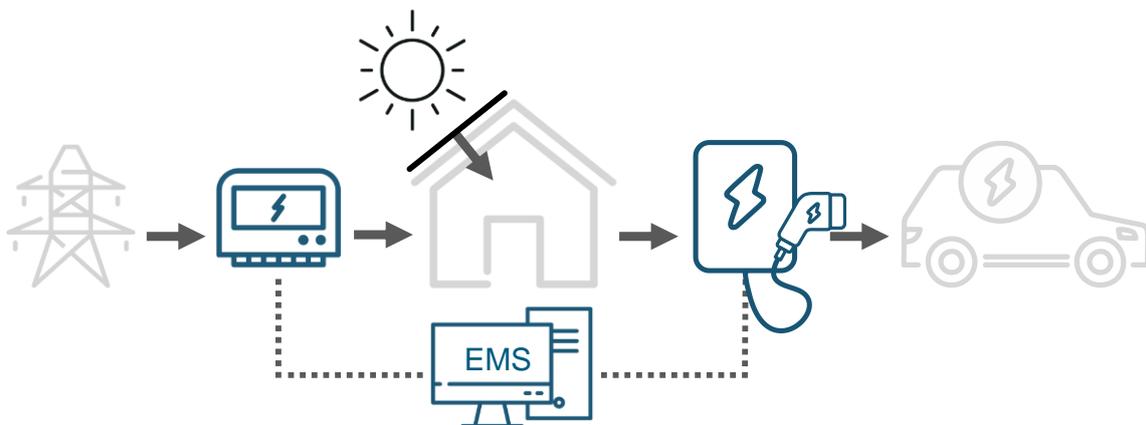


# Prüfrichtlinie

## Unidirektionales und Solares Laden Version 1.0



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Prüfrichtlinie

## Unidirektionales und Solares Laden Version 1.0

**Fraunhofer ISE**

Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann  
Dennis Freiberger  
Jan Körber

**HTW Berlin**

Nico Orth  
Joseph Bergner

**ADAC e.V.**

Matthias Vogt  
Michael Peukert

**Förderkennzeichen**

WBInspektion  
01MV23027 A und B

**Datum**

8. Mai 2025

**Kontakt**

Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg  
Telefon: +49 / 761 4588 – 5443  
E-Mail: [bernhard.wille-hausmann@ise.fraunhofer.de](mailto:bernhard.wille-hausmann@ise.fraunhofer.de)

<https://wallbox-inspektion.de>

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	<b>4</b>
<b>Begriffe und Formelzeichen</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>6</b>
1.1 Systemgrenze .....	6
<b>2 Prüfaufbau</b> .....	<b>8</b>
2.1 Stromnetz Modellierung.....	9
2.2 Haus-Emulation .....	9
2.3 Elektrofahrzeug-Emulation .....	10
2.4 Anforderungen an die Messgeräte und den Prüfstand.....	12
2.5 Prüfablauf.....	13
<b>3 Statische Prüfungen</b> .....	<b>14</b>
3.1 Stand-by-Verbrauch .....	14
3.2 Peripherieverbrauch .....	19
3.3 Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte .....	21
3.4 Regelgüte, Einschwingzeit und Totzeit.....	24
3.5 Phasenumschaltung zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb.....	28
<b>Anhang</b> .....	<b>32</b>
<b>A Beispiel Prüfbericht</b> .....	<b>33</b>
<b>1 Allgemeines</b> .....	<b>34</b>
1.1 Prüfling .....	34
1.2 Testumgebung .....	34
<b>2 Statische Prüfungen</b> .....	<b>35</b>
2.1 Stand-By Verbrauch .....	35
2.2 Peripherieverbrauch .....	36
2.3 Einschalten und maximale Betriebspunkte.....	37
2.4 Regelgüte .....	40
2.5 Phasenumschalten .....	45
<b>B Danksagung</b> .....	<b>48</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>49</b>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
<b>CP</b>	Control Pilot Kontakt
<b>TV</b>	Tastverhältnis (duty cycle)
<b>EMS</b>	Energiemanagementsystem
<b>EV</b>	Elektrofahrzeug (engl. Electric Vehicle)
<b>EVCC</b>	Fahrzeugladeregler (engl. Electric Vehicle Charge Controller)
<b>M</b>	Messpunkt
<b>mME</b>	Moderne Messeinrichtung
<b>iMSys</b>	Intelligentes Messsystem (engl. Smart Meter)
<b>NAP</b>	Netzanschlusspunkt
<b>OBC</b>	Ladegerät im Fahrzeug (engl. Onboard-Charger)
<b>PP</b>	Proximity Pilot bzw. Proximity Detection Kontakt
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>PWM</b>	Pulsweitenmoduliertes Signal
<b>Z</b>	Stromzähler
<b>DC</b>	Gleichstrom (engl. Direct Current)
<b>AC</b>	Wechselstrom (engl. Alternating Current)
<b>P-HIL</b>	Hard- und Softwareschnittstelle zur Kopplung von Softwaremodellen mit realen Leistungsflüssen (engl. Power Hardware in the Loop)

## Begriffe und Formelzeichen

Begriffe & Formelzeichen	Bedeutung
$I_{CP}$	Durch das TV auf dem CP-Kontakt vorgegebener maximal erlaubter Ladestrom für das Elektrofahrzeug
$I_{EV}$	Strom Elektrofahrzeug
$I_{EV, max}$	Maximal zulässiger Ladestrom des Elektrofahrzeugs
$I_{Haus}$	Strom sonstiger Verbrauch/Erzeugung (Verbrauch positiv)
$I_{max, PP}$	Maximal erlaubter Strom des Ladekabels, durch PP definiert
$I_{Netz}$	Strom Netzanschlusspunkt
$I_{WB, max}$	Maximaler Strom Wallbox
$M_{EV}$	Messung Elektrofahrzeug
$M_{Haus}$	Messpunkt sonstiger Verbrauch/Erzeugung (Verbrauch positiv)
$M_{KOMM}$	Messpunkt für die Kommunikation zwischen Wallbox und Fahrzeug
$M_{Netz}$	Messpunkt Netzanschlusspunkt
$P_{Deep-stand-by}$	Wirkleistung Deep-Stand-by gesamtes Wallboxsystem
$P_{Deep-stand-by, WB}$	Wirkleistung Deep-Stand-by der Wallbox (ohne Peripherie)
$P_{Eigenverbrauch}$	Eigenverbrauch des Wallbox im Betrieb
$P_{EV}$	Wirkleistung Elektrofahrzeug
$P_{Haus}$	Wirkleistung sonstiger Verbrauch/Erzeugung
$P_{Netz}$	Wirkleistung Netzanschlusspunkt (Bezug positiv)
$P_{Peri}$	Wirkleistung der Peripherieverbraucher
$P_{Stand-by}$	Wirkleistung Stand-by gesamtes Wallboxsystem
$P_{Stand-by, WB}$	Wirkleistung Stand-by der Wallbox (ohne Peripherie)
$P_{Verlust}$	Verlustwirkleistung Wallbox im Betrieb
$P_{WB, max}$	Maximale Wirkleistung Wallbox
$R_{PP}$	Widerstand zwischen PP und PE kodiert die maximale Strombelastbarkeit des Ladekabels
$t_{CP, set}$	Einstellzeit bis zum Erreichen der Sollwertvorgabe nach dem Startvorgang
$t_E$	Einschwingzeit bis zum Erreichen der Sollwertvorgabe im Betrieb
$t_{E, Phasenumschaltung}$	Einschwingzeit bis zum Erreichen der Sollwertvorgabe während der Phasenumschaltung
$T_{P, Phasenumschaltung}$	Pausenzeit zur Phasenumschaltung
$t_{mess}$	Messintervall zur Erfassung der Messgrößen
$t_{start}$	Zeit bis zum Start des Ladevorgangs
$t_T$	Totzeit bis zum Einstellen der Sollwertvorgabe im Betrieb
$t_{T, Phasenumschaltung}$	Totzeit bis zum Erreichen der Sollwertvorgabe während der Phasenumschaltung
$TV$	Tastverhältnis (duty cycle) des PWM-Signals auf CP-Kontakt
$t_{warten}$	Wartezeit bis zur Messung eines stabilen Ladestroms
$\Delta I_{CP}$	stationäre Regelabweichungen (vorzeichenbehaftet)
$U_{CP}$	Spitzenspannung des PWM-Signals auf dem CP-Kontakt

## 1 Einführung

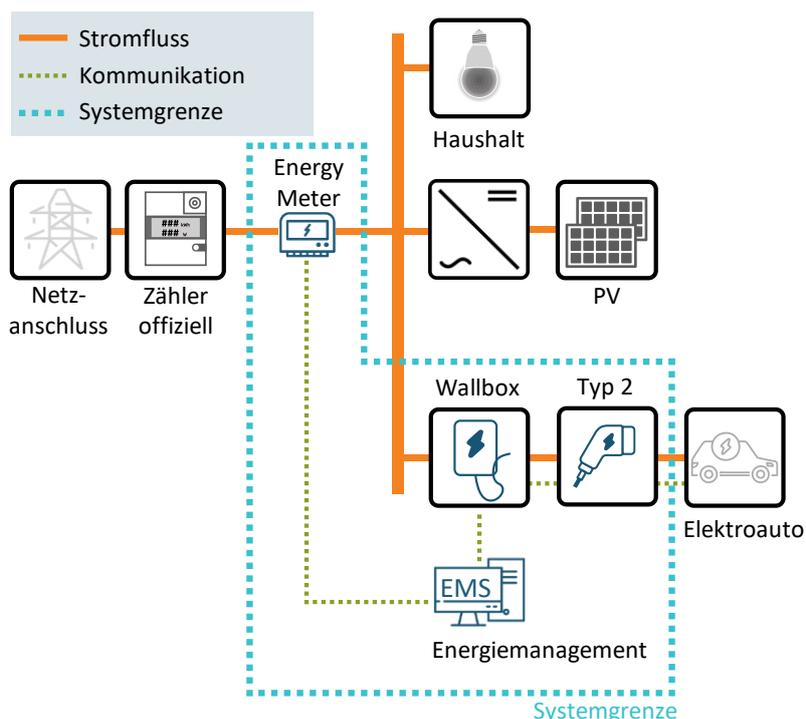
Das vorliegende Dokument ist ein Prüflitfadens zur einheitlichen und reproduzierbaren Charakterisierung zentraler Systemeigenschaften von gesteuerten unidirektionalen Ladelösungen für Elektrofahrzeuge im Privatbereich (auch als Wallbox bezeichnet). Ziel ist ein Qualitätsstandard für das sog. Überschussladen, das heißt ein gezieltes Laden des Fahrzeugs bei hoher Erzeugung durch die gekoppelte Photovoltaikanlage (PV). Im Fokus stehen neben dem Systemverbrauch im Betrieb und im Stand-by-Modus die Regelungseffizienz und Betriebseffekte, die beim solaren Laden von Elektrofahrzeugen eine zentrale Rolle spielen, wie z. B. reduzierte Leistungen und die Phasenumschaltung zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb.

Aus den Ergebnissen der beschriebenen Testverfahren lassen sich einerseits Datenblattangaben ableiten und Simulationsmodelle parametrisieren. Andererseits kann mit Hilfe eines mehrtägigen Kurztests eine anwendungsspezifische Bestimmung der Systemeffizienz erfolgen.

Hinweis: Der Prüflitfaden beschreibt ausschließlich Prüfroutinen für die technische Charakterisierung der Systemperformance. Die Messungen nach dem Leitfaden ersetzen keine Zertifizierungen nach nationalen und internationalen Normen und Sicherheitsstandards (u.a. IEC 61851, DIN IEC / TS 61439-7).

### 1.1 Systemgrenze

Der Leitfaden beschreibt die einheitliche Messung der Energieeffizienz und der Regelgüte für gesteuertes Laden von Ladelösungen für Elektrofahrzeuge. Abbildung 1 stellt schematisch das Heimenergiesystem dar, in das die Wallbox integriert ist. Um das solare Laden des Elektroautos mit einer Photovoltaikanlage (PV) über die Wallbox im Prüflitfaden abzubilden, wird in der Systemgrenze des Wallbox-Tests der zusätzliche Zähler bzw. Stromsensoren am Netzanschlusspunkt (NAP) sowie das Energiemanagementsystem (EMS) mitberücksichtigt. Für den Test gelten die übrigen Komponenten, wie z.B. stationäre Batterien, des Hauses als nicht beeinflussbar. Der Stromsensor steht hier stellvertretend für die Führungsgröße des gesteuerten Ladens. Die im Folgenden beschriebenen Komponenten sollen mit den Prüfungen hinsichtlich ihrer Qualität bewertet werden, das solar gesteuerte Laden zu ermöglichen.



**Abbildung 1:** Systemgrenze des Wallbox-Tests. Alle anderen Komponenten im Haus werden als nicht beeinflussbar angenommen.

## Stromzähler

Es wird davon ausgegangen, dass am Netzanschlusspunkt ein dedizierter Stromzähler (häufig auch Energy Meter genannt) installiert ist. Dieser ist häufig als zusätzlicher Zähler hinter dem abrechnungsrelevanten offiziellen Stromzähler (Smart Meter auch intelligentes Messsystem (iMSys) bzw. moderner Messeinrichtung (mME)) installiert. In vielen Fällen ist er mit klemmbaren Stromwandlern ausgeführt. Dieses System misst die residuale Last des Hausanschlusses, also die Haushaltslast abzüglich aller Erzeugungsleistung, welche als Regelgröße für das solare Laden im Energiemanagement genutzt wird.

## Wallbox

Die Wallbox bildet die Schnittstelle zwischen dem Stromnetz und dem Elektrofahrzeug. Im Kontext des solaren Ladens ist ihre Kernaufgabe die Vorgabe eines maximalen Ladestroms an das Fahrzeug zu kommunizieren und den Ladevorgang durch Freigabe des Ladestroms zu initiieren. Sofern es technisch umgesetzt ist, kann die Wallbox im Falle des AC-Ladens das Umschalten zwischen 1- und 3-phasigen Laden steuern.

## Energiemanagement

Die Bewertung der residualen Last sowie das Übersetzen und Erstellen von Steuersignalen erfolgt über ein Energiemanagementsystem (EMS). Dieses kann in der Wallbox integriert oder extern ausgeführt sein. Darüber hinaus bietet das Energiemanagement das Interface zu den Nutzenden, so dass Ladevorgaben Berücksichtigung finden können.

Generell beinhaltet die Prüfung einen Systemtest für ein vom Hersteller empfohlenes Wallbox-System, bestehend aus zusätzlichem Stromzähler am NAP, Energiemanagement und Wallbox, für den Anwendungsfall „solares Laden“. Der Fokus der Prüfungen liegt auf der Bewertung der Effizienz und der Regelqualität rund um das solare Laden. Für die Prüfung sollen die Standardeinstellungen des Herstellers genutzt werden.

Häufig sind mehrere Modi in der Parametrierung verfügbar und die Benennung zum „solaren Laden“ nicht eindeutig. Hier ist der Lademodus zu wählen, der ein reines „solares Überschussladen“ verspricht. Es sind die Schwellwerte der Standardeinstellung zu wählen. Der gewählte Wallbox-Modus und dessen Parametrierung sind im Prüfprotokoll zu vermerken.

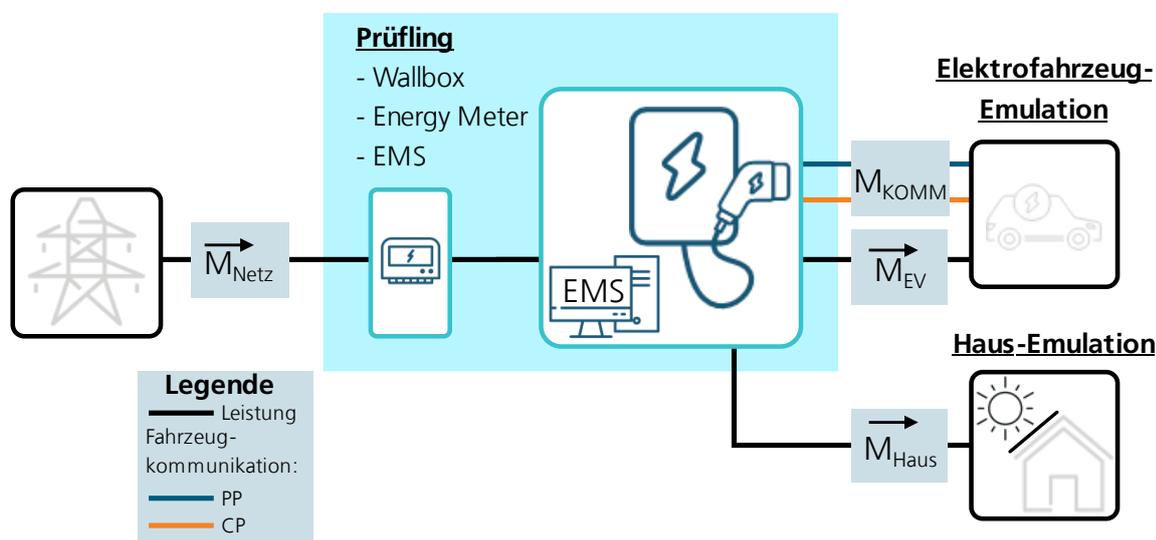
In Ausnahmefällen kann es notwendig werden, Einstellungen zu verändern (z.B. Aktivieren des solaren Ladens). In diesem Fall sind diese im Prüfbericht zu benennen und ggf. mit dem Hersteller abzustimmen. Empfiehlt ein Hersteller keine spezifischen Geräte für die Ausführung, sind vom Prüfinstitut ein Zähler und ein EMS auszuwählen und im Prüfbericht zu dokumentieren. Details und Beispiele für die Dokumentation sind im Beispiel Prüfbericht in Anhang A zusammengefasst.

## 2 Prüfaufbau

Im Folgenden wird der Aufbau für die Wallbox-Prüfung detailliert beschrieben. Hierfür werden die folgenden Messpunkte vorgegeben:

- $M_{\text{Netz}}$ : Netzanschlusspunkt zur Messung des Netzaustauschs
- $M_{\text{EV}}$ : Anschlusspunkt des Ladesteckers zur Messung der Leistungsaufnahme des E-Fahrzeuges
- $M_{\text{Haus}}$ : Messung des Leistungsbezugs bzw. der Leistungseinspeisung der Solaranlage des Haushalts ohne Elektrofahrzeug
- $M_{\text{KOMM}}$ : Erfassung des CP und PP Signals

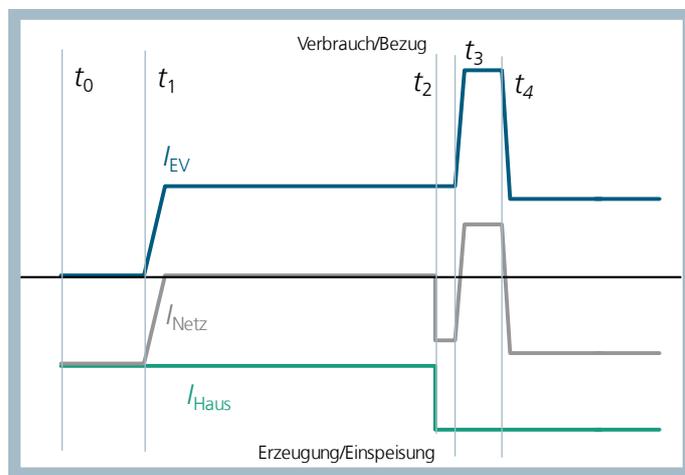
Ob alle Messpunkte für die Analyse benötigt werden, hängt von der jeweiligen Prüfung und vom Systemkonzept ab. Der in Abbildung 2 skizzierte Prüfaufbau soll die Messung in Bezug auf die Effizienz rund um den Prüfling ermöglichen. Das CP und PP-Signal werden in der Fahrzeug-Emulation ausgewertet. Sie ist in Abschnitt 2.3 beschrieben.



**Abbildung 2:** Vollständiger Prüfaufbau für die Prüfungen der unidirektionalen, solaren Ladelösung mit den Messpunkten  $M_{\text{Netz}}$ ,  $M_{\text{EV}}$  und  $M_{\text{Haus}}$ ,  $M_{\text{KOMM}}$  (die Pfeilrichtung definiert positive Leistungsflüsse)

An den Messpunkten erfolgt die Strom-, Spannungs- bzw. Leistungsmessung für den Netzaustausch  $P_{\text{Netz}}$ , das Elektrofahrzeug  $P_{\text{EV}}$  und den Haushalt inklusive Elektrofahrzeug  $P_{\text{Haus}}$ . Die in Abbildung 2 gezeigte Pfeilrichtung definiert positive Leistungsflüsse entsprechend dem Verbraucherzählpeilsystem. Um die Ströme an den Systemgrenzen zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 3 einen exemplarischen Verlauf der Ströme  $I_{\text{Netz}}$ ,  $I_{\text{EV}}$  und  $I_{\text{Haus}}$ :

- Zum Zeitpunkt  $t_0$  speist die PV-Anlage einen Strom ein,  $I_{\text{Haus}}$  ist daher negativ. Der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  ist nahezu identisch, weicht jedoch um den Stand-by-Verbrauch der Wallbox ab.
- In  $t_1$  aktiviert die Wallbox die Ladung und bezieht einen höheren Strom, so dass der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  um den Wallboxstrom  $I_{\text{EV}}$  ansteigt, während der Strom  $I_{\text{Haus}}$  identisch bleibt.
- Mit dem höheren eingespeisten Strom  $I_{\text{Haus}}$  zum Zeitpunkt  $t_2$ , wird der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  wieder negativ. Erhöht sich z. B. nach einem Eingriff des EMS der Wallboxstrom  $I_{\text{EV}}$  steigt auch der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  an,
- wie in  $t_3$  zu sehen. Der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  kann auch positive Werte annehmen, wenn die Last größer als die Erzeugung ist.
- Wird der Wallboxstrom  $I_{\text{EV}}$  wieder reduziert ( $t_4$ ), fällt auch der Netzstrom  $I_{\text{Netz}}$  wieder in den negativen Bereich und weist auf eine Einspeisung hin. Da über die Messungen auch Stand-by-Verluste erfasst werden, ist die in Tabelle 3 zusammengefasste Genauigkeit zu berücksichtigen, die auch im Prüfbericht zu dokumentieren ist.



**Abbildung 3:** Exemplarischer Verlauf der Ströme  $I_{\text{Netz}}$ ,  $I_{\text{EV}}$  und  $I_{\text{Haus}}$ . Ströme unterhalb der Nulllinie bedeuten Erzeugung/Einspeisung, oberhalb Verbrauch/Netzbezug.

## 2.1 Stromnetz Modellierung

Für alle Messungen wird davon ausgegangen, dass die Prüfungen an einem hinreichend starken Netzanschlusspunkt durchgeführt werden. Das heißt die Netzspannung ist in einem Bereich von  $\pm 2\%$  um die Nennspannung konstant. Die mittlere Netzspannung ist für die einzelnen Prüfungen zu erfassen und zu dokumentieren.

Ist die Netzspannung nicht hinreichend konstant, wird der Einsatz eines Netzsimulators empfohlen. Nur mit einer konstanten Spannung kann sichergestellt werden, dass alle Prüfung ein repräsentatives Ergebnis liefern. Der Verlauf der Netzspannung ist zu beobachten und bei Bedarf grafisch in Abhängigkeit der Belastung zu dokumentieren.

Da das EMS der Wallbox auf die am Netzanschlusspunkt gemessene Residuallast regelt, ist es entscheidend, die Reaktionszeiten dieses Stromsensors bzw. Energy Meter mit im Prüfaufbau zu betrachten und den originalen Sensor zu nutzen. Um einen Wert für die Residuallast nachzubilden wird ein entsprechender Überschuss bzw. mit Lastemulator eingestellt.

## 2.2 Haus-Emulation

Da in einem Haushalt mit einer Solaranlage sowohl Bezug als auch Einspeisung möglich ist, ist die Emulation des Haushalts als steuerbare elektrische Senke/Quelle auszuführen. Die Haus-Emulation muss ein Steuersignal mit einer gewissen Güte umsetzen können. Die Parameter hierfür sind in Tabelle 1 genannt.

Wallboxen kommunizieren über den CP-Kontakt an das Elektrofahrzeug den maximal erlaubten Ladestrom  $I_{\text{CP}}$ , der über das Tastverhältnis definiert ist. Ein EMS in Verbindung mit einem Zähler definiert diesen Strom entsprechend der Messung am NAP. Um für die Prüfungen die Spannungsabhängigkeit des Sollwertes zu vermeiden, soll die Erzeugung bzw. der Verbrauch des Hauses über den Strom und nicht über einen Leistungswert vorgegeben werden.

**Tabelle 1:** Anforderungen für die Haus-Emulation mit elektrischer Last

Parameter	Wert und Einheit	Kommentar
Stationäre Regelgüte	$\pm 250$ W	
Totzeit	0,1 s	
Einschwingzeit 90 %	0,2 s	
Leistungsbereich	$\pm 25$ kVA	

## 2.3 Elektrofahrzeug-Emulation

Für die Prüfung von Wallboxen ist es essenziell mit einer zuverlässigen Emulation des Elektrofahrzeuges das Ladeverhalten zu steuern. Im Projekt WBInspektion [1] wurde die Power Hardware-in-the-Loop (P-HIL) Simulation des Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen modelliert. Für Details sei auf die eigene Dokumentation des digital Fahrzeugzwillings „ev twin“ [2] hingewiesen. In diesem Prüfleitfaden sind die wichtigsten Bausteine sowohl hardware- als auch softwareseitig beschrieben, um einen Ladevorgang mit realem Leistungsfluss zu emulieren.

### 2.3.1 Technischer Hintergrund

Um die Wallbox mit dem modellierten Elektrofahrzeug zu verknüpfen, ist ein Hardware-Interface erforderlich. Dieses stellt im Wesentlichen die Kommunikation gemäß IEC 61851-1 zwischen Fahrzeugladeregler (EVCC, engl. Electric Vehicle Communication Controller) und Wallbox her. Abbildung 4 stellt das Hardware-Interface, den Anschluss der Kontakte CP (Control Pilot), PP (Proximity Pilot) und den Leistungsfluss dar, die für eine Prüfung zu emulieren sind. Zwischen Wallbox und Fahrzeug findet die Kommunikation über den CP-Kontakt statt. Die Basis ist die Signalisierung nach IEC 61851-1. Für Details bzgl. der Auswertung von CP und PP sei auf die IEC 61851-1 verwiesen [3].

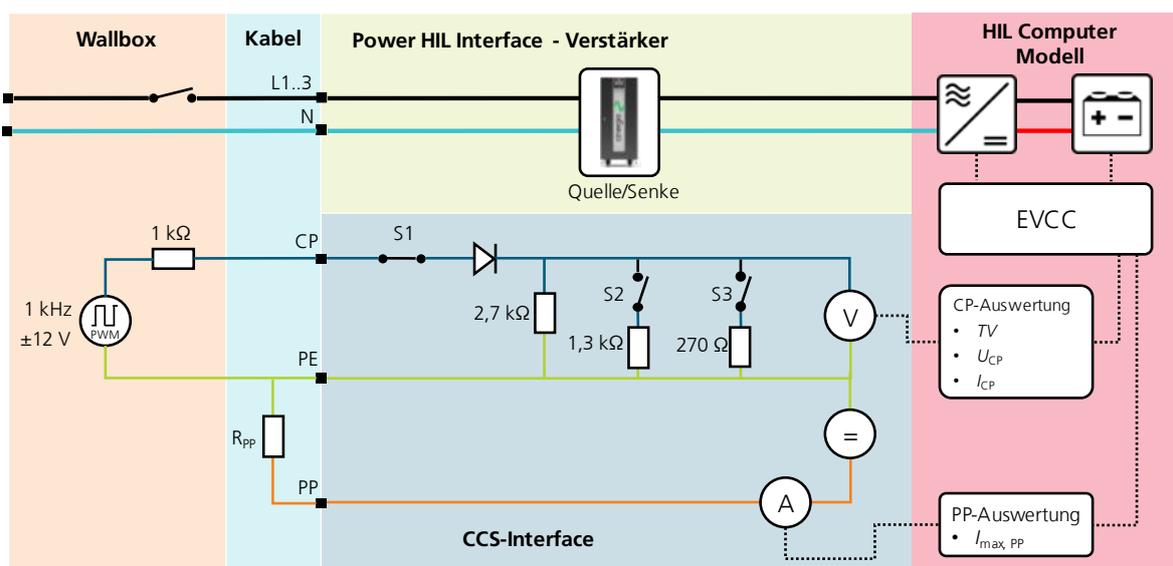
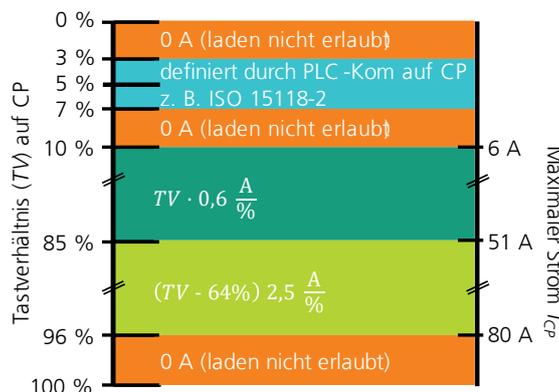


Abbildung 4: Hardware-Aufbau zum Anschluss der Wallbox gemäß IEC 61851-1 [3]

Sobald das Elektrofahrzeug mit der Wallbox verbunden wird (S1 geschlossen), misst das Fahrzeug auf dem CP-Kontakt ein pulswidenmoduliertes (PWM) Signal. Über das Tastverhältnis  $TV$  (engl. Duty cycle) des PWM-Signals kommuniziert die Ladestation dem Fahrzeug, welcher maximale Ladestrom  $I_{CP}$  freigegeben wird. Welcher Strom tatsächlich bezogen wird, hängt in der Praxis vom Fahrzeug ab. Abbildung 5 visualisiert die Auswertung des  $TV$ . Für das Standard-Pilotsignalgesteuerte Laden ist gemäß IEC 61851-1 ein Bereich zwischen 10 % und 96 % zulässig. Abbildung 5 verdeutlicht auch, dass in diesem Fall nur ein minimaler Ladestrom von 6 A durch die Wallbox vorgegeben werden kann.



**Abbildung 5:** Maximaler Strom  $I_{CP}$  definiert durch das Tastverhältnis  $TV$  auf dem CP-Kontakt

Seine Ladeanforderung kommuniziert das Elektrofahrzeug durch das Schließen des Schalters S2, die Spitzenspannung des PWM-Signals auf dem CP-Kontakt fällt von ca. 9 V (Systemstatus B) auf rund 6 V und gibt das Laden frei. Ist in der Wallbox das Laden freigegeben, beginnt die Ladung und Spannung wird aktiviert. Der Systemstatus C ist erreicht. In Abhängigkeit des in der Wallbox generierten PWM-Signals auf CP (PWM messbar oder nicht) und des Schaltzustandes auf der Fahrzeugseite (eingesteckt, Schalter S2) ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Systemzustände für die Ladestation. Diese Systemzustände sind relevant in der Vorbereitung der jeweiligen Prüfung, aber auch für die Vermessung des Stand-by Verbrauchs.

**Tabelle 2:** Mögliche über den CP-Kontakt spezifizierte Systemzustände der Wallbox gemäß IEC 61851-1

Systemzustand		Wallbox		Elektrofahrzeug			Wallbox bereit	
		Spitzenwert $U_{CP}$	PWM Status	Angeschlossen	S2	S3		
A1	Leerlauf	12 V	Aus	nein	n. relevant		nein	
A2	Leerlauf bereit	12 V	An		ja	offen	offen	ja
B1	angeschlossen	9 V	Aus	ja	zu	zu	nein	
B2	angeschlossen PWM	9 V	An				ja	
C1	ladebereit	6 V	Aus				nein	
C2	ladebereit PWM	6 V	An				ja	
D1	Ventilation	3 V	Aus		nein			
D2	Ventilation PWM	3 V	An		ja			
E	Fehler	0 V	Aus		n. relevant	n. relevant		nein
F	Ungültig	-12 V	Aus		n. relevant	n. relevant		nein

Vor dem Starten des Ladevorgangs im Fahrzeug muss der Fahrzeugladeregler als zusätzliche Restriktion die Strombelastbarkeit des Ladekabels beachten. Diese wird über einen Widerstand  $R_{PP}$  am PP-Kontakt codiert. Für die maximale Strombelastbarkeit des Ladekabels  $I_{max, PP}$  sind folgende Werte vorgesehen:

$$I_{max, PP} = \begin{cases} 63 \text{ A} & 80 \Omega \leq R_{PP} < 140 \Omega \\ 32 \text{ A} & 164 \Omega \leq R_{PP} < 308 \Omega \\ 20 \text{ A} & 400 \Omega \leq R_{PP} < 936 \Omega \\ 13 \text{ A} & 1100 \Omega \leq R_{PP} < 2460 \Omega \\ 0 \text{ A} & R_{PP} < 60 \Omega \text{ || } R_{PP} > 2200 \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Der Fahrzeugladeregler kann einen Strom  $I_{EV} \leq \min(I_{CP}, I_{max, PP}, I_{EV, max})$  in seinem integrierten Ladegerät (OBC, engl. On-board charger) einstellen. Über eine Spannungsmessung erkennt der Fahrzeugladeregler, ob 1- oder 3-phasig geladen wird und welche Phasen des OBC aktiviert werden müssen. Im Modell wird dieser Strom über den Verstärker in Abbildung 4 in der Fahrzeug-Emulation „ev twin“ eingestellt.

### 2.3.2 Parametrierung Fahrzeug-Emulation

Wichtigste Voraussetzung für die Wallboxprüfungen ist das Starten des Ladevorgangs im Fahrzeug. In allen Prüfungen darf, sofern nichts anderes vermerkt ist, vorgegeben werden, dass der Schalter S2 immer geschlossen ist. Das heißt: Das Fahrzeug startet immer im Zustand C, sobald es eingesteckt wird.

Zusätzlich muss im Fahrzeug für jede Prüfung ein Ladestrom  $I_{EV} \leq I_{EV, max}$  vorgegeben werden. Wenn im Folgenden die maximale Ladeleistung oder der maximale Ladestrom des Emulators definiert wird, so ist die maximale Ladeleistung im Emulator auf die nach Hersteller angegebene maximale Leistung der Wallbox  $P_{WB, max}$  (z. B. 11 kW – 16 A, 22 kW – 32 A) einzustellen.

## 2.4 Anforderungen an die Messgeräte und den Prüfstand

Mit den Prüfungen sollen die Spannungen und Ströme an den drei Messpunkten  $M_{Netz}$ ,  $M_{EV}$ ,  $M_{Haus}$  erfasst werden. Der Messung am NAP ( $M_{Netz}$ ) kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier auch der Stand-by Verbrauch erfasst wird. Tabelle 3 fasst die erforderlichen Genauigkeiten für die Strom- und Spannungsmessungen zusammen.

Die verwendete Messtechnik (Stromwandler, Shunts, Geräte etc.) inklusive ihrer Genauigkeiten sind im Prüfbericht mit Verweis zum Datenblatt anzugeben.

**Tabelle 3:** Anforderungen an die Genauigkeit für die Messungen

Messung	Kriterien	
Allgemein	Abtastung	> 5 kHz
	Messwerterfassung	> 100 ms
	Synchronität der Messeinrichtung	20 ms
Strommessung	Messbereich	$\pm 50$ A (bzw. $35 A_{rms}$ )
	Genauigkeit	0,2 % (Messbereich)
	Typ	Wechselstrom, 3-phasig
Strommessung Stand-by- und Peripherieverbrauch	Messbereich	$\pm 5$ A
	Genauigkeit	0,1 % (Messbereich)
	Typ	Wechselstrom, 3-phasig
Spannungsmessung	Messbereich	$\pm 400$ V (bzw. $250 V_{rms}$ )
	Genauigkeit	0,2 % (Messbereich)
	Typ	Wechselstrom, 3-phasig

## 2.5 Prüfablauf

Die Vermessungen des Prüflings teilen sich in zwei verschiedene Teilprüfungen auf. Die statischen Prüfungen haben das Ziel, einzelne Verbräuche, Zeiten und Funktionalitäten zu erfassen. Diese können später für einen Systemvergleich, als Datenblattangaben oder auch für detaillierte Simulationen herangezogen werden. In den Zeitreihen-Prüfungen steht die Bewertung eines Referenzprofils im Vordergrund.

Die in Tabelle 4 beschriebene Reihenfolge des Prüfablaufs wird empfohlen. Wenn Randbedingungen und Soll-Vorgaben der nachfolgenden Kapitel, bedingt durch das Systemverhalten oder die technischen Möglichkeiten des Prüfverantwortlichen, nicht eingehalten werden können, ist dies für jeden auftretenden Fall stets im Prüfbericht zu dokumentieren.

**Tabelle 4:** Empfohlene Reihenfolge des Prüfablaufs und Verweis zu den Unterkapiteln

Prüfung	Verweis
Stand-by-Verbrauch	3.1
Peripherieverbrauch	3.2
Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte	3.3
Regelgüte, Einschwingzeit und Totzeit	3.4
Phasenumschaltung zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb	3.5

Die folgenden Messvorschriften sind so aufgebaut, dass zunächst die "Prüfbedingungen" definiert werden. Darauf aufbauend wird die "Durchführung der Messung" inklusive der Messpunkte erläutert. Im Abschnitt "Ergebnisse" sind die Rahmenbedingungen der Prüfung, Auffälligkeiten und die Testergebnisse entsprechend der Vorgaben aufzulisten. Die vorgeschlagenen Tabellen sind gegebenenfalls zu erweitern. Der jeweils letzte Abschnitt der einzelnen Prüfung "Zusammenfassung" fasst die jeweiligen zentralen Messergebnisse für eine Übersicht zusammen. Im Anhang A ist ein Beispielprüfbericht zur besseren Übersicht dargestellt.

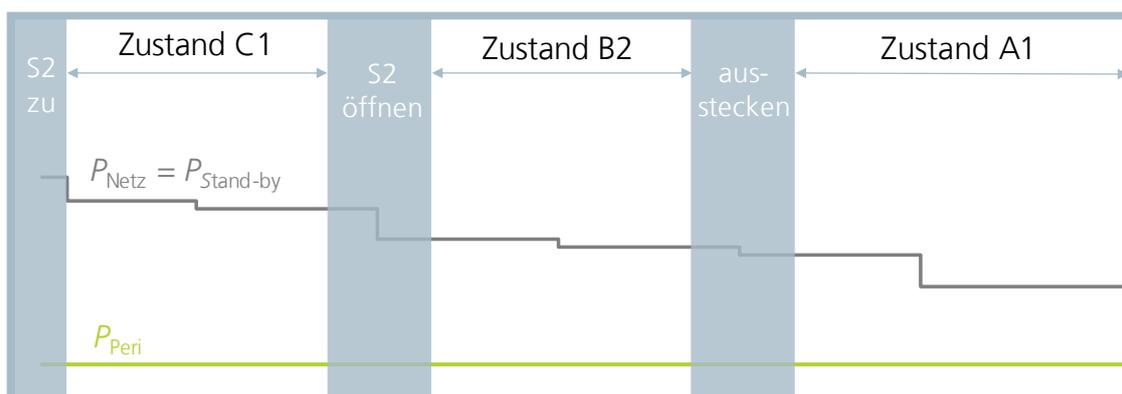
### 3 Statische Prüfungen

#### 3.1 Stand-by-Verbrauch

Den größten Teil des Jahres befindet sich die Wallbox im Bereitschaftsbetrieb. Dabei kann das Fahrzeug mit der Ladelösungen ladebereit verbunden sein oder nicht. Unter Umständen kann es bei einzelnen Systemen mehrere, unterschiedliche Stand-by-Modi geben. Grundsätzlich sind die Übergangsbedingungen zwischen den verschiedenen Betriebszuständen vom Hersteller anzugeben, vom Prüfinstitut zu bestätigen und im Prüfbericht festzuhalten. Diese Messung erfasst den Stand-by-Verbrauch des in Abbildung 2 beschriebenen Prüflings, bestehend aus Wallbox, Energy Meter und EMS und ggf. zusätzlich notwendigen Peripheriekomponenten.

##### 3.1.1 Prüfbedingungen

Innerhalb der Prüfung des Stand-by-Verbrauchs der Wallbox werden drei Messungen durchgeführt und somit verschiedene typische Betriebszustände unterschieden. Hierbei orientieren sich die Prüfungen an den Systemzuständen gemäß Tabelle 2. Für den Stand-by-Verbrauch sind die Zustände C1 (ladebereit), B2 (nicht ladebereit) und A1 (Fahrzeug nicht eingesteckt, Leerlauf) relevant, die in den einzelnen Messungen einzustellen sind. Abbildung 6 stellt schematisch den erwarteten Verlauf der Stand-by Leistung  $P_{\text{Stand-by}}$  nach Anschließen des ladebereiten Fahrzeuges in grau dar. Zusätzlich ist der konstante Verlauf der Leistung  $P_{\text{Peri}}$  der Peripherieverbraucher (vgl. Abschnitt 3.2) in grün visualisiert.



**Abbildung 6:** Schematischer Ablauf der Stand-by-Messung bei einem Übergang zwischen den verschiedenen Systemzuständen C1 (Fahrzeug eingesteckt, ladebereit), B2 (Fahrzeug eingesteckt, nicht ladebereit), A1 (Fahrzeug nicht eingesteckt). In allen Zuständen soll geprüft werden, ob ein Deep Stand-by eingestellt wird.

Nach Herstellen der Ladebereitschaft (schließen von S2) geht die Wallbox in den Zustand C1, sofern kein Überschuss zum Laden vorhanden ist. Die Wallbox kann jederzeit durch Aktivierung eines PWM-Signals ein Laden initiieren.

Durch Öffnen des Schalters S2 kann der Nutzer fahrzeugseitig die Ladefreigabe beenden, z.B. weil der gewünschte Ladezustand erreicht ist. Die Wallbox wechselt in den Zustand B2. Damit ist sie zwar grundsätzlich ladebereit, jedoch kann ein Ladevorgang nur starten, wenn die Freigabe fahrzeugseitig wieder aktiviert wird.

Wird das Fahrzeug schließlich vollständig getrennt bzw. ausgesteckt, wechselt die Wallbox in den Zustand A1. Besonders in diesem Systemzustand wird davon ausgegangen, dass sich bei einigen Systemen mit der Zeit, z.B. durch das Abschalten von LEDs, ein Deep Stand-by einstellt (siehe auch Definition in Abbildung 7). Für alle Systemzustände sollte geprüft werden, ob sich ein zusätzlicher Stand-by-Modus aktiviert.

## Elektrofahrzeug:

### Messung C1: Stand-by mit Fahrzeug (ladebereit)

- Die Wallbox befindet sich im Systemzustand C1, d.h. die Wallbox generiert kein PWM-Signal auf CP und kann jederzeit einen Ladevorgang freigeben, z.B. wenn ein Überschuss vorliegt. In diesem Fall ist das Elektrofahrzeug ladebereit, d.h. es liegt eine Ladeanforderung durch den Nutzer vor.
- Während der Prüfung ist das Elektrofahrzeug mit der Wallbox über das Ladekabel verbunden. Das Fahrzeug ist ladebereit (S2 geschlossen).

### Messung B2: Stand-by mit Fahrzeug (nicht ladebereit)

- Die Wallbox befindet sich im Systemzustand B2, d.h. die Wallbox generiert ein PWM-Signal auf CP und kann jederzeit einen Ladevorgang freigeben. In diesem Fall wurde das Laden durch das Elektrofahrzeug beendet, da z. B. keine Ladeanforderung durch den Nutzer vorlag.
- Während der Prüfung ist das Elektrofahrzeug mit der Wallbox über das Ladekabel verbunden. Das Fahrzeug ist nicht ladebereit (S2 offen).

### Messung A1: Stand-by ohne Fahrzeug

- Die Wallbox befindet sich im Systemzustand A1, d.h. die Wallbox generiert kein PWM-Signal auf CP und ist nicht bereit für ein Laden.
- Während der Prüfung ist das Elektrofahrzeug nicht mit der Wallbox verbunden.

### Ermittlung Deep-Stand-by

- Einige Wallboxen haben im Leerlauf-Betrieb eine höhere Leistungsaufnahme, reduzieren diese jedoch nach einer bestimmten Zeit, solange keine weitere Ladung initiiert wird.
- Aus diesem Grund ist für alle zuvor beschriebenen Systemzustände der Wallboxen zu ermitteln, ob die Wallbox in einen Deep-Stand-by geht. Hierzu muss sich Wallbox und ggf. auch das Fahrzeug mindestens 30 Minuten stabil im jeweiligen Systemzustand befinden. Es wird davon ausgegangen, dass die Wallbox spätestens nach Ablauf dieser Zeit in einen Deep-Stand-by umschaltet oder nicht, weil ein solcher Modus nicht implementiert ist. Dieser Zustand stellt eine Adaption einer Ruhephase dar (beispielsweise in der Nacht oder im Rahmen einer, auf den Ladebefehl wartenden Ladeplanung). Abbildung 7 stellt den erwarteten Verlauf schematisch dar.

## Netzanschlusspunkt:

### Messung C1, B2, A1

- a. Für alle Varianten der Stand-by-Messungen gilt, dass keine Last bzw. Erzeugung angeschlossen ist. Es gilt  $I_{\text{Haus}} = 0 \text{ A}$  am Messpunkt  $M_{\text{Haus}}$ . Dies ist beispielsweise durch Trennung vom Versuchsaufbau sicherzustellen.
- b. Weiterhin gilt für alle Fälle, dass das Elektrofahrzeug keine Leistung austauschen darf. Der Strom  $I_{\text{EV}}$  am Messpunkt  $M_{\text{EV}}$  beträgt  $0 \text{ A}$ .
- c. Über den Messpunkt  $M_{\text{Netz}}$  kann die momentane Stand-by-Leistung des Gesamtsystems ermittelt werden.

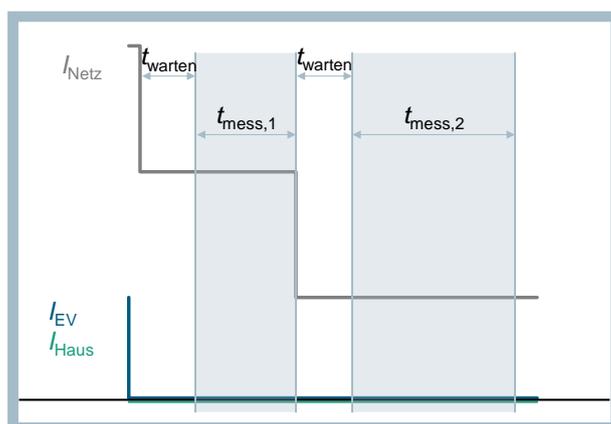
## Wallbox:

### Messung C1, B2, A1

- Die Wallbox befindet sich im jeweils vorgesehenen Systemzustand.
- In allen Stand-by-Varianten befindet sich die Wallbox in der typischen Betriebsweise für solares Überschussladen. Das heißt sie ist mit dem Energy Meter am Netzanschlusspunkt verbunden. Sollte der Hersteller eine Herstellerplattform anbieten, ist die Wallbox mit der Herstellerplattform und mit dem Internet verbunden. Jedoch ist in allen Stand-by-Varianten keine aktive Verbindung zum Beispiel vom Mobiltelefon vorgesehen.

### 3.1.2 Durchführung der Messung

Die nachfolgende Liste beschreibt die chronologische Vorgehensweise der Messung. Für die Auswertung in Tabelle 6 muss die Messung einmal erfolgen. Wie in Abbildung 7 visualisiert, startet die Stand-by Messung mit dem Beenden eines Ladevorgangs bzw. dem Herstellen des definierten Zustandes. Nach einer Wartezeit  $t_{\text{warten}}$  wird über den Zeitraum  $t_{\text{mess},1}$  die Stand-by-Aufnahme  $I_{\text{Netz}}$  gemessen. Stellt sich ein Deep Stand-by ein, wird nach einer erneuten Wartezeit zusätzlich die Deep-Stand-by-Aufnahme erfasst.



**Abbildung 7:** Schematischer Ablauf der Stand-by-Messung bei einem Übergang der Wallbox in einen Deep-Stand-by-Modus. Die Messungen beginnen nach dem Warten auf einen eingeschwungenen Zustand. Die erste Messung erfolgt bis das System in einen Modus mit verringerter Leistungsaufnahme übergeht (Deep-Stand-by). Nach dem Warten auf einen eingeschwungenen Zustand, wird die zweite Messung gestartet.

#### Messpunkte

Bei den Messungen sind für jeden Stand-by-Betrieb die folgenden Größen zu erfassen:

- Erfassen der Größen  $I_{\text{Netz}}$  und  $P_{\text{Netz}}$  für die jeweils angegebene Dauer und Mittelung. Es sind die minimalen, maximalen und mittleren Werte anzugeben.
- Überwachung von  $I_{\text{Haus}} = 0 \text{ A}$  und  $I_{\text{EV}} = 0 \text{ A}$  über die Versuchsdauer.

#### Vorbereitung

1. Haus-Emulation deaktivieren:  $I_{\text{Haus}} = 0 \text{ A}$
2. Fahrzeug-Emulation: Netzteil in der E-Fahrzeug Emulation ist nicht angeschlossen,  $P_{\text{EV}} = 0 \text{ W}$

Es ist vorgesehen die Prüfung in der Reihenfolge Variante C1, B2 und A1 durchzuführen.

#### Messung C1: Stand-by mit Fahrzeug (ladebereit)

1. Sicherstellen, dass sich Wallbox im Systemzustand C1 befindet.
  - a. Beendigung eines Ladevorganges.
  - b. Deaktivieren der Ladebereitschaft der Wallbox, z. B. keine Überschusseinspeisung (Haus-Emulation deaktivieren und trennen).
2. Sicherstellen, dass der Ladestecker mit dem Elektrofahrzeugemulator verbunden ist.
3. Herstellerangaben befolgen, sodass der Stand-by-Modus der Wallbox aktiv wird. Wenn möglich: Sichtprüfung (z. B. anhand einer LED-Anzeige), ob sich Wallbox im Stand-by-Betrieb befindet.
4. warten auf einen eingeschwungenen Zustand, jedoch mindestens 2 Minuten
5. Messung der Stromaufnahme  $I_{\text{Netz}}$  über einen Zeitraum von 30 Minuten oder bis zum Eintritt in den Deep-Standby.
6. Optional wenn Deep-Standby erreicht: Messung der Stromaufnahme  $I_{\text{Netz}}$  über einen Zeitraum von 15 Minuten im Deep-Stand-by, nach einer Wartezeit von wiederum 2 min.

#### Messung B2: Stand-by mit Fahrzeug (nicht ladebereit)

7. Sicherstellen, dass sich Wallbox im Systemzustand B2 befindet.
  - a. Deaktivieren der Ladebereitschaft im Fahrzeugemulator (öffnen von S2)
  - b. Aktivieren der Ladebereitschaft der Wallbox, z. B. über die App.

8. Sicherstellen, dass der Ladestecker mit dem Elektrofahrzeugemulator verbunden ist.
9. Weiter wie bei Variante C1 in den Punkten 3. bis 6.

Messung A1: Stand-by ohne Fahrzeug

10. Sicherstellen, dass sich Wallbox im Systemzustand A1 befindet.
  - a. Im Zustand B2 die Wallbox vom Fahrzeugemulator trennen.
  - b. Deaktivieren der Ladebereitschaft der Wallbox, z. B. über die App.
11. Sicherstellen, dass der Ladestecker nicht mit dem Elektrofahrzeugemulator verbunden ist.
12. Weiter wie bei Variante C1 in den Punkten 3. bis 6.

**3.1.3 Ergebnisse**

Die gemessenen Werte sind über den jeweiligen Messzeitraum zu mitteln. Zusätzlich sollen die Minimal- und Maximalwerte angegeben werden:

Hinweis: Bei mehreren Stand-by-Modi ist die Tabelle zu erweitern. Es ist die Dauer anzugeben, über die die Stand-by- bzw. Deep-Stand-by-Aufnahme erfasst wurde.

**Tabelle 5:** Rahmenbedingungen Stand-by-Messungen

<b>Betriebsmodus Wallbox</b>	
<b>Parametrisierung Wallbox</b>	
<b>Auffälligkeiten</b>	

**Tabelle 6:** Ergebnisse Stand-by-Verluste (Sb: Stand-by, d-Sb: deep-Stand-by)

Stand-by-Messung	Sb	d-Sb	Dauer [min]		$P_{\text{Netz}}$ [W]	$P_{\text{Haus}}$ [W]	$P_{\text{EV}}$ [W]	Anmerkungen	
Variante C1 mit Fahrzeug, Stand-by	x			Min					
				Mean					
				Max					
		x			Min				
					Mean				
					Max				
Variante B2 mit Fahrzeug, Stand-by	x			Min					
				Mean					
				Max					
		x			Min				
					Mean				
					Max				
Variante A1 ohne Fahrzeug, Stand-by	x			Min					
				Mean					
				Max					
		x			Min				
					Mean				
					Max				

### 3.1.4 Zusammenfassung

In Tabelle 7 werden die Ergebnisse aus Tabelle 6 zusammengefasst.

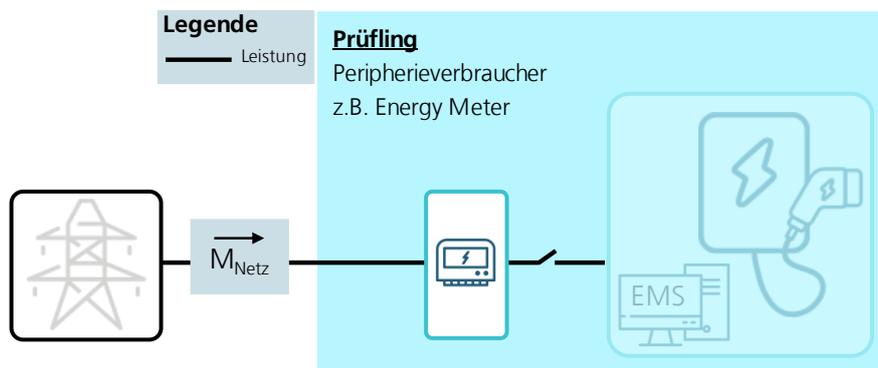
**Tabelle 7:** Zusammenfassung Stand-by-Verluste des Systems, bestehend aus Wallbox, Energy Meter und EMS und ggf. zusätzlich notwendigen Peripheriekomponenten

<b>KenngroÙe</b>	<b>mittlere Leistung [W]</b>	<b>Deep-Stand-by [ja/nein]</b>	<b>Umschaltzeit [s]</b>	<b>mittlere Leistung [W]</b>
C1: Stand-by mit Fahrzeug (ladebereit)				
B2: Stand-by mit Fahrzeug (nicht ladebereit)				
A1: Stand-by ohne Fahrzeug				

## 3.2 Peripherieverbrauch

Einige Wallboxen benötigen für den Betrieb zusätzliche Peripheriekomponenten (z. B. Leistungssensoren zur Erfassung der Residuallast, ein externes Energiemanagement oder eine Phasenumschaltbox). Die AC-Leistungsaufnahme dieser Geräte soll mit der im Folgenden beschriebenen Testmethodik separat erfasst werden. Ziel dieser Messung ist eine Einordnung bzw. Aufteilung des im vorherigen Test erfassten Stand-by-Verbrauchs.

Für diese Prüfung kann, wie in Abbildung 8 dargestellt, ein vereinfachter Aufbau aus der Prüfung des Stand-by-Verbrauchs genutzt werden. Über den Messpunkt  $M_{\text{Netz}}$  wird nur der zu prüfende Peripherieverbraucher versorgt und der Verbrauch erfasst.



**Abbildung 8:** Vollständiger Prüfaufbau für die Prüfungen des Peripherieverbrauchs. Es wird ausschließlich der Messpunkt für den Netzaustausch  $M_{\text{Netz}}$  genutzt. Die Wallbox selbst wird vom Strom getrennt.

Hinweise:

- Die hier beschriebenen Änderungen müssen im Prüfbericht dokumentiert werden.
- In einigen Fällen kann es vorkommen, dass der Peripherieverbraucher in einen sinnvollen Betrieb gebracht werden muss. Dies kann zum Beispiel auftreten, wenn das EMS im Energy Meter integriert ist. In diesem Fall muss eine aktive Kommunikation mit der Wallbox erstellt werden. Die Wallbox muss dann über einen externen Stromkreis versorgt werden.
- Sofern z. B. der Leistungssensor und das Energiemanagement in einzelnen Geräten und von der Wallbox unabhängig vorliegen, ist der Verbrauch der Produkte separat aufzuführen.

### 3.2.1 Prüfbedingungen

Gemäß Abbildung 8 sind sowohl Elektrofahrzeug als auch Haus-Emulation getrennt. Dies kann über das Öffnen der Sicherungsautomaten erfolgen. Es wird nur die Messung am Messpunkt  $M_{\text{Netz}}$  ausgewertet.

### 3.2.2 Durchführung der Messung

Die nachfolgende Liste beschreibt die chronologische Vorgehensweise der Messung. Für die Auswertung in Tabelle 8 muss die Messung einmal erfolgen.

#### Messpunkte

Bei den Messungen sind für jeden Peripherieverbraucher die folgenden Größen zu erfassen:

- Erfassen der Größen  $I_{\text{Netz}}$  und  $P_{\text{Netz}}$  für die jeweils angegebene Dauer und Mittelung. Es sind die minimalen, maximalen und mittleren Werte anzugeben.

#### Vorbereitung

1. Anschluss des Peripherieverbrauchers an  $M_{\text{Netz}}$
2. Sicherstellen, dass sich der Verbraucher in einem stabilen Betriebszustand befindet (siehe auch Hinweise in der Beschreibung)

#### Messung

1. Erfassung der Leistungsaufnahme  $P_{\text{Netz}}$  über einen Zeitraum von 10 Minuten.

### 3.2.3 Ergebnisse

**Tabelle 8:** Ergebnisse Peripherieverbrauch

Peripherieverbraucher	Dauer [min]		$P_{\text{Netz}}$ [W]	$P_{\text{Haus}}$ [W]	$P_{\text{EV}}$ [W]	Anmerkungen
Energy Meter	10	Min				
		Max				
		Mean				
z. B. Energiemanagement	10	Min				
		Max				
		Mean				
z. B. externe Phasenumschaltung	10	Min				
		Max				
		Mean				

### 3.2.4 Zusammenfassung

Für die Tabelle 9 Zusammenfassung des Peripherieverbrauchs  $P_{\text{Peri}} = \text{mean}(P_{\text{Netz}})$  sind die vermessenen Peripheriekomponenten aufzulisten und jeweils die mittlere Leistung über den Messzeitraum zu bestimmen.

**Tabelle 9:** Zusammenfassung Peripherieverbrauch

Kenngroße	$P_{\text{Peri}}$ [W]	Anmerkungen
Energy Meter		
z. B. Energiemanagement		
z. B. externe Phasenumschaltung		

Mit dem Peripherieverbrauch  $P_{\text{Peri}}$  lässt sich mit Hilfe der folgenden Formeln der isolierte Stand-by- $P_{\text{Stand-by, WB}}$  und Deep-Stand-by-Verbrauch  $P_{\text{Deep-Stand-by, WB}}$  der Wallbox bestimmen. Die Ergebnisse sind in die Tabelle 10 zu überführen.

$$P_{\text{Stand-by, WB}} = P_{\text{Stand-by}} - \sum P_{\text{Peri}} \quad (2)$$

$$P_{\text{Deep-Stand-by, WB}} = P_{\text{Deep-Stand-by}} - \sum P_{\text{Peri}} \quad (3)$$

**Tabelle 10:** Zusammenfassung des bestimmten Stand-by- und Deep-Stand-by-Verbrauchs der Wallbox ohne die Leistungsaufnahme der Peripheriekomponenten

Kenngroße		mittlere Leistung [W]	Anmerkungen
Stand-by-Verbrauch Wallbox	$P_{\text{Stand-by, WB}}$		
Deep-Stand-by-Verbrauch Wallbox	$P_{\text{Deep-Stand-by, WB}}$		

### 3.3 Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte

Mit der Prüfung des Einschaltens soll die grundsätzliche Funktionalität der Wallbox im Anwendungsfall solares Laden verifiziert werden. Gleichzeitig werden die maximalen Betriebspunkte, wie zum Beispiel der maximale Ladestrom, geprüft. Die Steuerung erfolgt über die Wirkkette Haus-Emulation, Zähler, EMS und Wallbox. In der Prüfung wird folgende Situation nachgestellt: Es besteht PV-Überschuss und das ladebereite Fahrzeug wird eingesteckt.

#### 3.3.1 Prüfbedingungen

##### Elektrofahrzeug

In dieser Prüfung wird dem Elektrofahrzeug im solar gesteuerten Modus über die Wirkkette Zähler, EMS, Wallbox ein Strom entsprechend der eingespeisten Leistung bereitgestellt. Hierzu ist der Fahrzeug-Emulator mit der zu prüfenden Wallbox zu verbinden. Initial ist das Fahrzeug ladebereit (Schalter S2 geschlossen, Systemzustand C2). Der maximal zulässige Strom bzw. die maximale Ladeleistung ist im Emulator auf die nach Hersteller angegebene Maximalleistung der Wallbox  $P_{WB, max}$  (z. B. 11 kW – 16 A, 22 kW – 32 A) einzustellen.

##### Netzanschlusspunkt

Der maximal von der Wallbox vorzugebende Ladestrom wird durch die Messung des Zählers für das EMS vorgegeben. Die am Zähler erfasste Leistung sollte dem Messpunkt  $M_{Netz}$  entsprechen und sich nach  $P_{Netz} = P_{EV} + P_{Haus}$  bestimmen. Bei Überschuss ( $P_{Netz}$  ist negativ) steuert das EMS den bereitgestellten Ladestrom für das Fahrzeug so, dass die Netzleistung  $P_{Netz}$  nahe Null ist. Das heißt: Über eine Einspeisung am Messpunkt  $M_{Haus}$  kann das Laden gesteuert werden. Es gilt ein Strom  $I_{Haus} < 0$  A führt zu einer Einspeisung und damit zum Laden des Fahrzeugs.

##### Wallbox

Die Wallbox muss nach Herstellerangaben für das solar gesteuerte Überschussladen parametrisiert werden und das EMS mit dem Zähler verbunden sein.

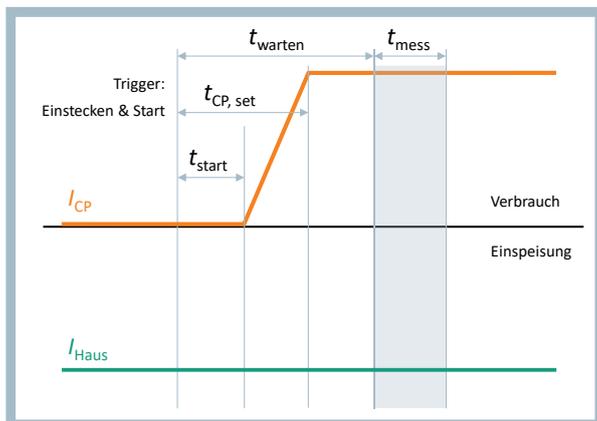
#### 3.3.2 Durchführung der Messung

Bei der Steuerung über den Zähler wird das in Abbildung 9 skizzierte Verhalten nach einer Leistungsänderung am Messpunkt  $M_{Haus}$  erwartet. Getriggert durch das Einstecken des Elektrofahrzeuges und starten des Ladevorgangs ist zu erwarten, dass nach einer Startzeit von  $t_{start}$  und einer Einstellzeit  $t_{CP, set}$  ein stabiler Ladestrom  $I_{CP}$  ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert) von der Wallbox angeboten wird. Nach einer Wartezeit von  $t_{warten} = 10$  min wird über ein Messintervall von  $t_{mess} = 30$  s das Tastverhältnis  $TV$  und der Strom  $I_{CP}$  ermittelt.

##### Messpunkte

Bei den Messungen sind für jeden Betriebspunkt die folgenden Größen zu erfassen:

- $t_{start}$  bis gilt  $I_{CP} > 0$  A
- $t_{CP, set}$  bis  $I_{CP}$  stabil eingestellt ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert)
- Abtastverhältnis  $TV$  und  $I_{CP}$  nach  $t_{warten} = 10$  Minuten bestimmen (Mittelung  $t_{mess} = 30$  s)
- Ströme an den Messpunkten  $I_{EV}$ ,  $I_{Netz}$ ,  $I_{Haus}$  (Mittelung  $t_{mess} = 30$  s)
- Leistungen an den Messpunkten  $P_{EV}$ ,  $P_{Netz}$ ,  $P_{Haus}$  (Mittelung  $t_{mess} = 30$  s)



**Abbildung 9:** Erwarteter Verlauf getriggert durch Einstecken und Starten des Ladevorgangs. Nach einer Startzeit von  $t_{\text{start}}$  und einer Einstellzeit  $t_{\text{CP, set}}$  wird ein maximaler Ladestrom  $I_{\text{CP}}$  von der Wallbox vorgegeben. Wenn der Wert stabil eingestellt ist ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert) werden über  $t_{\text{mess}} = 30$  s die Ströme und Leistungsflüsse an den Messpunkten EV, Netz und Haus erfasst.

### Betriebspunkte des emulierten Haushalts

Der Versuch ist für folgende Betriebspunkte des emulierten Hauses mit dem Strom  $I_{\text{Haus}}$  jeweils mit Vorbereitung und Messung zu wiederholen.

Hinweis: Auch beim 1-phasigen Laden wird der Strom  $I_{\text{Haus}}$  auf allen 3 Phasen vorgegeben, da dieser vom Zähler saldiert wird.

#### 3-phasiges Laden

- I.  $I_{\text{Haus}} = -I_{\text{WB, max}}$  (3 Phasen, typische Werte:  $I_{\text{WB, max}} = 16 \text{ A} \mid 32 \text{ A}$ )  
→ Bestimmung maximaler Ladestrom: Betriebspunkt max. 3 ph.
- II.  $I_{\text{Haus}} = -6 \text{ A}$  (3 Phasen)  
→ Bestimmung minimaler Ladestrom: Betriebspunkt min. 3 ph

#### 1-phasiges Laden

- III.  $I_{\text{Haus}} = -16/3 \text{ A}$  (3 Phasen, typische Werte:  $I_{\text{WB, max}} = 16/3 \text{ A}$ )  
→ Bestimmung maximaler Ladestrom: Betriebspunkt max. 1 ph.
- IV.  $I_{\text{Haus}} = -6/3 \text{ A}$  (3 Phasen)  
→ Bestimmung minimaler Ladestrom: Betriebspunkt min. 1 ph.

### Vorbereitung

1. Hausemulation auf Einspeisung und ersten Betriebspunkt stellen
2. Wallbox ist im ladebereiten Zustand A2
3. Trigger: Fahrzeugemulation mit der Wallbox verbinden und Laden aktivieren

### Messung

1. Warten, bis nach einer Startzeit von  $t_{\text{start}}$  und einer Einstellzeit  $t_{\text{CP, set}}$  ein stabiler maximaler Ladestrom  $I_{\text{CP}}$  ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert) von der Wallbox angeboten wird.
2. Die Wartezeit  $t_{\text{warten}} = 10$  min abwarten und über ein Messintervall von  $t_{\text{mess}} = 30$  s das Tastverhältnis  $TV$  und der Strom  $I_{\text{CP}}$  ermitteln.
3. Alle Betriebspunkte nacheinander anfahren.

## 3.3.3 Ergebnis

**Tabelle 11:** Rahmenbedingungen Messung Einschalten & Anfahren maximaler Betriebspunkte

<b>Betriebsmodus Wallbox</b>	
<b>Parametrierung Wallbox</b>	
<b>Auffälligkeiten</b>	

**Tabelle 12:** Ergebnisse Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte

Betriebspunkt	$I_{\text{Haus}}$ [A]	$I_{\text{Netz}}$ [A]	$I_{\text{EV}}$ [A]	$P_{\text{Haus}}$ [W]	$P_{\text{Netz}}$ [W]	$P_{\text{EV}}$ [W]	$t_{\text{start}}$ [s]	$t_{\text{CP,set}}$ [s]	$TV$ [%]	$I_{\text{CP}}$ [A]
	3 Phasen									
I:max, 3 ph.										
II:min, 3 ph.										
	1 Phase									
III:max, 1 ph.										
IV:min, 1 ph.										

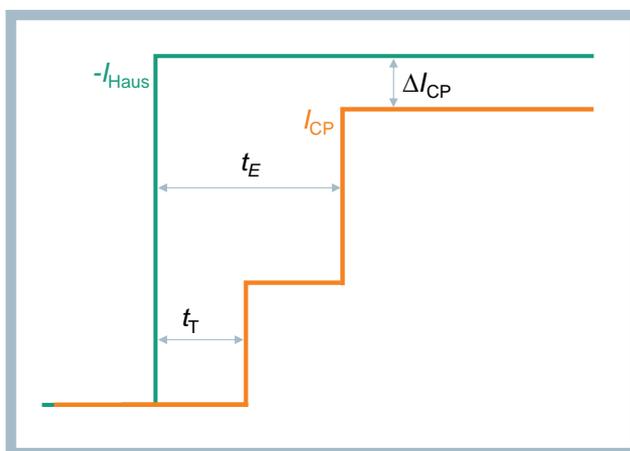
### 3.3.4 Zusammenfassung

**Tabelle 13:** Zusammenfassung Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte

KenngroÙe	I: max, 3 ph.	II: min, 3 ph.	III: max, 1 ph.	IV: min, 1 ph.
Startzeit $t_{\text{start}}$ [s]				
Einstellzeit $t_{\text{CP, set}}$ [s]				
Maximale Leistung [W]				

### 3.4 Regelgüte, Einschwingzeit und Totzeit

Dieser Test wiederholt die Prüfungen aus Abschnitt 3.3 Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte mit dem Ziel die Regelgüte und -qualität im Betrieb zu erfassen. Der Versuch wird für 1- und 3-phasiges Laden durchgeführt. Bei der Steuerung über den Zähler wird das in Abbildung 10 skizzierte Verhalten nach einem Stromsprung am Messpunkt  $M_{\text{Haus}}$  erwartet. Anders als in Abschnitt 3.3 lädt das Fahrzeug bereits und wird nicht erst angesteckt. Durch die Messung am Zähler nach einer sprunghaften Stromänderung an  $I_{\text{Netz}}$ , in Folge einer Erzeugungsänderung  $I_{\text{Haus}}$ , wird nach einer Totzeit  $t_T$  und nach der Einschwingzeit  $t_E$  ein neuer maximal möglicher Strom  $I_{\text{CP}}$  über den CP-Kontakt kommuniziert. Dieser wird über das Tastverhältnis  $TV$  ermittelt. Die Regelabweichungen des maximal erlaubten Ladestroms  $I_{\text{CP}}$  vom Sollwert  $-I_{\text{Haus}}$  können mit der stationären Regelabweichung  $\Delta I_{\text{CP}}$  beschrieben werden. Der Strom  $-I_{\text{Haus}}$  soll im gültigen Betriebsbereich der Wallbox liegen. Es ist zu beachten, dass bei einigen Wallboxen die Änderung bei großen Sprüngen schrittweise erfolgt.



**Abbildung 10:** Erwartete Sprungantwort des zulässigen Stroms  $I_{\text{CP}}$  nach einem Leistungssprung am Messpunkt  $M_{\text{Netz}}$  in Folge einer Erzeugungsänderung von  $I_{\text{Haus}}$ . Nach der Totzeit  $t_T$  und nach der Einschwingzeit  $t_E$  muss sich ein stabiler Strom  $I_{\text{CP}}$  eingestellt haben.

#### 3.4.1 Prüfbedingungen

Die Prüfbedingungen sind an die Prüfbedingungen in Abschnitt 3.3.1 angelehnt.

##### Elektrofahrzeug

In dieser Prüfung wird dem Elektrofahrzeug im solar gesteuerten Modus über die Wirkkette Zähler, EMS, Wallbox ein Strom entsprechend der eingespeisten Leistung bereitgestellt. Hierzu ist der Fahrzeug-Emulator mit der zu prüfenden Wallbox zu verbinden und mit einem minimalen Strom zum Laden zu bringen (Schalter S2 geschlossen, Systemzustand C2). Der maximal zulässige Strom bzw. die maximale Ladeleistung ist im Emulator auf die nach Hersteller angegebene Maximalleistung der Wallbox  $P_{\text{WB, max}}$  (z. B. 11 kW – 16 A, 22 kW – 32 A) einzustellen.

##### Netzanschlusspunkt

Es gelten die Prüfbedingungen gemäß Abschnitt 3.3.1. Der Strom  $I_{\text{Haus}}$  wird so eingestellt, dass das Fahrzeug von Systemzustand B2 in Systemzustand C2 wechselt.

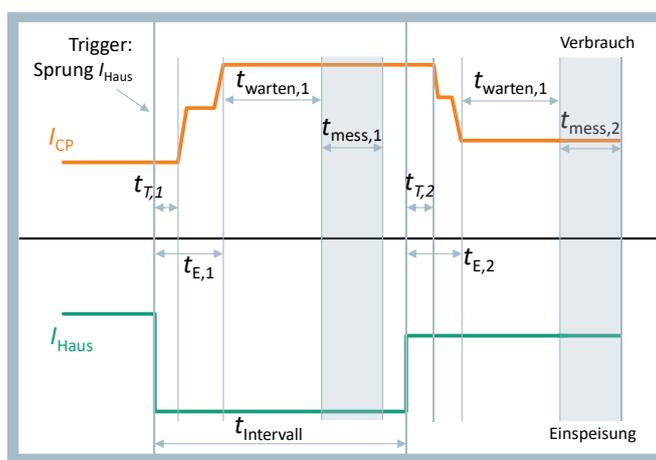
##### Wallbox

Es gelten die Prüfbedingungen gemäß Abschnitt 3.3.1.

### 3.4.2 Durchführung der Messung

Die Vorbereitung erfolgt in Anlehnung an Abschnitt 3.3.2. Es gelten die gleichen Messpunkte. Abweichend startet die Messung nicht im Zustand B2 durch Anstecken des Fahrzeugs, sondern im Zustand C2 durch eine sprunghafte Änderung des Einspeisestroms  $I_{\text{Haus}}$ .

Abbildung 11 visualisiert die erwarteten Änderungen im maximalen Ladestrom  $I_{\text{CP}}$  nach einer sprunghaften Stromänderung des Haushalts  $I_{\text{Haus}}$ . Die Stromaufnahme des Fahrzeugs ändert sich nach einer Totzeit  $t_{\text{T}}$  und stellt einen endgültigen Wert nach der Einschwingzeit  $t_{\text{E}}$  ein. Wenn sich das System im eingeschwungenen Zustand befindet, werden für einen Zeitraum  $t_{\text{mess}} = 30$  s die Leistungen und Ströme erfasst. Anschließend folgt die nächste Stufe. Die Tot- und Einschwingzeiten können dabei je nach Betriebspunkt variieren.



**Abbildung 11:** Erwartete Sprungantworten des Stroms  $I_{\text{CP}}$  nach einer sprunghaften Änderung des Stroms von  $I_{\text{Haus}}$ .

Da im Folgenden die Regelgüte erfasst wird, sollte die Netzspannung möglichst konstant sein, um deren Einflüsse gering zu halten (vgl. Abschnitt 2.1). Die mittlere Netzspannung ist für jeden Betriebspunkt zu erfassen.

#### Messpunkte

Tabelle 14 stellt alle einzustellenden Betriebspunkte für den 1- und 3-phasigen Betrieb dar. In einer zweiten, nachgelagerten Messung ist der Messverlauf in umgekehrter Reihenfolge zu prüfen.

#### Vorbereitung

1. Wallbox in den Modus „solares Laden“ versetzen
2. Fahrzeugemulation in den Systemzustand C2 versetzen:
  - a. Überschuss einstellen von  $I_{\text{Haus}} = -11$  A
  - b. Laden im Fahrzeug aktivieren (S2 geschlossen)

#### Messung Betriebspunkte (Tabelle 14)

1. Einstellen des Betriebspunktes für  $I_{\text{Haus}}$  nach Tabelle 14
2. Erfassen von  $t_{\text{T}}$  bis eine signifikante Änderung von  $I_{\text{CP}}$  erfolgt
3. Erfassen von  $t_{\text{E}}$  bis  $I_{\text{CP}}$  stabil eingestellt ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert)
4. Warten:  $t_{\text{warten}} = 5$  Minuten
5. Messung: (Mittelung  $t_{\text{mess}} = 30$  s)
  - a. Abtastverhältnis  $TV$
  - b. Maximaler Strom  $I_{\text{CP}}$
  - c. Statische Regelgüte  $\Delta I_{\text{CP}}$  (berechnet)
6. Messung in umgekehrter Reihenfolge wiederholen

**Hinweis:** Es wird empfohlen zuerst die Messung mit der Anzahl an Phasen durchzuführen, die nach 3.3.2 als letztes gemessen wurde.

### Betriebspunkte für den Haushaltstrom

Die Betriebspunkte in Tabelle 14 sollen nacheinander angefahren werden. Die Änderung der Stromvorgabe erfolgt in einem Intervall von  $t_{\text{Intervall}} = 10 \text{ min}$  oder nach Abschluss der vorherigen Stufe.

**Tabelle 14:** Betriebspunkte der Haus-Emulation für die Bewertung der Regelgüte - jeweils für 10 Minuten (bzw. bis zur erfolgten Messung der Stufe) konstant zu halten. Für das 1-phasige Laden wird  $I_{\text{Haus}}$  in Summe auf alle drei Phasen vorgegeben.

Betriebspunkt	Wallbox	
	3-phasig	1-phasig
	$I_{\text{Haus}}$ [A] je Phase	$I_{\text{Haus}}$ [A] Summe auf allen Phasen
1	-7,0	-7,0
2	-16,0	-16,0
3	-7,0	-7,0
4	-13,0	-13,0
5	-8,0	-8,0
6	-12,0	-12,0
7	-10,0	-10,0
8	-11,0	-11,0
9	-10,5	-10,5

### 3.4.3 Ergebnis

Die Regelabweichung  $\Delta I_{\text{CP}}$  bestimmt sich aus der Summe des durch die Wallbox maximal bereitgestellten Stroms  $I_{\text{CP}}$  und der aus  $I_{\text{Haus}}$  berechneten Sollwertvorgabe, wie folgt:

$$\Delta I_{\text{CP}} = \begin{cases} I_{\text{CP}} + \sum I_{\text{Haus}} & 1\text{-phasig} \\ \frac{3 I_{\text{CP}} + \sum I_{\text{Haus}}}{3} & 3\text{-phasig} \end{cases} \quad (4)$$

Bei 1-phasigem und 3-phasigen Laden wird der Summenstrom aller drei Phasen mit dem maximal bereitgestellten Strom  $I_{\text{CP}}$  verglichen. Das Vorzeichen von  $\Delta I_{\text{CP}}$  ist mit zu übertragen. Eine negative Regelabweichung bedeutet somit, dass der eingespeiste Strom  $I_{\text{Haus}}$  größer ist als der eingestellte Strom  $I_{\text{CP}}$  auf dem CP-Kontakt, ein positives Vorzeichen, dass der bereitgestellte Strom  $I_{\text{CP}}$  größer ist als der eingespeiste Strom  $I_{\text{Haus}}$ .

### 3-phasiger Betrieb

Tabelle 15: Ergebnis Regelgüte im 3-phasigen Betrieb

Betriebspunkt		$I_{\text{Haus}}$ [A]	$\bar{U}_{\text{Netz}}$ [V]	$P_{\text{Netz}}$ [kW]	$P_{\text{EV}}$ [kW]	$t_{\text{T}}$ [s]	$t_{\text{E}}$ [s]	$TV$ [%]	$I_{\text{CP}}$ [A]	$\Delta I_{\text{CP}}$ [A]
	$P_{\text{Haus}}$ [kW]									
1	-4,8	-7,0								
2	-11,0	-16,0								
3	-4,8	-7,0								
4	-9,0	-13,0								
5	-5,5	-8,0								
6	-8,3	-12,0								
7	-6,9	-10,0								
8	-7,6	-11,0								
9	-7,2	-10,5								
8	-7,6	-11,0								
7	-6,9	-10,0								
6	-8,3	-12,0								
5	-5,5	-8,0								
4	-9,0	-13,0								
3	-4,8	-7,0								
2	-11,0	-16,0								
1	-4,8	-7,0								

### 1-phasiger Betrieb

Tabelle 16: Ergebnis Regelgüte im 1-phasigen Betrieb

Betriebspunkt		$I_{\text{Haus}}$ [A]	$\bar{U}_{\text{Netz}}$ [V]	$P_{\text{Netz}}$ [kW]	$P_{\text{EV}}$ [kW]	$t_{\text{T}}$ [s]	$t_{\text{E}}$ [s]	$TV$ [%]	$I_{\text{CP}}$ [A]	$\Delta I_{\text{CP}}$ [A]
	$P_{\text{Haus}}$ [kW]									
1	-1,6	-7,0								
2	-3,7	-16,0								
3	-1,6	-7,0								
4	-3,0	-13,0								
5	-1,8	-8,0								
6	-2,8	-12,0								
7	-2,3	-10,0								
8	-2,5	-11,0								
9	-2,4	-10,5								
8	-2,5	-11,0								
7	-2,3	-10,0								
6	-2,8	-12,0								
5	-1,8	-8,0								
4	-3,0	-13,0								
3	-1,6	-7,0								
2	-3,7	-16,0								
1	-1,6	-7,0								

#### 3.4.4 Zusammenfassung

In Tabelle 17 werden die Ergebnisse zusammengefasst und der Median, sowie der Minimal- und Maximalwert der Messungen aufgeführt.

Tabelle 17: Zusammenfassung Regelgüte.

Kenngröße	3-phasig			1-phasig		
	Min	Median	Max	Min	Median	Max
Totzeit $t_{\text{T}}$ [s]						
Einschwingzeit $t_{\text{E}}$ [s]						
Regelgenauigkeit $\Delta I_{\text{CP}}$ [A]						

## 3.5 Phasenumschaltung zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb

Für das solare unidirektionale Laden, gesteuert über das Pilotsignal nach IEC61851-1, kann die Wallbox nur einen minimalen Ladestrom von 6 A einstellen (vgl. Abschnitt 2.3.) Ein kleinerer Strom kann mit dem über den CP-Kontakt übertragenen PWM-Signal nicht kommuniziert werden. Die minimalen Ladeleistungen betragen damit 1,4 kW (1-phasiger Betrieb) bzw. 4,2 kW (3-phasiger Betrieb). Aus diesem Grund kommt vor allem für kleinere PV-Installationen der Umschaltung zwischen ein und drei Phasen im Tagesverlauf der wechselhaften PV-Erzeugung eine besondere Bedeutung zu. Um eine Fehlfunktion zu vermeiden, wird bei der Phasenumschaltung das Laden unterbrochen, die Wallbox freigeschaltet, mit der gewünschten Phasenanzahl wieder zugeschaltet und die Ladung fortgesetzt. Um eine Trennung sicherstellen zu können, wird in der Regel zwischen Frei- und Zuschaltung eine Umschaltzeit implementiert. Diese Umschaltzeit soll mit dieser Prüfung erfasst werden.

### 3.5.1 Prüfbedingungen

#### Elektrofahrzeug

In dieser Prüfung wird dem Elektrofahrzeug im solar gesteuerten Modus über die Wirkkette Zähler, EMS, Wallbox ein Strom entsprechend der eingespeisten Leistung bereitgestellt. Hierzu ist der Fahrzeug-Emulator mit der zu prüfenden Wallbox zu verbinden. Initial ist das Fahrzeug ladebereit (Schalter S2 geschlossen, Systemzustand C2). Der maximal zulässige Strom bzw. die maximale Ladeleistung ist im Emulator auf die nach Hersteller angegebene Maximalleistung der Wallbox  $P_{WB, max}$  (z. B. 11 kW – 16 A, 22 kW – 32 A) einzustellen.

#### Netzanschlusspunkt

Der maximal von der Wallbox vorzugebende Ladestrom und das Umschalten zwischen 1- und 3-phasigem Betrieb wird durch die Messung des Energy Meters für das EMS vorgegeben. Die am Zähler erfasste Leistung sollte etwa dem Messpunkt  $M_{Netz}$  entsprechen und sich nach  $P_{Netz} = P_{EV} + P_{Haus}$  bestimmen. Bei Überschuss ( $P_{Netz}$  ist negativ) steuert das EMS den bereitgestellten Ladestrom und die Anzahl der für das Fahrzeug genutzten Phasen so, dass die Netzleistung  $P_{Netz}$  nahe Null ist. Das heißt, dass über eine Einspeisung am Messpunkt  $M_{Haus}$  das Laden gesteuert werden kann. Es gilt ein Strom  $I_{Haus} < 0$  A führt zu einer Einspeisung und damit zum Laden des Fahrzeugs. Durch Vorgabe einer Einspeisung von z. B.  $I_{Haus} = -7/3$  A (auf allen 3 Phasen) wird zuverlässig ein 1-phasiges Laden oder mit  $I_{Haus} = -16$  A (3 Phasen) wird 3-phasiges Laden initialisiert.

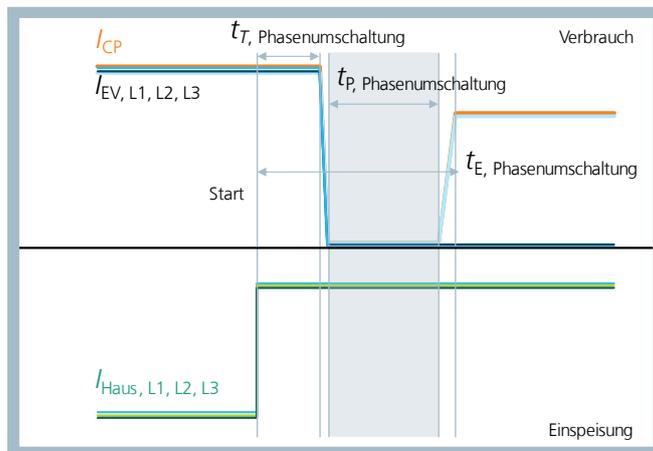
#### Wallbox

Die Wallbox muss nach Herstellerangaben für das solar gesteuerte Überschussladen parametrisiert werden und das EMS mit dem Zähler verbunden sein. In der Wallbox und dem EMS muss die automatische Umschaltung zwischen 1- und 3-phasigem Laden aktiviert sein.

### 3.5.2 Durchführung der Messung

Bei der Durchführung der Messung soll der mehrfache Wechsel zwischen 1- und 3-phasigem Laden durch Änderung der Einspeisung des Stroms  $I_{Haus}$  getestet werden.

Der erwartete Ablauf der Messung ist in Abbildung 12 visualisiert. Zum Start der Messung befindet sich das Fahrzeug im dreiphasigen Ladebetrieb. Zum Startpunkt wird der eingespeiste Strom  $I_{Haus}$  auf unter -6 A auf allen drei Phasen reduziert, sodass mit dem minimal einstellbaren  $I_{CP} = 6$  A eine höhere Leistung von 4,2 kW bezogen wird. Es ergibt sich Netzbezug. Nach einer Totzeit  $t_{T, Phasenumschaltung}$  unterbricht die Wallbox die Fahrzeugladung und trennt das Fahrzeug vom Netz. Es folgt eine Pause von  $t_{P, Phasenumschaltung}$  bis die Wallbox die Ladung wieder im 1-phasigen Betrieb startet. Nachdem das Elektrofahrzeug wieder 1-phasig mit neuem  $I_{CP}$  lädt, ist die Phasenumschaltung mit der Gesamtschwingzeit  $t_{E, Phasenumschaltung}$  abgeschlossen. Die Umschaltung in den 3-phasigen Betrieb geschieht in umgekehrter Reihenfolge.



**Abbildung 12:** Erwartetes Verhalten einer Phasenumschaltung vom 3-phasigen auf den 1-phasigen Betrieb, in Folge einer sprunghaften Änderung des Stroms von  $I_{\text{Haus}}$ . Nach einer Totzeit  $t_{T, \text{Phasenumschaltung}}$  beendet die Wallbox das Laden und startet es nach einer Pause  $t_{P, \text{Phasenumschaltung}}$  wieder. Die gesamte Dauer wird mit der Einschwingzeit  $t_{E, \text{Phasenumschaltung}}$  beschrieben. Vor der Umschaltung lud das Fahrzeug auf 3 Phasen mit einem Strom  $I_{EV, L1, L2, L3} = I_{CP}$ . Nach der Umschaltung sind die Ströme auf zwei Phasen  $I_{EV} = 0 \text{ A}$ .

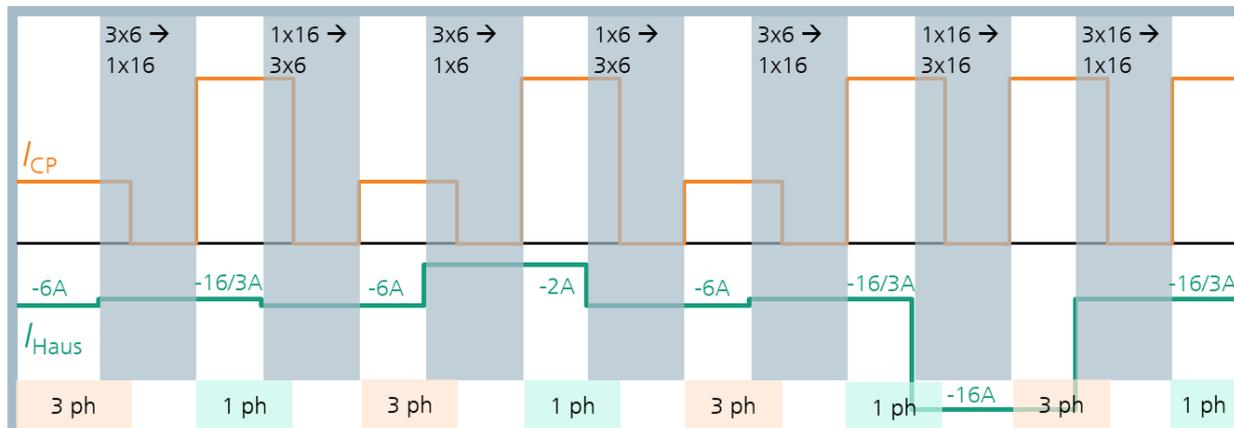
Die Messung erfolgt dann im Wechsel von 3-phasigem auf 1-phasigen Betrieb und von 1-phasigem auf 3-phasigen Betrieb. Wie in Tabelle 18 dargestellt, sollen die Umschaltung jeweils mit den extremen Betriebszuständen gemäß Pilotsignal  $I_{CP} = 6 \text{ A}$  oder  $I_{CP} = 16 \text{ A}$  durchgeführt werden. Tabelle 18 zeigt die möglichen Kombinationen.

**Tabelle 18:** Prüfpunkte für Messung 1- und 3-phasiges Umschalten

		1-phasig	
		Maximaler Strom 1 x 16 A	Minimaler Strom 1 x 6 A
3-phasig	Maximaler Strom 3 x 16 A	3 x 16 ↔ 1 x 16	3 x 16 ↔ 1 x 6
	Minimaler Strom 3 x 6 A	3 x 6 ↔ 1 x 16	3 x 6 ↔ 1 x 6

In der Praxis sind Phasenumschaltung immer zu erwarten, wenn die Ladeleistungen im 3-phasigen Laden nicht mehr weiter gesenkt werden kann oder im 1-phasigem Laden nicht weiter gesteigert werden kann. Aus diesem Grund fokussiert die in Abbildung 13 dargestellte Abfolge von Umschaltungen auf den Zuständen der unteren Zeile in Tabelle 18.

Nach einer Vorbereitung im 3-phasigen Betrieb  $I_{\text{Haus}} = -6 \text{ A}$  und einem stabilen Laden mit  $I_{CP} = 6 \text{ A}$ , wird durch eine Änderung von  $I_{\text{Haus}} = -16/3 \text{ A}$  (3-phasig) einphasiges Laden initiiert. Dies ist in Abbildung 13 mit dem grau schraffierten Bereich hervorgehoben. Dieser Bereich entspricht der Einschwingzeit  $t_{E, \text{Phasenumschaltung}}$ . Nach der Umschaltung ist eine Pause von mindestens 3 Minuten einzuhalten, bevor die nächste Umschaltung initiiert wird. Es ist zu beachten, dass alle Ströme für die Vorgabe von  $I_{\text{Haus}}$  3-phasig sind.



**Abbildung 13:** Abfolge von Phasenumschaltung gemäß Tabelle 18. Getriggert wird die Phasenumschaltung durch eine Änderung in  $I_{\text{Haus}}$ . Im daran folgenden grau hinterlegten Bereich findet die Phasenumschaltung statt. Der erwartete Verlauf ist in Abbildung 12 dargestellt. Nach erfolgreich durchgeführtem Phasenwechsel muss ein Mindestpause von 3 Minuten vor dem nächsten Initiieren einer Umschaltung eingehalten werden.

### Messpunkte

Bei den Messungen sind für jeden Betriebspunkt (siehe Abbildung 13) die folgenden Größen zu erfassen:

- Erfassen der Größen  $I_{EV}$ ,  $I_{\text{Netz}}$ ,  $I_{\text{Haus}}$ ,  $U_{EV}$ ,  $U_{\text{Netz}}$ ,  $U_{\text{Haus}}$
- $t_{T, \text{Phasenumschaltung}}$  bis die Wallbox das Laden beendet
- $t_{P, \text{Phasenumschaltung}}$  Zeitspanne zwischen Ladeunterbrechung und Ladestart
- $t_{E, \text{Phasenumschaltung}}$  bis  $I_{CP}$  stabil ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert) eingestellt ist

### Vorbereitung:

1. Hausemulator auf Einspeisung stellen,  $I_{\text{Haus}} = -6$  A
2. Fahrzeugemulator mit der Wallbox verbinden, Laden aktivieren und maximalen Ladestrom einstellen
3. Es ist zu überprüfen, dass die Wallbox nun 3-phasig lädt
4. Einhalten von Mindestpause 3 Minuten

### Betriebspunkte entsprechend Abbildung 13

1. Hausemulator 3-phasig:  $I_{\text{Haus}}$  einstellen
2. Erfassen von  $t_{T, \text{Phasenumschaltung}}$
3. Erfassen von  $t_{P, \text{Phasenumschaltung}}$ ,
4. Erfassen von  $t_{E, \text{Phasenumschaltung}}$
5. Erfassen von  $TV$  und  $I_{CP}$  so bald  $I_{CP}$  stabil ( $\pm 0,5$  A vom Sollwert)
6. Überprüfen mit wie vielen Phasen geladen wird.  
Kriterium Phase aktiv: Spannung an Phase an  $M_{EV} > 40$  V
7. Erfassen der übrigen Größen  $I_{EV}$ ,  $I_{\text{Netz}}$ ,  $I_{\text{Haus}}$ ,  $U_{EV}$ ,  $U_{\text{Netz}}$ ,  $U_{\text{Haus}}$
8. Einhalten von Mindestpause 3 Minuten vor dem Ansteuern der nächsten Stufe

Hinweis: Es ist mit Einschwingzeiten von über 10 Minuten zu rechnen.

### Messung

1. Die Messungen sind mindestens einmal zu wiederholen
2. Besonderheiten sind im Prüfbericht zu vermerken

### 3.5.3 Ergebnisse

Tabelle 19: Rahmenbedingungen Messung 1- und 3-phasiges Umschalten

<b>Betriebsmodus Wallbox</b>	
<b>Parametrierung Wallbox</b>	
<b>Auffälligkeiten</b>	

Die Tabelle 20 ist für jede der drei Wiederholung erneut auszufüllen, zu bezeichnen und im Prüfbericht festzuhalten.

Tabelle 20: Ergebnis 1- und 3-phasiges Umschalten

Betriebspunkt	$I_{\text{Netz}}$ [A]	$I_{\text{Haus}}$ [A]	$I_{\text{EV}}$ [A]	$U_{\text{Netz}}$ [W]	$U_{\text{Haus}}$ [W]	$U_{\text{EV}}$ [V]	$t_{\text{T, Phasen-umschaltung}}$ [s]	$t_{\text{P, Phasen-umschaltung}}$ [s]	$t_{\text{E, Phasen-umschaltung}}$ [s]	TV [%]	$I_{\text{CP}}$ [A]	Ph.
	3 Phasen			3 Phasen								
3x6 → 1x16												
1x16 → 3x6												
3x6 → 1x6												
1x6 → 3x6												
3x6 → 1x16												
1x16 → 3 x16												
3x16 → 1x16												

### 3.5.4 Zusammenfassung

Der Mittelwert der Phasenumschaltzeit zwischen dem 1- und 3-phasigen Laden und umgekehrt sowie der Minimal- und Maximalwert der drei Wiederholungen sind in Tabelle 21 festzuhalten.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Phasenumschaltzeit zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb

	Kenngröße	Min [s]	Mean [s]	Max [s]
1 zu 3 Phasen	$t_{\text{T, Phasenumschaltung}}$			
	$t_{\text{P, Phasenumschaltung}}$			
	$t_{\text{E, Phasenumschaltung}}$			
3 zu 1 Phasen	$\hat{t}_{\text{T, Phasenumschaltung}}$			
	$\hat{t}_{\text{P, Phasenumschaltung}}$			
	$\hat{t}_{\text{E, Phasenumschaltung}}$			

# Anhang

## A Beispiel Prüfbericht

Im Folgenden ist exemplarische für einen Prüfling aus dem Projekt „WBInspektion“ ein Prüfreport dargestellt. Dieser stellt die Ergebnistabelle aus den Abschnitten 3.1 bis 3.6 in einen Kontext. Mit Diagrammen soll der jeweilige Test der Prüfung veranschaulicht werden.

## Prüfbericht Unidirektionales und Solares Laden

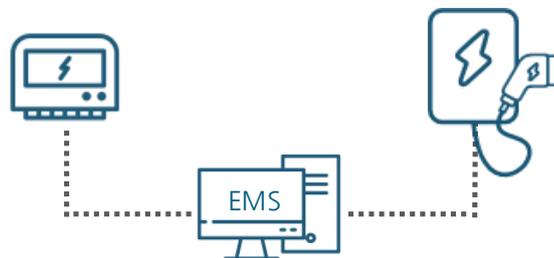
Die Folgenden Prüfungen wurden im Rahmen des Projektes „WBInspektion“ im Digital Grid Lab des Fraunhofer ISE durchgeführt. Der Prüfbericht gliedert sich in folgende Teile:

- 1 Allgemeines
- 2 Statische Prüfungen
  - 2.1 Stand-By Verbrauch
  - 2.2 Peripherieverbrauch
  - 2.3 Einschalten und maximale Betriebspunkte
  - 2.4 Regelgüte
  - 2.5 Phasenumschalten

### 1 Allgemeines

#### 1.1 Prüfling

<b>Bezeichnung Prüfling</b>	
<b>Wallbox - Hersteller</b>	
<b>Wallbox - Modell</b>	
<b>Wallbox - SW Version</b>	
<b>Maximaler Strom</b>	16 A
<b>Stromzähler – Hersteller</b>	
<b>Stromzähler – Modell</b>	



**Abbildung 1:** Beispielprüfling bestehend aus Wallbox, Energy Meter und Energiemanagement

#### 1.2 Testumgebung

Abtastrate der Messpunkte	0,1 s

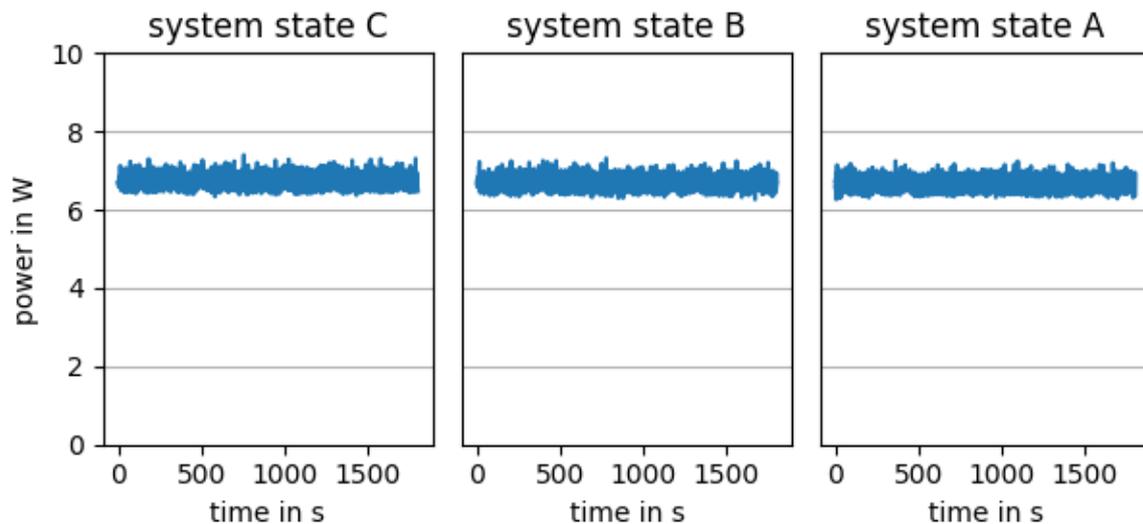
## 2 Statische Prüfungen

### 2.1 Stand-By Verbrauch

**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.1  
**Zeitstempel:** 28.11.2024, 10:55 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 15 min  
**Betriebspunkte:** Systemzustände C, B, A  
**Anmerkung:** Leistungsverstärker für Emulation Elektrofahrzeug und Haushalt sind ausgeschaltet.

**Tabelle 1:** Messergebnisse Stand-by Verbrauch

Betriebspunkt		P_Netz [W]	P_Haus L1 [kW]	P_Haus L2 [kW]	P_Haus L3 [kW]	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]
<b>C</b>	min	6,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	mean	6,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	max	7,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>B</b>	min	6,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	mean	6,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	max	7,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>A</b>	min	6,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	mean	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	max	7,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



**Abbildung 2:** Verlauf der Stand-by Leistung  $P_{\text{Stand-by}}$  des Gesamtsystems in den Systemzuständen C (Laden angefordert), B (ladebereit), A (ausgesteckt).

**Tabelle 2:** Zusammenfassung Stand-by-Verluste des Systems, bestehend aus Wallbox, Energy Meter und EMS und ggf. zusätzlich notwendigen Peripheriekomponenten

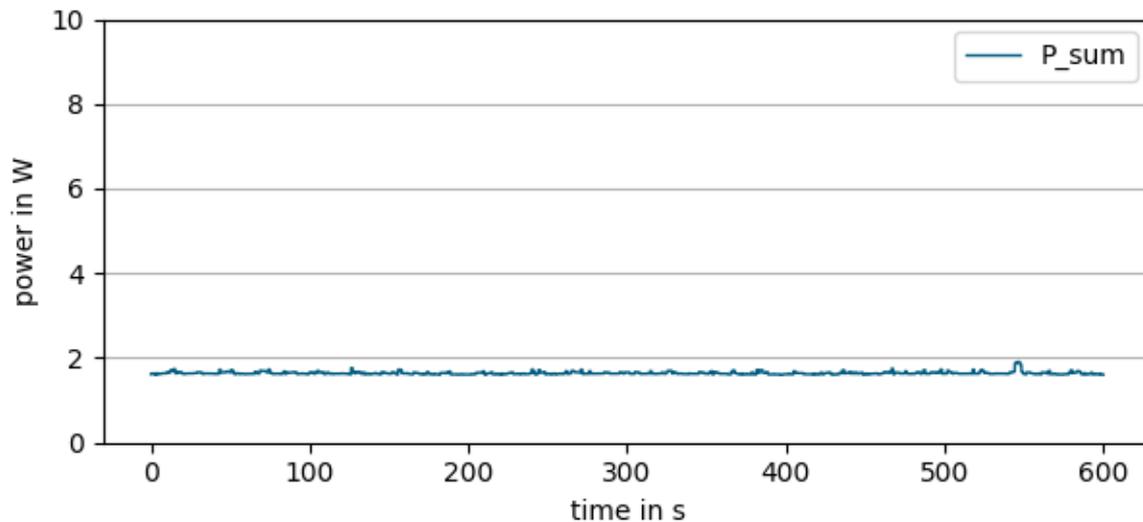
Kenngröße	mittlere Leistung [W]	Deep-Stand-by [ja/nein]	Umschaltzeit [s]	mittlere Leistung [W]
C1: Stand-by mit Fahrzeug (ladebereit)	6,69	Nein	-	-
B2: Stand-by mit Fahrzeug (nicht ladebereit)	6,64	Nein	-	-
A1: Stand-by ohne Fahrzeug	6,6	Nein	-	-

## 2.2 Peripherieverbrauch

**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.2  
**Zeitstempel:** 24.02.2025, 15:39 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 10 min  
**Betriebspunkte:** Energy Meter

**Tabelle 3:** Messergebnisse der Leistungsaufnahme des Smart Meters

Betriebs-punkt		P_Netz [W]
Energy Meter	min	1,60
	mean	1,64
	max	1,91



**Abbildung 3:** Verlauf der Leistungsaufnahme des Energy Meters während der 10-minütigen Messung des Peripherieverbrauchs.

**Tabelle 4:** Zusammenfassung Peripherieverbrauch

Kenngröße	Mittlerer $P_{\text{Peri}}$ [W]	Anmerkungen
Energy Meter	1,64	Beinhaltet EMS

## 2.3 Einschalten und maximale Betriebspunkte

**Tabelle 5:** Rahmenbedingungen Messung Einschalten & Anfahren maximaler Betriebspunkte

<b>Betriebsmodus Wallbox</b>	
<b>Parametrierung Wallbox</b>	Strom: 16 A
<b>Auffälligkeiten</b>	-

### 3-phasig

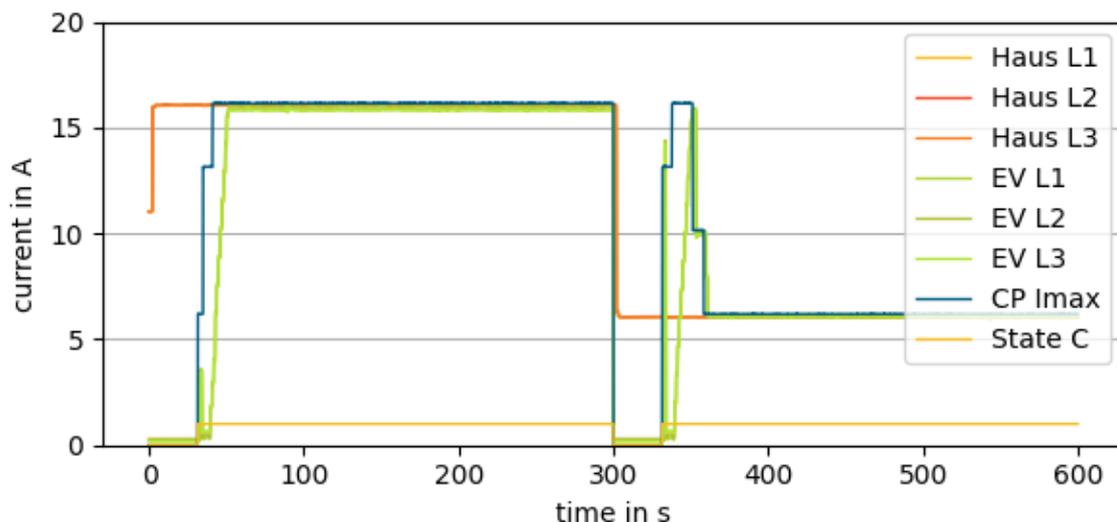
**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.3  
**Zeitstempel:** 20.02.2025, 15:50 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 5 min  
**Betriebspunkte:** -16, -7  
**Phasen:** 3

**Tabelle 6:** Messergebnisse maximale Betriebspunkte Teil 1

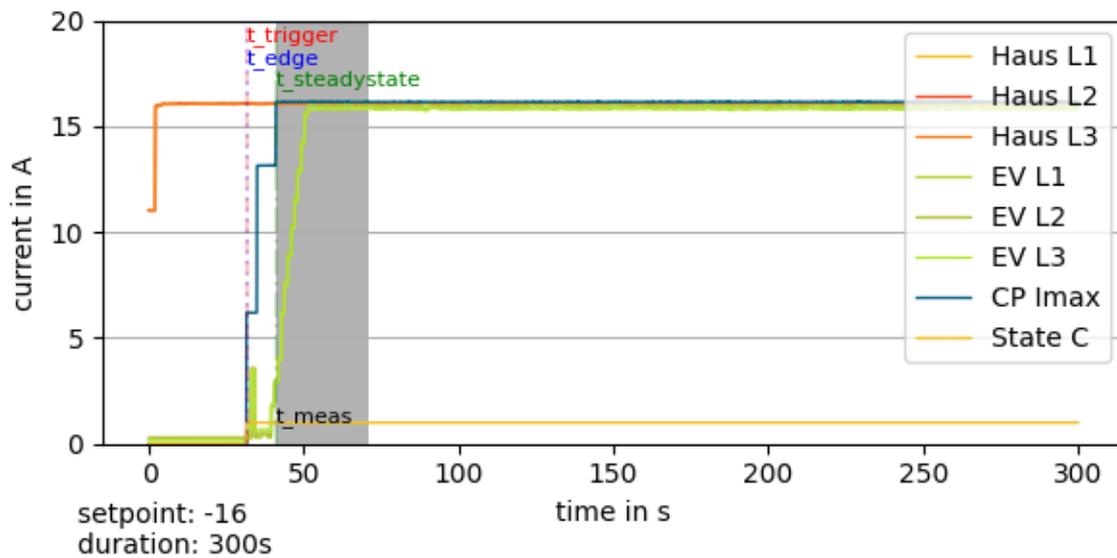
Betriebspunkt	I_Haus L1 [A]	I_Haus L2 [A]	I_Haus L3 [A]	U_Netz L1 [V]	U_Netz L2 [V]	U_Netz L3 [V]	P_Netz L1 [kW]	P_Netz L2 [kW]	P_Netz L3 [kW]
-16	16,04	16,06	16,04	236,20	237,03	237,47	0,68	0,69	0,67
-6	6,05	6,06	6,04	236,26	237,17	237,54	0,38	0,38	0,35

**Tabelle 7:** Messergebnisse maximale Betriebspunkte Teil 2

Betriebspunkt	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]	TV [%]	I_CP [A]	t_start [s]	t_CP,set [s]
-16	3,25	3,23	3,23	26,90	16,14	0,00	9,50
-6	1,49	1,47	1,47	10,31	6,19	0,00	26,90



**Abbildung 4:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug. bei zwei aufeinanderfolgenden dreiphasigen Einschaltvorgängen. Im ersten ist der Haushaltsüberschuss auf Phasen L1, L2, L3 auf den maximalen Betriebspunkt 16 A eingestellt, im zweiten auf den minimalen Betriebspunkt 6 A. Zustand C von 0 auf 1 signalisiert den Start des Ladevorgangs.



**Abbildung 5:** Detaillierter Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Einschalten auf dreiphasig 16 A.  $t_{\text{trigger}}$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt des Einschaltvorgangs,  $t_{\text{edge}}$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t_{\text{steadystate}}$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.

## 1-phasig

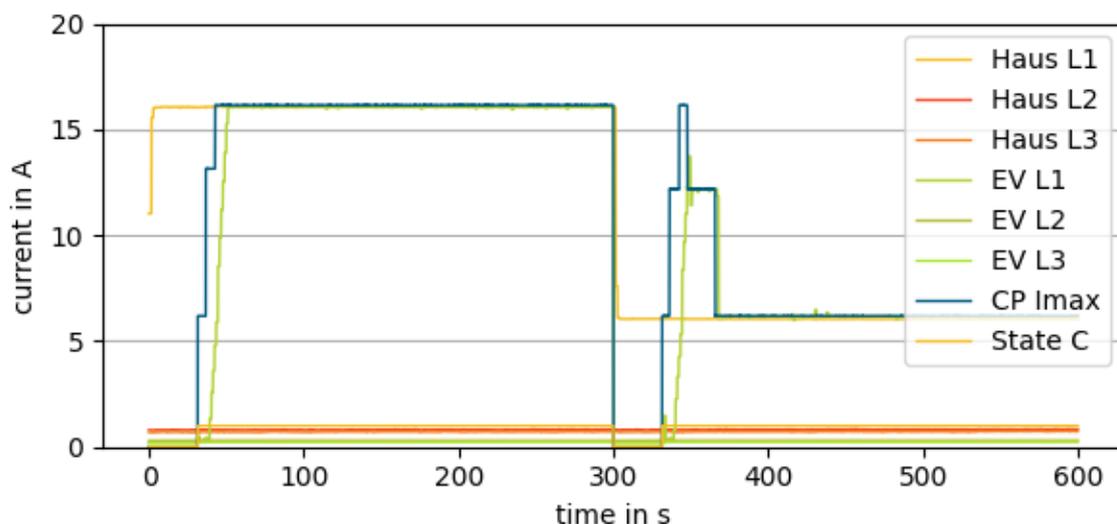
**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.3  
**Zeitstempel:** 21.02.2025, 11:18 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 5 min  
**Betriebspunkte:** -16, -7  
**Phasen:** 1

**Tabelle 8:** Messergebnisse maximale Betriebspunkte Teil 1

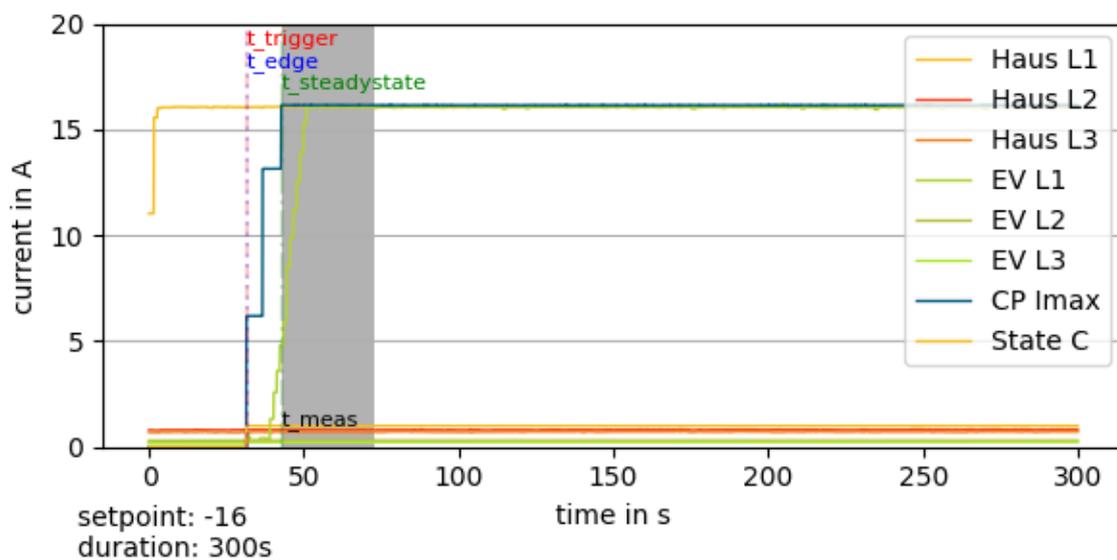
Betriebspunkt	I_Haus L1 [A]	I_Haus L2 [A]	I_Haus L3 [A]	U_Netz L1 [V]	U_Netz L2 [V]	U_Netz L3 [V]	P_Netz L1 [kW]	P_Netz L2 [kW]	P_Netz L3 [kW]
-16	16,05	0,81	0,71	235,21	235,82	236,53	0,52	0,21	0,17
-6	6,05	0,82	0,72	234,86	235,59	236,24	0,39	0,24	0,17

**Tabelle 9:** Messergebnisse maximale Betriebspunkte Teil 2

Betriebspunkt	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]	TV [%]	I_CP [A]	t_start [s]	t_CP,set [s]
-16	3,41	0,00	0,00	26,90	16,14	0,0	11,2
-6	1,53	0,00	0,00	10,31	6,19	0,0	34,3



**Abbildung 6:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug, bei zwei aufeinanderfolgenden einphasigen Einschaltvorgängen. Im ersten ist der Haushaltsüberschuss auf Phase L1 auf den maximalen Betriebspunkt 16 A eingestellt, im zweiten auf den minimalen Betriebspunkt 6 A. Zustand C von 0 auf 1 signalisiert den Start des Ladevorgangs.



**Abbildung 7:** Detaillierter Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Einschalten auf einphasig 16 A.  $t_{trigger}$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt des Einschaltvorgangs,  $t_{edge}$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t_{steadystate}$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.

**Tabelle 10:** Zusammenfassung Einschalten und Anfahren maximaler Betriebspunkte

Kenngröße	I: max, 3 ph.	II: min, 3 ph.	III: max, 1 ph.	IV: min, 1 ph.
Startzeit $t_{start}$ [s]	0,0	0,0	0,0	0,0
Einstellzeit $t_{CP, set}$ [s]	9,5	26,9	11,2	34,3
Maximaler CP- Strom [A]	16,14	6,19	16,14	6,19

## 2.4 Regelgüte

### 3 phasig

**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.4  
**Zeitstempel:** 20.02.2025, 13:33 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 2 min  
**Betriebspunkte:** -7, -16, -7, -13, -8, -12, -10, -11, -10.5, -11, -10, -12, -8, -13, -7, -16, -7  
**Phasen:** 3

Tabelle 11: Messergebnisse Regelgüte 3-phasig Teil 1

Betrieb s-punkt	I_Haus L1 [A]	I_Haus L2 [A]	I_Haus L3 [A]	U_Netz L1 [V]	U_Netz L2 [V]	U_Netz L3 [V]	P_Netz L1 [kW]	P_Netz L2 [kW]	P_Netz L3 [kW]
-7	7,04	7,05	7,03	235,48	236,20	236,84	0,39	0,40	0,38
-16	16,04	16,06	16,04	235,65	236,39	237,04	0,33	0,30	0,31
-7	7,04	7,05	7,03	235,55	236,34	236,90	0,39	0,39	0,37
-13	13,04	13,06	13,04	235,63	236,32	236,91	0,30	0,33	0,33
-8	8,03	8,05	8,03	235,96	236,68	237,26	0,40	0,42	0,40
-12	12,04	12,05	12,04	235,77	236,48	237,17	0,36	0,37	0,36
-10	10,04	10,04	10,03	235,68	236,35	236,95	0,39	0,39	0,38
-11	11,02	11,04	11,02	235,82	236,55	237,16	0,33	0,38	0,33
-10,5	10,52	10,54	10,52	235,79	236,55	237,15	0,36	0,35	0,35
-11	11,03	11,04	11,02	235,43	236,21	236,81	0,33	0,37	0,34
-10	10,03	10,04	10,02	235,59	236,34	236,95	0,37	0,38	0,36
-12	12,03	12,04	12,03	235,53	236,30	236,90	0,32	0,36	0,29
-8	8,03	8,04	8,02	235,86	236,77	237,20	0,40	0,42	0,40
-13	13,04	13,05	13,03	236,07	236,87	237,44	0,33	0,37	0,30
-7	7,04	7,05	7,03	236,47	237,24	237,79	0,39	0,39	0,38
-16	16,04	16,06	16,04	236,43	237,19	237,75	0,37	0,37	0,34
-7	7,04	7,05	7,03	236,40	237,08	237,70	0,39	0,39	0,37

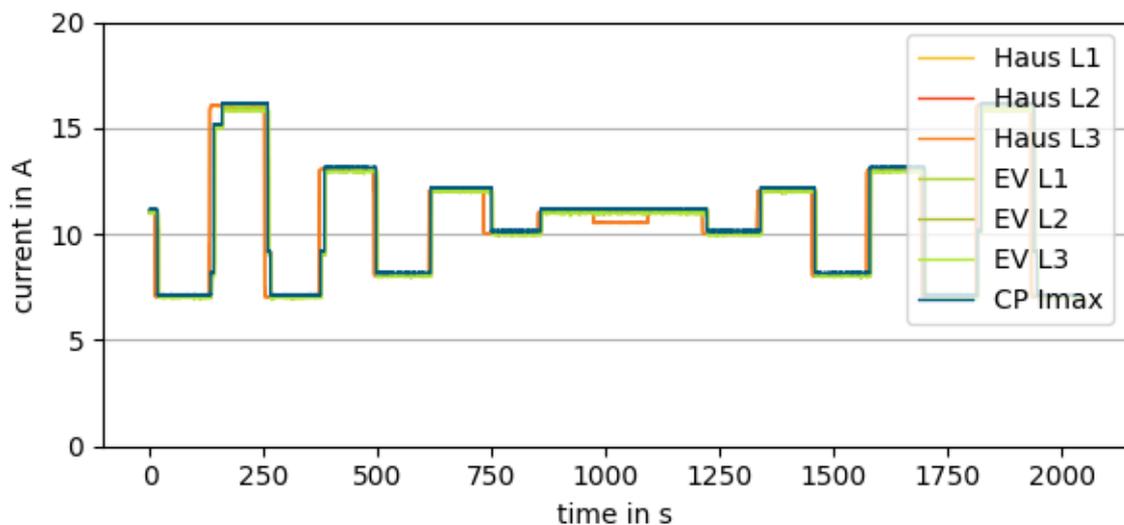
Tabelle 12: Messergebnisse Regelgüte 3-phasig Teil 2

Betriebs- punkt	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]	TV [%]	I_CP [A]	dI_CP [A]	t_T [s]	t_E [s]
-7	1,71	1,69	1,70	11,90	7,14	-0,10	5,2	5,2
-16	3,73	3,72	3,72	26,90	16,14	-0,10	3,2	27,6
-7	1,70	1,68	1,68	11,90	7,14	-0,10	7,2	13,2
-13	3,03	3,01	3,01	21,90	13,14	-0,10	3,4	11,9
-8	1,97	1,95	1,95	13,61	8,17	-0,13	5,3	5,3
-12	2,78	2,76	2,77	20,30	12,18	-0,14	4,1	4,1
-10	2,39	2,37	2,37	16,91	10,14	-0,11	17,4	17,4

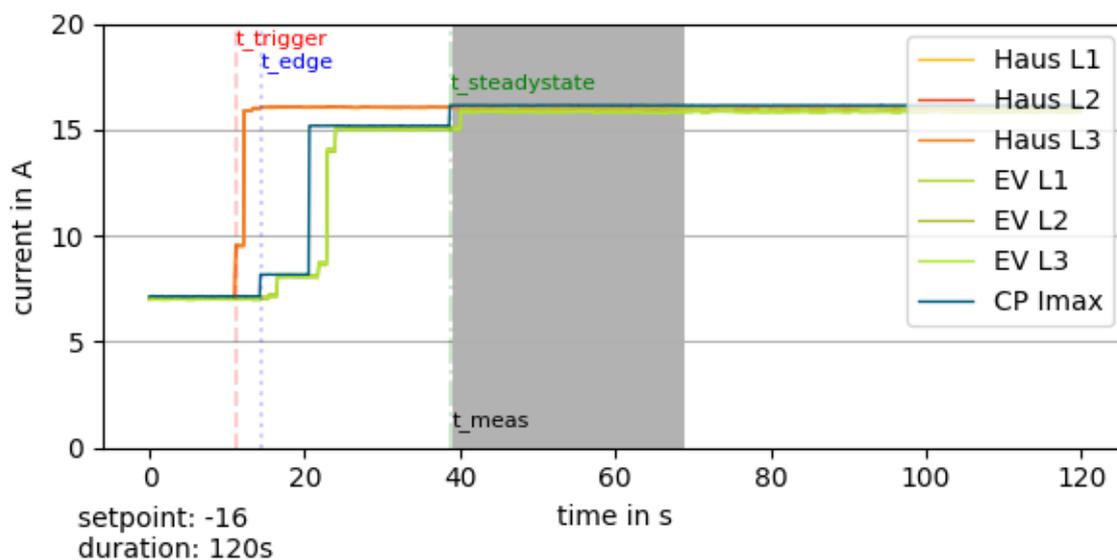
-11	2,60	2,57	2,58	18,60	11,16	-0,14	5,2	5,2
-10,5	2,61	2,59	2,59	18,60	11,16	-0,64	0,0	0,0
-11	2,61	2,59	2,59	18,60	11,16	-0,14	0,0	0,0
-10	2,38	2,37	2,37	16,91	10,14	-0,12	8,9	8,9
-12	2,81	2,79	2,80	20,30	12,18	-0,15	7,6	7,6
-8	1,98	1,96	1,96	13,61	8,17	-0,14	6,4	6,4
-13	3,02	3,00	3,00	21,90	13,14	-0,10	6,5	6,5
-7	1,72	1,70	1,70	11,90	7,14	-0,10	7,0	7,0
-16	3,67	3,66	3,65	26,90	16,14	-0,10	2,7	10,1
-7	1,69	1,67	1,67	11,90	7,14	-0,11	6,3	12,6

**Tabelle 13:** statistische Auswertung Regelgüte

	dI_CP [A]	t_T [s]	t_E [s]
<b>count</b>	17	15	15
<b>min</b>	-0,64	2,70	4,10
<b>mean</b>	-0,15	6,43	9,93
<b>25%</b>	-0,14	4,65	5,85
<b>50%</b>	-0,11	6,30	7,60
<b>75%</b>	-0,10	7,10	12,25
<b>max</b>	-0,10	17,40	27,60



**Abbildung 8:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug bei den aufeinanderfolgenden Betriebspunkten beim Versuch Regelgüte. Die Betriebspunkte werden auf den Phasen L1, L2, L3 am Haushaltsüberschuss eingestellt. Das System befindet sich während der gesamten Dauer im Zustand C (laden).



**Abbildung 9:** Detaillierter Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Versuch Regelgüte – Sprung 7 A → 16 A (dreiphasig).  $t\_trigger$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt der Änderung der Haushaltslast,  $t\_edge$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t\_steadystate$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.

## 1 phasig

**Beschreibung:** siehe Abschnitt 3.4  
**Zeitstempel:** 21.02.2025, 11:43 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 2 min  
**Betriebspunkte:** -7, -16, -7, -13, -8, -12, -10, -11, -10.5, -11, -10, -12, -8, -13, -7, -16, -7  
**Phasen:** 1

**Tabelle 14:** Messergebnisse Regelgüte 1-phasig Teil 1

Betrieb s-punkt	I_Haus L1 [A]	I_Haus L2 [A]	I_Haus L3 [A]	U_Netz L1 [V]	U_Netz L2 [V]	U_Netz L3 [V]	P_Netz L1 [kW]	P_Netz L2 [kW]	P_Netz L3 [kW]
-7	7,04	0,83	0,73	235,09	235,83	236,46	0,38	0,22	0,22
-16	16,04	0,83	0,74	235,17	235,88	236,47	0,35	0,24	0,20
-7	7,04	0,82	0,73	235,19	235,88	236,43	0,38	0,24	0,21
-13	13,04	0,83	0,72	235,20	235,89	236,55	0,32	0,24	0,20
-8	8,04	0,83	0,75	234,92	235,69	236,36	0,41	0,23	0,20
-12	12,04	0,85	0,75	234,97	235,83	236,44	0,34	0,22	0,21
-10	10,03	0,83	0,74	235,35	236,11	236,74	0,39	0,22	0,17
-11	11,03	0,84	0,75	235,52	236,30	236,94	0,35	0,23	0,21
-10,5	10,53	0,85	0,75	235,26	236,02	236,67	0,39	0,24	0,23
-11	11,03	0,84	0,74	235,26	235,98	236,62	0,34	0,24	0,26
-10	10,03	0,85	0,75	235,18	235,95	236,57	0,38	0,25	0,21
-12	12,04	0,86	0,75	235,36	236,13	236,76	0,35	0,25	0,21
-8	8,04	0,84	0,76	235,35	236,14	236,74	0,39	0,22	0,22
-13	13,04	0,86	0,76	235,77	236,54	237,11	0,31	0,23	0,22

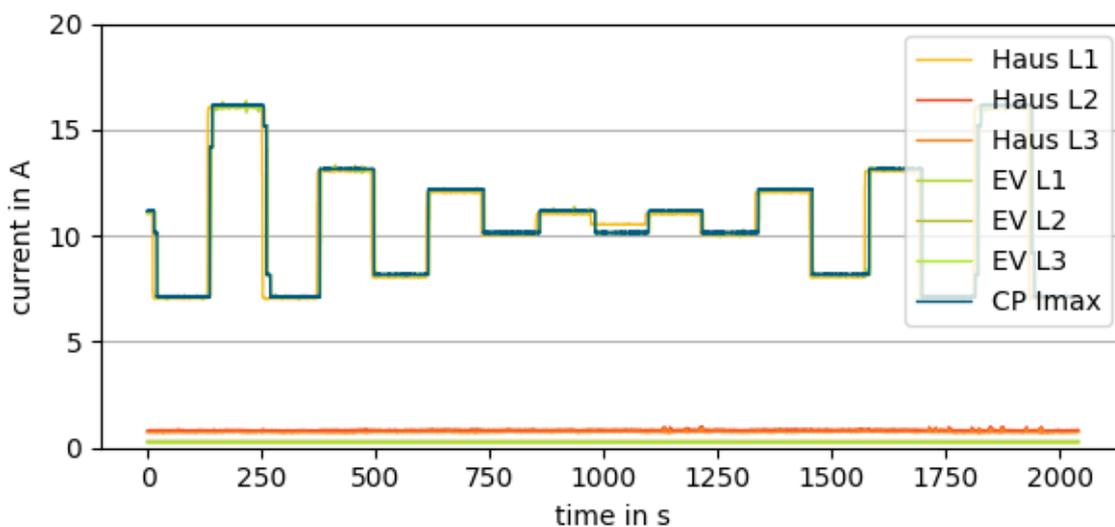
-7	7,04	0,85	0,76	235,82	236,67	237,16	0,42	0,22	0,24
-16	16,04	0,84	0,75	235,63	236,41	236,97	0,34	0,23	0,21
-7	7,04	0,83	0,74	235,38	236,19	236,88	0,39	0,24	0,20

**Tabelle 15:** Messergebnisse Regelgüte 1-phasig Teil 2

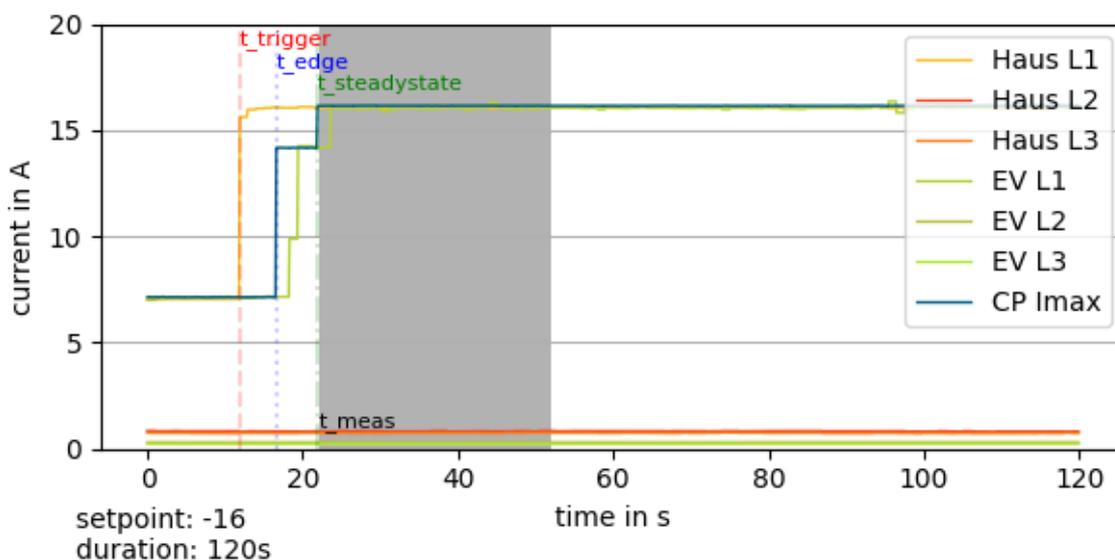
Betriebs- punkt	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]	TV [%]	I_CP [A]	dI_CP [A]	t_T [s]	t_E [s]
-7	1,70	0,00	0,00	11,90	7,14	-0,10	3,0	9,2
-16	3,71	0,00	0,00	26,90	16,14	-0,10	4,7	10,0
-7	1,68	0,00	0,00	11,90	7,14	-0,10	3,4	17,8
-13	3,00	0,00	0,00	21,90	13,14	-0,09	5,9	5,9
-8	1,98	0,00	0,00	13,61	8,17	-0,13	4,4	4,4
-12	2,80	0,00	0,00	20,30	12,18	-0,14	3,7	3,7
-10	2,39	0,00	0,00	16,91	10,14	-0,11	4,3	4,3
-11	2,59	0,00	0,00	18,61	11,16	-0,14	7,6	7,6
-10,5	2,38	0,00	0,00	16,91	10,14	0,38	9,3	9,3
-11	2,59	0,00	0,00	18,61	11,16	-0,14	6,1	6,1
-10	2,37	0,00	0,00	16,91	10,14	-0,11	3,4	3,4
-12	2,82	0,00	0,00	20,30	12,18	-0,15	6,2	6,2
-8	1,93	0,00	0,00	13,61	8,17	-0,13	5,0	5,0
-13	3,02	0,00	0,00	21,90	13,14	-0,09	9,5	9,5
-7	1,76	0,00	0,00	11,90	7,14	-0,10	5,1	5,1
-16	3,73	0,00	0,00	26,90	16,14	-0,11	2,6	15,0
-7	1,69	0,00	0,00	11,90	7,14	-0,10	6,4	11,7

**Tabelle 16:** statistische Auswertung Regelgüte

	dI_CP [A]	t_T [s]	t_E [s]
<b>count</b>	17	17	17
<b>min</b>	-0,15	2,60	3,40
<b>mean</b>	-0,09	5,33	7,89
<b>25%</b>	-0,13	3,70	5,00
<b>50%</b>	-0,11	5,00	6,20
<b>75%</b>	-0,10	6,20	9,50
<b>max</b>	0,38	9,50	17,80



**Abbildung 10:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug bei den aufeinanderfolgenden Betriebspunkten beim Versuch Regelgüte. Die Betriebspunkte werden auf Phasen L1 am Haushaltsüberschuss eingestellt. Das System befindet sich während der gesamten Dauer im Zustand C (laden).



**Abbildung 11:** Detaillierter Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Versuch Regelgüte – Sprung 7 A → 16 A (einphasig).  $t_{\text{trigger}}$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt der Änderung der Haushaltslast,  $t_{\text{edge}}$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t_{\text{steadystate}}$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.

**Tabelle 17:** Zusammenfassung Regelgüte.

Kenngröße	3-phasig			1-phasig		
	Min	Median	Max	Min	Median	Max
Totzeit $t_r$ [s]	2,70	6,30	17,40	2,60	5,00	9,50
Einschwingzeit $t_e$ [s]	4,10	7,60	27,60	3,40	6,20	17,80
Regelgenauigkeit $\Delta I_{CP}$ [A]	-0,10	-0,11	-0,64	-0,15	-0,11	0,38

## 2.5 Phasenumschalten

**Beschreibung:** 3.5  
**Zeitstempel:** 21.02.2025, 15:27 Uhr  
**Zeit pro Betriebspunkt:** 10 min  
**Betriebspunkte:** '3x6-1x16', '1x16-3x6', '3x6-1x6', '1x6-3x6', '3x6-1x16', '1x16-3x16', '3x16-1x16'  
**Phasen:** Phasenwechsel  
**Anmerkungen:** Spikes kommen von CP Filter.

**Tabelle 18:** Messergebnisse Phasenwechsel Teil 1

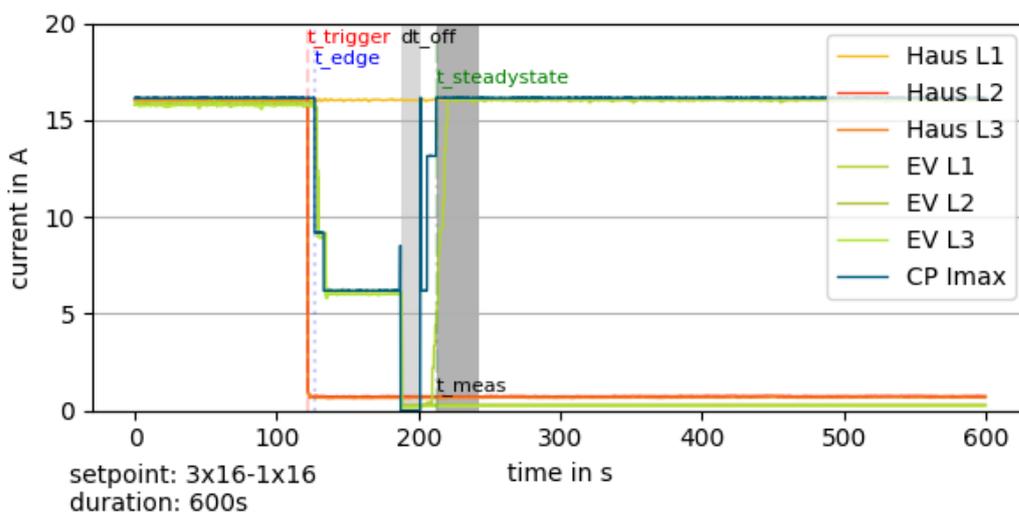
Betriebspunkt	I_Haus L1 [A]	I_Haus L2 [A]	I_Haus L3 [A]	U_Netz L1 [V]	U_Netz L2 [V]	U_Netz L3 [V]	P_Netz L1 [kW]	P_Netz L2 [kW]	P_Netz L3 [kW]
<b>3x6-1x16</b>	16,03	0,75	0,66	235,13	235,89	236,67	0,49	0,21	0,19
<b>1x16-3x6</b>	6,03	6,05	6,03	235,11	235,83	236,77	0,35	0,36	0,33
<b>3x6-1x6</b>	6,03	0,74	0,64	235,99	236,73	237,64	0,35	0,22	0,18
<b>1x6-3x6</b>	6,04	6,05	6,03	234,62	235,41	236,22	0,35	0,36	0,34
<b>3x6-1x16</b>	16,03	0,74	0,65	235,21	235,96	236,89	0,44	0,21	0,20
<b>1x16-3x16</b>	16,03	16,05	16,04	235,67	236,35	237,21	1,63	1,66	1,68
<b>3x16-1x16</b>	16,04	0,74	0,66	235,07	235,78	236,71	0,53	0,21	0,19

**Tabelle 19:** Messergebnisse Phasenwechsel Teil 2

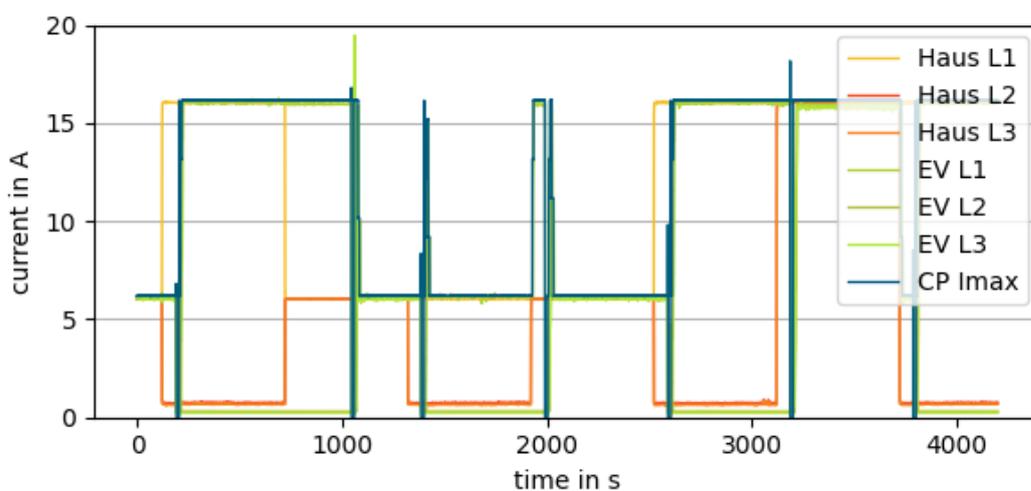
Betriebspunkt	P_EV L1 [kW]	P_EV L2 [kW]	P_EV L3 [kW]	TV [%]	I_CP [A]	t_T [s]	t_E [s]	t_P [s]
<b>3x6-1x16</b>	3,45	0,00	0,00	26,90	16,14	70,0	96,2	14,0
<b>1x16-3x6</b>	1,48	1,46	1,46	10,31	6,19	323,9	362,6	14,2
<b>3x6-1x6</b>	1,48	0,00	0,00	10,31	6,19	65,3	105,4	14,0
<b>1x6-3x6</b>	1,48	1,46	1,46	10,31	6,19	7,5	109,9	13,9
<b>3x6-1x16</b>	3,51	0,00	0,00	26,90	16,14	68,9	95,6	14,0
<b>1x16-3x16</b>	2,18	2,17	2,18	26,90	16,14	65,0	80,0	14,3
<b>3x16-1x16</b>	3,40	0,00	0,00	26,90	16,14	4,9	90,6	14,0

**Tabelle 20:** statistische Auswertung Phasenwechsel

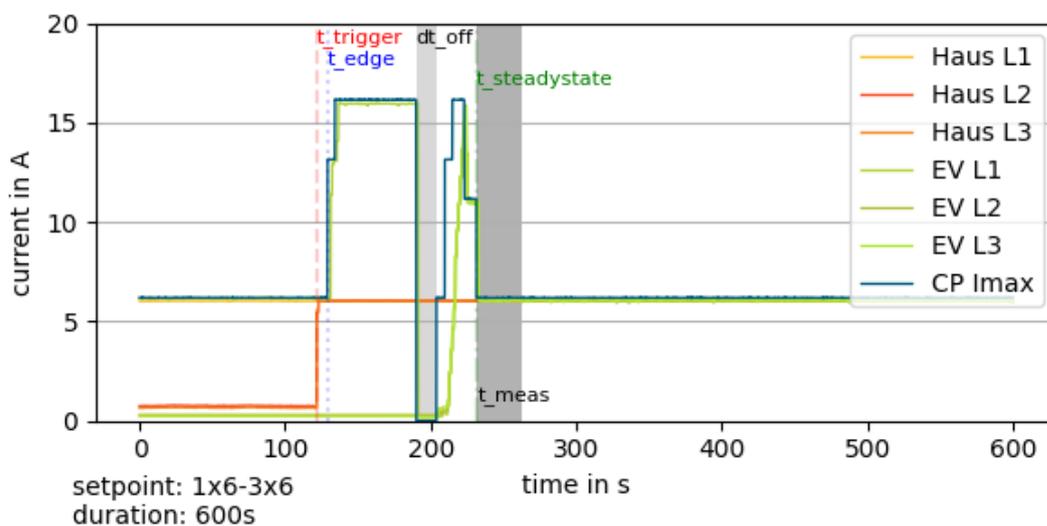
	t_T [s]	t_E [s]	t_P [s]
count	7	7	7
min	4,90	80,00	13,90
mean	86,50	134,33	14,06
25%	36,25	93,10	14,00
50%	65,30	96,20	14,00
75%	69,45	107,65	14,10
max	323,90	362,60	14,30



**Abbildung 12:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Phasenwechsel von 3 auf 1 Phase. Der Phasenwechsel wird ausgelöst durch die Änderung der Haushaltslast von 16 A dreiphasig auf 16 A auf L1.  $t_{\text{trigger}}$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt der Änderung des Haushalts,  $t_{\text{edge}}$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t_{\text{steadystate}}$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.  $dt_{\text{off}}$  entspricht  $t_P$ , also der Zeit in der CP-I<sub>max</sub>  $\approx 0$  A.



**Abbildung 13:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug bei aufeinanderfolgenden Phasenwechseln.



**Abbildung 14:** Verlauf der Ströme am Haushalt und Elektrofahrzeug beim Phasenwechsel von 1 auf 3 Phasen. Der Phasenwechsel wird ausgelöst durch die Änderung der Haushaltslast von 6 A auf L1 auf 6 A dreiphasig.  $t_{\text{trigger}}$  detektiert den gemessenen Zeitpunkt der Änderung der Haushaltslast,  $t_{\text{edge}}$  markiert den Zeitpunkt der ersten gemessenen Reaktion des CP-I<sub>max</sub> Signals, und  $t_{\text{steadystate}}$  das gemessene Ende des Einschwingvorgangs des CP-I<sub>max</sub> Signals.  $dt_{\text{off}}$  entspricht  $t_{\text{P}}$ , also der Zeit in der CP-I<sub>max</sub> = 0 A.

**Tabelle 21:** Zusammenfassung der Phasenumschaltzeit zwischen dem 1- und 3-phasigen Betrieb

	Kenngröße	Min [s]	Mean [s]	Max [s]
1 zu 3 Phasen	$t_{\text{T, Phasenumschaltung}}$	7,5	132,13	323,9
	$t_{\text{P, Phasenumschaltung}}$	13,9	14,13	14,3
	$t_{\text{E, Phasenumschaltung}}$	80,0	184,17	362,6
3 zu 1 Phasen	$t_{\text{T, Phasenumschaltung}}$	4,9	52,28	70,0
	$t_{\text{P, Phasenumschaltung}}$	14,0	14,0	14,0
	$t_{\text{E, Phasenumschaltung}}$	90,6	96,95	105,4

## **B Danksagung**

Die Arbeiten am vorliegenden Leitfaden wurden durchgeführt im Projekt "WBInspektion", gefördert durch das BMWK in der Förderrichtlinie "Elektro Mobil" (FKZ: 01MV23027).

## Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer ISE, „Projektwebseite Wallbox-Inspektion,“ 2024. [Online]. Available: [www.wallbox-inspektion.de](http://www.wallbox-inspektion.de).
- [2] Fraunhofer ISE, „ev twin,“ 2025. [Online]. Available: [https://marketplace.typhoon-hil.com/package?package\\_name=EV+charging+twin](https://marketplace.typhoon-hil.com/package?package_name=EV+charging+twin).
- [3] VDE, „DIN EN IEC 61851-1 VDE 0122-1:2019-12, Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge,“ 2019.