werden können, wurden die Messungen der unterschiedlichen Betriebszustände über einen Zeitraum von jeweils 30 min durchgeführt [36]. In der Praxis tritt der Betriebszustand A1 am häufigsten auf. Bild 14 stellt daher für diesen Zustand die Stand-by-Leistungsaufnahme der analysierten Wallboxen und Peripherieverbraucher gegenüber.

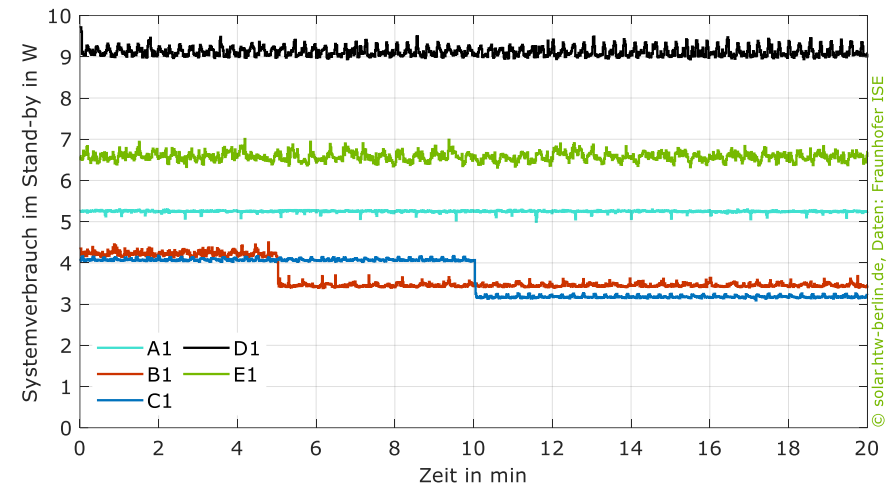


Bild 14 Messwerte des Stand-by-Verbrauchs im Betriebszustand A1 (Fahrzeug nicht eingesteckt) inkl. zugehöriger Systemkomponenten wie z. B. der Energy Meters am Netzanschlusspunkt. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Die Wallbox E1 bezieht im Mittel etwa 6,6 W, wenn Wallbox und Fahrzeug nicht verbunden sind. Das sind 2,5 W weniger als System D1 mit 9,1 W und 1,4 W mehr als System A1 mit 5,2 W. Großen Einfluss auf den Stand-by-Verbrauch hat dabei die Helligkeit des Displays, die standardmäßig auf 30 % eingestellt, allerdings veränderbar ist. Die Wallboxen B1 und C1 reduzieren nach 5 min bzw. 10 min ihren Leistungsbezug um etwa 1 W und gehen in Ruhebetrieb in einen Energiesparmodus. Die Reduktion der Leistungsaufnahme ist dabei auf die Deaktivierung unnötiger Messungen (B1) und das Ausschalten von LEDs (C1) zurückzuführen. Beide Wallboxen sind jedoch sofort wieder einsatzbereit, wenn dies erforderlich ist. Die Wallbox C1 bezieht damit 1 W im Stand-by-Modus, der restliche Systemverbrauch resultiert vom Energy-Meter am Netzanschlusspunkt, wie Bild 15 zeigt. Die Leistungsaufnahme in den Zuständen C2 und B2 ist bei den Wallboxen nur geringfügig höher.

Für die isolierte Messung des **Peripherieverbrauchs** wird ein vereinfachter Aufbau aus der Prüfung des Systemverbrauchs im Stand-by genutzt. Über den

Messpunkt am Netzanschluss (siehe Bild 9) wird nur der zu prüfende Peripherieverbraucher versorgt und somit dessen individueller Verbrauch erfasst. Die Wallbox ist nicht in Betrieb.

Bild 15 stellt die Zusammensetzung des Systemverbrauchs im Stand-by-Betrieb gegenüber. Bei den Wallboxen mit einem intelligenten Abschaltkonzept bezieht sich die Angabe der Stand-by-Leistung auf den Betriebszustand mit reduziertem Verbrauch. Die Leistungsaufnahmen der AC-Leistungssensoren variieren zwischen 0,6 W und 3,5 W. Der Peripherieverbrauch der Wallbox D1 ist am höchsten, da neben dem Energiemanagementsystem Sunny Home Manager 2.0 von SMA noch ein zusätzlicher Energy Meter verbaut werden musste. Dieser zusätzliche Zähler ist notwendig, da im Labor kein SMA-Wechselrichter installiert ist, der standardmäßig die aktuelle solare Erzeugung an das Energiemanagementsystem kommuniziert. Je nach Hersteller unterscheiden sich demnach die Funktionalitäten der Energy Meter deutlich. Die Leistungsaufnahmen der Wallboxen liegen hingegen zwischen 1,0 W (C1) bis 5,6 W (D1), der Mittelwert beträgt 3,1 W.

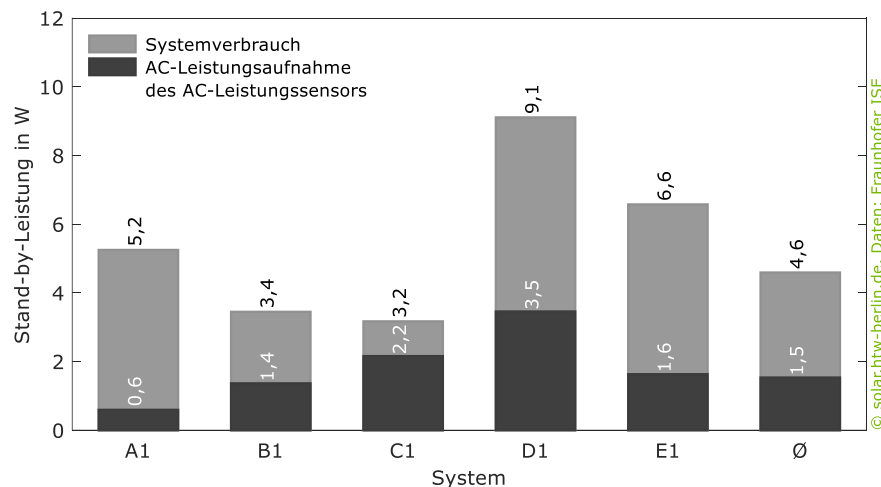


Bild 15 Zusammensetzung der Stand-by-Leistungsaufnahme der untersuchten Systeme im Betriebszustand A1 (Fahrzeug nicht eingesteckt). Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.



Bild 16 Testsieger in der Kategorie „geringster Systemverbrauch im Stand-by-Betrieb“ ist eine Systemkombination der Firma KOSTAL.

Der **Testsieger** in der Kategorie „geringster Systemverbrauch im Stand-by-Betrieb“ ist der Kostal Enector AC in Kombination mit dem Kostal Smart Energy Meter G2, siehe Bild 16. Der Verbrauch liegt in Summe lediglich bei 3,2 W.

2.4 Dynamische Regelungsabweichungen

Verzögerungen und Ungenauigkeiten in der Regelung führen zu Abweichungen zwischen der Überschussleistung und der Leistungsabgabe der Wallbox. Im Prüflabor wurde das Reaktionsverhalten der Wallboxen über einen sogenannten Sprungantworttest charakterisiert. Die Prüfrichtlinie „Unidirektionales und Solares Laden“ definiert ein **Stufenprofil** mit 9 sprunghafte Änderungen des Stromsollwerts, die in umgekehrter Reihenfolge zwei Mal hintereinander durchgeführt werden, siehe auch Bild 17 [21]. Die Stromvorgabe wird jeweils über mehrere Minuten konstant gehalten und variiert zwischen 7 A und 16 A. Die Messung wird sowohl für den dreiphasigen als auch einphasigen Betrieb durchgeführt, ohne dass eine Phasenumschaltung provoziert wird.

Bild 17 zeigt das **Reaktionsverhalten** der Wallboxen B1, C1 und D1 auf die sprunghaften Änderungen der Sollwertvorgabe im dreiphasigen Betrieb. Der Sollwert ist beispielhaft für Wallbox B1 dargestellt. Geringfügige Abweichungen zwischen den Sollwerten sind nicht zu vermeiden. Mit den Stromvorgaben

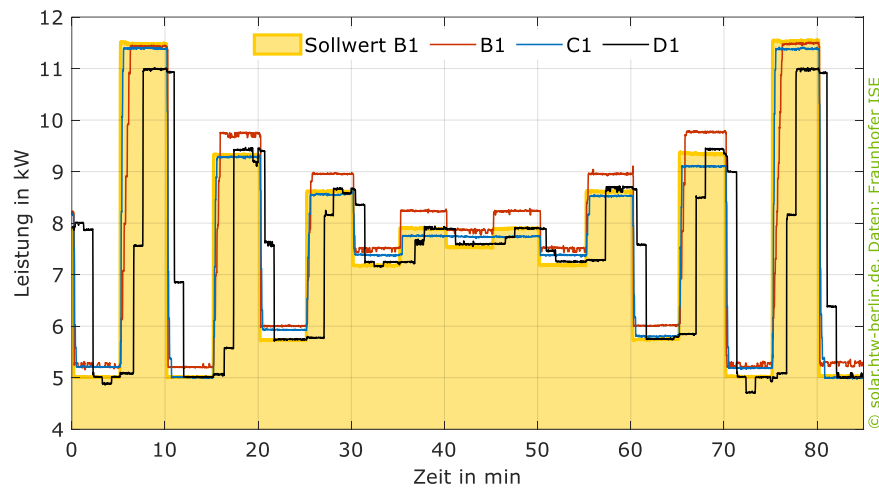


Bild 18 Reaktionsverhalten und resultierende Leistungsflüsse im Sprungantworttest im dreiphasigen Betrieb für die Systeme B1, C1 und D1. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

zwischen 7 A und 16 A und der Netzspannung um 236 V ergeben sich Leistungen zwischen 4,8 kW und 11,3 kW.

Die Reaktionen der Wallboxen auf sprunghafte Änderungen der Sollwerte variieren deutlich. Während die Wallbox C1 innerhalb von wenigen Sekunden die neue Leistungsvorgabe eingestellt hat, vergehen bei der Wallbox D1 teilweise mehr als 2,5 min. Bei größeren Änderungen des Sollwerts erhöhen die Wallboxen B1 und D1 die Leistungsabgabe zudem in der Regel schrittweise. Darüber hinaus sind bei konstanten Sollwerten zum Teil deutliche Abweichungen identifizierbar, die in Abschnitt 2.5 näher betrachtet werden.

Bild 18 ist das Reaktionsverhalten der fünf analysierten Wallboxen beispielhaft für die einzustellenden **Betriebspunkte 3 bis 5** des dreiphasigen Sprungantworttests zu entnehmen. Die Sollwertvorgaben, die einen solaren Überschuss symbolisieren, können die Wallboxen unterschiedlich schnell und genau einstellen. Das Einschwingverhalten der Wallboxen A1 und B1 variiert deutlich je nach Richtung der Leistungsänderung. Bei großen, positiven Änderungen der

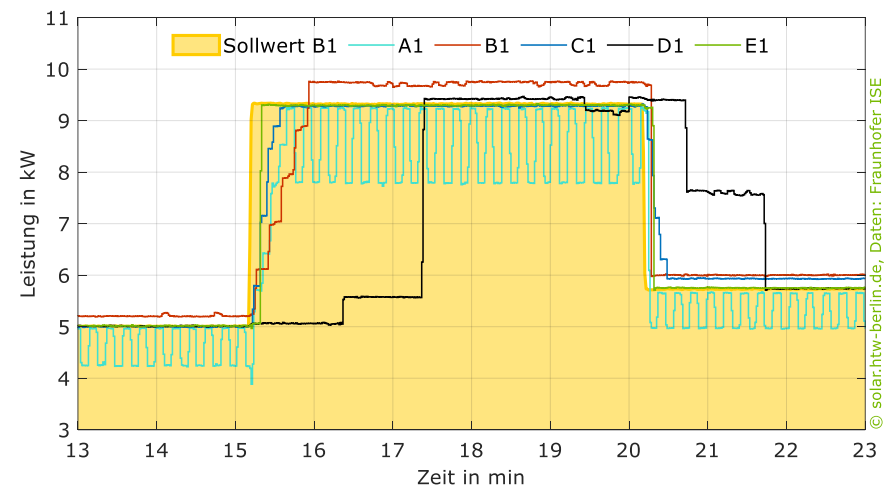


Bild 17 Reaktionsverhalten und resultierende Leistungsflüsse der analysierten Systeme im dreiphasigen Sprungantworttest für die Stufen 3 bis 5. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Überschussleistung reagieren die Wallboxen in der Regel mit einer vergleichsweise langsamen und schrittweisen Anpassung der Leistungsabgabe. Bei einer Reduktion des Sollwerts wird die Wallboxleistung hingegen innerhalb von wenigen Sekunden und häufig stufenlos reduziert.

Die Zeitspanne bis zur ersten Leistungsänderung, auch **Totzeit** genannt, liegt bei der Wallbox D1 beim positiven Leistungssprung in Bild 18 bei etwa 70 s. Im Mittel (Median), über alle Leistungsstufen und im ein- und dreiphasigen Betrieb, nimmt das System eine Leistungserhöhung jedoch erst nach 109 s vor. Eine Leistungsreduktion erfolgt hingegen durchschnittlich bereits nach 43 s. Über den gesamten Sprungantworttest beträgt die mittlere Totzeit 73 s, siehe auch Bild 19. Bei großen Sprüngen der Leistungsabgabe ist zudem sehr häufig ein Zwischenschritt identifizierbar, bei dem die Wallbox die Leistungsabgabe über einen Zeitraum von etwa 1 min hält. Das System C1 reagiert hingegen im Mittel bereits nach nur 2,7 s auf Leistungsänderungen am Netzanschlusspunkt und weist damit die geringste Totzeit im Test auf, siehe auch Bild 19.

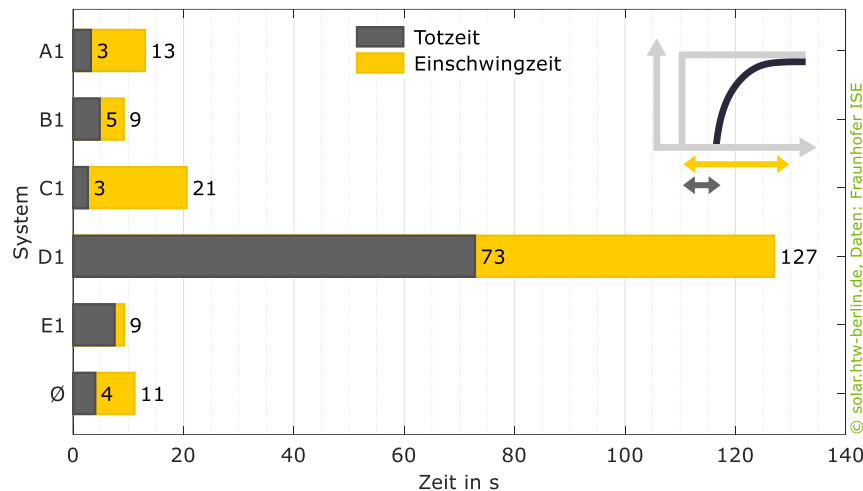


Bild 19 Median der Tot- und Einschwingzeit bei steigenden und abfallenden Änderungen der Sollwertvorgabe der untersuchten Systeme im ein- und dreiphasigen Betrieb. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin

Bis der neue Sollwert eingestellt ist, vergehen jedoch im Durchschnitt weitere 18 s. Die vergleichsweise hohe **Einschwingzeit** von 21 s ist auch auf das asymptotische, schrittweise Annähern der Leistungsabgabe an den Vorgabewert zu erklären, dass dem Verlauf einer negativen Exponentialfunktion ähnelt. Mit einer Einschwingzeit von 37 s bei positiven Sollwertänderungen und 6,5 s bei negativen Änderungen variiert das Reaktionsverhalten der Wallbox B1 am stärksten. Im Mittel reagiert sie über die Sprungantworttests mit 9,15 s allerdings geringfügig schneller als die anderen Wallboxen. Die Ladestation E1 erzielt eine durchschnittliche Einschwingzeit von 9,20 s. Dabei unterscheidet sich das Reaktionsverhalten zwischen positiven und negativen Sollwertsprüngen kaum. Die vergleichsweise hohe Totzeit von 7,5 s verhindert jedoch ein noch besser Einschwingverhalten. Mit 1,7 s ist die Differenz zwischen der Einstellung des Sollwerts nach der Reaktion der Wallbox jedoch mit Abstand am geringsten.



Bild 20 Testsieger in der Kategorie „schnellstes Einschwingverhalten“ ist eine Systemkombination von Amperfiel.

Der **Testsieger** in der Kategorie „**schnellstes Einschwingverhalten**“ ist somit die connect.solar in Kombination mit dem PowerMeter 63 der Firma Amperfiel, siehe Bild 20. Die Zeitspanne, bis das System ihre Leistungsabgabe an die Überschussleistung angepasst hat beträgt gerundet im Mittel 9,2 s.

2.5 Stationäre Regelungsabweichungen

Im Idealfall stellt die Wallbox ihre Leistungsabgabe unter stationären Betriebsbedingungen so ein, dass die Überschussleistung vollständig an das Elektrofahrzeug übergeben wird. Überschüssige Netzeinspeisung, bei zu geringer, als auch zusätzlicher Netzbezug, bei zu hoher Leistungsvorgabe werden vermieden. In der Praxis kommt es jedoch mitunter zu deutlichen Unterschieden zwischen dem Sollwert und der Leistungsabgabe der Wallbox, wie Bild 17 und Bild 18 zeigen. Mögliche Gründe für die Abweichungen sind

- eine unpräzise Erfassung der Strom- bzw. Leistungswerte,
- eine ungenaue Einstellung des CP-Signals oder auch
- eine beabsichtigte Sollwertabweichung zur Kompensation von Regelungsträgheiten, diskreten Leistungsschritten oder ähnlichem.

Die **stationären Regelungsabweichungen** werden ebenfalls im Rahmen des Sprungantworttests (siehe Bild 17) sowohl für den ein- als auch dreiphasigen Betrieb ermittelt. Sobald sich das System im eingeschwungenen Zustand, bei gleichbleibender Leistungsabgabe befindet, werden Sollwert (Überschussleistung) und die Leistungsabgabe der Wallbox erfasst. Klar ist: Übersteigt die Wallboxleistung den Sollwert, wird zusätzliche Energie aus dem Netz bezogen. Ist die Leistungsabgabe der Wallbox hingegen geringer als die zur Verfügung stehende Überschussleistung, wird Energie ins Netz eingespeist. Die Folge kann ein erhöhter Netzbezug sein, wenn zu einem späteren Zeitpunkt nicht genügend Solarenergie zur Verfügung steht. Kommt es unter stationären Bedingungen zu einem oszillierenden Verhalten, treten beide Energieflüsse auf. Wie Bild 17 und Bild 18 zeigen, variieren die Abweichungen unter konstanten Bedingungen nicht nur zwischen den Wallboxen, sondern auch bei der gleichen Wallbox in Abhängigkeit der eingestellten Sollwerte. Nach einer Steigerung des Vorgabewerts fällt die stationäre Regelabweichung z. B. bei der Wallbox C1 im Labortest häufig deutlich geringer aus als nach einer Reduktion. Darüber hinaus hat die Anzahl der genutzten Phasen häufig einen Einfluss auf die Regelabweichung. Dies deutet darauf hin, dass als **Regelgröße** zum Teil der Strom genutzt wird.

Bild 21 zeigt exemplarisch für B1 und E1 die stationären Regelabweichungen in Abhängigkeit des eingestellten Stroms. Die Leistungsabgabe der Wallboxen B1 und E1 liegen im eingeschwungenen Zustand im Labortest fast ausnahmslos oberhalb des Sollwerts. Dieses Verhalten führt in der Praxis zu zusätzlichem Netzbezug. Bei der Wallbox B1 betragen die stationären Regelungsabweichungen im dreiphasigen Betrieb mehr als 200 W. Mit steigendem Ausgangsstrom und damit zunehmender Ausgangsleistung nehmen die Regelgenauigkeiten zu. Bei einem Sollwert von 13 A lädt die Wallbox B1 mit 9,4 kW und bezieht somit mehr als 400 W zusätzlich aus dem Stromnetz.

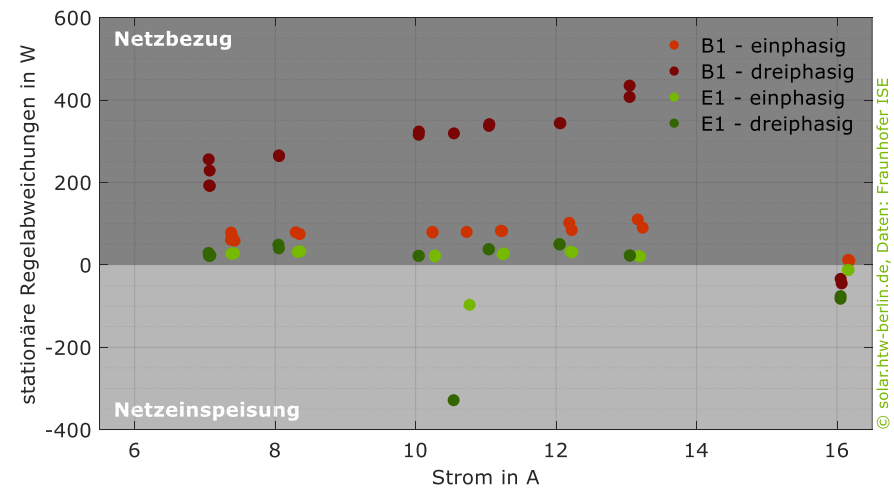


Bild 21 In den Labortests ermittelte stationäre Regelungsabweichungen der Wallboxen B1 und E1 für den ein- und dreiphasigen Betrieb. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Im einphasigen Betriebsmodus steigen die stationären Regelungsabweichungen nur geringfügig an und liegen durchschnittlich nur bei 79 W. Bild 22 zeigt die Abhängigkeit der Regelabweichungen von Leistungsabgabe der Wallbox sehr anschaulich in einem weiteren, nicht stationären Testszenario. Während die Leistungsabgabe nahe der maximalen Leistung (Minute 7) etwa 400 W vom Sollwert abweicht, sind es kurz vor der Phasenumschaltung (Minute 40) nur noch ca. 150 W. Wie bereits zuvor genannt, fallen die Unterschiede zur Überschussleistung im einphasigen Betrieb deutlich geringer aus.

Bei der Wallbox E1 sind die stationären Regelungsabweichungen im ein- und dreiphasigen Betrieb vergleichbar und liegen unterhalb von 51 W, siehe Bild 21. Hier kann von einer leistungsbasierten Regelabweichung ausgegangen werden. Etwa in der Mitte des Tests beträgt die Stromvorgabe 10,5 A, siehe Bild 17. Da die Wallbox E1 jedoch nur ganzzahlige Stromwerte einstellen kann, liegt die Leistungsabgabe hier etwa 330 W unterhalb des Sollwerts von 7,5 kW.

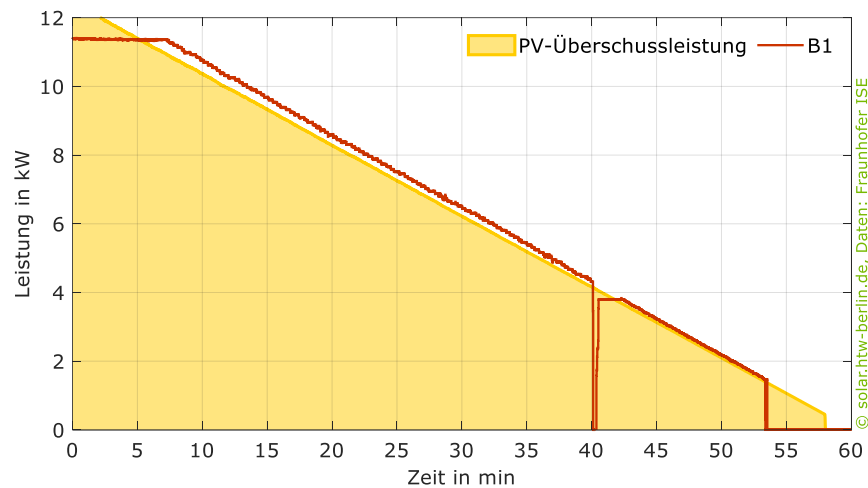


Bild 22 Reaktionsverhalten der Wallbox B1 auf eine kontinuierliche Reduktion der Überschussleistung. Messungen: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Wenn die Sollwertvorgabe 16 A beträgt, geben die Wallboxen im Test ihre maximale Leistung ab. Auffällig ist: Bei den Wallboxen B1 und D1 unterscheiden sich die stationären Regelungsabweichungen insbesondere bei maximaler Ladeleistung im dreiphasigen Betrieb deutlich von den Regelungsungenauigkeiten bei den anderen Sollwerten. Die Leistungsabgabe liegt in beiden Fällen unterhalb des Sollwerts, es kommt somit zur Netzeinspeisung. Bei der Wallbox B1 kommen womöglich keine vorgegebenen Sollwertabweichungen mehr zum Tragen. Bei Wallbox D1 wirkt hingegen vermutlich eine Leistungsbegrenzung und die Abgabe wird auf 11 kW beschränkt, siehe auch Bild 17.

Die Wallbox A1 nähert den Sollwert im Labortest mit oszillierenden Änderungen der Leistungsabgabe an. Der Mittelwert der Leistungsabgabe liegt dabei jedoch mit ca. 690 W bzw. 1 A deutlich unterhalb des Sollwerts und schwingt mit ± 1 A um diesen Mittelwert, siehe auch Bild 18. Dies scheint jedoch nur auf ganzzahligen Stromsollwerte übertragbar. Ist die Stromvorgabe hingegen

eine Dezimalzahl, wie z. B. ab Minute 40 des Labortests mit 10,5 A, schwingt die Leistungsabgabe der Wallbox in 1-A-Schritten um den Sollwert. Netzeinspeisung und Netzbezug wechseln sich ab. Die Regelabweichungen der Wallbox A1 schwanken somit sehr stark.

Tabelle 3 stellt die mittleren stationären Regelungsabweichungen (Median) der analysierten Wallboxen im ein- und dreiphasigen Betrieb gegenüber. Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen den 17 Sollwerten sowie der Leistungsabgabe der Prüflinge. Der Median bildet das durchschnittliche Verhalten ab, kann einen konstanten Anstieg der Regelungsabweichung wie bei der Wallbox B1 im dreiphasigen Betrieb jedoch nicht gut nachbilden. Bei der Ladestation C1 schwanken die stationären Regelungsungenauigkeiten im dreiphasigen Betrieb zwischen 264 W und -150 W. Der Median von 45 W gibt diese starke Streuung nicht wieder.

Während die Wallboxen A1 und D1 mit ihrer Leistungsabgabe tendenziell unterhalb des Sollwerts liegen und überschüssiger Strom eingespeist wird, kommt es bei den anderen Wallboxen im Betrieb zu zusätzlichem Netzbezug. Mit -16 W ist der Median der stationären Regelungsabweichungen im ein- und dreiphasigen Betrieb bei der Wallbox D1 am geringsten.

Tabelle 3 Mittlere (Median) stationäre Regelungsabweichungen der analysierten Wallboxen im ein- und dreiphasigen Betrieb sowie der Wallboxergebnisse.

System	einphasiger Betrieb	dreiphasiger Betrieb	Ø 1- & 3-ph
A1	-	-376 W / -6,5 %	-376 W / -6,5 %
B1	79 W / 3,4 %	316 W / 4,3 %	197 W / 3,8 %
C1	74 W / 3,1 %	45 W / 0,5 %	60 W / 1,8 %
D1	-21 W / -0,9 %	-11 W / -0,2 %	-16 W / -0,5 %
E1	27 W / 1,0 %	23 W / 0,5 %	25 W / 0,7 %



Bild 24 Testsieger in der Kategorie „höchste Regelungsgenauigkeit“ ist eine Systemkombination der Firma SMA. Der eingestellte Wert der Wallbox liegt im Mittel 16 W unter dem Sollwert.

Der **Testsieger** in der Kategorie „höchste Regelungsgenauigkeit“ ist somit der SMA eCharger in Kombination mit dem Sunny Home Manager 2.0 und dem Energy Meter, siehe Bild 23.

2.6 Bandbreite zentraler Systemeigenschaften

Die Bandbreite der **wichtigsten Effizienzeigenschaften** der im Rahmen der Wallbox-Inspektion 2025 analysierten Ladestationen stellt Bild 24 gegenüber. Mit 3,2 W ist der Stand-by-Verbrauch der Wallbox Enector AC in Kombination mit dem Smart Energy Meter G2 von Kostal bei nicht angestecktem Fahrzeug am geringsten. Nach 10 min reduziert die Wallbox ihre Leistungsaufnahme und geht in einen Energiesparmodus über. Die Kombination aus eCharger, Sunny Home Manager 2.0 und Energy Meter von SMA benötigt hingegen 9,3 W. Das Einschwingverhalten ist von sehr starken Unterschieden geprägt. Die Einschwingzeit gibt an, wie lange das System benötigt, um einen neuen Vorgabewert (z. B. Solarüberschuss) einzustellen. Bei der Amperfiel connect.solar und dem PowerMeter 63 ist die Sollwertänderung im Durchschnitt nach etwa 9,2 s beendet. Insbesondere auf kleine Leistungsänderungen reagiert die Wallbox sehr schnell. Bei der Systemkombination von SMA ist der Einschwingvorgang im Mittel erst nach 127 s abgeschlossen. Die Einschwingzeit ist um den Faktor 13 höher.

Die Unterschiede zwischen dem Sollwert und der Leistungsabgabe unter konstanten Bedingungen wird auch als stationäre Regelungsabweichung bezeichnet. Positive Werte bedeuten, dass zur Ladung Netzbezug anfällt. Negative Abweichungen resultieren in einer verringerten Netzeinspeisung. Aus ökonomischer Sicht ist eine konservative, negative Regelungsabweichung zu bevorzugen. Mit einer durchschnittlichen Abweichung von -376 W ist die Regelungsabweichung im Labortest bei der Wallbox A1 am höchsten. Das Ladeverhalten ist durch pulsierende Änderungen der Leistungsabgabe geprägt. Die Systemkombination von SMA zeichnet sich hingegen mit geringen stationären Regelungsabweichungen von -21 W im Mittel aus.

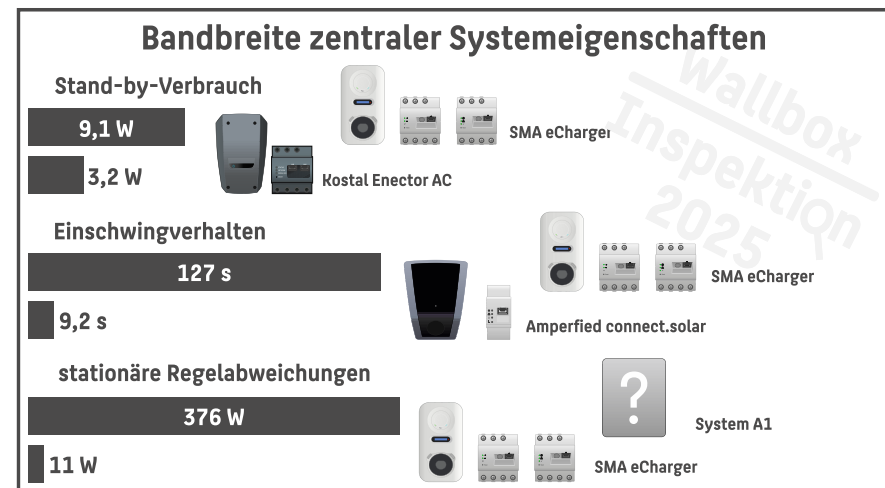


Bild 23 Bandbreite der Effizienzeigenschaften der Wallbox-Inspektion. Stand-by-Verbrauch im Schlafmodus mit reduzierter Leistungsaufnahme, Einschwingverhalten: Mittlerer Zeitraum bis zum Einstellen des neuen Sollwerts, stationäre Regelabweichungen: mittlere Abweichungen vom Sollwert im dreiphasigen Betrieb.

2.7 Anwendungstest

Neben den statischen Prüfungen des Stand-by- und Peripherieverbrauchs, des Einschalt- und Phasenumschaltvorgangs und der Regelgüte, wurden die 5 Systeme unterschiedlichen **Anwendungstests (AWT)** im Labor ausgesetzt. Die Grundlagen für die verschiedenen Belastungsprofile sind sekundliche Messungen der Haushaltslast und der PV-Erzeugung in Einfamilienhäusern in Berlin, siehe Bild 25. Aus den Betriebsdaten unterschiedlicher Haushalte wurden insgesamt 6 verschiedene, kurzzeitige Anwendungstests bis zu einer Länge von 45 min identifiziert. Sie bilden **klassische Betriebseffekte in Wohngebäuden** nach. Die 4 im Folgenden dargestellten Belastungsprofile lassen sich grob wie folgt zusammenfassen:

1. Sonniger, unbedeckter Morgen mit Fluktuationen der Überschussleistung, bedingt durch die Haushaltslast (Bild 25 und Bild 26 oben), AWT 1

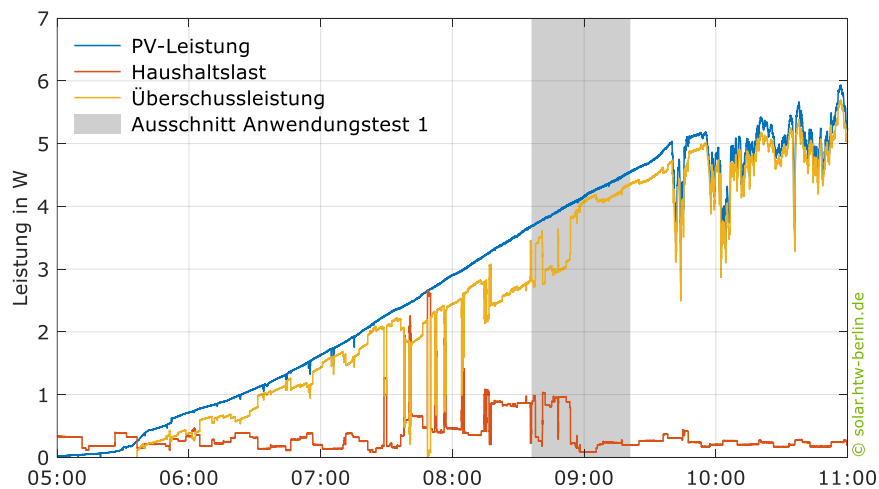


Bild 25 Sekundliche Leistungsmesswerte der PV-Erzeugung und Haushaltslast sowie der resultierenden Überschussleistung in einem Einfamilienhaus in Berlin im Juni 2025.

2. Bedeckter Frühlingstag im Mai, mit schwankender Überschussleistung unterhalb von 4 kW (Bild 26 unten), AWT 2
3. Stark wechselnd bewölkter Tag mit Wolkendurchzügen und somit schwankender Leistungsabgabe der PV-Anlage (Bild 27 oben), AWT 3
4. Vorwiegend bedeckter Tag, der die Solarstrahlung auf die Diffusstrahlung begrenzt, durchbrochen von einer temporären Wolkenslücke (Bild 27 unten), AWT 4

Im Labor am Fraunhofer ISE wurde allen Systemen die identische solare Überschussleistung vorgegeben. Die Wallboxen wurden vorab in den Betriebsmodus C2 gebracht, sodass sie bereits ladebereit waren und Änderungen in der Sollwertvorgabe direkt umsetzen konnten. Wie auch in den anderen Tests entspricht der Betriebsmodus demjenigen, in dem ausschließlich solarer Überschuss zur Ladung genutzt werden soll, vgl. Tabelle 1. Der Übersichtlichkeit halber wird im Folgenden lediglich das **Rektionsverhalten ausgewählter Wallboxen** in den verschiedenen Anwendungstests gegenübergestellt und beschrieben. Im Anhang sind weitere Testergebnisse zu finden.

Wie Bild 25 entnommen werden kann, steigt die solare Erzeugung mit dem Sonnenaufgang im Rahmen des **ersten Anwendungstests** kontinuierlich an, siehe auch Bild 26 oben. Die schwankende Überschussleistung resultiert somit insbesondere durch die zeitlich begrenzte Nutzung unterschiedlicher Haushaltsverbraucher am Morgen. Bild 26 oben 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 sehr kleinen Leistungsstufen realisieren. 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-Leis-

tungsstufen, 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 26 unten 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

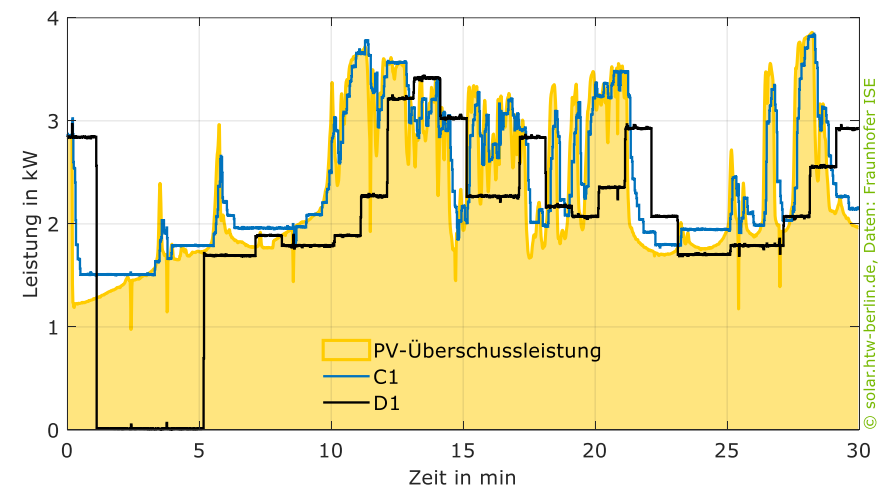
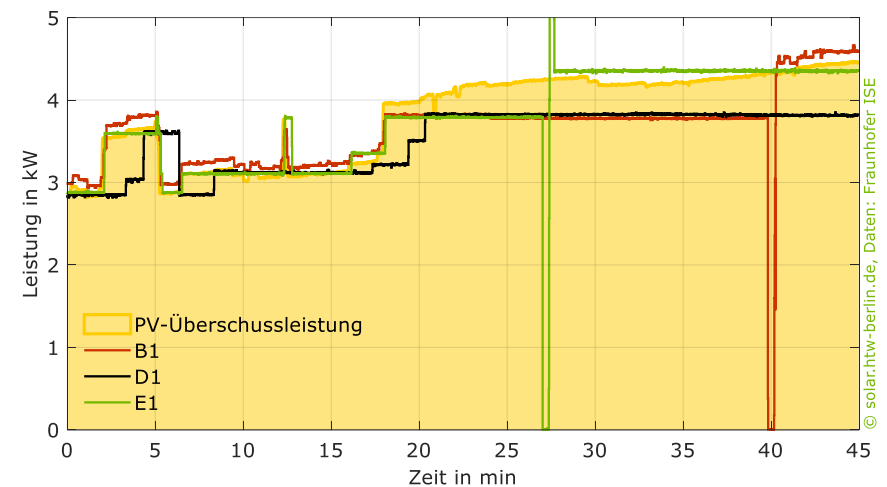


Bild 26 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem sonnigen, unbedeckten Morgen im Sommer (AWT 1, oben) und einem bewölkten Mittag im Frühling (AWT 2, unten). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

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.

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 27 oben 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. 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

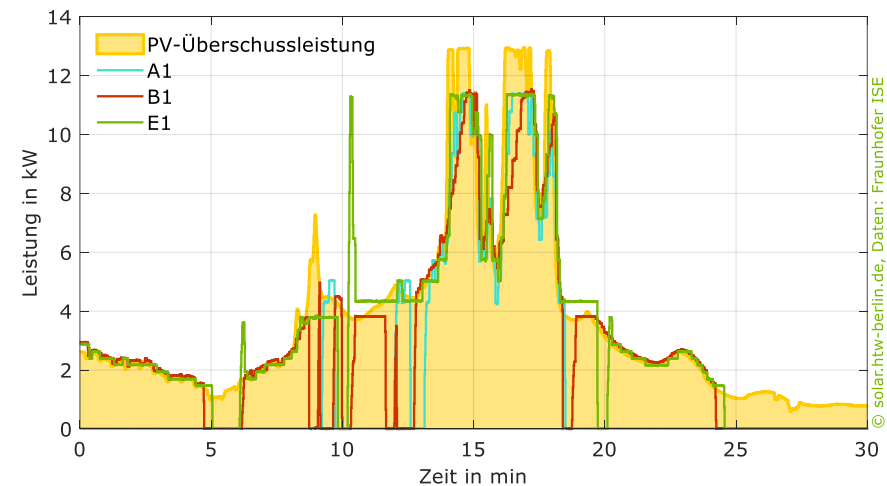
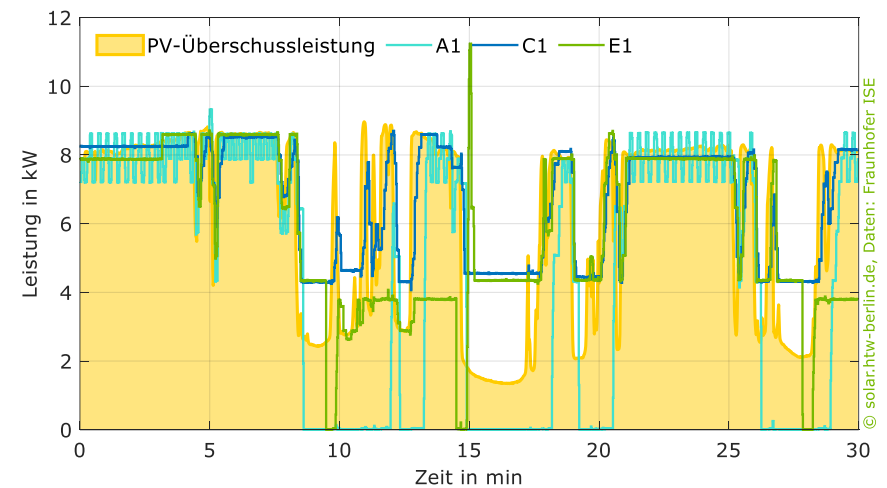


Bild 27 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen (PV-Leistung abzüglich Haushaltslast) an einem stark wechselbewölkten Sommertag (AWT 3, oben) und einem vorwiegend bedeckten Tag (AWT 4, unten). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

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. 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 kurzer Zeit eine Phasenumschaltung initiiert. Während die Wallbox E1 nur zwei Phasenwechsel innerhalb des 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 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.

Tabelle 4 fasst einige **Betriebsergebnisse der analysierten Systeme** für die verschiedenen Anwendungstests zusammen. Messbedingt sind leichte Schwankungen zwischen dem jeweils vorgegebenen solaren Überschuss zu erkennen. Gleichzeitig variiert je nach Anwendungstest auch die Energiemenge, die den Wallboxen als **solarer Überschuss** E_{PVS} zur Verfügung stand.

Der **Solaranteil an der Wallboxladung** a_{PV2WB} gibt an, wieviel Solarenergie E_{PV2WB} für die gesamte Energieabgabe der Wallbox, Summe aus der Solarladung E_{PV2WB} und Netzladung E_{G2WB} , zur Fahrzeugladung genutzt wurde.

$$a_{PV2WB} = \frac{E_{PV2WB}}{E_{G2WB} + E_{PV2WB}} \quad (1)$$

Anders ausgedrückt: Ein Solaranteil von 100 % bedeutet kein Netzbezug - bei 0 % wird kein PV-Strom genutzt. Bei den Wallboxen A1 und C1 ist der Solaranteil beispielsweise bei dem vorwiegend bedeckten Tag im Anwendungstest 4 mit 96,7 % und 97,9 % vergleichsweise hoch. Allerdings wird mit dieser Kennzahl vernachlässigt, dass im Vergleich zu den Wallboxen B1 und E1 deutlich weniger Energie zur Fahrzeugladung aufgewendet wurde, siehe Tabelle 4. Eine reine Fokussierung auf den Solaranteil an der Fahrzeugladung ist daher nicht zu empfehlen.

Der **Anteil der direkt genutzten PV Energie** e_{PV2WB} beschreibt, welcher Anteil des solaren Überschusses E_{PVS} direkt für die Ladung aufgewendet wurde.

$$e_{PV2WB} = \frac{E_{PV2WB}}{E_{PVS}} \quad (2)$$

Ein hoher Wert bedeutet somit: Ein Großteil des solaren Überschusses konnte zur Fahrzeugladung verwendet werden und die Netzeinspeisung fällt gering aus. Dieser Kennzahl fehlt jedoch eine Bewertung des Netz- bzw. Gesamtenergiebezugs der Wallbox. Regelungenaugkeiten, die Pausenzeit während der Phasenumschaltungen oder auch Ausschaltverzögerungen können zu zusätzlichen Netzbezug beitragen und somit den Solaranteil als auch den Anteil direkt genutzter Solarenergie beeinflussen. Beide Kennzahlen werden zudem der unterschiedlichen **ökonomische Wertigkeit des Netzbezugs und der Netzeinspeisung** nicht gerecht. Der Netzbezugspreis in Deutschland liegt derzeit deutlich über der Netzeinspeisevergütung. Aus ökonomischer als auch ökologischer Betrachtung sollte der Netzbezug zur Ladung des Elektrofahrzeugs daher weitestgehend vermieden werden.

Tabelle 4 Vergleich verschiedener Betriebsergebnisse für die Anwendungstests (AWT) 1 bis 4. Bezeichnungen: solarer Überschuss: E_{PVs} , Netzbezug der Wallbox: E_{G2WB} ; solare Energieaufnahme der Wallbox: E_{PV2WB} ; Solaranteil an der, von der Wallbox abgegebenen Energiemenge: a_{PV2WB} ; Eigenverbrauch, Verhältnis der geladenen Energiemenge zum solaren Überschuss: e_{PV2WB} ; Umschaltungen: Anzahl der Phasenumschaltung während des AWT.

AWT	Kennzahl	A1	B1	C1	D1	E1
AWT 1	E_{PVs} in kWh	2,86	2,85	2,84	2,88	2,86
	E_{G2WB} in kWh	0,015	0,047	0,024	0,017	0,048
	E_{PV2WB} in kWh	0,44	2,68	2,65	2,61	2,77
	a_{PV2WB} in %	96,8	98,3	99,1	99,4	98,3
	e_{PV2WB} in %	15,4	93,9	93,3	90,8	96,8
	Umschaltungen	-	1	-	-	1
AWT 2	E_{PVs} in kWh	-	1,16	1,15	1,15	1,16
	E_{G2WB} in kWh	-	0,056	0,078	0,099	0,065
	E_{PV2WB} in kWh	-	1,04	1,12	0,88	1,06
	a_{PV2WB} in %	-	94,9	93,5	89,9	94,2
	e_{PV2WB} in %	-	89,5	97,2	76,5	91,6
	Umschaltungen	-	-	-	-	-
AWT 3	E_{PVs} in kWh	3,11	3,10	3,12	3,10	3,07
	E_{G2WB} in kWh	0,124	0,132	0,413	0,423	0,334
	E_{PV2WB} in kWh	2,17	2,25	2,95	2,41	2,61
	a_{PV2WB} in %	94,6	94,5	87,7	85,1	88,7
	e_{PV2WB} in %	69,8	72,5	94,6	77,7	85,2
	Umschaltungen	-	10	-	-	3
AWT 4	E_{PVs} in kWh	1,80	1,81	1,79	1,82	1,81
	E_{G2WB} in kWh	0,270	0,056	0,022	0,100	0,110
	E_{PV2WB} in kWh	0,78	1,33	1,05	0,86	1,51
	a_{PV2WB} in %	96,7	95,9	97,9	89,6	93,2
	e_{PV2WB} in %	43,3	73,1	58,7	46,9	83,6
	Umschaltungen	-	4	-	-	2

3 Simulationsbasierte Systembewertung

Der Vergleich der Systemeigenschaften, ermittelt unter identischen Messbedingungen im Labor, zeigt ein Mosaik zur Charakterisierung der Wallboxen. Die einzelnen Eigenschaften verraten jedoch nicht, wie sich die Wallbox als Gesamtsystem verhält. Hierfür sind die Anwendungstests in Kapitel 2.7 ein guter erster Ansatz. Aufgrund der Komplexität und dem Messaufwand ist eine ergänzende **Simulationsanalyse** jedoch sinnvoll. Die simulationsbasierte Systembewertung ermöglicht es,

- längere Zeiträume, typischerweise ein Kalenderjahr, zu betrachten,
- das Zusammenspiel einzelner Eigenschaften zu bewerten und
- den Einfluss unterschiedlicher Rahmenbedingungen zu verstehen.

Hierfür ist eine einheitliche Simulationsumgebung wichtig, in der die Wallboxen unter identischen Rahmenbedingungen verglichen werden können. Darüber hinaus sollte die Qualität der Simulationsmodelle mit Messdaten verglichen werden, um belastbare Ergebnisse zu erhalten, die der realen Wallbox entsprechen.

3.1 Systemsimulation

Das Simulationsmodell für die einheitliche Systembewertung bildet einen **Haushalt mit Elektroauto, Wallbox und** einer durchschnittlich großen **Solaranlage** von 10 kW nach, siehe auch Bild 28. Die Solarleistung wird zunächst zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs von 5010 kWh/a verwendet. Der überschüssige Solarstrom von 8709 kWh/a steht der Wallbox zur Ladung des Elektroautos zur Verfügung. Energie, die nicht durch die Solaranlage gedeckt wer-

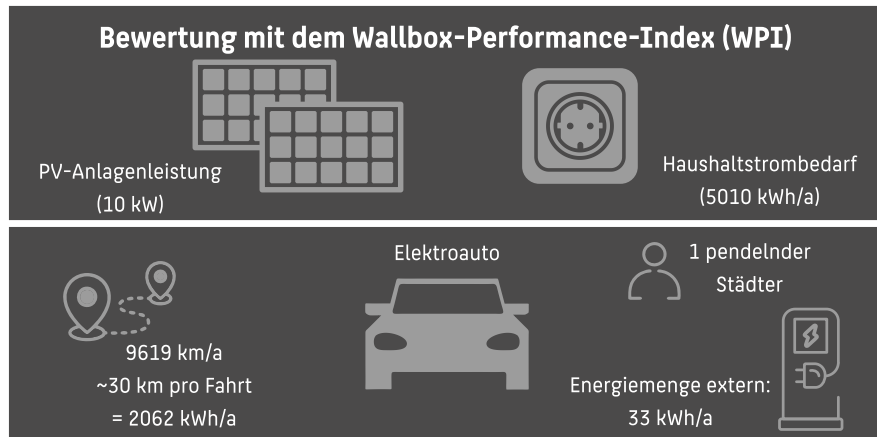


Bild 28 Zusammensetzung des Referenzfalls zur simulationsbasierten Bewertung solar ladenden Wallboxen mit dem Wallbox Performance Index (WPI).

den kann, muss aus dem Netz bezogen werden. Die Eingangsdaten für die Berechnung des solaren Überschusses werden aus der Stromspeicher-Inspektion übernommen [37], [38]. Ergänzend wird ein repräsentatives Fahrprofil aus den SynPro-Daten des Fraunhofer ISE verwendet [39]. Das Fahrzeug benötigt im Jahr 2062 kWh für eine Strecke von 9616 km und entspricht den Fahrgewohnheiten eines städtischen Pendlers mit 30 km pro Tag. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird unterstellt, dass das Elektrofahrzeug immer angesteckt wird, wenn es zuhause ist und einen verlustfreien Laderegler hat. An Werktagen wird das Fahrzeug in der Regel erst am späten Nachmittag geladen – selbstverständlich bevorzugt mit überschüssigen Solarstrom. Steht nicht genügend solarer Überschuss für die nächste Fahrt zur Verfügung, wird das Fahrzeug mit maximaler Leistung geladen. Das **Simulationsmodell** der Wallbox bildet zum einen sowohl die Systemzustände als auch das Zeitverhalten der realen Wallbox nach. Dies sind beispielsweise Haltezeiten bei der Phasenumschaltung oder beim Initiieren der Ladung. Zum anderen soll das Regelverhalten der realen Wallbox entsprechen. Dazu gehört beispielsweise, wie häufig

der Sollwert geändert werden kann oder mit welchem Regelverhalten auf Sollwertänderungen reagiert wird (siehe auch Bild 18). Die Wallbox ist so parametrisiert, wie im Labor vermessen und wurde anhand der Anwendungstests validiert. Die Parameter wurden in begründeten Fällen leicht angepasst, wenn dies zu einer deutlich verbesserten Abbildung in den Anwendungstests führte. Weitere Informationen sind im Anhang A.1 zu finden, darunter der genaue Aufbau und die modellierten und nicht modellierten Systemverluste. Einige beispielhafte Validierungen sind ebenfalls im Anhang zu finden.

3.2 Wallbox-Performance-Index (WPI)

Die Simulation der Wallbox mit den Laborparametern wird hier als „reales“ System verstanden und für die Systembewertung mit einem „idealen“ System verglichen. Eine ideale Wallbox hat keine Zeitverzögerungen oder Regelabweichungen. Überschüssiger Solarstrom kann mit einer Leistung zwischen 1380 W und 11040 W vollständig in das Elektrofahrzeug geladen werden. Die ideale Wallbox hat zudem keine Bereitschaftsverluste. Die Systembewertung mit dem **Wallbox-Performance Index (WPI)** gibt in Prozent an, wie nahe das reale, solare Laden der idealen Fahrzeugladung kommt. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen wird in diesem Abschnitt die Berechnung des WPI erläutert.

Das Ziel des solaren Ladens besteht darin, möglichst viel günstigen Solarstrom für die Fahrzeugladung zu nutzen und dadurch teuren Netzstrom einzusparen. Die unterschiedliche Wertigkeit, der ins Netz eingespeisten und aus dem Netz bezogenen Energie macht es erforderlich, dies auch bei der Bewertung der Systemeigenschaften zu berücksichtigen. In Bild 29 ist der Zusammenhang zwischen dem Regelverhalten der Wallbox B1 und der Netzeinspeisung und dem Netzbezug beispielhaft dargestellt. Die schwarze Linie markiert dabei das ideale Regelverhalten.

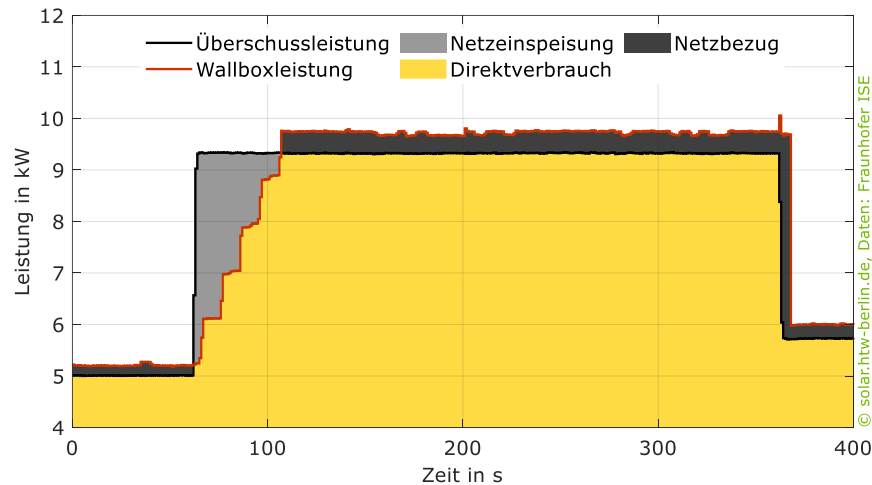


Bild 29 Vergleich des idealen und realen Regelverhaltens am Beispiel der Wallbox (B1) im dreiphasigen Betrieb mit den Auswirkungen auf die Netzeinspeisung und den Netzbezug. Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Die **ideale Wallbox** folgt der Überschussleistung, es kommt zu keinen Abweichungen. Aufgrund von zeitlichen Verzögerungen und Regelungsabweichungen bei der Sollwertanpassung, weicht das reale Regelverhalten (rote Linie) vom idealen Regelverhalten ab. Lädt die **reale Wallbox** das Fahrzeug mit weniger Leistung als zur Verfügung steht, so wird in diesem Moment mehr Solarleistung ins Netz eingespeist (hellgrau). Bezieht die reale Wallbox hingegen mehr Leistung als von der Solaranlage zur Verfügung gestellt wird, führt dies zu zusätzlichem Netzbezug (dunkelgrau). Der etwa viermal teurere Netzbezug kann teilweise durch Netzeinspeisung kompensiert werden. Gleiche Energiemengen führen jedoch zu einem ökonomischen Verlust. Da sich die Effekte über das Jahr ausgleichen können, ist die Jahresbilanz entscheidend.

Wie in Bild 30 schematisch dargestellt ist, werden für die Ermittlung der Jahresbilanzen und des WPI identische Zeitreihen der Haushaltslast, Solarstromerzeugung und des Fahrprofils verwendet. Diese dienen als Eingangsdaten der

idealen als auch der realen Wallboxsimulation. Die resultierende Jahresbilanz der Netzeinspeisung und des Netzbezugs dient als Bewertungsgrundlage für den WPI. Die für die Berechnung erforderlichen Kosten für den Netzbezug und die Vergütung für die Netzeinspeisung wurden mit 32 ct pro kWh und 8 ct pro kWh angenommen (siehe auch FAQ-Abschnitt 4). Da die Systembewertung lediglich die Wallbox erfassen soll, wurden, wie bereits erwähnt, die Verluste im Fahrzeug vernachlässigt.

Die **Berechnungsgrundlage für den WPI** wird in Bild 31 beispielhaft für das System C1 hergeleitet. Das Einsparpotenzial des solaren Ladens des idealen und des realen Systems wird durch den Vergleich mit einer Wallbox ohne Solaranlage ermittelt. Bei einem Netzbezug von 2062 kWh/a und Netzbezugskosten von 32 ct/kWh verursacht die netzladende Wallbox jährliche Kosten von 660 €. Durch die Installation einer 10-kW-PV-Anlage lassen sich die Netzbezugskosten im Idealfall Wallbox um 467 € auf 193 € pro Jahr reduzieren.

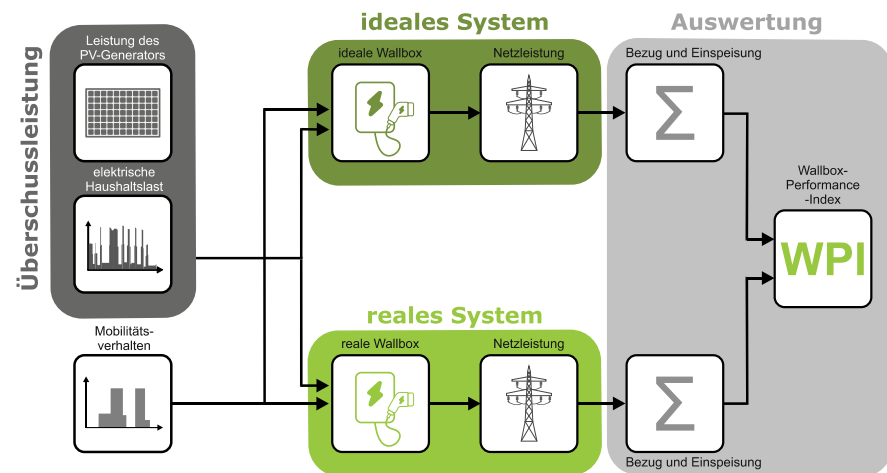


Bild 30 Vereinfachte Vorgehensweise zur simulationsbasierten Ermittlung und Bewertung von solaroptimiert betriebenen Wallboxen mit dem Wallbox-Performance-Index (WPI). Grafik: HTW Berlin.

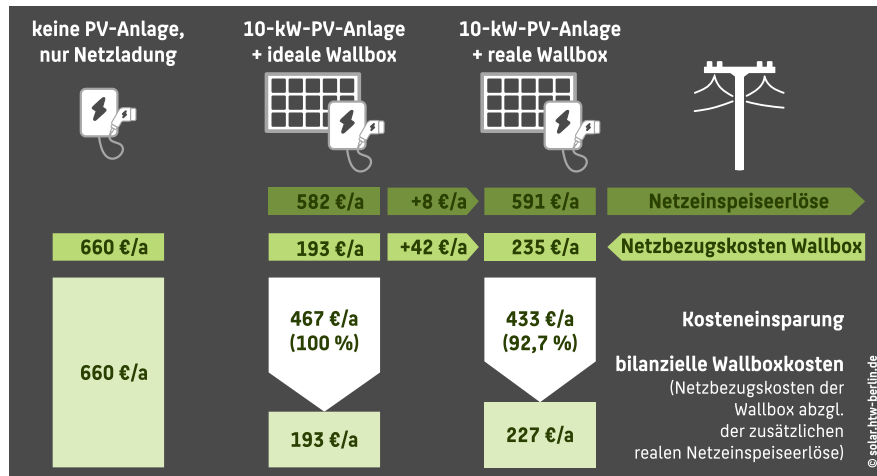


Bild 31 Netzbezugskosten der Wallbox sowie erzielte Kosteneinsparungen beim Einsatz des idealen, verlustfreien und des realen Systems C1 (Einspeisevergütung 8 ct/kWh, Netzbezugspreis 32 ct/kWh).

Gleichzeitig deckt die Solaranlage ein Drittel des Haushaltsstrombedarfs und speist Überschussstrom ein, der bei 8 ct/kWh mit insgesamt 582 €/a vergütet wird. Die Kosteneinsparung der solargesteuerten, idealen Wallbox dient im Folgenden als Referenzwert. Die reale Wallbox reagiert aufgrund ihrer Verluste, wie z. B. Verzögerungen und Regelabweichungen, weniger effizient: Sie reduziert die Netzbezugskosten nur um 424 € pro Jahr, was 42 € höhere Kosten gegenüber dem Idealsystem bedeutet. Allerdings erzielt sie durch die Netzeinspeisung Einsparungen von 591 € pro Jahr, also 8 € mehr als die ideale Wallbox. Insgesamt realisiert die reale Wallbox C1 somit Kosteneinsparungen von 433 €/a, was 92,7 % der idealen Einsparungen entspricht.

Der WPI berechnet sich mit den Formeln (3) bis (6). Zuerst wird die maximale Einsparung als Differenz aus Netzbezugskosten der Wallbox ohne Solaranlage und der idealen solargesteuerten Wallbox bestimmt (3). Im zweiten Schritt

wird die zusätzliche Einspeisevergütung ermittelt (4), um die realen Einsparungen mit der Differenz der Netzbezugskosten der realen Wallbox zu bestimmen (5). Abschließend werden beide Kosteneinsparungen ins Verhältnis gesetzt, um den WPI zu bestimmen (6). Hierbei können auch externe Ladung berücksichtigt werden, sofern diese aufgrund von Regelungsabweichungen erforderlich werden.

$$\Delta C_{\text{IDEAL}} = E_{\text{G2WB,REF}} \cdot p_{\text{G2AC}} - E_{\text{G2WB,IDEAL}} \cdot p_{\text{G2AC}} \quad (3)$$

$$\Delta C_{\text{AC2G}} = E_{\text{AC2G,REAL}} \cdot p_{\text{AC2G}} - E_{\text{AC2G,IDEAL}} \cdot p_{\text{AC2G}} \quad (4)$$

$$\Delta C_{\text{REAL}} = E_{\text{G2WB,REF}} \cdot p_{\text{G2AC}} - E_{\text{G2WB,REAL}} \cdot p_{\text{G2AC}} + \Delta C_{\text{AC2G}} \quad (5)$$

$$\text{WPI} = \frac{\Delta C_{\text{REAL}}}{\Delta C_{\text{IDEAL}}} \quad (6)$$

$E_{\text{G2WB,REF}}$	Netzbezug der Wallbox ohne PV-System
$E_{\text{G2WB,IDEAL}}$	Netzbezug der idealen, solargesteuerten Wallbox
$E_{\text{G2WB,REAL}}$	Netzbezug der realen, solargesteuerten Wallbox
$E_{\text{AC2G,REAL}}$	Netzeinspeisung der realen, solargesteuerten Wallbox
$E_{\text{AC2G,IDEAL}}$	Netzeinspeisung der idealen, solargesteuerten Wallbox
p_{G2AC}	Netzbezugspreis
p_{AC2G}	Netzeinspeisevergütung
ΔC_{REAL}	Kosteneinsparung des realen PV-Speichersystems
ΔC_{IDEAL}	Kosteneinsparung des idealen PV-Speichersystems

3.3 Systembewertung mit dem WPI

Die **simulationsgestützte Systembewertung** ermöglicht es, den Einfluss der einzelnen Systemverluste isoliert voneinander zu analysieren. Im Folgenden werden die **Auswirkungen ausgewählter Systemeigenschaften** der Abschnitte 2.1 bis 2.6 hinsichtlich ihres Effektes auf die Systemperformance des WPI beschrieben. Hierfür wurde das ideale System simuliert und schrittweise jeweils mit einer zusätzlichen Systemeigenschaft dem realen System angenähert. In Bild 32 ist dies beispielhaft für das System C1 dargestellt. Während die Stromschrittweite von 0,5 A keine nennenswerten Auswirkungen hat, beeinflusst die Haltezeit vor dem Phasenwechsel die möglichen Einsparungen mit 1,6 % am stärksten.

Mit 2,4 % etwas höher ist die Verlustkategorie der **dynamischen Regelung** zu bewerten, der alle Effekte von der Leistungsmessung bis zum eingeschwungenen Zustand zugeordnet werden können. Dies entspricht 33 % der Verluste. Ungeachtet dessen besteht bei der Regelung wenig Spielraum für Optimie-

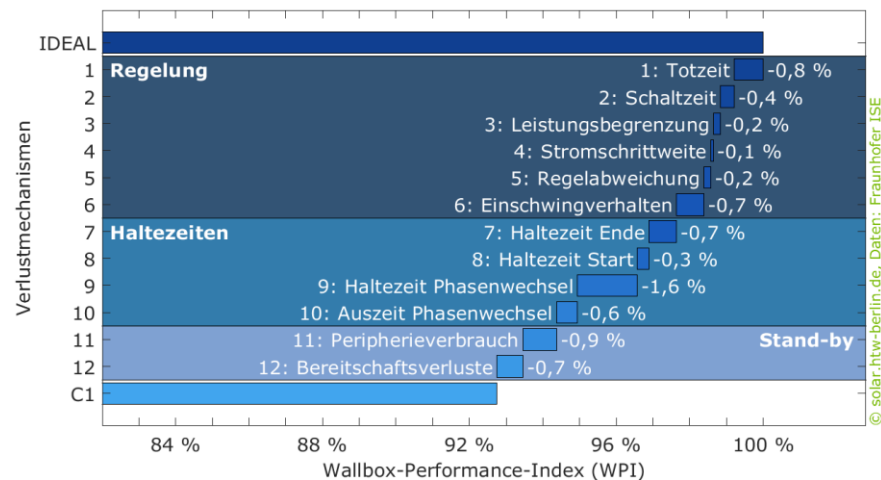


Bild 32 Einfluss der verschiedenen Verlustmechanismen auf den WPI des Systems C1.

rung. Im Vergleich mit den Mitbewerbern ist lediglich das Einschwingverhalten leicht verzögert. Die größte Verlustkategorie bilden die übergeordneten **Haltezeiten** und Schaltungslogiken, die die Einsparungen um 3,3 % reduzieren. Dies entspricht 44 % der gesamten Verluste. Hierin spiegelt sich wider, dass der Hersteller Kostal versucht die Schaltvorgänge zu reduzieren. Das Ergebnis ist ein sehr ruhiges Regelverhalten, das jedoch mit zusätzlichem Netzbezug erlangt wird. Wenn man die Verlustkategorie **Stand-by** betrachtet, reduziert diese die Einsparungen, wie auch die Haltezeit beim Phasenwechsel, um 1,6 % gegenüber der idealen Wallbox. Die beiden Eigenschaften Bereitschaftsverluste und Peripherieverbrauch führen trotz höchster Effizienz zu nennenswerten Kosten. Der Grund: Die Wallbox befindet sich mehr als 8000 h im Jahr im Bereitschaftsbetrieb. In Summe kann System C1 somit 92,7 % der maximalen Kosteneinsparungen erreichen.

Tabelle 5 zeigt die Differenzen aufgeschlüsselt nach den 3 Verlustkategorien für alle **Wallboxen im Test**. Die dynamische Regelung führt bei der ausschließlich dreiphasig ladenden Wallbox A1 zu einer Reduktion des WPI von 13,2 %. Maßgeblich ist hier die Leistungsbegrenzung mit 10,3 %. Das System A1 kann wegen der Begrenzung auf drei Phasen ausschließlich Leistungen über 4,2 kW laden. Die anderen Wallboxen mit automatischer Phasenumschaltung können einen größeren Leistungsbereich erschließen. Daher reduzieren sich die Einsparungen nur um 1,9 % für System E1 bis 6,8 % bei der Ladelösung D1.

Tabelle 5 Vergleich der Reduktion des Wallbox-Performance-Index in den Kategorien: Regelung, Haltezeiten und Stand-by.

Verlustkategorie	A1	B1	C1	D1	E1
Regelung in %	13,2	2,9	2,4	6,8	1,9
Haltezeiten in %	1,3	0,6	3,3	1,6	0,9
Stand-by in %	2,3	1,8	1,6	4,1	2,8

Die Verlustkategorie Haltezeiten zeigt eine Bandbreite von 0,6 % für das sehr dynamisch regelnde System B1 bis 3,3 % bei dem eher konstant regelnde System C1. Hierbei werden unterschiedliche Regelansätze verfolgt:

- Kurze Haltezeiten sorgen für eine dynamische Regelung die Wallboxen reagieren schnell auf Änderungen der Überschussleistung. Für die Einsparungen ist dies vorteilhaft, da Netzbezug effektiv reduziert wird.
- Lange Haltezeiten vermeiden hingegen häufiges An-, Aus- und Umschalten der Wallboxen. Dies erhöht die Kompatibilität mit verschiedenen Fahrzeugen. Es sorgt aber auch dafür, dass die Wallbox häufiger in einem Betriebsmodus verbleibt, der nicht genau zur Überschussleistung passt und Strom aus dem Netz bezogen wird

Die Stand-by-Verluste reduziert die möglichen Einsparungen im Bereich zwischen 1,6 % bei System C1 und 4,1 % bei System D1. Die Ladelösungen B1 und C1 reduzieren nach 5 min bzw. 10 min ihren Leistungsbedarf, indem Teilkomponenten ausgeschaltet werden. Dies wirkt sich vorteilhaft auf dem Systemverbrauch aus.

Für das **System A1** ist die Leistungsbegrenzung der entscheidende Verlustfaktor und reduziert die möglichen Einsparungen bereits deutlich. Haltezeiten sind bei diesem System eher dynamisch parametrisiert und erhöhen die Kosten nur um 1,3 % gegenüber der idealen Wallbox. Der mittlere Stand-by-Verbrauch der Wallbox von 5,2 W sorgt hingegen für einen nennenswerten Netzbezug und eine Reduktion des WPI von 2,3 %.

Bei der **Wallbox B1** ist die Regelung mit 2,9 % eher verlustreich. Dies liegt vor allem an der stationären Regelabweichungen, die die Hälfte dieser Verluste ausmachen. Durch sehr kurze Haltezeiten erreicht das System einen hochdynamischen Betrieb, was zu geringen Effizienzverlusten von nur 0,6 % führt. Die Verringerung der Kosteneinsparung im Stand-by-Betrieb ist mit 1,8 % ebenfalls sehr gering.

Nur das **System C1**, siehe Bild 32, hat mit 1,6 % noch geringere Einbußen im

Bereitschaftsbetrieb. Die Regelung ist bei dieser Ladelösung mit Verlusten von nur 2,4 % ebenfalls etwas effizienter als bei B1. Die höheren Haltezeiten führen jedoch zu einem WPI-Verlust von 3,3 %. Besonders relevant: Die Prüfung des Phasenwechsels in diskreten Zeitintervallen von 15 min. Sie macht die Hälfte dieses Anteils aus.

Die Regelungsverluste sorgen bei der **Wallbox D1** für 54 % der Gesamtverluste der möglichen Kosteneinsparungen dieses Systems. Dies ist insbesondere dem Energiemanagement geschuldet, welches nur jede Minute eine Optimierung mit Prognosen und Anpassung der Ladeleistung durchführt. Die möglichen Vorteile des prognosebasierten Energiemanagements kommen im Test nicht zum Tragen. Die längeren Haltezeiten sorgen für eine ruhige, jedoch mit einem um 1,6 % reduzierten WPI eher verlustreichere Regelung. Der Stand-by-Verbrauch des Systems D1 ist mit 9,1 W der höchste im Testfeld und führt zu Verlusten von 4,1 %.

Die Regelung mit den höchsten Kosteneinsparungspotenzial weist die **Wallbox E1** auf. Die einzelnen Eigenschaften greifen so gut ineinander, dass die Wallbox hier mit 1,9 % die geringsten Einbußen aller Teilnehmer hat. Auch die Haltezeiten dieses Systems zeigen einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Effizienz und ruhiger Regelung. Die Stand-by-Verluste sorgen hingegen für leicht erhöht Verluste. Im Vergleich zu den Systemen B1 und C1 ist zum einen der Grundverbrauch der Wallbox höher. Zum anderen geht das System in den Standardeinstellungen nicht in einen Zustand mit geringerem Verbrauch über. Dies ist durch eine individuelle Einstellung jedoch möglich.

Weitere Details zu den einzelnen Verlustkategorien der jeweiligen Wallboxen sind im Anhang zu finden.

Wie bereits in Bild 32 (oben) dargestellt, erreicht das System C1 in Summe einen WPI von 92,7 %. In der abschließenden **Systembewertung der Funktionalität des solaren Überschussladens** in Bild 33 liegt die Wallbox auf Platz 3 und damit im Mittelfeld der 5 untersuchten Systeme. Bei den Ladelösungen B1 mit 94,8 % und E1 mit 94,4 % kann man aufgrund der schnelleren Regelung etwas

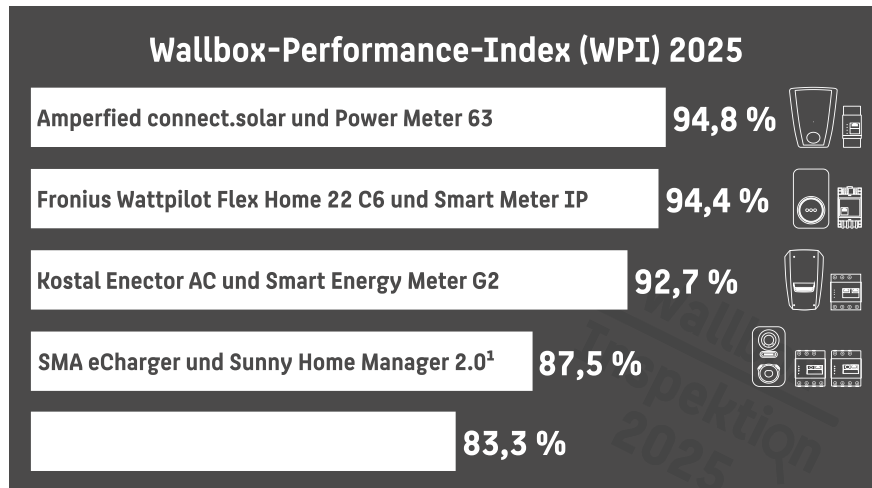


Bild 33 Wallbox-Performance-Index der analysierten Wallboxen (Netzbezugs-kosten 32 ct/kWh und Einspeisevergütung 8 ct/kWh).¹⁾ und SMA Energy Meter.

höhere Kosteneinsparungen erwarten. Sie können sich die ersten beiden Plätze im Ranking sichern. Die Abweichung ist hierbei gering, auch wenn beide Hersteller unterschiedliche Regelansätze verfolgen. Den geringsten WPI der Wallboxen mit Phasenumschaltung erreicht Wallbox D1 mit 87,5 %, mehr als 7 Prozentpunkte hinter dem Spitzenreiter. Wallbox A1 kann im Test ebenfalls mit einer sehr schnellen Regelung punkten, erreicht jedoch nur einen WPI von 83,3 %. Trotz vergleichbarer Systemeigenschaften hat die Wallbox mit dem dreiphasigen Anschluss die geringsten Kosteneinsparungen. Erklärend ist jedoch anzumerken, dass auch die anderen Wallboxen einen um etwa 10 Prozentpunkte geringeren WPI hätten, würde man diese nur dreiphasig betreiben. Zusammenfassend konnte zwischen den Regelverhalten der Wallboxen beim solaren Laden ein Unterschied von etwa 11 Prozentpunkten verglichen mit den Kosteneinsparungen der idealen Wallbox ermittelt werden. Dies entspricht einem Unterschied von etwa 54 Euro pro Jahr. Für die Top 3 Wallboxen des Vergleichs, B1, E1 und C1, die im Test mit vergleichbaren Voraussetzungen starten, fallen die Unterschiede mit etwa 10 € pro Jahr deutlich geringer aus.

4 Einflussfaktoren auf die Eigenversorgung und die Systembewertung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Eigenversorgung der Elektrofahrzeuge mit Solarstrom und auf die Systembewertung der Wallboxen.

Wie unterscheiden sich die Betriebs- und Bewertungsergebnisse in Abhängigkeit des Ladeverhaltens?

i *Take-Away: Das Ladeverhalten hat einen zentralen Einfluss auf den Anteil der Solarenergie. Wenn mehr Energie geladen wird, sinkt der Solaranteil. Der WPI ändert sich in bei unterschiedlichen Fahrverhalten. Das Referenzprofil bildet einen mittleren WPI ab.*

Wie viel Solarstrom direkt in das Elektroauto geladen werden kann, hängt neben der Größe und Orientierung der Solaranlage besonders von der Anwesenheit des Fahrzeugs und dem individuelle Ladeverhalten ab [19], [40]. Die Abwesenheit und die Arbeitstätigkeit können somit entscheiden Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Bild 34 stellt den Solaranteil an der Fahrzeugladung ohne Heimspeicher für unterschiedliche, statistisch verteilte **Bevölkerungsgruppen in Deutschland** am Beispiel von 151 Fahrprofilen [39] und Ladeverhalten gegenüber. Die Jahresfahrleistung der untersuchten Haushalte variiert zwischen 1100 km/a und 31.000 km/a. Mit insgesamt 79 verschiedenen Fahrprofilen sind die Rentner*innen und Vollzeitarbeitenden am stärksten vertreten. Wie bereits bei der Bestimmung des WPI (Kapitel 3) beträgt die simulierte PV-Anlagenleistung 10 kW und der Haushaltsstromverbrauch 5010 kWh/a.

Die blau eingefärbten Simulationsergebnisse zeigen den Solaranteil beim ungesteuerten, dreiphasigen Laden mit einer Ladeleistung von 11 kW bei Ankunft des Fahrzeugs. Die bunten Punkte im oberen Teil der Grafik repräsentieren hingegen die Solaranteile an der Fahrzeugladung beim täglichen Anstecken und solaren Überschussladen mit automatischer Phasenumschaltung. Erwartungsgemäß ist der Solaranteil beim Ankunftsladen mit maximaler Ladeleistung geringer als bei solarer Ladung. Er liegt bei den untersuchten Haushalten unter 20 %, siehe auch [19]. Der Solaranteil an der Fahrzeugladung zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen der Jahresfahrleistung und einen

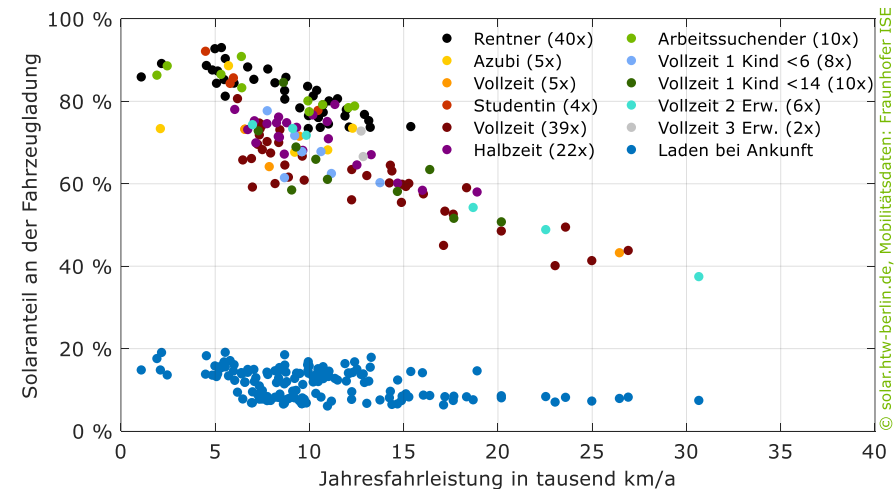


Bild 34 Einfluss von 151 statistisch verteilten Fahrprofilen unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen auf den Solaranteil an der Fahrzeugladung ohne Berücksichtigung eines Heimspeichers beim Bedarfsladen bei Ankunft und beim täglichen solaren Überschussladen. Wallbox E1, PV-Leistung: 10 kW. Mobilitätsdaten: Synpro, Fraunhofer ISE [38].

geringer ausgeprägten Zusammenhang der sozio-ökonomischen Einordnung. Der Grund hierfür: Die Gleichzeitigkeit zwischen der Anwesenheit des Elektrofahrzeugs und der Solarerzeugung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer solaren Ladung. Daher sind die Solaranteile an der Fahrzeugladung bei geringer Jahresfahrleistung und damit viel Standzeit höher als bei Fahrzeugen mit mehr Fahrleistung. Sind die jährlichen Kilometer gleich, unterscheiden sich die Solaranteile dennoch, je nachdem wie die Personen tagsüber zuhause sind. Zusätzlich resultieren weite Strecken in einem höheren Energiebedarf des Fahrzeugs, so dass für den gleichen Anteil mehr Energie geladen werden muss. Beide Effekte überlagern sich und beeinflussen den Solaranteil, der bei den Vollzeitarbeitenden im Mittel 64 % beträgt. Die Teilzeitarbeitenden können im Mittel 9 Prozentpunkte mehr Solarstrom in ihr Elektrofahrzeug laden. Rentner*innen (schwarz), Arbeitssuchende (hellgrün) und Student*innen (rot) bilden bei gleicher Jahresfahrleistung das obere Ende der Bandbreite ab. Ihr Solaranteil beträgt im Mittel 82 %, da sie statistisch geringere Strecken zurücklegen und einen höheren Anteil ihrer Zeit zuhause verbringen.

Erwartungsgemäß haben die unterschiedlichen Fahrprofile auch einen **Einfluss auf den WPI**, wie Bild 35 zeigt. Bei niedrigen Fahrleistungen von z. B. 2000 km/a fällt die Ladung an der privaten Wallbox mit 400 kWh/a sehr gering aus. In diesen Fällen erhöht allein der Stand-by-Verbrauch der Wallbox (im Beispiel hier 6,6 W) den Netzbezug gegenüber dem idealen, verlustfreien System um mehr als 10 % der insgesamt geladenen Energiemenge. Hinzukommen weitere Verlustmechanismen wie die Stromschritte oder die Totzeit. Dies hat direkte Auswirkungen auf den WPI, der unter 90 % fällt. Der WPI der 146 Fahrprofile mit einer Fahrleistung von mehr als 4400 km/a variiert hingegen lediglich zwischen 92,9 % und 96,4 %. Auch hier hat die Anwesenheit und das Fahrverhalten im Jahresverlauf einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. So erreicht eine in Vollzeit arbeitenden Person mit einer Fahrstrecke von etwa

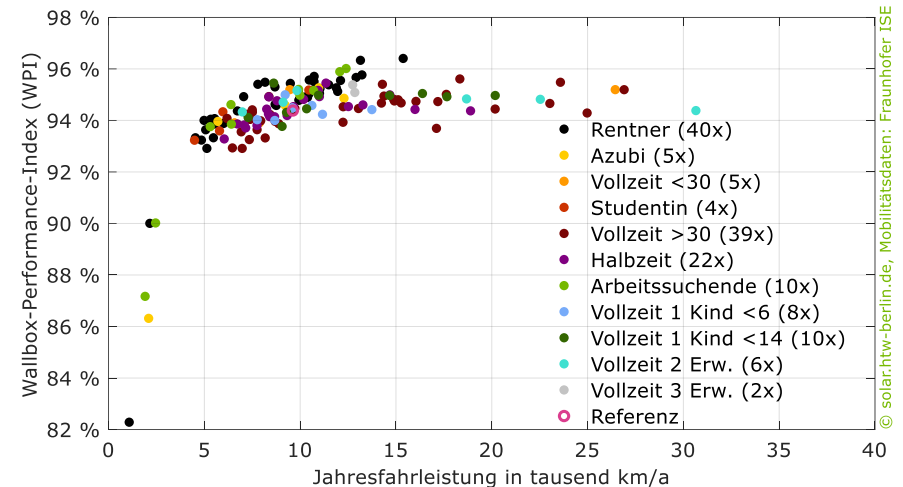


Bild 35 Einfluss von 151 statistisch verteilten Fahrprofilen unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen auf den Performance Index (PI) beim solaren Überschussladen. Wallbox E1, PV-Leistung: 10 kW. Mobilitätsdaten: Synpro, Fraunhofer ISE.

17.100 km/a und einer höheren Energieaufnahme im Winter (60 %) einen WPI von 93,7 %. Bei einem vergleichbaren Haushalt mit 18.300 km/a können jedoch 95,6 % der maximalen Einsparungen erzielt werden, da es keine saisonale Verschiebung gibt. Der Median aller Profile liegt bei 94,6 % und damit sehr nahe beim Wert des Referenzprofils. Bei 127 der 151 simulierten Fahrprofilen (85 %) weicht der WPI um lediglich ± 1 Prozentpunkt vom Median ab.

Welchen Einfluss hat die Größe der PV-Anlage auf den Performance Index und auf den Solaranteil?



Take-Away: Eine größere PV-Anlage führt zu mehr solaren Überschüssen. Dadurch sinkt der Einfluss der Wallboxeigenschaften und der Solaranteil an der Wallboxladung steigt. Für PV-Anlagen mit einer Leistung von weniger als 10 kW kann eine einphasige Ladestation ausreichen.

Steht aufgrund der größeren PV-Leistung mehr Solarenergie zur Verfügung, steigt der Anteil der geladenen Solarenergie und das Elektrofahrzeug kann häufiger ausschließlich mit Solarenergie geladen werden. Damit reduzieren sich sowohl die Netzbezugskosten der verlustfreien, idealen als auch der verlustbehafteten Wallbox. Somit fällt der Einfluss von Tot- und Haltezeiten sowie der Regelabweichungen geringer aus. Bild 36 stellt die Abhängigkeit des WPI von der Größe der installierten Leistung der Solaranlage dar. Hierbei entspricht die blaue Punktwolke mit einer Leistung von 10 kW der bereits bekannten Verteilung in Bild 35.

Wird die **installierte Solarleistung** auf 15 kW erhöht, steigt der WPI im Mittel um 1 Prozentpunkt an. Er liegt somit im oberen Bereich der WPI-Verteilung bei 10 kW. Betrachtet man die individuellen Fahrprofile steigt der WPI zwischen 0,35 % und 2,1 %. Dabei profitieren insbesondere die Haushalte mit hohen Fahrleistungen sowie die Haushalte mit einer höheren Energieaufnahme im Winter. In beiden Fällen zählt jede Kilowattstunde überschüssiger Solarstrom. Bei einer weiteren Erhöhung auf 20 kW ist ein beginnender Sättigungseffekt identifizierbar. Die Steigerung der Solaranlagenleistung erhöht den WPI im Mittel nur um weitere 0,6 Prozentpunkte, beim Referenzsystem nur um 0,46 Prozentpunkte. Der WPI wird also von der Größe der PV-Anlagenleistung beeinflusst. Ein Vergleich des Wallbox-Performance-Index unterschiedlicher Wallboxen ist daher nur unter **identischen Rahmenbedingungen** sinnvoll.

Wie viel Solarenergie ins Fahrzeug geladen werden kann, hängt neben dem Ladeverhalten oder der PV-Anlagengröße auch von der **elektrischen Anbindung der Wallbox** ab, wie Bild 37 zeigt. Ist die Ladestation nur an einen Außenleiter und somit einphasig angeschlossen, so ist die Ladeleistung auf 1,4 kW bis 3,7 kW beschränkt. Wenn die Wallbox hingegen auf einen dreiphasigen Betrieb beschränkt ist, liegt die minimale Ladeleistung bei 4,2 kW und die maximale Ladeleistung in der Regel bei 11 kW. Eine Wallbox mit automatischem

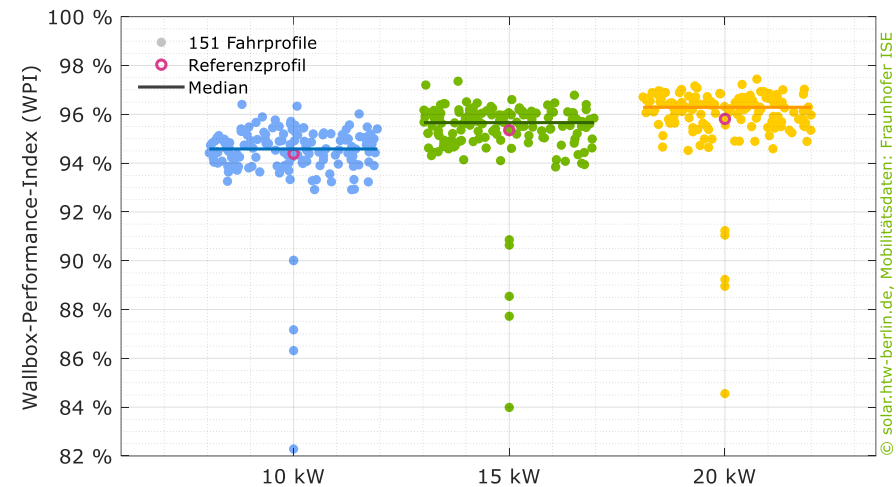


Bild 36 Einfluss der PV-Anlagenleistung auf die Größe des WPI der Wallbox E1. Mobilitätsdaten: Synpro, Fraunhofer ISE.

Phasenwechsel verbindet beide Welten und kann Ladeleistungen zwischen 1,4 kW bis 11 kW realisieren.

Bild 37 stellt den Solaranteil an der Fahrzeugladung in Abhängigkeit der installierten Solaranlagenleistung für die Wallbox E1 mit dem Referenzfahrprofil dar. Hierbei wird die Wallbox virtuell in drei verschiedenen Varianten betrieben **einphasig**, **dreiphasig** und **mit automatischer Phasenumschaltung**. Alle Varianten sind auch in der Praxis möglich. Im unteren Teil der Grafik ist erneut zum Vergleich das Ankunftsladen dargestellt.

Bei sehr kleinen PV-Anlagen ist das ungesteuerte Laden bei Ankunft ebenso lukrativ, wie das Solarladen mit drei Phasen. Bei PV-Leistungen unter 10 kW überschreitet der überschüssige Solarstrom nur selten die Schwelle für das dreiphasiges Laden in Höhe von 4,2 kW, während das Fahrzeug angeschlossen ist. Der Solaranteil fällt somit vergleichsweise gering aus und es wird viel Netzstrom zur Fahrzeugladung aufgewendet. Eine Verdopplung der PV-Leistung von 5 kW auf 10 kW versiebenfacht jedoch den Solaranteil auf 57 %.

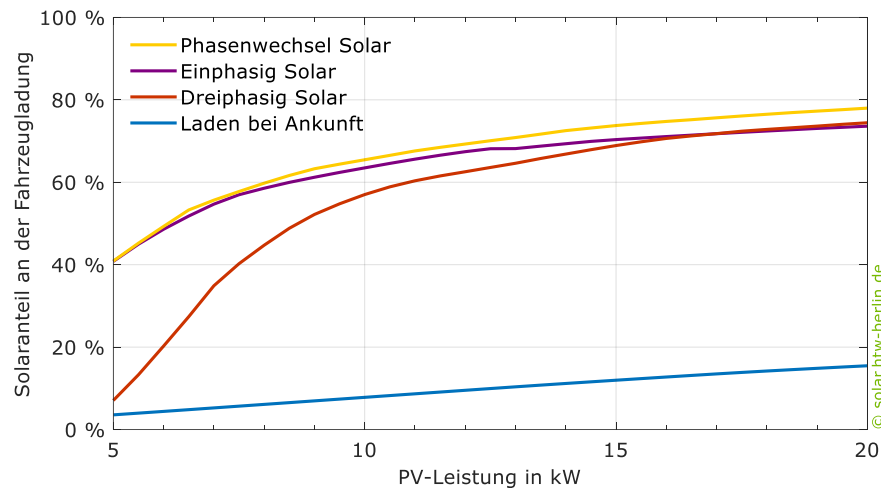


Bild 37 Solaranteil an der Fahrzeugladung in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung und der Phasenanzahl der Wallbox unter Berücksichtigung der Parameter des Systems E1. Ansteckhäufigkeit: Immer angesteckt, Fahrprofil: Referenz.

Der **einphasige Anschluss der Wallbox** ermöglicht hingegen deutlich höhere Solaranteile. Ein Solaranteil von 57 % wird hier bereits mit 7,5 kW erreicht. Der Grund: Der überschüssige Solarstrom überschreitet viel häufiger die minimale Ladeschwelle des einphasigen Ladens von 1,4 kW. Hierdurch kann deutlich mehr Solarenergie aufgenommen werden. Bis zu einer PV-Leistung von etwa 13 kW gibt es nur wenige Situationen im Jahr, wo Ladeleistungen größer als die maximale einphasige Leistung von 3,7 kW für mehr Solarenergie im Fahrzeug sorgen würde. Da das Fahrzeug einfach über einen längeren Zeitraum mit der gleichen Menge Solarstrom bei geringerer Leistung geladen wird. Ein Haken: Die **Wirkungsgrade der Fahrzeugladegeräte** sind im einphasigen Betrieb deutlich geringer als im dreiphasigen Betrieb, siehe [19], [41]. Um die gleiche Energie ins Elektrofahrzeug zu laden, muss mehr Energie zur Verfügung gestellt werden. Dies wirkt sich bei Netzladungen ökonomisch negativ aus, reduziert aber auch bei Solarladungen die vergütete Überschusseinspeisung.

Die höchsten Solaranteile bei geringsten Verlusten lassen sich mit der Wallbox mit **automatischer Phasenumschaltung** erzielen. Der Phasenwechsel ermöglicht sowohl die Ladung mit geringer Leistung in den Morgen- und Abendstunden oder bei Bewölkung als auch das schnelle Laden mit hoher Leistung. Mit zunehmender PV-Anlagengröße steigt der Vorteil gegenüber der einphasigen Ladelösung an, wohingegen sich die dreiphasige Variante stetig annähert. Der Verlauf der vier Linien ist bei den untersuchten Haushalten mit den unterschiedlichen Fahrprofilen ähnlich. Allerdings unterscheidet sich zum einen die Höhe des Solaranteils an der Fahrzeugladung. Zum anderen variiert die Anlagenleistung, bei der sich die dreiphasige Installation gegenüber der einphasigen Variante vorteilhaft auf den Solaranteil auswirkt. In der Praxis haben weitere Rahmenbedingungen wie z. B. die Ausrichtung und Neigung der Solaranlage oder das Haushaltslastprofil Einfluss auf die Ergebnisse.

Wie beeinflusst das Elektrofahrzeug die solare Ladung?

i *Take-Away: Die Effizienz des Fahrzeugladegerätes (engl. On-Board-Charger – OBC) hat einen starken Einfluss auf die Performance. Elektrofahrzeuge haben ein eigenes Einschwingverhalten und zusätzliche Tot- und Haltezeiten und, die das solare Laden beeinflussen.*

Im Labortest wurde das Fahrzeug durch ein generisches Modell in einer PHIL-Umgebung abgebildet. Dies ermöglicht es die Wallbox einheitlich zu charakterisieren, ohne die Einflüsse des Autos zu berücksichtigen. Im Feld bringen die Elektrofahrzeuge jedoch eigene **Systemeigenschaften** mit, die sich mit denen der Wallbox überlagern. Besonders relevant sind hierbei Umwandlungsverluste. Zu nennen sind aber auch Fahrzeugspezifische Eigenschaften wie das Regelverhalten, der Eigenverbrauch des Fahrzeugs und die Bereitschaftsverluste.

Elektrofahrzeuge haben bei geringer Leistung einen geringeren **Wirkungsgrad** als bei höheren Leistungen [19], [41]. Liegt dieser bei 11 kW im Mittel bei 90 %, reduziert er sich bei minimaler Ladeleistung im einphasigen Betrieb auf unter 77 %. Hinzu kommt ein Batteriewirkungsgrad, der bei 96 % liegen kann [42]. Dies bedeutet: Für einen Fahrenergiebedarf von 50 kWh müssen etwa 58 kWh mit 11 kW geladen werden. Die gleiche Ladung mit minimaler Leistung erfordert bereits 10 kWh mehr, also 68 kWh. Beim solaren Laden folgt die Ladeleistung der Überschussleistung. Sie ist, eine entsprechende PV-Leistung vorausgesetzt, nur selten auf den Minimalwert begrenzt, sodass der Wirkungsgrad in der Regel zwischen minimalem und maximalem Wirkungsgrad liegt. Die Verteilung der Energieabgabe bei einem bestimmten Strom ist für das Referenzsystem mit 10-kW-PV-Anlage und automatischer Phasenumschaltung in Bild 38 dargestellt. Zusätzlich ist der mittlere Umwandlungswirkungsgrad

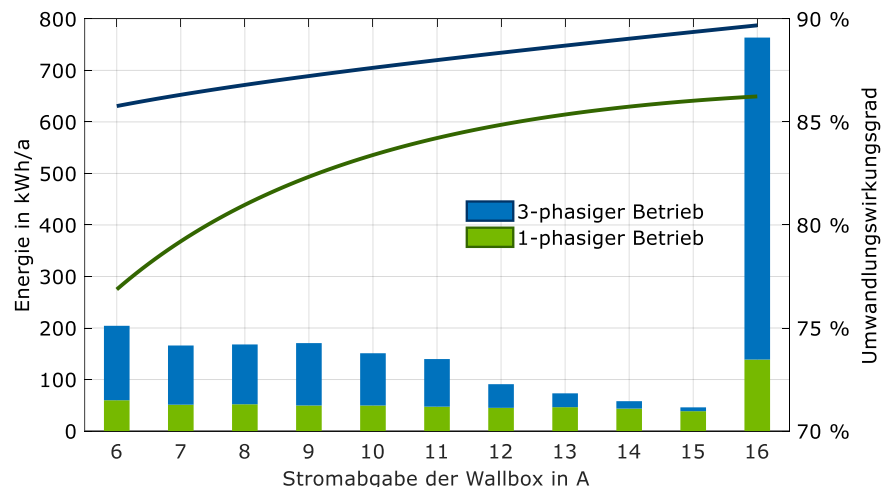


Bild 38 Abgegebene Energiemenge in Abhängigkeit der Stromabgabe der simulierten Wallbox E1 sowie mittlere Umwandlungseffizienz von Ladegeräten unterschiedlicher Elektrofahrzeuge [34]. PV-Leistung: 10 kW, Ansteckhäufigkeit: Immer angesteckt, Fahrprofil: Referenz.

des Ladereglers von 20 einphasig und 36 dreiphasig ladenden Elektrofahrzeugen nach [41] abgebildet. Die Wallbox lädt 625 kWh, knapp ein Drittel der Energie, mit maximaler Leistung von 11 kW bzw. 16 A auf drei Phasen. Dies liegt daran, dass das Fahrzeug in der Simulation vor der Abfahrt auch bei wenig solarem Überschuss einen ausreichenden Ladezustand erreichen muss. Die Energie entspricht weitestgehend der Netzladung bei einem erreichten Solaranteil von 67 %.

Wird eine geringere Leistung als 11 kW eingestellt, folgt die Wallbox in 1-A-Schritten meist der Solarleistung. 1100 kWh von etwa 1400 kWh solarer Ladung werden mit einem Wirkungsgrad von mehr als 85 % aufgenommen. Dies entspricht einem Anteil an der geladenen Energiemenge von mehr als 78 %. Nur etwa 110 kWh werden bei einer Umwandlungseffizienz von weniger als 80 % ins Fahrzeug geladen. Der mittlere Umwandlungswirkungsgrad über das Jahr würde bei diesem mittleren Ladestromregler etwa 87 % betragen. Dies entspricht einem höheren Verbrauch von etwa 304 kWh, wobei jedoch etwa zwei Drittel der zusätzlichen Energiemenge direkt von der 10-kW-Solaranlage gedeckt werden.

Einen geringeren Einfluss als der Wirkungsgrad des Ladereglers hat das **Regelverhalten des Elektrofahrzeugs**. Für vier unterschiedliche Fahrzeuge ist in Bild 39 eine Phasenumschaltung unter vergleichbaren Rahmenbedingungen mit einer Wallbox dargestellt.

Die Ladestation wurde hierbei über das Kommunikationsprotokoll Modbus gesteuert und nicht, wie sonst in dieser Studie, über den Energy Meter des Energiemanagements. Sie ist nicht Teil des Performancevergleichs dieser Studie. Somit ist klar: Das dargestellte Regelverhalten zeigt die Reaktion der Wallbox mit Fahrzeug und nicht ausschließlich des Elektroautos.

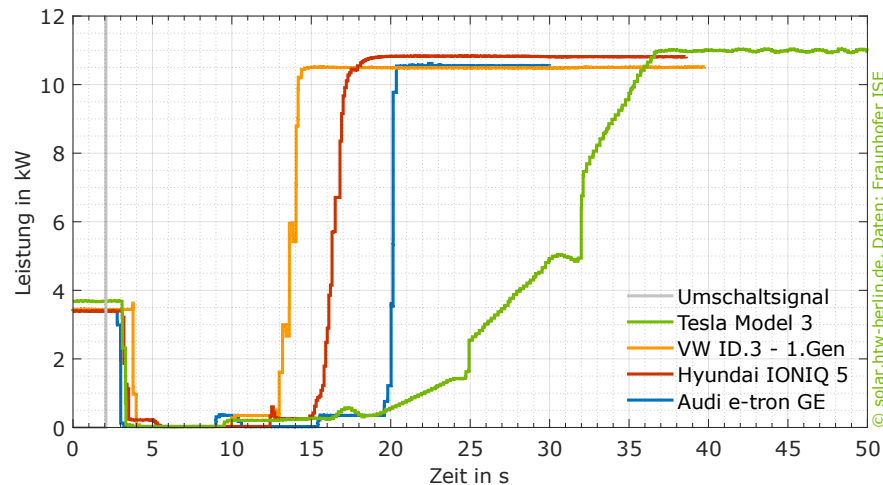


Bild 39 Reaktion unterschiedlicher Elektrofahrzeuge auf das Umschaltsignal einer Wallbox für die Phasenumschaltung aus dem ein- in den dreiphasigen Betrieb. Messungen Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Bei Sekunde zwei erfolgte der Befehl zur Phasenumschaltung per Modbus. Es lässt sich erkennen, dass die Wallbox und die Fahrzeuge binnen zwei Sekunden reagieren, die Leistung zu reduzieren. Mit weniger als 1 s zeigt der Audi e-tron GE in diesem Test die schnellste Reaktion. Sie ist nur unwesentlich schneller als beim Tesla Model 3 und Hyundai IONIQ 5 und rund 1 s schneller als die Reaktion des VW ID.3. Die Fahrzeuge reduzieren die Leistung in zwei bis drei Stufen, was ebenfalls durch die Wallbox vorgegeben worden sein kann. Während der Tesla Model 3, der Audi e-tron GE und der VW ID.3 die Leistung auf null Watt reduzieren und bereit für den Phasenwechsel sind, kann beim Hyundai IONIQ 5 noch für etwa 2 s eine Leistung von 250 W gemessen werden, ehe dieser vollständig ausgeschaltet und getrennt wird.

In verschiedenen Anwendungsforen kann man lesen, dass der Leistungsbedarf des Fahrzeugs nun deutlich gedrosselt wird, um die Batterie nicht wieder

zu entladen. Genannt werden hier 3 W bis 20 W und nicht näher bezifferte geringe Leistungen.

Eine Umschaltung der Phasen erfolgt im leistungsfreien Zustand. Die Leistung des Audi, Tesla und des VW wird erstmalig nach etwa 6 s nach Beendigung der Ladung angehoben. Dies ist vermutlich der Zeitraum nach dem die Wallbox die Ladung erneut freigibt. Während VW und Tesla sofort in eine unterschiedlich lange Startsequenz übergehen, reduziert der Audi e-tron erneut die Leistung und das Fahrzeug wird abermals für 5 s getrennt. Der Hyundai IONIQ 5 ist mit 8 s nur unwesentlich langsamer, bevor die Ladung mit drei Phasen initiiert wird.

Alle Fahrzeuge halten beim Ladestart eine geringe Leistung (Tesla Model 3 208 W; Hyundai IONIQ 5: 256 W; VW ID.3: 347 W und Audi e-tron: 374 W) ehe die Ladeleistung erhöht wird. Diese kann mit dem Eigenverbrauch des Elektrofahrzeugs in Verbindung gebracht werden und ist ein Grund für den geringen Wirkungsgrad bei geringen Ladeleistungen. Der ID.3 und der IONIQ 5 vergehen etwa 3 s bis die Ladeleistung gesteigert wird. Der Audi e-tron GE benötigt für die Startsequenz etwa 4,5 s. Alle drei Fahrzeuge steigern die Leistungsaufnahme binnen 2 s bis 4 s auf die maximale Leistung. Das Model 3 von Tesla hat einen abweichenden Verlauf. Hier dauert der Startvorgang etwa 10 s, bevor die Leistung schrittweise durch das Hinzuschalten der einzelnen 3 Phasen über weitere 15 s auf die maximale Leistung gesteigert wird. Eine Simulation mit der Wallbox E1 über ein Jahr zeigt keine nennenswerte Erhöhung des Netzbezugs durch die Startverzögerung.

Ist der Ladevorgang einmal gestartet, reagiert die Wallbox mit allen Fahrzeugen nach 1 s bis 5 s auf Änderungen des Modbussignals. Sie haben dabei ein vernachlässigbares Einschwingverhalten.

Welchen Einfluss hat die Ansteckhäufigkeit auf den Solaranteil?



Take-Away: Wer das Fahrzeug häufiger anschließt, kann mehr Solar-energie laden und vermeidet Netzstrombezug.

Klar ist: Wer häufiger das Elektrofahrzeug an die Wallbox anschließt, und die **solaroptimierte Ladefunktion** nutzt, kann mehr Kilowattstunden Solarstrom ins Fahrzeug laden. Das zeigen auch die Simulationsergebnisse in Bild 40. Wird das Elektrofahrzeug immer angesteckt, wenn es auf dem privaten Parkplatz steht, ergeben sich in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fahrprofile bei einer PV-Leistung von 10 kW die grün dargestellten Punkte. Der Solaranteil beträgt hier im Median 73 %. Bei einer geladenen Energiemenge von z. B. 2000 kWh/a bis 3000 kWh/a, was einer Fahrleistung von etwa 10.000 km/a bis 15.000 km/a entspricht, variiert der Solaranteil zwischen 55 % und 84 %. Wird das Fahrzeug

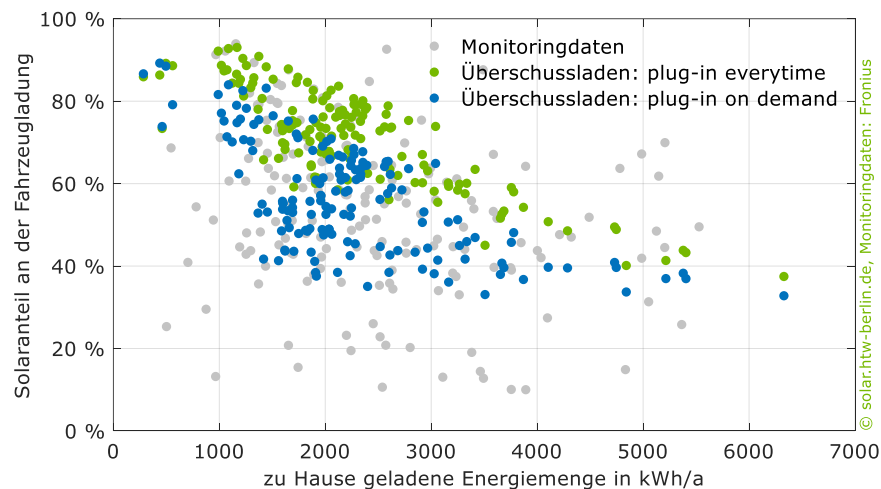


Bild 40 Solaranteil an der Fahrzeugladung von 151 statistisch verteilten Fahrprofilen in Abhängigkeit der zu Hause geladenen Energiemenge und der Ansteckhäufigkeit. Wallbox E1, PV-Leistung: 10 kW. Mobilitätsdaten: Synpro, Fraunhofer ISE. Vergleich mit 170 Betriebsdaten von der Fronius International GmbH bei einer PV-Leistung zwischen 9 kW und 11 kW [19].

Ansteckverhalten bei Ankunft und bei Bedarf



Ist die Batterie leer und muss für die nächste Fahrt geladen werden, ist für die meisten unstrittig: Der erste Weg nach der Ankunft führt direkt zur Wallbox. Nun hängt es jedoch von der Planbarkeit der nächsten Fahrt ab, ob das Fahrzeug sofort mit maximaler Leistung nach Ankunft geladen wird oder im Solarmodus der Überschussleistung folgt. Was für niedrige Ladezustände unstrittig ist, lässt bei einer halbvollen Batterie Handlungsspielraum für individuelle Präferenzen beim Ansteckverhalten. Dieses orientiert sich in der Regel am Bedarf und kann simulativ abgebildet werden. Hierbei gibt es drei zentrale Einflussgrößen:

1. Reicht die Energie für die nächste Fahrt?
2. Ist nur noch wenig Energie in der Batterie?
3. Ist das Laden besonders lohnend?

Übrigens: Für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Wallboxen beim WPI wird angenommen, dass das Fahrzeug immer mit der Wallbox verbunden wird, sobald es zuhause ankommt. So haben alle die gleichen Chancen mit der knappen Solarenergie weiterzukommen.

hingegen nur bei **Bedarf geladen** (blaue Punkte), reduziert dies die Ladevorgänge und Möglichkeiten überschüssigen Solarstrom zu laden. Der Solaranteil fällt um 18 Prozentpunkte und maximal um bis zu 36 Prozentpunkte geringer aus. In der oben genannten Bandbreite variieren die Solaranteile um 35 Prozentpunkte um den Median von 55 %. Folglich steigt der Netzbezug im Vergleich zur Routineladung deutlich an und variiert stärker.

Die größten **Änderungen** sind bei den Vollzeitarbeitenden identifizierbar. Haushalte mit sehr geringen Fahrleistungen können, bei den heutigen großen Batteriekapazitäten der Fahrzeuge, die Ladung sehr flexibel gestalten und trotzdem hohe Solaranteile erzielen. Insbesondere, wenn sie zudem noch

tagsüber häufig anwesend sind. Ist die zu Hause geladene Energiemenge hingegen sehr hoch, müssen die Haushalte das Fahrzeug in der Regel sowieso fast jeden Tag an die Wallbox anschließen. Der Unterschied zwischen den Ladeverhalten fällt somit gering aus.

Im Hintergrund von Bild 40 sind in Hellgrau 170 gemessene Betriebsdaten mit einer Solaranlagenleistung zwischen 9 kW und 11 kW dargestellt. In den **Monitoringdaten** sind Haushalte aus Deutschland, Österreich und der Schweiz mit variierender Ausrichtung und Neigung der Solaranlage enthalten [19]. Der Median des Solaranteils aller Haushalte liegt bei 52 %. Der Vergleich der Simulationsdaten mit den Messergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Bandbreite kann mit der unterschiedlichen Ansteckhäufigkeit und den verschiedenen Fahrprofilen gut wiedergegeben werden. Bei den Monitoringdaten mit den niedrigen Solaranteilen, im unteren Bereich der Grafik, handelt es sich vor allem um Haushalte, die in den Abendstunden oder nachts mit dynamischen Stromtarifen laden. Beides resultiert in höheren Netzanteilen an der Fahrzeugladung.

Welchen Einfluss haben die Kostenannahmen?



Take-Away: Änderungen der Kostenannahmen haben einen geringen Einfluss auf die Berechnung des Wallbox-Performance-Index (WPI). Das Verhältnis von Einspeisevergütung und Netzbezugskosten ist relevant.

Der WPI ist eine ökonomische Kennzahl, die von den Kosten für den Netzbezug und der Vergütung der ins Netz eingespeisten Energie abhängt. Für das **Referenzszenario** wurde eine Einspeisevergütung von 8 ct/kWh und Netzbezugskosten von 32 ct/kWh gewählt.

Im Folgenden soll nun der Einfluss variierender ökonomischer Rahmenbedingungen auf den WPI analysiert werden. Bild 41 stellt die Bewertungsgröße für

die Wallbox E1 bei einer PV-Leistung von 10 kW in Abhängigkeit des Netzbezugspreises und der Einspeisevergütung dar. Im Referenzfall erzielt das System einen WPI von 94,4 %. Der gleiche Wert ergibt sich auch bei einer Einspeisevergütung von 10 ct/kWh und Netzbezugskosten von 40 ct/kWh bzw. bei 5 ct/kWh und 20 ct/kWh. Das Verhältnis der ökonomischen Kennwerte liegt in allen drei Fällen bei 4:1. Der WPI ist somit nur vom Verhältnis der beiden Kenngrößen abhängig, siehe dazu auch Formel (6) und (7).

$$WPI = \frac{E_{G2WB,REF} - E_{G2AC,REAL} + E_{AC2G,REAL} \cdot p - E_{AC2G,IDEAL} \cdot p}{E_{G2WB,REF} - E_{G2WB,IDEAL}} \quad (7)$$

$$\text{mit } p = \frac{p_{AC2G}}{p_{G2AC}}$$

Hierzu zwei Beispiele: Erhöht sich lediglich der Netzbezugspreis auf 40 ct/kWh, fällt der WPI im Vergleich zum Referenzszenario um 0,1 Prozentpunkte niedriger aus. Stand-by-Verluste und Regelungenauigkeiten werden stärker gewichtet. Entfällt hingegen die Einspeisevergütung, würde der WPI

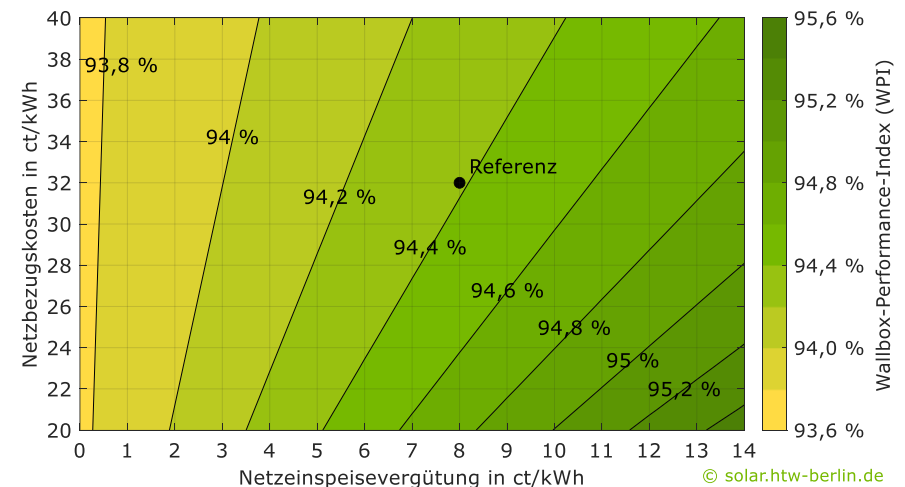


Bild 41 Abhängigkeit des Performance Index von der Einspeisevergütung und des Netzbezugspreises. Wallbox E1, PV-Leistung: 10 kW.

um etwa 0,6 Prozentpunkte geringer ausfallen. Der Grund: Die Einspeisevergütung kompensiert den zusätzlichen Netzbezug anteilig. Die höchsten WPI-Kennwerte mit mehr als 95 % wären bei einem geringen Netzbezugspreis und gleichzeitig einer hohen Einspeisevergütung erzielbar.

Auch hier wird deutlich: Der WPI wird von den Kostenannahmen beeinflusst, die Auswirkungen sind jedoch begrenzt. Wichtig für einen Vergleich sind vor allem Dingen, dass der Systembewertung identische ökonomische Rahmenbedingungen zugrunde liegen.

Welchen Einfluss haben unterschiedliche Systemeigenschaften auf die Systembewertung?



Take-Away: Eine schnelle Regelung und geringe Stand-by-Verluste führen zu merkbar höheren Einsparungen.

Durch die Simulationsrechnungen lassen sich die Effekte einzelner Verlustfaktoren auf die Gesamtbewertung der Wallboxen mit dem Wallbox-Performance-Index isoliert voneinander betrachten. In Kapitel 3.3 wurde dies genutzt, um Abweichungen vom idealen Regelverhalten zu bewerten. Zur Optimierung der Wallboxparameter kann jedoch auch betrachtet werden, wie eine Änderung der Parameter die Performance der Wallbox beeinflusst. Bild 42 stellt die Änderung des WPI für die Variation von 5 unterschiedliche Systemeigenschaften für das System E1 gegenüber. Die Nulllinie stellt den Referenzfall und somit einen WPI von 94,4 % dar.

Eine Reduktion der Stromschrittweite von 1 A auf 0,1 A würde für die Wallbox E1 in einer Erhöhung des WPI von 0,2 Prozentpunkten resultieren. Um die Relevanz der Reaktionszeit auf eine Änderung der Überschussleistung zu analysieren, wurde die **Totzeit** auf 1 s reduziert und auf 15 s erhöht. Während die

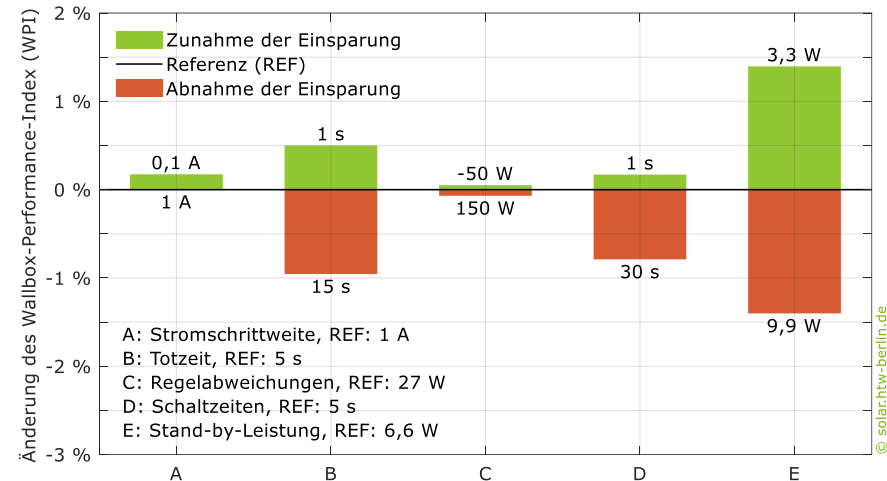


Bild 42 Einfluss der Variation ausgewählter Systemeigenschaften auf den Wallbox-Performance-Index (WPI) des Systems E1.

Verbesserung der Totzeit in einem Anstieg des PI von 0,5 Prozentpunkten resultieren würde, hätte eine Reaktionsverschlechterung um den Faktor 3 gegenüber der Referenz eine Verringerung des WPI um 1 Prozentpunkt zur Folge. Eine Veränderung der **Regelungsabweichungen** um etwa ± 100 W hat einen geringen Einfluss auf die Systembewertung. Liegt die Leistungsabgabe der Wallbox unterhalb des solaren Überschusses, ist weniger Netzbezug nötig, was sich positiv auswirkt. Eine Verhundertfachung der Regelabweichungen oberhalb der Überschussleistung auf 150 W reduziert den WPI um etwa 0,1 Prozentpunkte.

Die **Schaltzeit** beschreibt den Zeitraum, die die Wallbox benötigt, um neue Änderungsbefehle entgegenzunehmen. Könnte die Wallbox jede Sekunde ihre Leistungsabgabe anpassen, würde der WPI auf 94,6 um 0,2 Prozentpunkte ansteigen. Die Implementierung einer Zeitverzögerung von 30 s, würde hingegen einen ähnlichen Effekt haben wie die Erhöhung der Totzeit auf 15 s.

Abschließend stellt Bild 42 den Einfluss des **Systemverbrauchs** im Bereitschaftsbetrieb dar. Der Systemverbrauch setzt sich dabei aus der Leistungsaufnahme des Energy Meter am Netzanschlusspunkt und der Wallbox zusammen und summiert sich im Referenzfall auf 6,6 W. Eine Verringerung könnte z. B. durch die Einstellung eines Schlafmodus (Deep-Stand-by), durch eine Funktionsreduzierung, wie beispielsweise das reduzierte Senden von Statusinformationen oder das Ausschalten der Beleuchtung nach einer zeitweisen Inaktivität erreicht werden. Eine Anpassung der Stand-by-Leistungsaufnahme um $\pm 3,3$ W hätte zur Folge, dass der WPI um $\pm 1,4$ Prozentpunkte von Referenzwert abweicht.

Anhang

A.1 Systemsimulation

An dieser Stelle wird das **Simulationsmodell** kurz beschrieben. Es besteht, wie auch schon der Laboraufbau aus einem Elektrofahrzeug und einer Wallbox, die anhand der Labormessdaten parametrisiert wurde, sowie aus einem Solarsystem und der Haushaltslast (siehe auch Bild 9). Es wird grundsätzlich angenommen, dass der simulierte Haushalt stets versucht seinen gesamten Ladestrom an der eigenen Wallbox und nach Möglichkeit mit Solarstrom zu decken. Dabei dient die Solarleistung zunächst der Deckung der Haushaltslast. Anschließend steht die Überschussleistung der Wallbox zur Ladung des Elektroautos zur Verfügung. Ist dies nicht möglich, wird extern geladen (siehe Infobox).

Im Simulationsmodell kann unterschieden werden, wie häufig die Nutzerinnen und Nutzer das Elektrofahrzeug anstecken. So kann beispielsweise eingestellt werden, ob immer angesteckt wird, wenn das Elektrofahrzeug zuhause ist oder ob dies in Abhängigkeit des Ladezustands, der nächsten Fahrten oder erwarteten Solarenergie passiert.

Der schematische Ablauf der Simulation ist in Bild 43 dargestellt. Hier ist das Fahrzeug auf der rechten Seite im grünen Rahmen und alle wallboxrelevanten Elemente zentral in blau eingefasst. Das Elektrofahrzeug wird maßgeblich durch das **Fahrprofil** beschrieben, welches direkte Auswirkungen auf die Zeiten der Anwesenheit und den **Ladezustand** hat. Weitere Einflussgrößen sind die Batteriekapazität, die Leistung des Ladereglers und mögliche **Ladeverluste**. Ist das Elektrofahrzeug angesteckt, erfolgt eine **Zustandsbestimmung**. Hier wird in verschiedenen Routinen überprüft, welcher Lademodus gewählt wird. Zuerst wird überprüft wieviel Energie für die Fahrten benötigt wird und ob diese im verbleibenden Zeitfenster bis zur Abfahrt geladen werden kann.

Externe Ladung



Eine externe Ladung des Fahrzeugs ist immer dann erforderlich, wenn die Energie des Fahrzeugs nicht ausreicht, um die Fahrt von Zuhause nach Zuhause zu beenden. Die externe Ladung ist in der Regel mit höheren Kosten verbunden [43]. Dies kann im Simulationsmodell ebenfalls berücksichtigt werden und wird separat bilanziert. Für die Bewertung mit dem WPI ist dies jedoch nicht erforderlich: Die angenommene ausreichende Ladung vor Fahrtbeginn sorgt dafür, dass die externe Ladung in allen Fällen gleich ist und sich somit aus der Gleichung kürzt.

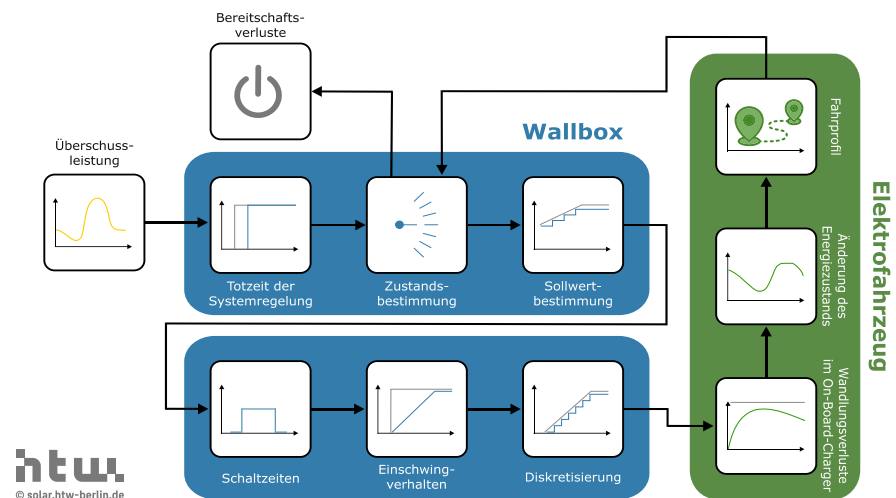


Bild 43 Schematischer Aufbau der Simulationsmodells wbsim.

Ist die Zeit zu knapp, lädt die Wallbox mit maximaler Leistung zum letztmöglichen Zeitpunkt. Steht genügend Zeit zur Verfügung, wird so viel Solarenergie wie möglich geladen. Wenn die Überschussleistung die minimale Ladeleistung überschreitet, wechselt die Wallbox nach einer Haltezeit aus einem Wartemodus (B2 – Angesteckt und nicht Ladebereit) in den Lademodus (C2 – Angesteckt und Ladebereit). Je nach Höhe der Überschussleistung und Fähigkeiten der Wallbox wird hierbei die einphasige oder dreiphasige Ladung initiiert.

Wichtig ist: Die gemessene Überschussleistung wird vom Energiemanagement mit einer **Verzögerung (Totzeit)** verarbeitet. Ist die Wallbox ladebereit, wird zunächst ein **Sollwert der Regelung** unter Berücksichtigung der Leistungsbegrenzung ermittelt. Die Umsetzung der Ladeleistung im Simulationsmodell ist abhängig vom Regelverhalten. Die Wallboxen unterscheiden sich hinsichtlich des **Einschwingverhaltens** und der **Diskretisierung** der Leistungswerte. Zum Teil variieren auch die **Schaltzeiten**, also wie häufig ein neuer Sollwert eingestellt werden kann. Im Simulationsmodell wird ein Sollwert auf Basis der Wallboxeigenschaften berechnet und dann entsprechend des Regelverhaltens an das Elektrofahrzeug weitergegeben.

Da das Modell allgemein gehalten ist, ist es nicht zielführend alle Details der Labormessung nachzubilden. So kann beispielsweise ein Funktionstest beim Anschalten (Wallboxen C1 und E1) oder ein deutliches Unterschreiten des Sollwertes bei Amperegenauen Sollwertvorgaben (A1) oder auch das scheinbar unsystematische Halten von Leistungswerten (C1) nicht nachgebildet werden. Besonders charakteristische Eigenschaften, wie das Schwingen um den Sollwert (A1), das Regeln auf einen Mittelwert (D1) oder auch übergeordnete Haltezeiten (C1), wurden hingegen individuell berücksichtigt. Einen beispielhaften Eindruck von der Validierung kann man für die Systeme B1 und C1 über Bild 44 und Bild 45 erhalten. Hier sind jeweils die Messergebnisse aus den Anwendungstests den Simulationsergebnissen gegenübergestellt.

In Tabelle 6 sind die abgebildeten Effekte und bekannte Einschränkungen aufgeschlüsselt.

Tabelle 6 Abgebildete Eigenschaften und Einschränkungen in der Simulation.

Abgebildete Effekte	Einschränkungen
EINGANGSDATEN UND ALLGEMEINE ANNAHMEN	
Zufallsbasiertes Ansteckverhalten mit unterschiedlichen Ladetypen.	Idealisierte Prognosen für Fahrverhalten und Solarstromerzeugung.
Externe Ladung im Falle einer langen Reise.	Fokus im Modell auf solares Laden. Externe Ladung mit pauschaler Energie berücksichtigt.
Ladung vor der Abfahrt als Feature des Energiemanagement (Grundannahme). Ladelogik für Laden mit maximaler Leistung oder solarem Laden.	Imperfekte Ladeplanung durch pauschalen Sicherheitsfaktor berücksichtigt. Keine Berücksichtigung dynamischer Stromtarife. Kein stationärer Batteriespeicher.
Verluste im On-Board-Charger einstellbar.	
Batteriekapazität und Wirkungsgrad.	
Einheitlich Ladezustandsbilanz, Ladezustand am Anfang des Jahres entspricht dem Wert am Ende.	
STAND-BY-BETRIEB	
Bereitschaftsverluste und Deep-Standby (angeschlossen und ohne Kabelverbindung).	Keine Verluste der Peripherie und Wallbox im Ladezustand C angenommen, da vernachlässigbar im Vergleich zur Ladeleistung.

Abgebildete Effekte

Einschränkungen

ZUSTANDSBESTIMMUNG, LADESTART UND -ENDE

Zeitkonstanten vor dem Ladestart, sowohl Haltezeiten mit Leistung über Schwellwert („Haltezeiten Start“) als auch übergeordnete Regelungen, die einen Ladestart blockieren, um häufiges An und Ausschalten zu unterbinden („Cooldown“).

Das sogenannte „Probing“, also das Ausfahren der Leistung mit dem Ziel die Fähigkeiten des Fahrzeugs zu ermitteln.

Logiken, die entscheiden, ob ein normaler Ladestart erfolgt oder ein Phasenwechsel.

Zum Teil wird beim Beenden der Ladung bereits festgelegt, ob ein Phasenwechsel durchgeführt wird.

Phasenabhängige Logiken zur Beendigung der Ladung und zum Phasenwechsel inkl. Haltezeiten.

Keine Ladeschlussbegrenzung.

REGELUNG

Phasenabhängige Sollwertbestimmung unter Berücksichtigung der Regelabweichung. Regelabweichung als Funktion in Abhängigkeit von Ladestrom und Zeit.

Stochastische Regelabweichung.

Schaltzeiten mit konstanter Leistung, Minimalwert ergibt sich ggf. aus Totzeiten.

Dynamisches Regelverhalten, mit diskreten Schritten, PT1-Verhalten und Stromänderungsbegrenzung mit einmaliger Möglichkeit zum Leistungssprung zu Beginn einer Leistungsänderung.

Wechsel der Stromänderungsbegrenzung in Abhängigkeit der Sprunghöhe (Wattgenau bei kleinen Änderungen, 1-A-Schritte bei größeren Änderungen).

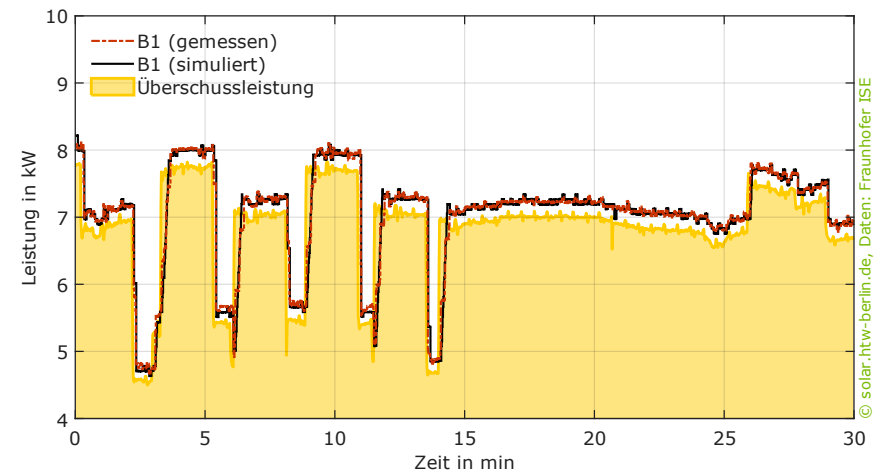


Bild 44 Beispielhafter Vergleich der gemessenen und simulierten Leistung der Wallbox B1.

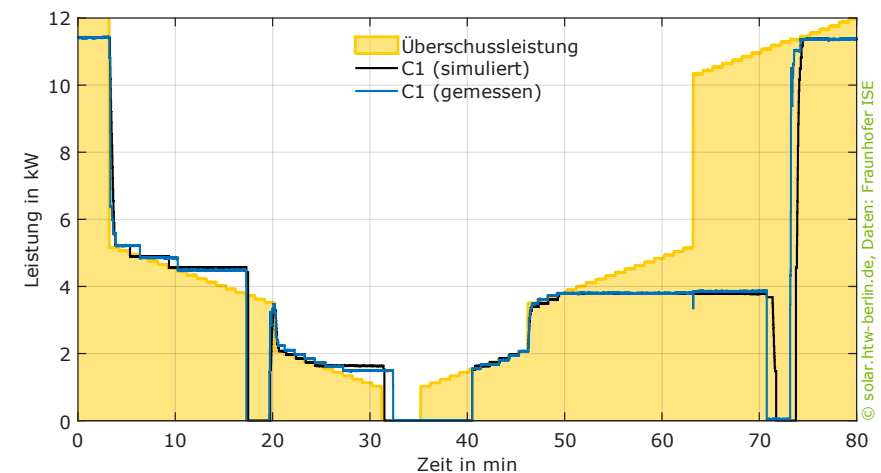


Bild 45 Beispielhafter Vergleich der gemessenen und simulierten Leistung der Wallbox C1.

A.2 Firmware der vermessenen Wallboxen

Tabelle 7 Firmware-Versionen der namentlich teilnehmenden Ladelösungen.

System	Kürzel	Firmware-Version
Amperfiend connect.solar	B1	5.1.1
Fronius Wattpiot Flex Home 22 C6	E1	41.24.rc3-dirty
Kostal Enector AC 3.7/11	C1	2023.21.11024
SMA eCharger	D1	2.1.39.R

A.3 Weitere Details zu Verlustanalyse

In diesem Abschnitt werden die Details zur Verlustanalyse noch weiter vertieft. Hierfür werden die einzelnen Verlustkategorien Regelung, Haltezeit und Stand-by nacheinander betrachtet und jeweils herausstechende Ergebnisse benannt.

Verlustkategorie Regelung:

Betrachtet man die Eigenschaften der Verlustkategorie Regelung im Detail zeigt sich folgendes Bild: Die Regelungsrelevanten **Tot- und Schaltzeiten** sind bei den schnellsten Systemen wenig relevant. Im Vergleich zum idealen System müssen die Systeme A1 und C1 lediglich 22,6 kWh mehr aus dem Netz beziehen. Dies wird durch Einspeisung in gleicher Höhe ökonomisch abgepuffert und reduziert den WPI um 1,16 %. Dahingegen zeigt sich bei System D1, dass die Zeit bis zur ersten Reaktion eine relevante Größe sein kann. Hier führt die interne Optimierung des Energiemanagements auf einen prognostizierten Sollwert zu einer deutlichen Verzögerung, die mit einer Reduktion des WPI von 6,7 % relativ weit vom idealen Systemverhalten entfernt ist. Allein das Regeln auf die Prognose ist bereits für mehr als 5,4 % der Verluste verantwortlich. Auch wenn die Prognose im realen Betrieb vermutlich an die lokale Erzeugung und Verbrauch angepasst wird, erscheint eine prognosebasierte Optimierung

in der getesteten Konfiguration nur begrenzt zielführend. Der Netzbezug für die Wallboxladung steigt durch die verzögerte Reaktion im System D1 gegenüber dem idealen Regelverhalten um 130 kWh an und wird durch zusätzliche Netzeinspeisung in gleicher Höhe nur anteilig kompensiert. Während die Totzeit bei der Wallbox D1 zu großen Verlusten führt, sind die **stationäre Regelabweichungen** nur von geringem Effekt. Wie auch bei der Wallbox E1 reduzieren sie die Einsparungen nur um weniger als 0,05 %. Ganz anders ist dies bei der Wallbox B1: Die Regelabweichungen im dreiphasigen Betrieb sind mit rund 1,5 % die verlustreichste Einzeleigenschaft des Systems. Da die Wallboxleistung deutlich über der Überschussleistung liegt, steigt der Netzbezug gegenüber der idealen Regelung um 28 kWh an. Weil das Fahrzeug folglich zu einem früheren Zeitpunkt vollständig geladen ist, wird die gleiche Menge Solarstrom mehr ins Netz gespeist.

Die Wallboxen B1, A1 und E1 können durch das schnelle **Einschwingverhalten** bei reduziertem Überschuss die Kostenersparnis auf hohem Niveau erhalten. Das Einschwingverhalten von Wallbox C1 sorgt hingegen für nennenswerte Verluste in Höhe von 0,7 %, da das System im Gegensatz zu den andern Wallboxen ein PT1-Regelverhalten für die Regelung nutzt, bei dem sich dem Sollwert schrittweise angenähert wird, siehe z. B. Bild 26 unten.

Verlustkategorie Haltezeiten:

In der Verlustkategorie der Haltezeiten sticht besonders das System C1 durch seine langen **Haltezeiten beim Starten, Ausschalten und beim Phasenwechsel** hervor. Sie führen zu Verlusten in der Kostenersparnis von 3,3 %. Hierbei ist interessant, dass der zurückhaltende Einsatz der Phasenumschaltung (5 min Haltezeit mit zeitdiskreter Prüfung alle 15 min) knapp 1 % Unterschied gegenüber der deutlich schnelleren Reaktion von Wallbox E1 hat. Die Haltezeit vor dem Phasenwechsel beträgt hier 60 s, was in der Simulation zu etwas mehr als einer Verdopplung der Anzahl an Phasenwechseln führt.

Die dreiphasige Wallbox A1 wird nicht durch Haltezeiten beim Phasenwechsel beeinflusst, da sie **keine einphasige Ladung ermöglicht**. Hierdurch entgehen den Betreiber*innen bei einer 10-kW-PV-Anlage jedoch Solarstrommengen, die nur bei geringer Leistung zur Verfügung stehen. Die Wallbox lädt somit 200 kWh weniger Solarenergie als die gleiche Wallbox ohne Leistungsbeschränkung. Allein die Beschränkung auf den dreiphasigen Betrieb führt somit zu mehr als 10 % Verlusten im WPI. Trotz sonst guten Parametern fällt die Systembewertung von A1 daher entsprechend gering aus.

Verlustkategorie Stand-by:

Gering ist auch der **Peripherieverbrauch** des Systems A1. Leider konnte dieser hohe Qualitätsstandard bei den **Bereitschaftsverlusten** der Wallbox nicht gehalten werden. Aufgrund der geringeren Einsparungen verursacht der Systemverbrauch mit 5,3 W eine Reduktion der möglichen Kosteneinsparung in Höhe von etwa 2,3 %. Bei System C1, dem System mit der geringsten Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb, reduzieren sich die Kosteneinsparungen gegenüber der idealen Wallbox um 1,6 %. Bei den Systemen A1 und E1 stellt die Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb die verlustreichste Einzelkategorie dar. Den größten Verlust im Bereitschaftsbetrieb verzeichnet System D1 mit einem WPI-Verlust von 4,1 %. Der Grund: Die in Summe 9,1 W Bereitschaftsverluste führen zu 53 kWh höherem Netzbezug und 27 kWh geringerer Netzeinspeisung. Die Konfiguration mit den zwei Zählern ist in dieser Systemtopologie nachteilhaft, da der Nutzen in der Optimierung nicht zum Tragen kommt. Erwähnenswert ist hierbei, dass die Systemintegration in der SMA-Produktwelt hier Synergieeffekte nutzen kann. So entfällt beispielsweise der Energy Meter, wenn ein SMA Wechselrichter die Erzeugungswerte direkt liefern kann.

A.4 Weitere Anwendungstests

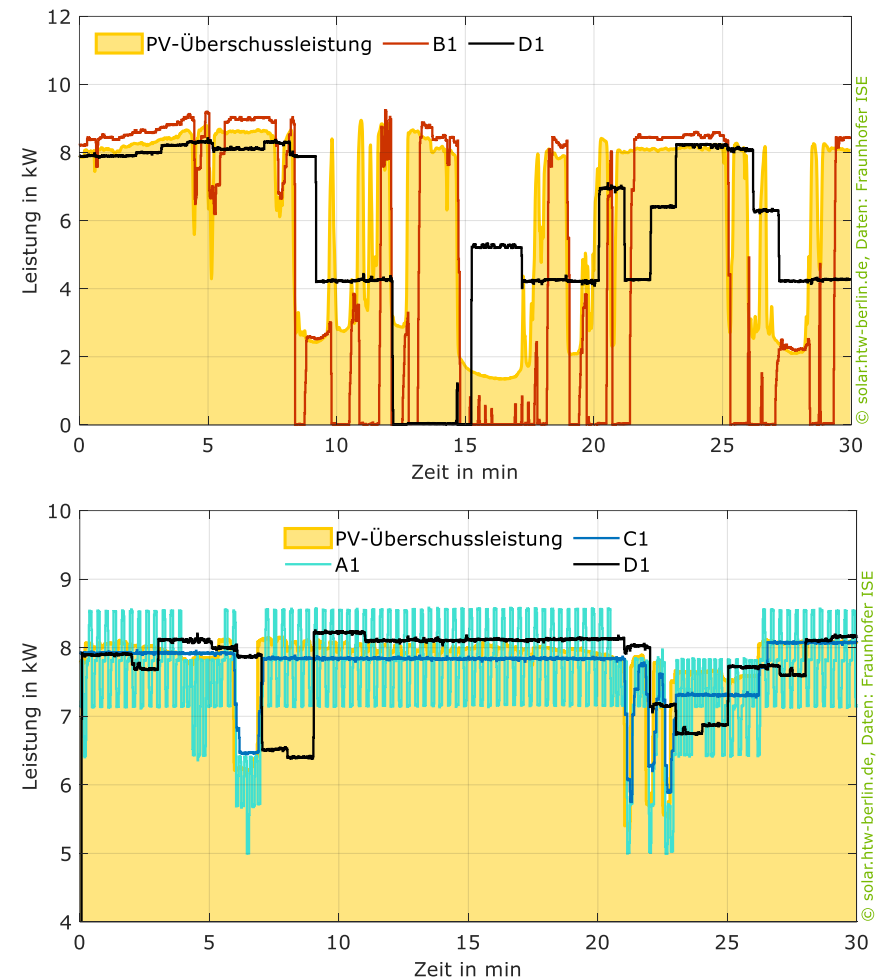


Bild 46 Reaktionsverhalten unterschiedlicher Wallboxen auf die Vorgabe von in Einfamilienhäusern gemessenen sekundlichen Überschussleistungen an einem stark wechselbewölkten Sommertag (AWT 3, oben) und einer Überschussleistung im dreiphasigen Betrieb (unten). Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

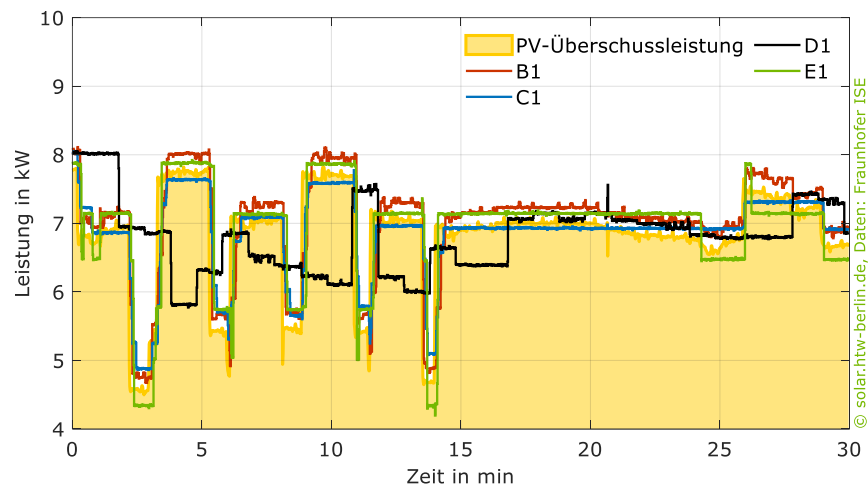


Bild 47 Reaktion der Wallboxen B1 bis E1 auf eine Vorgabe der Überschussleistung bis 8 kW im dreiphasigen Betriebsmodus. Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

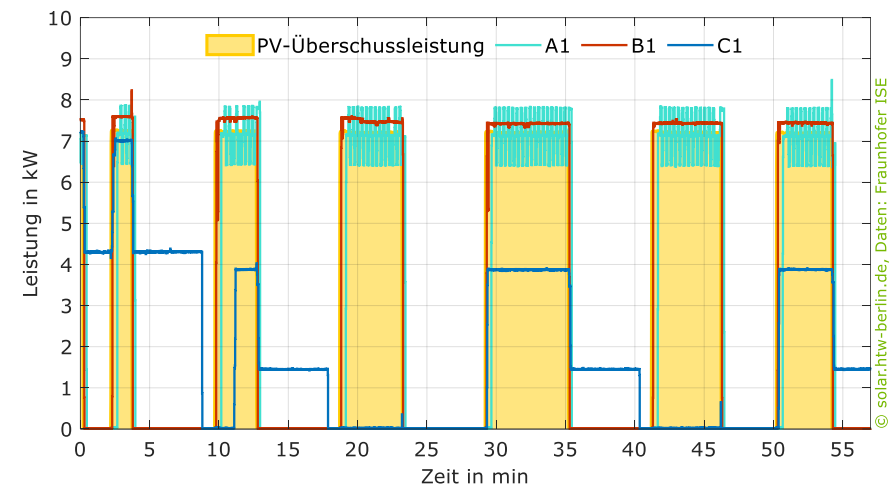


Bild 49 Reaktion der Wallboxen A1, B1 und C1 auf die pulsartigen Änderungen der Leistungsvorgabe mit unterschiedlich langen Pausenzeiten zwischen den Pulsen. Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

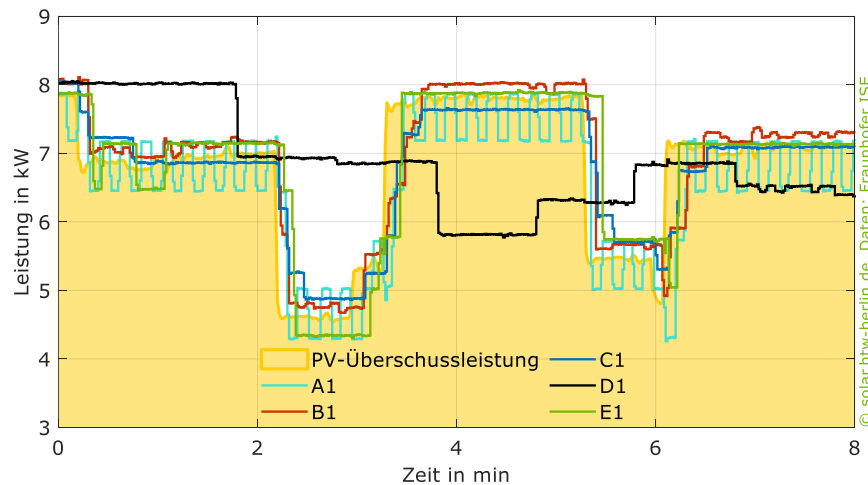


Bild 48 Reaktion der untersuchten Wallboxen auf einen Ausschnitt aus Bild 47 mit einer Überschussleistung zwischen 4 kW und 8 kW. Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

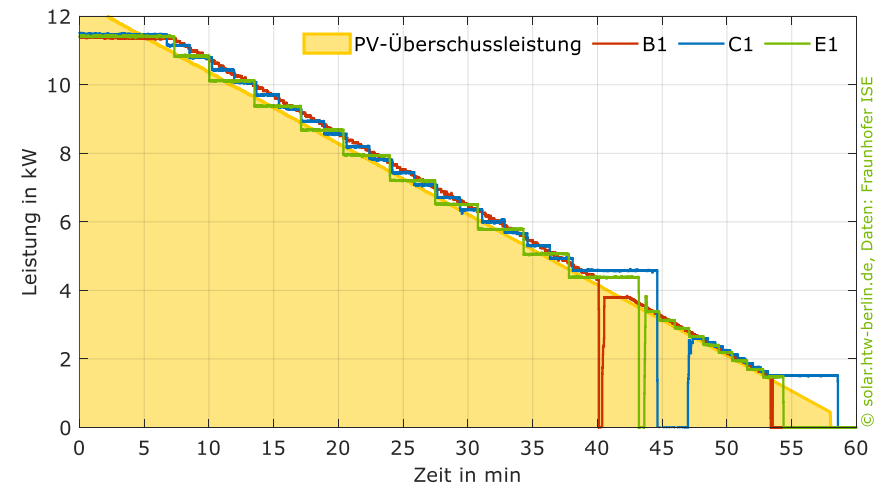


Bild 50 Reaktion der Wallboxen B1, C1 und E1, die eine Stromschrittweite von 0,1 A, 0,5 A und 1 A aufweisen, auf eine kontinuierliche Reduktion der Überschussleistung. Daten: Fraunhofer ISE, Grafik: HTW Berlin.

Literaturverzeichnis

- [1] pv magazine: „Marktübersicht Wallboxen und Ladesäulen 2025“, *pvt magazine Deutschland*, Nov-2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/marktuebersicht-elektroauto-ladeloesungen/produkt Datenbank-elektroauto-ladeloesungen-wallboxen-und-ladesaeulen-2025/>
- [2] P3 AUTOMOTIVE GMBH: „AUSGABE 01 | HOME CHARGING – INTELLIGENTE AC-WALLBOXEN“, P3 AUTOMOTIVE GMBH, Apr. 2023
- [3] ADAC e.V.: „Elektroauto laden: E-Auto zuhause an der Wallbox oder an der Ladestation laden: Hier finden Sie die wichtigsten Informationen.“, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/>. [Zugegriffen: 04-Dez-2025]
- [4] „<https://www.photovoltaikeforum.com/>“, *Photovoltaikforum*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.photovoltaikeforum.com/>. [Zugegriffen: 04-Dez-2025]
- [5] „<https://www.goingelectric.de/>“, *GoingElectric*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.goingelectric.de/>. [Zugegriffen: 04-Dez-2025]
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] A. Regett, W. Mauch, U. Wagner: „Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V., München, 2019
- [11] 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]
- [12] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: „Kundenakzeptanz als Schlüssel für den Markthochlauf der Elektromobilität“, Berlin, 2021
- [13] 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
- [14] UScale GmbH: „Private Charging-Studie 2023“, UScale GmbH, 2023
- [15] 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

- [16] J. Rode: „Solar Photovoltaics and Battery Electric Vehicles“, *SSRN Journal*, 2024
- [17] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Hrsg.: *Einfach zuhause laden Studie zum Ladeverhalten von Privatpersonen mit Elektrofahrzeug und eigener Wallbox*. NOW GmbH, 2024
- [18] M. Wietschel, S. Preuß, R. Kunze, M. Keller: „Laden von Elektrofahrzeugen in Deutschland mit Ökostromverträgen“
- [19] N. Orth, J. Bergner, S. Salehi: „Solares Laden von Elektrofahrzeugen“, HTW Berlin, Berlin, 2025
- [20] VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., ETG, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: „DIN EN IEC 61851-1 VDE 0122-1:2019-12: Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge“, Berlin: Beuth Verlag, 2019
- [21] Dr.-Ing. B. Wille-Hausmann u. a.: „Prüfrichtlinie - Unidirektionales und Solares Laden Version 1.1“, Dez. 2025
- [22] Fraunhofer ISE: „Digital Grid Lab“, 14-Juli-2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/center/zentrum-fuer-leistungselektronik-und-nachhaltige-netze/digital-grid-lab.html>. [Zugegriffen: 31-Okt-2025]
- [23] B. Wille-Hausmann, J. Körber, N. Orth, J. Bergner: „Wallbox Inspection – Evaluating Solar Controlled Charging of EV Charging Equipment“, gehalten auf der 38th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS38), Göteborg, Schweden, 2025
- [24] A. N. Morab, S. Marchand, B. Wille-Haußmann: „Electric vehicle modeling for function testing of charging infrastructures using power hardware-in-the-loop simulations“, *IET Conf. Proc.*, Bd. 2021, Nr. 10, S. 90–96, Feb. 2022
- [25] Typhoon HIL: „Typhoon HIL – EV charging twin“, 31-Jan-2025. [Online]. Verfügbar unter: https://marketplace.typhoon-hil.com/package?package_name=EV+charging+twin. [Zugegriffen: 31-Okt-2025]
- [26] P. Pütz: „Real-time Electric Vehicle Modelling to evaluate Solar Optimized Charging“, Masterarbeit, Uni Freiburg, Freiburg
- [27] J. Bergner: „Untersuchungen zu prognosebasierten Betriebsstrategien für PV-Speichersysteme“, Bachelorthesis, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2014
- [28] D. Scofield, J. Smart, B. Carlson: „INL Electric Vehicle Testing and Modeling“, Idaho National Laboratory
- [29] KOSTAL Solar Electric GmbH: „Betriebsanleitung:Kostal ENECOT AC 3.7/11“. Feb-2025
- [30] pv magazine: „Marktübersicht Wallboxen und Ladesäulen 2024“, *pvmagazine Deutschland*, Nov-2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/marktuebersicht-elektroauto-ladeloesungen/produkt Datenbank-elektroauto-ladeloesungen-wallboxen-und-ladesaeulen-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] Neoom: „1/3-Phasenumschaltung“, *Neoom*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wissen.neoom.com/1/3-phasenumschaltung>. [Zugegriffen: 10-Sep-2025]
- [34] M. G. Steiner u. a.: „In Situ“ Evaluation of Mechanical Wear of Mobile Contacts of Electricity Voltage Regulator“, *Energies*, Bd. 13, Nr. 19, S.

5015, Sep. 2020

- [35] SMA Solar Technology AG: „Datenblatt: SMA EV CHARGER 7.4 / 22 - Elektrofahrzeuge mit Solarstrom laden - intelligent, schnell, kostengünstig“. 24-Apr-2020
- [36] Dr. Bernhard Wille-Haussmann *u. a.*: „Prüfrichtlinie - Unidirektionales und solares Laden“, Mai 2025
- [37] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, J. von Rautenkranz: „Stromspeicher-Inspektion 2025“, Berlin, 2025
- [38] J. Weniger, T. Tjaden, N. Orth, S. Maier: „Performance Simulation Model for PV-Battery Systems (PerMod Version 2.2)“, *Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin*, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/permod/>
- [39] Fraunhofer ISE: „Synthetische Leistungsprofile für Wohnen und Gewerbe“. [Online]. Verfügbar unter: <https://synpro-lastprofile.de/>. [Zugegriffen: 20-Nov-2023]
- [40] 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
- [41] 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
- [42] C. Beckers, E. Hoedemaekers, A. Dagkilic, H. J. Bergveld: „Round-Trip Energy Efficiency and Energy-Efficiency Fade Estimation for Battery Passport“, in *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Milan, Italy, 2023, S. 1–6
- [43] ADAC e.V.: „Ladetarife für Elektroautos: Anbieter und Kosten im Vergleich“, *adac.de*, 04-Dez-2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/>. [Zugegriffen: 05-Dez-2024]