

Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme

Stand: Version 2.0.1
Ausgabe: 07/2019

Herausgegeben von



Inhalt

1	Vorwort	4
2	Anwendungsbereich	4
3	Abkürzungen	5
4	Begriffe und Formelzeichen	5
4.1	PV-Anbindung.....	5
4.2	AC-Anbindung (DC- und Generatorgekoppelte Systeme)	5
4.3	AC-Anbindung (AC-gekoppelte Systeme)	6
4.4	DC-Anbindung (PV-Generatorgekoppelte Systeme).....	6
4.5	Batterieteil	6
4.6	Anschluss des Batterieteils an das Leistungsumwandlungssystem.....	7
4.7	Parametrisierung der Prüfsequenzen	8
4.8	Gemessene Größen	8
4.9	Berechnete Größen	10
5	Allgemeine Beschreibung der Systeme	15
5.1	AC-gekoppelte Systeme	15
5.2	DC-gekoppelte Systeme	16
5.3	PV-Generatorgekoppelte Systeme	16
6	Allgemeine Beschreibung des Prüfablaufs	18
6.1	Leistungsvorgaben einzelner Betriebspunkte.....	19
6.2	Unerwünschte Leistungsflüsse	19
6.3	Ladezustand der Batterie.....	19
6.4	Optional: Verwendung eines Batteriesimulators	20
7	Teilprüfung: Leistungsumwandlungssystem	21
7.1	Prüfaufbau	21
7.2	Berechnung der Wirkungsgrade	22
7.3	PV-Direktnutzung und Netzeinspeisung (PV2AC)	22
7.4	Batterieladung und -entladung (allgemein).....	24
7.5	Batterieentladung (BAT2AC, BAT2PV)	25
7.6	Batterieladung (PV2BAT, AC2BAT)	28
7.7	Leistungsaufnahme im Standby oder ausgeschalteten Zustand.....	30
8	Teilprüfung: Batterie	32
8.1	Batteriewirkungsgrad	32
8.2	Sonstige Verluste.....	33
9	Regelabweichungen des Speichersystems	34
9.1	Bestimmung der dynamischen Regelabweichungen	34
9.2	Bestimmung der stationären Regelabweichungen bei gemischten Pfaden	37
Anhang A	Anforderung an die Messgeräte und den Prüfstand	39
I.	PV-Simulator	39
II.	Wechselstromversorgung	39
III.	Elektrische Last	39
IV.	Genauigkeit und Datenaufzeichnung	39
Anhang B	Umgang mit dynamischen Leistungsflüssen	40
Anhang C	Bestimmung der Bemessungsleistungen	42
I.	Nominale PV-Einspeiseleistung (PV2AC)	42
II.	Nominale PV-Ladeleistung (PV2BAT)	43
III.	Nominale AC-Entladeleistung (BAT2AC)	44
IV.	Umgang mit Regelabweichungen und kurzfristigen Maximalleistungen	45
Anhang D	Bestimmung von Kenngrößen und Datenblattangaben	47
Anhang E	Normative Verweise	48
Anhang F	Danksagung	49
Anhang G	Kurzfassung der Prüfergebnisse nach Effizienzleitfaden	50

Haftungsausschluss

Der Effizienzleitfaden wurde von einer Expertengruppe aus mehreren Forschungs- und Prüfinstituten sowie Herstellern und Verbänden mit größter Sorgfalt und unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik erstellt. Eine Haftung für die inhaltliche Richtigkeit und Eignung der Vorgaben und Hinweise im Einzelfall besteht gleichwohl nicht.

Die Vervielfältigung der Broschüre für nichtkommerzielle Zwecke ist unter Angabe der Quelle gestattet. Die Verfasser und Herausgeber übernehmen keine Haftung für Fehler in Zusammenhang mit der Vervielfältigung oder bei der Reproduktion.

- - -

Änderungsübersicht

Juli 2019 Version 2.0.1 (Änderungen gegenüber Version 2.0)

- Haftungsausschluss und Vervielfältigungshinweis hinzugefügt.
- Kapitel 7.6.3: Korrektur der Haltedauer auf „mindestens 3“ Minuten.
- Kapitel 8.1.3: redaktionelle Ergänzung „Um den Testaufwand bei modularen Systemen zu begrenzen, wird empfohlen ...“
- Kapitel 9.2 / Tabelle 33: Korrektur des Index auf „ $0,75 \cdot P_{PV2BAT,nom}$ “
- Quellenverweis Abb. 8: Aktualisiert auf „KIT/ Batterietechnikum“

1 Vorwort

Das vorliegende Dokument ist ein Prüfleitfaden zur Charakterisierung der Wirkungsgrade, des Standby-Verbrauchs und der Regelungseffizienz von stationären Batteriespeichersystemen. Im Fokus steht dabei die Bewertung von netzgekoppelten Photovoltaik(PV)-Speichersystemen, die der Erhöhung des Eigenverbrauchs bzw. des Autarkiegrades dienen. Zum einen lassen sich aus den Ergebnissen der beschriebenen Testverfahren Datenblattangaben ableiten. Zum anderen können damit Simulationsmodelle zur anwendungsspezifischen Bestimmung der Systemeffizienz parametrisiert werden.

Hinweis: Der Effizienzleitfaden beschreibt ausschließlich Prüfroutinen für die technische Charakterisierung der Systemperformance. Die Messungen nach Effizienzleitfaden ersetzen insbesondere keine Zertifizierungen nach nationalen und internationalen Sicherheitsstandards (u.a. IEC 62619, VDE AR E 2510-50, Sicherheitsleitfaden Lithium-Ionen Heimspeicher).

2 Anwendungsbereich

Der Leitfaden beschreibt die einheitliche Messung der Energieeffizienz von PV-Speichersystemen. Es werden dabei Systeme der gängigsten Topologien und Batteriezellchemien betrachtet. Die Systemtopologien und die zugehörigen Energiewandlungspfade sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Energiewandlungspfade sind durch die Leistungsflüsse zwischen der jeweiligen Quelle (PV-Generator, Batterie oder Netz) und der jeweiligen Senke (Batterie, Last oder Netz) definiert. Daraus ergeben sich folgende Energiewandlungspfade:

- PV2AC:** PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung
- AC2BAT oder PV2BAT:** AC-Batterieladung oder PV-Batterieladung
- BAT:** Batteriespeicherung
- BAT2AC oder BAT2PV:** AC-Batterieentladung oder PV-Batterieentladung¹

Bei AC- und PV-Generatorkoppelten Systemen wird zusätzlich zum eigentlichen Speichersystem ein konventioneller PV-Wechselrichter für den Betrieb benötigt. Darüber hinaus ist nicht in jedem marktverfügbaren Speichersystem eine Batterie integriert. Dies führt dazu, dass sich je nach Ausstattung eines konkreten Systems nicht alle Wandlungspfade bestimmen lassen.

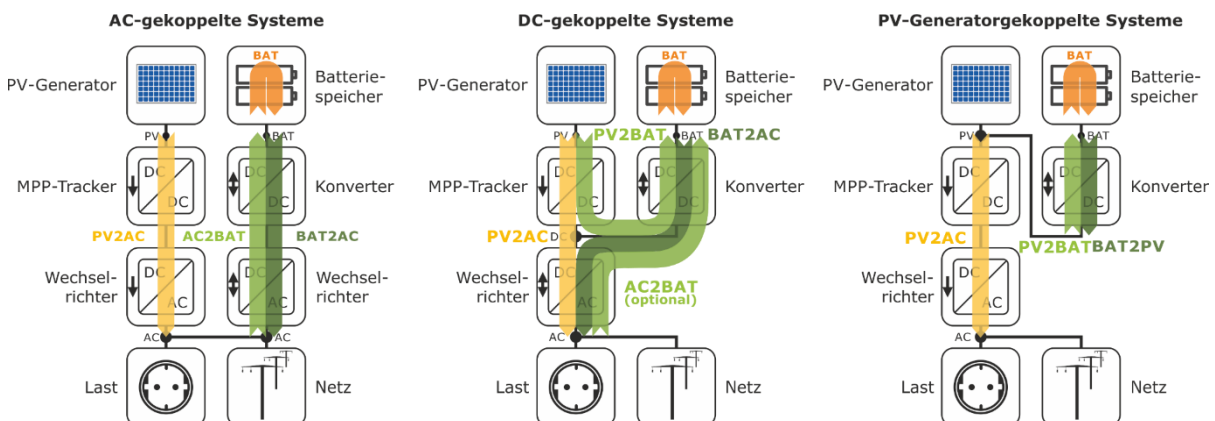


Abbildung 1: Energiewandlungspfade der einzelnen Topologien von PV-Speichersystemen. (Quelle: HTW Berlin)

Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es, eine einheitliche und abgestimmte Vorgehensweise zur Bestimmung der Energieeffizienz von PV-Speichersystemen zu definieren. Dabei fließen neben der Effizienz des Leistungsumwandlungssystems und der Batterie, die Regelung der Einzelkomponenten, deren Ansteuerung durch das Energiemanagementsystem und die Leistungsmessung ein. Ebenfalls wird die Leistungsaufnahme der Systemkomponenten im Betrieb und Standby betrachtet.

Auf Basis der Messergebnisse lassen sich im Anschluss Simulationsmodelle (nicht Bestandteil dieses Prüfleitfadens) parametrisieren. Durch modellbasierte Simulationen des Betriebsverhaltens kann

¹ BAT2PV bedeutet, dass das Speichersystem zwischen den PV-Modulen und dem Eingang des PV-Wechselrichters angeschlossen wird und sich somit in den DC-Eingang des PV-Wechselrichters entlädt (siehe Abbildung 1 rechts).

dadurch eine verbesserte Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Systemen für die jeweilige Anwendung erreicht werden. Zudem lassen sich durch Simulationsanalysen die Einflüsse unterschiedlicher Lastprofile sowie der Auslegungen von PV-Systemen und Batteriespeichern auf den ökonomischen Nutzen der Systeme ermitteln.

3 Abkürzungen

BESS	Battery Energy Storage System
BMS	Battery Management System
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PCE	Power Conversion Equipment (DE: Leistungsumwandlungssystem)
PV	Photovoltaic
PVS	Photovoltaic Simulator
SOC	State of Charge

4 Begriffe und Formelzeichen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten folgende Begriffe:

Batteriespeichersystem

Gesamtes System: Beinhaltet die Batterie, die Leistungssteller sowie alle sonstigen für den Betrieb notwendigen Komponenten wie Energiemanagement und Zähler. Überbegriff über alle Speichersysteme - egal ob DC-, AC-, PV-Generatorgekoppelte Systemtopologie.

4.1 PV-Anbindung

Maximale PV-Eingangsspannung	$U_{PV,max}$
Maximale DC-Eingangsspannung.	
Minimale PV-Eingangsspannung	$U_{PV,min}$
Minimal erforderliche DC-Eingangsspannung.	
PV-Bemessungseingangsspannung	$U_{PV,nom}$
Nominale DC-Eingangsspannung.	
Maximale MPP-Spannung	$U_{MPP,max}$
Maximale DC-Eingangsspannung, bei der das MPPT aktiv ist.	
Minimale MPP-Spannung	$U_{MPP,min}$
Minimale DC-Eingangsspannung, bei der das MPPT aktiv ist.	
Nominale MPP-Spannung	$U_{MPP,nom}$
Nominale DC-Eingangsspannung, bei der das MPPT aktiv ist. Diese entspricht der PV-Bemessungseingangsspannung, falls vom Hersteller angegeben. Ansonsten wird diese als Mittelwert der minimalen und maximalen MPP-Spannung nach DIN EN 50530 bestimmt.	
PV-Bemessungseingangsleistung	$P_{PV,nom}$
Nominale, kontinuierliche DC-Eingangsleistung bei $\cos(\varphi) = 1$ (Angegeben für String 1, ...String n, Gesamt). Diese ist gleichzeitig die maximale DC-Eingangsleistung.	
PV-Bemessungsausgangsleistung	$P_{PV-WR,nom}$
Nominale, kontinuierliche AC-Ausgangsleistung des PV-Wechselrichters.	

4.2 AC-Anbindung (DC- und Generatorgekoppelte Systeme)

Bemessungsausgangsleistung (PV)	$P_{AC,nom}$ (Abgabe)
Nominale AC-Ausgangsleistung des PV-Batteriespeichersystems, bestehend aus der PV-Leistung.	
Bemessungsausgangsleistung (Batterieentladung)	$P_{AC,nom}$ (Entladen)
Nominale AC-Ausgangsleistung des PV-Batteriespeichersystems, bestehend der Entladeleistung des Batteriesystems.	

Bemessungseingangsleistung (AC-Batterieladung)	$P_{AC,nom}$ (Bezug)
Nominale AC-Eingangsleistung des PV-Batteriespeichersystems (erfordert einen bidirektionalen Wechselrichter)	

4.3 AC-Anbindung (AC-gekoppelte Systeme)

Maximale Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters	$P_{BESS,max}$ (Entladen)
Maximal zulässige, kurzzeitig abrufbare AC-Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	
Nominale Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters	$P_{BESS,nom}$ (Entladen)
Nominale, kontinuierliche AC-Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters.	

Maximale Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters	$P_{BESS,max}$ (Laden)
Maximal zulässige, kurzzeitig abrufbare AC-Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	
Nominale Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters	$P_{BESS,nom}$ (Laden)
Nominale, kontinuierliche AC-Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters.	

4.4 DC-Anbindung (PV-Generatorkgekoppelte Systeme)

Nominale Entladeleistung des Batterie-Konverters	$P_{BESS,nom}$ (Entladen)
Nominale, kontinuierliche DC-Entladeleistung des Batteriekonverters in Richtung des Wechselrichters.	
Nominale Ladeleistung des Batterie-Konverters	$P_{BESS,nom}$ (Laden)
Nominale, kontinuierliche DC-Ladeleistung des Batteriekonverters aus Richtung des PV-Generators.	

4.5 Batterieteil

Batterie	BAT
System, das eine oder mehrere Zellen, Module oder Batteriepacks enthält. Es verfügt über eine Batteriemanagementeinheit, die im Fall von Überladung, Überstrom und Überhitzung die Verbindung unterbricht (vgl. IEC 62619).	
Batteriemanagementsystem (BMS)	BMS
Zu einer Batterie gehörendes elektrisches System zur Überwachung und/oder Lenkung ihres Zustands, zur Berechnung sekundärer Daten, Aufzeichnung dieser Daten und/oder Regelung ihrer Umgebung, um damit das Leistungsverhalten und/oder die Lebensdauer der Batterie zu beeinflussen.	
Ladezustand (SOC)	SOC
Der vom Speichersystem bzw. BMS ermittelte und visualisierte Ladezustand der Batterie (Display, Webportal, etc. des Speichersystems). Idealerweise kann der SOC über ein Kommunikationsprotokoll ausgelesen und aufgezeichnet werden.	
Maximale Batteriespannung	$U_{BAT,max}$
Maximale Batteriespannung des verwendeten Batteriesystems.	
Minimale Batteriespannung	$U_{BAT,min}$
Minimale Batteriespannung des verwendeten Batteriesystems.	
Nominale Batteriespannung	$U_{BAT,nom}$
Nominale Batteriespannung des verwendeten Batteriesystems.	

Minimaler Ladezustand	SOC_{\min}
Der minimale SOC, bis zu dem das Speichersystem die Batterie entlädt.	
Maximaler Ladezustand	SOC_{\max}
Der maximale SOC, bis zu dem das Speichersystem die Batterie lädt.	
Mittlerer Ladezustand	SOC_{avg}
Der Mittelwert des minimalen und maximalen Ladezustands, welcher während des Normalbetriebs erreicht wird.	
Mittlerer Ladezustandsbereich	$SOC_{\text{avg,area}}$
Ladezustandsbereich um den mittleren Ladezustand ± 10 Prozentpunkte.	
Maximale Ladeleistung	$P_{\text{BAT,max (Laden)}}$
Maximale, kurzzeitig abrufbare DC-Ladeleistung des verwendeten Batteriesystems. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	
Maximale Entladeleistung	$P_{\text{BAT,max (Entladen)}}$
Maximale, kurzzeitig abrufbare DC-Entladeleistung des verwendeten Batteriesystems. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	
Nominale Ladeleistung	$P_{\text{BAT,nom (Laden)}}$
Nominale, kontinuierliche Leistung der verwendeten Batterie bei $SOC_{\text{avg,area}}$ im Ladebetrieb. Wird im Regelfall durch $P_{\text{PCE/BAT,nom (Laden)}}$ vorgegeben.	
Nominale Entladeleistung	$P_{\text{BAT,nom (Entladen)}}$
Nominale, kontinuierliche Leistung der verwendeten Batterie bei $SOC_{\text{avg,area}}$ im Entladebetrieb. Wird im Regelfall durch $P_{\text{PCE/BAT,nom (Entladen)}}$ vorgegeben.	
Nutzbare Batteriekapazität (Amperestunden)	$C_{\text{BAT,nutz}}$
Die nutzbare Batteriekapazität $C_{\text{BAT (Entladen)}}$ als Mittelwert der vollständigen Entladungen bei Leistungen $P_{\text{PCE/BAT,nom (Entladen)}}$ 100%, 50% und 25% entsprechend der Tabelle 29	
Nutzbare Batteriekapazität (Wattstunden)	$E_{\text{BAT,nutz}}$
Die nutzbare Batteriekapazität $E_{\text{BAT (Entladen)}}$ als Mittelwert der vollständigen Entladung bei Leistung $P_{\text{PCE/BAT,nom (Entladen)}}$ 100%, 50% und 25% entsprechend der Tabelle 29	

4.6 Anschluss des Batterieteils an das Leistungsumwandlungssystem

Maximale Batteriespannung	$U_{\text{PCE/BAT,max}}$
Maximale batterie-seitige DC-Spannung des Batterie-Wechselrichters/Konverters.	
Minimale Batteriespannung	$U_{\text{PCE/BAT,min}}$
Minimale batterie-seitige DC-Spannung des Batterie-Wechselrichters/Konverters.	
Nominale Batteriespannung	$U_{\text{PCE/BAT,nom}}$
Nominale batterie-seitige DC-Spannung des verwendeten Batterie-Wechselrichters/Konverters.	
Maximale kurzzeitige Ladeleistung	$P_{\text{PCE/BAT,max (Laden)}}$
Maximal zulässige, kurzzeitig abrufbare batterie-seitige Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters/Konverters. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	
Maximale kurzzeitige Entladeleistung	$P_{\text{PCE/BAT,max (Entladen)}}$
Maximal zulässige, kurzzeitig abrufbare batterie-seitige Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters/Konverters. Erfordert die Angabe, über welchen Zeitraum die maximale Leistung abgerufen werden kann.	

Nominale Ladeleistung

$P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Laden)}$

Nominale, kontinuierliche batterie-seitige Ladeleistung des Batterie-Wechselrichters/Konverters.

Nominale Entladeleistung

$P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Entladen)}$

Nominale, kontinuierliche batterie-seitige Entladeleistung des Batterie-Wechselrichters/Konverters.

4.7 Parametrisierung der Prüfsequenzen

Nachfolgend werden alle Größen definiert, die für die Parametrisierung der Prüfsequenzen benötigt werden. Wie diese im Einzelfall bestimmt werden können, lässt sich Anhang C entnehmen.

Nominale PV-Einspeiseleistung

$P_{PV2AC,nom}$

Nominale, kontinuierliche MPP-Leistung des PV-Simulators, die in AC-Ausgangsleistung umgesetzt werden kann. Die Leistung ist für den Fall definiert, dass die Batterie weder geladen noch entladen wird ($P_{BAT} \sim 0$).

Nominale PV-Ladeleistung

$P_{PV2BAT,nom}$

Nominale, kontinuierliche MPP-Leistung des PV-Simulators, die zur Bereitstellung der nominalen DC-Ladeleistung des Leistungsumwandlungssystems $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Laden)}$ benötigt wird.

- Beim Test von Komponenten, die ohne integrierte Batterien vertrieben werden, ist darauf zu achten, dass die Ladeleistung der Batterie $P_{BAT,nom} \text{ (Laden)}$ mindestens so groß ist wie $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Laden)}$.
- Ist die Batterie fester Bestandteil des getesteten Produkts und ist die nominale Ladeleistung $P_{BAT,nom} \text{ (Laden)}$ kleiner als $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Laden)}$, so gilt die nominale Ladeleistung der Batterie als Bezugsgröße.
- Die Leistung $P_{PV2BAT,nom}$ kann abhängig von der Ausgangsspannung des PV-Simulators $U_{PVS,(min,nom,max)}$ sein und wird dementsprechend für die benötigte Spannung definiert.

Nominale Entladeleistung

$$P_{BAT2AC,nom}$$

$$P_{BAT2PV,nom}$$

Nominale, kontinuierliche Leistung der AC-Last, die zur Bereitstellung der nominalen DC-Entladeleistung des Leistungsumwandlungssystems $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Entladen)}$ benötigt wird.

- Beim Test von Komponenten, die ohne integrierte Batterien vertrieben werden, ist darauf zu achten, dass die Entladeleistung der Batterie $P_{BAT,nom} \text{ (Entladen)}$ mindestens so groß ist wie $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Entladen)}$.
- Ist die Batterie fester Bestandteil der getesteten Komponenten und ist die nominale Entladeleistung $P_{BAT,nom} \text{ (Entladen)}$ kleiner als $P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Entladen)}$, so gilt die nominale Entladeleistung der Batterie als Bezugsgröße.
- Die Leistung $P_{BAT2AC,nom}$ bzw. $P_{BAT2PV,nom}$ kann abhängig von der Eingangsspannung des Leistungsumwandlungssystems $U_{PCE/BAT,(min)}, U_{PCE/BAT,(max)}, U_{PCE/BAT,(nom)}$ sein und wird dementsprechend für die benötigte Spannung definiert.

4.8 Gemessene Größen

Die folgenden Größen sind topologieabhängig im Kapitel 5 schematisch als Messpunkte dargestellt. Zudem gelten folgende Ergänzungen für die Messwerte:

1. Die Indexergänzungen „Laden“ und „Entladen“ werden als Erweiterung der Messgrößenbezeichnung in Abhängigkeit vom Betriebszustand genutzt. Beispiel:
 - Momentane Ladeleistung der Batterie: $P_{BAT} \text{ (Laden)}$
 - Momentane Entladeleistung der Batterie: $P_{BAT} \text{ (Entladen)}$
2. Die arithmetischen Mittel der aufgezeichneten Messwerte werden mit einem Strich über der Messgröße dargestellt. Beispiel:

- Mittlere Ladeleistung über eine Messperiode: $\bar{P}_{\text{BAT(Laden)}}$
- 3. Die vorgegebenen Sollgrößen werden durch den Zusatz „SOLL“ angegeben. Beispiel:
 - Sollgröße der Last: $P_{\text{LAST,SOLL}}$
- 4. Die Indexergänzungen „Bezug“ und „Abgabe“ definieren den Bezug von Leistung aus dem Stromnetz oder die Abgabe von Leistung in das Stromnetz. Beispiel:
 - Netzeinspeisung: $P_{\text{NETZ (Abgabe)}}$
 - Netzbezug: $P_{\text{NETZ (Bezug)}}$

4.8.1 Allgemein

MPP-Leistung des PV-Simulators	$P_{\text{PVS,MPP}}$
Bereitgestellte Leistung des PV-Simulators.	
Ausgangsleistung des PV-Simulators	$P_{\text{PVS,DC}}$
Gemessene DC-Leistung des PV-Simulators.	
MPP-Spannung des PV-Simulators	$U_{\text{PVS,MPP}}$
Spannung im Maximum Power Point (MPP).	
Ausgangsspannung des PV-Generators	$U_{\text{PVS,DC}}$
Gemessene DC-Spannung des PV-Simulators.	
Batterieleistung des PV-Batteriespeichersystems	P_{BAT}
Gemessene DC-Leistung der Batterie.	
Batteriespannung des PV-Batteriespeichersystems	U_{BAT}
Gemessene DC-Spannung der Batterie.	
Batteriestrom des PV-Batteriespeichersystems	I_{BAT}
Gemessener DC-Strom der Batterie.	
AC-Ausgangsleistung des PV-Batteriespeichersystems	P_{AC}
AC-gekoppeltes System: AC-Summenleistung des PV- und Batterie-Wechselrichters.	
DC-gekoppeltes System: AC-Leistung des PV-Batterie-Wechselrichters.	
PV-Generatorkoppeltes System: AC-Leistung des PV-Wechselrichters.	
AC-Leistung am Netzanschlusspunkt	P_{NETZ}
Gemessene AC-Leistung am Netzanschlusspunkt.	
AC-Leistung an der Last	P_{LAST}
Gemessene AC-Leistung der Last.	

4.8.2 Zusatz: AC-gekoppelte Systeme

Diese Größen sind nötig zur separaten Wirkungsgradbestimmung des Batterie-Wechselrichters, unabhängig vom verwendeten PV-Wechselrichter.

Leistung am AC-Anschlusspunkt des Batterie-Wechselrichters	P_{BESS}
Gemessene AC-Leistung des Batterie-Wechselrichters.	
Leistung am AC-Anschlusspunkt des PV-Wechselrichters	$P_{\text{PV-WR}}$
Gemessene AC-Leistung des PV-Wechselrichters.	
Spannung am AC-Anschlusspunkt des PV-Wechselrichters	$U_{\text{PV-WR}}$
Gemessene AC-Spannung des PV-Wechselrichters.	

4.8.3 Zusatz: PV-Generatorgekoppelte Systeme

Leistung am DC-Anschlusspunkt des Batterie-Konverters zum Wechselrichter	P_{BESS}
Gemessene DC-Leistung des Konverters.	
Leistung am AC-Anschlusspunkt des PV-Wechselrichters	P_{AC}
Gemessene AC-Leistung des PV-Wechselrichters.	
Spannung am AC-Anschlusspunkt des PV-Wechselrichters	U_{AC}
Gemessene AC-Spannung des PV-Wechselrichters.	

4.9 Berechnete Größen

4.9.1 MPPT-Wirkungsgrad

Statischer MPPT-Wirkungsgrad, energetisch	η_{MPPT}
Verhältnis der vom Prüfling entnommenen Energie zu der vom PV-Simulator theoretisch zur Verfügung gestellten Energie im Maximum Power Point (MPP) [1]. Die Energie wird über die Messperiode t_M integriert.	
$\eta_{\text{MPPT}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{PVS,DC}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{\text{PVS,MPP}}(t) \cdot dt} \quad (1)$	
Mit	
Vom Prüfling entnommene DC-Leistung [1].	$P_{\text{PVS,DC}}(t)$
Am PV-Simulator theoretisch zur Verfügung gestellte Leistung im MPP [1].	$P_{\text{PVS,MPP}}(t)$
Messperiode.	t_M
Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad	
Um die Messungen nicht zu komplex zu gestalten, wird auf die Beschreibung, Messung und Berechnung des dynamischen MPPT-Wirkungsgrades verzichtet. Er kann aber nach DIN EN 50530 gemessen und im Prüfprotokoll oder Datenblatt angegeben werden.	

4.9.2 Pfadwirkungsgrade: AC-gekoppelte Systeme

Für AC-gekoppelte Systeme sind die Pfade AC2BAT und BAT2AC von Relevanz.

Batterieladung (AC2BAT)	η_{AC2BAT}
$\eta_{\text{AC2BAT}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{BAT (Laden)}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{\text{BESS (Laden)}}(t) \cdot dt} \quad (2)$	
Batterieentladung (BAT2AC)	η_{BAT2AC}
$\eta_{\text{BAT2AC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{BESS (Entladen)}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{\text{BAT (Entladen)}}(t) \cdot dt} \quad (3)$	

Optional können die Pfade PV2AC und PV2BAT bestimmt werden.

PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung (PV2AC)	$\eta_{\text{PV2AC,conv}}$
$\eta_{\text{PV2AC,conv}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{PV-WR}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{\text{PVS,DC}}(t) \cdot dt} \quad (4)$	
Batterieladung (PV2BAT)	η_{PV2BAT}
$\eta_{\text{PV2BAT}} = \eta_{\text{PV2AC,conv}} \cdot \eta_{\text{AC2BAT}} \quad (5)$	

4.9.3 Pfadwirkungsgrade: DC-gekoppelte Systeme

Für DC-gekoppelte Systeme sind die Pfade PV2AC, PV2BAT und BAT2AC von Relevanz.

Batterieladung (PV2BAT)	$\eta_{PV2BAT,conv}$
$\eta_{PV2BAT,conv} = \frac{\int_0^{t_M} P_{BAT (Laden)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} [P_{PVS,DC}(t) + P_{AC (Bezug)}(t) - P_{AC (Abgabe)}(t)] \cdot dt} \quad (6)$	

P_{AC} stellt während der gesamten Messperiode der Batterieladung einen unerwünschten Leistungsfluss dar (vgl. Kapitel 6.2).

Batterieentladung (BAT2AC)	η_{BAT2AC}
$\eta_{BAT2AC} = \frac{\int_0^{t_M} P_{AC (Abgabe)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt} \quad (7)$	

PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung (PV2AC)	$\eta_{PV2AC,conv}$
$\eta_{PV2AC,conv} = \frac{\int_0^{t_M} P_{AC (Abgabe)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} [P_{PVS,DC}(t) - P_{BAT (Laden)}(t) + P_{BAT (Entladen)}(t)] \cdot dt} \quad (8)$	

P_{BAT} stellt während der gesamten Messperiode der Batterieladung einen unerwünschten Leistungsfluss dar (vgl. Kapitel 6.2). Optional kann der Pfad AC2BAT bestimmt werden, sofern der Wechselrichter bidirektional ist.

Batterieladung (AC2BAT)	η_{AC2BAT}
$\eta_{AC2BAT} = \frac{\int_0^{t_M} P_{BAT (Laden)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{AC (Bezug)}(t) \cdot dt} \quad (9)$	

4.9.4 Pfadwirkungsgrade: PV-Generatorkgekoppelte Systeme

Für PV-Generatorkgekoppelte Systeme sind die Pfade PV2BAT und BAT2PV von Relevanz.

Batterieladung (PV2BAT)	$\eta_{PV2BAT,conv}$
$\eta_{PV2BAT,conv} = \frac{\int_0^{t_M} P_{BAT (Laden)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} [P_{PVS,DC}(t) - P_{BESS (Abgabe)}(t)] \cdot dt} \quad (10)$	

Batterieentladung (BAT2PV)	η_{BAT2PV}
$\eta_{BAT2PV} = \frac{\int_0^{t_M} P_{BESS (Abgabe)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt} \quad (11)$	

Optional können die Pfade PV2AC und BAT2AC bestimmt werden.

PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung (PV2AC)	$\eta_{PV2AC,conv}$
$\eta_{PV2AC,conv} = \frac{\int_0^{t_M} P_{AC (Abgabe)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} [P_{PVS,DC}(t) + P_{BAT (Entladen)}(t) - P_{BAT (Laden)}(t)] \cdot dt} \quad (12)$	

P_{BAT} stellt während der gesamten Messperiode der PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung einen unerwünschten Leistungsfluss dar (vgl. Kapitel 6.2).

Batterieentladung (BAT2AC)	η_{BAT2AC}
$\eta_{BAT2AC} = \frac{\int_0^{t_M} P_{AC (Abgabe)}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt} \quad (13)$	

4.9.5 PV-Gesamtwirkungsgrad (MPPT- und Umwandlungswirkungsgrad)

Der PV-Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem MPPT- und dem Umwandlungswirkungsgrad zusammen. Er wird für die Wandlungspfade PV-Netzeinspeisung bzw. Direktnutzung (PV2AC) als $\eta_{PV2AC,t}$ und PV-Batterieladung (PV2BAT) als $\eta_{PV2BAT,t}$ bestimmt. Der Umwandlungswirkungsgrad wird je nach Topologie und Pfad mit Hilfe der Formeln aus Kapitel 4.9.2 bis 4.9.4 bestimmt. Je nach Topologie wird der PV-Gesamtwirkungsgrad anschließend für die einzelnen Leistungs- und Spannungsniveaus wie folgt berechnet:

AC-gekoppelt (PV2AC)	$\eta_{PV2AC,t}$
-----------------------------	------------------

$$\eta_{PV2AC,t} = \eta_{PV2AC,conv} \cdot \eta_{MPPT} \quad (14)$$

AC-gekoppelt (PV2BAT)	$\eta_{PV2BAT,t}$
------------------------------	-------------------

$$\eta_{PV2BAT,t} = \eta_{PV2BAT,conv} \cdot \eta_{MPPT} = \eta_{PV2AC,conv} \cdot \eta_{AC2BAT} \cdot \eta_{MPPT} \quad (15)$$

DC- und PV-Generatorkgekoppelt (PV2AC)	$\eta_{PV2AC,t}$
---	------------------

$$\eta_{PV2AC,t} = \eta_{PV2AC,conv} \cdot \eta_{MPPT} \quad (16)$$

DC- und PV-Generatorkgekoppelt: (PV2BAT)	$\eta_{PV2BAT,t}$
---	-------------------

$$\eta_{PV2BAT,t} = \eta_{PV2BAT,conv} \cdot \eta_{MPPT} \quad (17)$$

4.9.6 Batteriekenzzahlen

Geladene Energie in die Batterie	$E_{BAT (Laden)}$
---	-------------------

Geladene Energie während einer bestimmten Periode t_M . Die Periode entspricht einem abgegrenzten Zeitraum. Sie wird in Wattstunden (Wh) angegeben.

$$E_{BAT (Geladen)} = \int_0^{t_M} P_{BAT (Laden)}(t) \cdot dt \quad (18)$$

Entladene Energie aus der Batterie	$E_{BAT (Entladen)}$
---	----------------------

Entladene Energie während einer bestimmten Periode t_M . Die Periode entspricht einem abgegrenzten Zeitraum. Sie wird in Wattstunden (Wh) angegeben.

$$E_{BAT (Entladen)} = \int_0^{t_M} P_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt \quad (19)$$

Geladene Kapazität in die Batterie	$C_{BAT (Laden)}$
---	-------------------

Geladene Kapazität während einer bestimmten Periode t_M . Die Periode entspricht einem abgegrenzten Zeitraum. Sie wird in Amperestunden (Ah) angegeben.

$$C_{BAT (Geladen)} = \int_0^{t_M} I_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt \quad (20)$$

Entladene Kapazität aus der Batterie	$C_{BAT (Entladen)}$
---	----------------------

Entladene Kapazität während einer bestimmten Periode t_M . Die Periode entspricht einem abgegrenzten Zeitraum. Sie wird in Amperestunden (Ah) angegeben.

$$C_{BAT (Entladen)} = \int_0^{t_M} I_{BAT (Entladen)}(t) \cdot dt \quad (21)$$

Energetischer Batteriewirkungsgrad – Round-trip efficiency $\eta_{\text{BAT,RTE}}$

Der Batteriewirkungsgrad (Einheit: %) stellt das Verhältnis der entladenen zur geladenen Energiemenge für eine definierte Anzahl von Vollzyklen dar. Die Energie wird an den Anschlussklemmen der Batterie gemessen. Die Leistungsaufnahme des BMS können den Wirkungsgrad reduzieren.

$$\eta_{\text{BAT,RTE}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{BAT (Entladen)}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} P_{\text{BAT (Laden)}}(t) \cdot dt} \quad (22)$$

Coulomb-Batteriewirkungsgrad – Coulomb Round-trip efficiency $\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$

Der Coulomb-Batteriewirkungsgrad (Einheit: %) stellt das Verhältnis der entladenen zur geladenen Kapazität für eine definierte Anzahl von Vollzyklen dar. Die Kapazität wird an den Anschlussklemmen der Batterie gemessen.

$$\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}} = \frac{\int_0^{t_M} I_{\text{BAT (Entladen)}}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} I_{\text{BAT (Laden)}}(t) \cdot dt} \quad (23)$$

4.9.7 Leistungsaufnahme im Standby oder ausgeschalteten Zustand

Auch wenn keine Leistungsumwandlung stattfindet, nehmen die einzelnen Systemkomponenten AC- und/oder DC-seitig Leistung auf.

Leistungsumwandlungssystem

Die Leistungsaufnahme kann entweder durch das Netz oder durch die Batterie gedeckt werden, wobei zwischen folgenden Modi unterschieden wird:

Leistungsaufnahme im Standby (Bereitschafts-Modus) $P_{\text{Standby,AC}},$
 $P_{\text{Standby,DC}}$

Eingangsleistung des Leistungsumwandlungssystems, wenn das System die vom Hersteller angegebenen Bedingungen für den Standby-Betrieb erreicht hat. Je nach System kann es gegebenenfalls mehrere Stufen des Standby-Betriebs geben.

Leistungsaufnahme im ausgeschalteten Zustand (Off-Modus) $P_{\text{Off,AC}},$
 $P_{\text{Off,DC}}$

Eingangsleistung des Leistungsumwandlungssystems, wenn das System manuell abgeschaltet wurde.

Die DC-Leistungsaufnahme des Wechselrichters bzw. Konverters wird für alle Topologien identisch bestimmt.

DC-Leistungsaufnahme des Wechselrichters / Konverters² $\bar{P}_{\text{Standby,DC}}$

$$\bar{P}_{\text{Standby,DC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{BAT (Entladen)}}(t) \cdot dt}{t_M} \quad (24)$$

Die Bestimmung der AC-Leistungsaufnahme variiert je nach Topologie. Zur AC-Leistungsaufnahme von PV-Generatorgekoppelten Systemen im entladenen Zustand trägt die Leistungsaufnahme des PV-Wechselrichters bei. Die Leistungsaufnahme der AC-Hilfsenergieversorgung von PV-Generatorgekoppelten Systemen ist in der Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten enthalten.

AC-Leistungsaufnahme des AC-gekoppelten Systems² $\bar{P}_{\text{Standby,AC}}$

$$\bar{P}_{\text{Standby,AC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{BESS (Laden)}}(t) \cdot dt}{t_M} \quad (25)$$

² Die Leistungsaufnahme im Off-Modus wird analog mit den gleichen Formeln berechnet.

AC-Leistungsaufnahme des DC-gekoppelten und PV-Generatorgekoppelten Systems² $\bar{P}_{\text{Standby,AC}}$

$$\bar{P}_{\text{Standby,AC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{AC (Bezug)}}(t) \cdot dt}{t_M} \quad (26)$$

PV-Wechselrichter

Bei AC-gekoppelten Systemen ist optional die AC-Leistungsaufnahme des PV-Wechselrichters im Standby-Betrieb zu ermitteln.

AC-Leistungsaufnahme des PV-Wechselrichters des AC-Generatorgekoppelten Systems² $\bar{P}_{\text{PV-WR,Standby,AC}}$

$$\bar{P}_{\text{PV-WR,Standby,AC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{PV-WR (Bezug)}}(t) \cdot dt}{t_M} \quad (27)$$

Weitere Systemkomponenten

Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten $\bar{P}_{\text{PERIPH,AC}}$

AC-Leistungsaufnahme der zusätzlich für den Betrieb des Systems erforderlichen Peripherie-Komponenten (z.B. Leistungssensoren, externes Energiemanagementsystem, ggf. erforderliche AC-Hilfsenergieversorgung oder Umschalteneinrichtung für den Netzersatzbetrieb)

Die AC-Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten lässt sich bei ausgeschalteter Last und PV-Erzeugung unabhängig von der Topologie wie folgt ermitteln:

AC-Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten $\bar{P}_{\text{PERIPH,AC}}$

$$\bar{P}_{\text{PERIPH,AC}} = \frac{\int_0^{t_M} P_{\text{NETZ (Bezug)}}(t) \cdot dt - \int_0^{t_M} P_{\text{AC (Bezug)}}(t) \cdot dt - \int_0^{t_M} P_{\text{Last}}(t) \cdot dt + \int_0^{t_M} P_{\text{AC (Abgabe)}}(t) \cdot dt - \int_0^{t_M} P_{\text{Netz (Abgabe)}}(t) \cdot dt}{t_M} \quad (28)$$

Batteriemanagementsystem (BMS)

Leistungsaufnahme im Standby $P_{\text{BMS,Standby}}$

BMS-Leistungsaufnahme im Standby. Beschreibung, siehe Kapitel 8.2.

5 Allgemeine Beschreibung der Systeme

Dieses Kapitel enthält die Beschreibung des Gesamtsystems, wie es beim Anwender installiert wird. Zu den wesentlichen Systemkomponenten gehören das Leistungsumwandlungssystem (Wechselrichter bzw. Konverter), die Batterie und die AC-Stromsensoren. Je nach Anbindung der Batterie wird zwischen verschiedenen Topologien unterschieden, welche nachfolgend detailliert erklärt werden. Die einzelnen Topologien werden mit Angabe der Messpunkte (Strom-, Spannungs- bzw. Leistungsmessung) nachfolgend beschrieben. Welche Messpunkte für die Analyse benötigt werden, hängt von der jeweiligen Prüfung und Systemtopologie ab. In Tabelle 1 sind alle Messpunkte angegeben, die für sämtliche Systemtopologien gelten. Zusätzliche, topologieabhängige Messpunkte werden in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben.

Tabelle 1: Allgemeine Messpunkte, unabhängig von der Systemtopologie.

Messpunkte	Beschreibung	Signalform	Mögliche Anschlüsse
PVS	PV-Simulator	DC	String 1 bis n
LAST	Emulierte Haushaltslast	AC	L1, L2, L3
NETZ	Netzanschlusspunkt	AC	L1, L2, L3
BAT	Anschlussklemme Batterie	DC	String 1 bis n
AC	AC-Ausgangsleistung Speichersystem	AC	L1, L2, L3

5.1 AC-gekoppelte Systeme

Das AC-gekoppelte Speichersystem ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein PV-Wechselrichter wandelt den Gleichstrom der PV-Anlage in Wechselstrom um (PV2AC). Die Batterieladung (AC2BAT) und Batterieentladung (BAT2AC) erfolgt über einen bidirektionalen Batterie-Wechselrichter. Die gesamte Kette der Batterieladung besteht somit aus den Pfaden PV2AC und AC2BAT.

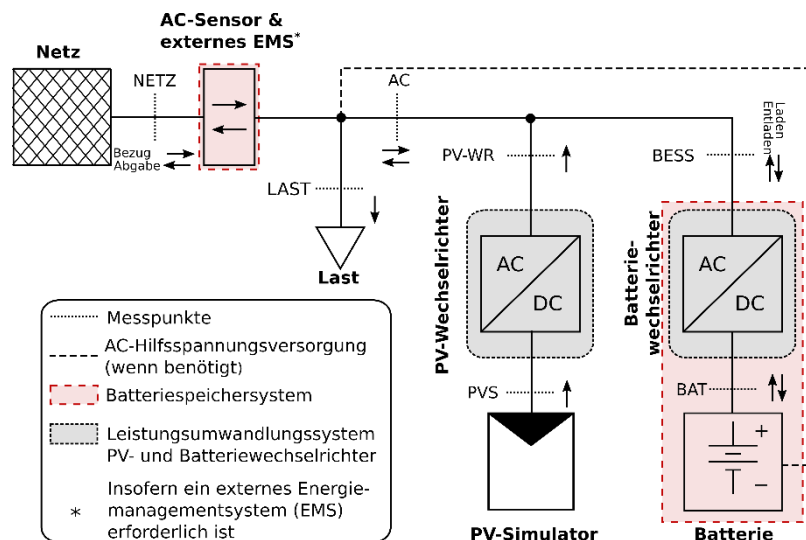


Abbildung 2: Systemkomponenten und Messpunkte von AC-gekoppelten Speichersystemen. (Quelle: AIT)

Zusätzlich zu den in Tabelle 1 aufgeführten Messpunkten gibt es beim AC-gekoppelten System zwei weitere Messpunkte (siehe Tabelle 2). Die gesamte Leistung am Anschlusspunkt (AC) stellt die Summenleistung des PV-Wechselrichters (PV-WR) und des Batterie-Wechselrichters (BESS) dar.

Tabelle 2: Zusätzliche Messpunkte bei AC-gekoppelten Systemen.

Messpunkte	Beschreibung	Signalform	Mögliche Anschlüsse
PV-WR (AC-gekoppelt)	AC-Anschluss des PV-Wechselrichters	AC	L1, L2, L3
BESS (AC-gekoppelt)	AC-Anschluss des Batterie-Wechselrichters	AC	L1, L2, L3

5.2 DC-gekoppelte Systeme

Das DC-gekoppelte Speichersystem ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Batteriespeichersystem ist an den DC-Zwischenkreis des Wechselrichters angebunden. Das Leistungsumwandlungssystem besteht aus einer Einheit. Die erzeugte PV-Energie wird in die Batterie geladen (PV2BAT) oder zur Lastdeckung bzw. Netzeinspeisung verwendet (PV2AC). Die Batterie wird zur Lastdeckung über den Wechselrichter entladen (BAT2AC). Die Wechselrichterbrücke kann unidirektional oder bidirektional ausgeführt sein. Ist Letzteres der Fall, ist es zusätzlich möglich, die Batterie aus dem AC-Netz zu laden (AC2BAT). Alle erforderlichen Messpunkte für DC-gekoppelte Speichersysteme lassen sich aus Tabelle 1 entnehmen.

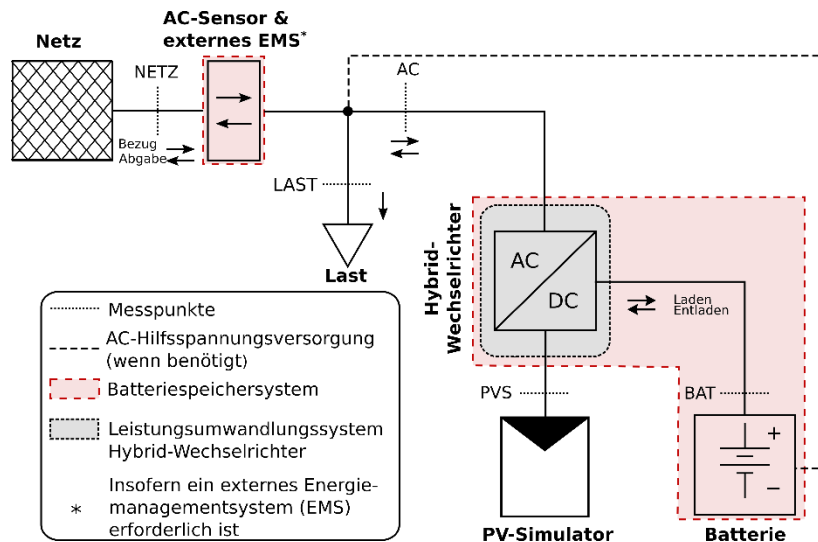


Abbildung 3: Systemkomponenten und Messpunkte von DC-gekoppelten Speichersystemen. (Quelle: AIT)

5.3 PV-Generatorkgekoppelte Systeme

Das PV-Generatorkgekoppelte Speichersystem ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Batteriesystem wird üblicherweise über einen Batterie-Konverter zwischen dem PV-Generator und einem konventionellen PV-Wechselrichter angebunden. Die Batterie wird direkt über den Konverter geladen (PV2BAT). Die PV-Netzeinspeisung bzw. Direktnutzung (PV2AC) sowie die Batterieentladung (BAT2AC) erfolgen über einen zum Speichersystem kompatiblen PV-Wechselrichter. Die gesamte Kette der Batterieentladung besteht somit aus den Energiewandlungspfaden BAT2PV und PV2AC.

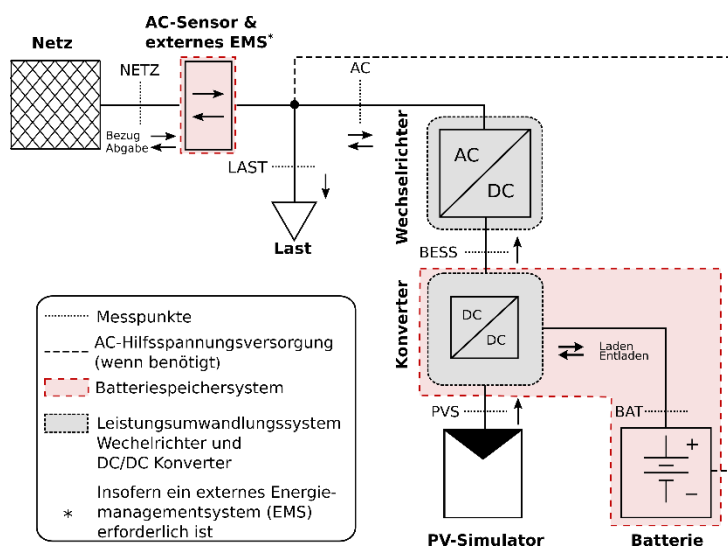


Abbildung 4: Systemkomponenten und Messpunkte von PV-Generatorkgekoppelten Speichersystemen. (Quelle: AIT)

Beim PV-Generatorkgekoppelten System wird ein zusätzlicher Messpunkt am DC-Eingang des PV-Wechselrichters verwendet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Zusätzliche Messpunkte bei PV-Generatorkoppelten Systemen.

Messpunkte	Beschreibung	Signalform	Mögliche Anschlüsse
BESS (PV-Generator- gekoppelt)	DC-Anschluss des Batterie- Konverters an den PV-Wechselrichter	DC	String 1 bis n

Bei hier nicht aufgeführten Systemtopologien muss der Prüfverantwortliche die Messanordnung gesondert mit dem Hersteller absprechen und im Prüfbericht entsprechend in Anlehnung an Abbildung 2 bis Abbildung 4 dokumentieren.

6 Allgemeine Beschreibung des Prüfablaufs

Der Prüfablauf in Tabelle 4 beschreibt eine mögliche Reihenfolge der durchzuführenden Messungen. 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: Mögliche Reihenfolge des Prüfablaufs.

	Verweis
Bestimmung der Bemessungsleistung	Anhang C
Leistungsumwandlungssystem	Kapitel 7
Batterie	Kapitel 8
Regelabweichungen des Systems	Kapitel 9

Die angegebene Soll-Temperatur T_A sollte im Verlauf der Messung in der Mitte des gegebenen Toleranzbereichs liegen, nicht im Randbereich. Für das Leistungsumwandlungssystem ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ einzustellen.

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die topologie- und pfadabhängigen Messpunkte sowie die anzuwendenden Formeln zur Bestimmung der Wirkungsgrade. Darüber hinaus beschreibt sie die Bemessungsausgangsleistung, die als Grundlage der Normierung des Wirkungsgrads analog der DIN EN 50530 angewendet wird. Im Prüfbericht und Datenblatt sind die Bemessungsausgangsleistungen und optional die Bemessungseingangsleistungen anzugeben.

Tabelle 5: Überblick über die Vermessung der Wandlungspfade.³

		Vermessener Wandlungspfad				
		PV2AC	PV2BAT	AC2BAT	BAT2AC	BAT2PV ⁴
Bemessungsleistung		$P_{PV2AC,nom}$	$P_{PV2BAT,nom}$	$P_{PV2BAT,nom}$	$P_{BAT2AC,nom}$	$P_{BAT2AC,nom}$
Ausgangsleistung des Leistungsumwandlungssystems	ACG	P_{PV-WR}	P_{BAT}	P_{BAT}	P_{BESS}	-
	DCG	P_{AC}			P_{AC}	-
	PVG				P_{BESS}	
Eingangsleistung des Leistungsumwandlungssystems	ACG	$P_{PVS,DC}$	$P_{PVS,DC}$	P_{BESS}	-	
	DCG			P_{AC}	-	
	PVG			P_{BAT}		
Errechneter Wirkungsgrad nach Formel	ACG	(4)	(5)(5)	(2)	(3)	-
	DCG	(8)	(6)	-	(7)	-
	PVG	(12)	(10)	(9)	(13)	(11)
Bemessungsausgangsleistung	ACG	$P_{PV-WR,nom}$	$P_{BAT,nom}$ (Laden)	$P_{BAT,nom}$ (Laden)	$P_{BESS,nom}$ (Entladen)	-
	DCG	$P_{AC,nom}$ (Abgabe)			$P_{AC,nom}$ (Entladen)	-
	PVG				$P_{BESS,nom}$ (Entladen)	

³ ACG = AC-gekoppelt, DCG = DC-gekoppelt, PVG = PV-Generatorgekoppelt

⁴ Der Pfad BAT2PV kommt nur bei PV-Generatorgekoppelten Systemen vor.

6.1 Leistungsvorgaben einzelner Betriebspunkte

Option A: Steuerung der Prüfung über PV-Erzeugung und Last

Die Prüfung erfolgt einzig durch Vorgabe der Leistung am PV-Simulator und an der elektrischen Last. Das Energiemanagementsystem des PV-Batteriespeichersystems regelt die Batterieleistung auf Basis der gemessenen Netzaustauschleistung. Die Batterie wird zur Deckung des Lastverbrauchs entladen und mit überschüssiger PV-Energie geladen. Dies setzt voraus, dass erweiterte Ladestrategien, wie prognosebasiertes Laden etc., deaktiviert sind. Für Messungen, bei denen keine Batterieladung bzw. Batterieentladung auftreten soll, ist es in vielen Fällen möglich, durch Bypass oder Emulation des AC-Stromsensors die Batterieladung oder -entladung zu unterdrücken.

Option A ist zu wählen, wenn alle Teilprüfungen mit der gleichen Vorgehensweise der Ansteuerung durchgeführt werden sollen.

Option B: Steuerung der Prüfung über eine Kommunikationsschnittstelle

Diese Möglichkeit der Ansteuerung gilt nur für die Wirkungsgradvermessung, jedoch nicht für die Bestimmung der Regeldynamik und -abweichung (siehe Kapitel 9). Leistungsvorgaben erfolgen nach Möglichkeit direkt über eine standardisierte Kommunikationsschnittstelle⁵. Bei der Wirkungsgradmessung ist dadurch ein präziseres Anfahren einzelner Betriebspunkte möglich, da die Regelschleife des Systems mit dem Zähler nicht benötigt wird. Die Schnittstelle sollte zusätzlich das Auslesen von Systemzuständen, wie z.B. dem *SOC*, erlauben.

Option B ist nur anwendbar für die Prüfungen nach Kapitel 7.5, 7.6 und 8.1. Für alle anderen Teilprüfungen ist die Vorgehensweise nach Option A notwendig. Sollte Option B angewendet werden, sind die entsprechenden Ergebnistabellen für den Prüfbericht ggf. anzupassen.

6.2 Unerwünschte Leistungsflüsse

Bei der Wirkungsgradvermessung können unerwünschte Leistungsflüsse auftreten, die nicht dem zu vermessenden Pfad zugehören. Auftretende Verluste können so in der Regel bei DC-gekoppelten Systemen wegen fehlenden Messpunkten im DC-Zwischenkreis nicht einem einzelnen Pfad exakt zugeordnet werden. Unerwünschte Leistungsflüsse bei der Wirkungsgradbestimmung einzelner Pfade sind bei DC- und ggf. PV-Generatorgekoppelten Systemen folgende:

- Batterieladung bzw. Batterieentladung beim Vermessen von PV2AC
- AC-Einspeisung bzw. AC-Bezug beim Vermessen von PV2BAT

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt grundsätzlich mit Messwerten des Zeitraums im eingeschwungenen Zustand (siehe Anhang B). Damit darüber hinaus der Fehler durch unerwünschte Leistungsflüsse minimiert wird, darf der Mittelwert des unerwünschten Leistungsflusses dauerhaft nicht mehr als 10% des Wertes der Eingangsleistung des jeweiligen Pfades betragen. Ist dies nicht möglich, kann der Wirkungsgrad nicht für die volle Messperiode t_M berechnet werden. Stattdessen erfordert die Mittelwertberechnung, dass mindestens ein Teilstück größer 40 s oder zwei Teilstücke zu je 20 s vorhanden sind. Trifft dies nicht zu, wird der Betriebspunkt erneut vermessen. Ist erneut keine Berechnung möglich, wird dies im Prüfprotokoll unter Angabe aller gemittelten Leistungen angegeben.

6.3 Ladezustand der Batterie

Batterie vollständig geladen

Die Batterie kann für die Prüfungen als vollständig geladen angenommen werden, sobald das Speichersystem näherungsweise den SOC_{max} erreicht hat und die Batterieladeleistung P_{BAT} trotz potenziell vorhandener DC-Eingangsleistung für 5 min auf unter 1% der Nominalleistung $P_{PCE/BAT,nom(Laden)}$ reduziert wurde. Wird dieser Schwellwert nicht unterschritten, gilt die Batterie als vollständig geladen, sobald die Batterieladeleistung 3% der Nominalleistung $P_{PCE/BAT,nom(Laden)}$ über einen Zeitraum von 1 h unterschritten hat. Ist es nach wie vor nicht möglich, die beschriebenen Kriterien zu erfüllen (z.B. durch ein kontinuierliches Pendeln zwischen Batterieladung und -entladung), obliegt es dem Prüfverantwortlichen den vollständig geladenen Zustand zu definieren. Die Definition kann bspw. durch Bildung des gleitenden Mittelwerts über 2 min und anschließender Anwendung eines der vorigen Kriterien erfolgen.

⁵ Als Beispiel kann SunSpec Modbus-TCP genannt werden, das definierte Modelle zum Auslesen und Steuern von Wechselrichtern bereitstellt.

Batterie vollständig entladen

Die Batterie kann für die Prüfungen als vollständig entladen angenommen werden, sobald das Speichersystem näherungsweise den SOC_{\min} erreicht hat und die Batterieentladeleistung trotz anliegender Last vom System automatisch und für mindestens 5 min auf unter 1% der Nominalleistung $P_{PCE/BAT,nom}$ (Entladen) reduziert wurde oder vom System eine Nachladung initiiert wird.

Abschätzung des SOC

Bei mehreren Teilprüfungen ist es wichtig, dass der SOC der Batterie im Bereich $SOC_{avg,area}$ bleibt. Wenn der Ladezustand der Batterie nicht über eine Kommunikationsschnittstelle ausgelesen werden kann, ist eine Abschätzung zulässig. Diese erfolgt über die Integration des geladenen bzw. entladenen Stroms und den Bezug auf die nutzbare Batteriekapazität $C_{BAT,nutz}$.

6.4 Optional: Verwendung eines Batteriesimulators

Zur Beschleunigung und Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Wirkungsgradbestimmung des Leistungsumwandlungssystems (PV2BAT, AC2BAT, etc.) kann die Verwendung eines Batteriesimulators vorteilhaft sein. Teilweise ist es zur Durchführung der Prüfungen erforderlich, die Batteriespannung in einem definierten Spannungsband zu halten. Die Batteriespannung ändert sich mit der Lade- bzw. Entladeleistung sowie dem Ladezustand der Batterie. Der Einsatz eines Batteriesimulators ist deshalb nach Möglichkeit vorzuziehen. Die Prüfung kann beschleunigt werden, was die effiziente Vermessung zusätzlicher Betriebspunkte hinsichtlich Leistung und Spannung erlaubt. Ebenso ist die Vermessung bei quasi konstant gehaltener Spannung möglich, was eine bessere Reproduzierbarkeit der Resultate ermöglicht.

Bei Lithium-Ionen-Batteriesystemen wird stets eine Kommunikation zwischen dem Leistungsumwandlungssystem und dem Batteriemanagementsystem (BMS) gefordert. Diese erfolgt in der Regel über einen Kommunikationsbus (CAN, Modbus, etc.). Erkennt der Wechselrichter keine Kommunikation, kann die Batterie nicht geladen oder entladen werden. Das bedeutet, dass nicht nur der Leistungsteil der Batterie, sondern auch die Kommunikationsschnittstelle emuliert werden muss.

Nach Möglichkeit sollte der Hersteller für diesen Fall erlauben, die Kommunikationsschnittstelle (BMS-Wechselrichter/Konverter) für Prüfungen zu deaktivieren. Das kann z.B. in einem speziellen Prüfmodus implementiert sein, bei dem ausgeschlossen ist, dass dieser Modus vom Kunden oder auch vom Installateur (versehentlich) aktiviert wird. Der sich ergebende Vorteil ist eine effizientere und genauere Vermessung des Systems durch Verwendung des Batteriesimulators.

7 Teilprüfung: Leistungsumwandlungssystem

Dieser Abschnitt hat die Bestimmung des Wirkungsgrades bzw. auftretender Verluste des Leistungsumwandlungssystems (Batterie-Wechselrichter bzw. Konverter) zum Inhalt. Dieses besteht prinzipiell aus der Leistungselektronik, eventuell erforderlichen Niederfrequenz- oder Hochfrequenz- Transformatoren sowie ggf. zusätzlichen Lüftern zur Kühlung. Bei vollintegrierten Systemen ist aufgrund der definierten Messpunkte in den Verlusten des Leistungsumwandlungssystems der Energieverbrauch einzelner Displays, des Energiemanagementsystems, der verwendeten Kommunikationsschnittstellen sowie gegebenenfalls des AC-Stromsensors enthalten.

Der Wirkungsgrad des Leistungsumwandlungssystems wird bei Voll- und Teillast für die einzelnen Energiewandlungspfade bestimmt. Diese werden in Abbildung 1 beschrieben und in Tabelle 6 je nach Systemtopologie aufgelistet.

Zur Bestimmung der Umwandlungswirkungsgrade an den definierten Stützstellen sind aus den Wirkungsgraden zunächst die resultierenden Verlustleistungen zu bestimmen. Im Anschluss lässt sich die Leistungsabhängigkeit der Verlustleistung durch eine quadratische Gleichung annähern. Aus der quadratischen Gleichung können die Verlustleistungen und folglich die Wirkungsgrade an den exakt definierten Stützstellen bestimmt werden. Sollte alternativ ein formerhaltendes Interpolationsverfahren (z.B. PCHIP aus MATLAB) verwendet werden, muss diese Entscheidung durch eine Begründung erläutert werden.

Tabelle 6: Vermessung der einzelnen Wandlungspfade für die verschiedenen Topologien.

Wandlungspfad	Kürzel	AC-gekoppelt	DC-gekoppelt	PV-Generator-gekoppelt
PV-Netzeinspeisung und Direktnutzung	PV2AC	Optional ⁶	Ja	Ja ⁷
PV-Batterieladung	PV2BAT	Optional ⁶	Ja	Ja
AC-Batterieentladung	BAT2AC	Ja	Ja	Optional
AC-Batterieladung	AC2BAT	Ja	Optional ⁸	Optional ⁹
DC-Batterieentladung	BAT2PV	Nein	Nein	Ja

AC-gekoppelte Systeme:

Bei AC-gekoppelten Systemen wird mindestens der Wirkungsgrad des Batterie-Wechselrichters AC2BAT und BAT2AC bestimmt.

PV-Generatorkgekoppelte Systeme:

Bei PV-Generatorkgekoppelten Systemen wird der Wirkungsgrad des Batterie-Konverters PV2BAT und BAT2PV bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit AC- und DC-gekoppelten Systemen sollte auch der Entladewirkungsgrad BAT2AC aus der Verkettung der Wirkungsgrade des PV-Wechselrichters (PV2AC) und des Batterie-Konverters beim Entladen (BAT2PV) bestimmt und im Prüfbericht angegeben werden. Es wird empfohlen den Wirkungsgrad BAT2AC in derselben Messung aufzunehmen, in der der Wirkungsgrad BAT2PV vermessen wird. Im Prüfbericht ist in diesen Fall anzumerken, dass der Wirkungsgrad bei Verwendung eines alternativen PV-Wechselrichters in der Praxis höher oder niedriger ausfallen kann.

7.1 Prüfaufbau

Der Prüfaufbau ist in Abbildung 2 bis Abbildung 4 dargestellt. Bei Prüfungen von PV-Wechselrichtern mit mehreren unabhängigen PV-Eingängen wird die Messung für alle vom Hersteller vorgesehenen Eingangskonfigurationen durchgeführt [1]. Sofern vom Hersteller nicht anders vorgesehen, ist die Ge-

⁶ Für eine Charakterisierung im Gesamtsystem muss ein Wechselrichter bereitgestellt werden.

⁷ Die genauen Messbedingungen und der PV-Wechselrichter sind anzugeben.

⁸ Erfordert einen bidirektionalen Wechselrichter.

⁹ Erfordert einen bidirektionalen Wechselrichter und eine entsprechend abgestimmte Regelung.

samtleistung auf beide Eingänge gleichmäßig zu verteilen. Wird anders gemessen, muss dies angegeben werden. Alle drei Eingangsspannungen ($U_{MPP,min}$, $U_{MPP,nom}$, $U_{MPP,max}$) müssen mit der gleichen Konfiguration vermessen werden. Der Hersteller liefert eine Beschreibung, welche Eingänge für den Betriebsmodus PV2BAT und PV2AC verwendet werden.

7.2 Berechnung der Wirkungsgrade

Die Berechnungen der Wirkungsgrade erfolgen nach den Formeln (2) bis (13).

7.3 PV-Direktnutzung und Netzeinspeisung (PV2AC)

Der Leistungsfluss PV2AC tritt bei Direktnutzung oder Netzeinspeisung der PV-Erzeugung auf. Das System muss durch das Maximum Power Point Tracking (MPPT) möglichst die maximal vom PV-Simulator bereitgestellte Leistung beziehen. Hierbei können MPPT-Anpassungsverluste entstehen. Zusätzlich treten Verluste bei der Umwandlung der DC- in AC-Leistung auf.

Hinweis: AC-gekoppelte Systeme

Der Wirkungsgrad $\eta_{PV2AC,t}$ ist beim AC-gekoppelten System einzig durch den beim Anwender verwendeten PV-Wechselrichter bestimmt. Wird das Speichersystem (Batterie-Wechselrichter, Batterie) ohne PV-Wechselrichter angeboten, ist keine Messung für diesen Betriebsmodus notwendig. Wenn ein oder mehrere PV-Wechselrichter Teil des Speicherpakets sind oder vom Hersteller empfohlen werden, soll für diese PV-Wechselrichter das Ergebnis der Wirkungsgradmessungen nach DIN EN 50530 verwendet werden.

Hinweis: DC-gekoppelte Systeme

Der Wirkungsgrad $\eta_{PV2AC,t}$ wird beim DC-gekoppelten System im realen Betrieb auch von den Leerlaufverlusten des batteriezeitigen Leistungsstellers beeinflusst. Um realistische Messergebnisse für den PV2AC-Wirkungsgrad zu erhalten, soll das Speichersystem dabei an dem Wechselrichter angeschlossen sein und im Bereitschafts- oder Standby-Modus verweilen. Eine Trennung der Batterie von den leistungselektronischen Komponenten während der Vermessung des PV2AC-Wirkungsgrads ist im Prüfbericht anzugeben.

Hinweis: PV-Generatorkgekoppelte Systeme

Der Wirkungsgrad $\eta_{PV2AC,t}$ ist beim PV-Generatorkgekoppelten System primär durch den verwendeten PV-Wechselrichter bestimmt. Das zwischen PV-Generator und Wechselrichter geschaltete Speichersystem kann, je nach Verschaltungskonzept, zusätzliche Verluste erzeugen und ggf. das MPPT des verwendeten PV-Wechselrichters beeinflussen. Eine Prüfung des Pfades PV2AC ist deshalb mit einem zum Speichersystem kompatiblen Wechselrichter durchzuführen. Das Speichersystem sollte dabei an den PV-Wechselrichter angeschlossen sein, sowie im Bereitschafts- oder Standby-Modus verweilen.

7.3.1 Prüfbedingungen

PV-Eingangsspannung und -leistung

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der PV-Erzeugungsleistung und der Spannung am PV-Simulator. Es gelten die in der Norm DIN EN 50530 angegebenen Messbedingungen. Die Messung erfolgt jeweils bei minimaler, nominaler und maximaler PV-Eingangsspannung. Für jedes PV-Spannungsniveau werden Messungen bei Vollast und im Teillastbereich durchgeführt.

Batteriezustand

Die Prüfung erfolgt bei vollgeladener Batterie laut Definition in Kapitel 6.3.

Batterieleistung

Im Idealfall tritt während der Prüfung keine Batterieladung oder -entladung auf. In der Praxis lässt sich dies jedoch nicht immer vermeiden, sodass es dazu kommen kann, dass die Batterie geringfügig geladent oder entladent wird. Die Leistung P_{BAT} wird während der Prüfung aufgezeichnet. Sollte eine Ladung oder Entladung der Batterie während der Messung auftreten, ist die in Kapitel 6.2 beschriebene Vorgehensweise zu befolgen.

Last

Während der Prüfung ist keine Last aktiv. Eine Zusammenfassung der Prüfbedingungen ist in Tabelle 7 gegeben.

Tabelle 7: Prüfbedingungen für den Pfad PV2AC.

Parameter	Wert
P_{LAST}	0
$P_{PVS,MPP}$	Vorgabewert
Batteriezustand	Vollständig geladene Batterie, siehe Kapitel 6.3
T_A	25 °C ± 5 °C

7.3.2 Betriebspunkte

Der statische MPPT-Wirkungsgrad η_{MPPT} und der Umwandlungswirkungsgrad $\eta_{PV2AC,conv}$ werden gleichzeitig für die in Tabelle 8 gelisteten Betriebspunkte vermessen. Die Kennlinie wird auf die maximale Leistung und nicht auf die Einstrahlung normiert. Die Eingangsspannung ist somit für jede Teilmessung ($U_{MPP,min}$, $U_{MPP,nom}$ und $U_{MPP,max}$) konstant und nicht von der Einstrahlung abhängig.

Tabelle 8: Betriebspunkte für den Pfad PV2AC.

MPP-Leistung der simulierten I/U-Kennlinie bezogen auf die Bemessungseingangsleistung							
$P_{PVS,MPP}/P_{PV2AC,nom}$							
0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
jeweils bei $U_{MPP,min}$, $U_{MPP,nom}$ und $U_{MPP,max}$. Sollte $U_{MPP,max}$ nicht möglich sein, kann auch $0,8 \cdot U_{PV,max}$ gewählt werden.							
simulierte I/U-Kennlinie: c-Si							

7.3.3 Durchführung der Messungen

Die Durchführung der Messungen erfolgt nach der Norm DIN EN 50530.

7.3.4 Auswertung

Für jeden Betriebspunkt aus Tabelle 8 werden der MPPT- und der Umwandlungswirkungsgrad als energetischer Mittelwert über die Messperiode t_M berechnet. Wird innerhalb der Messperiode kein eingeschwungener Zustand erreicht oder treten unerwünschte Leistungsflüsse auf, erfolgt die Vorgehensweise für die Mittelwertbildung nach Kapitel 6.2.

Der statische MPPT-Wirkungsgrad η_{MPPT} wird gemäß Formel (1) berechnet. Der Umwandlungswirkungsgrad $\eta_{PV2AC,conv}$ wird je nach Topologie anhand von Formel (4), (8) oder (12) berechnet. Der PV-Gesamtwirkungsgrad η_{PV2AC} entspricht dem Produkt des statischen MPPT-Wirkungsgrades und des Umwandlungswirkungsgrades (vgl. Formel (14) bzw. (16)). Das Prüfprotokoll enthält die in Tabelle 9 angegebenen Werte. Der auf die Bemessungsausgangsleistung bezogene Pfadwirkungsgrad (PV2AC) ist nochmals in Tabelle 10 bzw. Tabelle 11 zu überführen. Falls der Wechselrichter mit zwei Strings betrieben wird sind die Werte $\bar{U}_{PVS,DC}$, $\bar{P}_{PVS,MPP}$ und η_{MPPT} in der Messwerttabelle als die Mittelwerte der String-bezogenen Größen anzugeben.

Tabelle 9: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für den Pfad PV2AC.

$P_{PVS,MPP}/P_{PV2AC,nom}$		0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{PV2AC}	%								
η_{MPPT}	%								
$\eta_{PV2AC,conv}$	%								
$\bar{P}_{PVS,MPP}$	W								
$\bar{U}_{PVS,DC}$	V								
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W								
\bar{P}_{AC}^{10}	W								
\bar{P}_{PV-WR}^{11}	W								

¹⁰ nur bei DC- und PV-Generatorkoppelten Systemen

¹¹ nur bei AC-gekoppelten Systemen

$\bar{P}_{\text{BAT (Laden)}}^{10}$	W								
$\bar{P}_{\text{BAT (Entladen)}}^{10}$	W								
\bar{U}_{BAT}	V								
$\bar{P}_{\text{AC}}/\bar{P}_{\text{AC,nom}}^{10}$	-								
$\bar{P}_{\text{PV-WR}}/\bar{P}_{\text{PV-WR,nom}}^{11}$	-								
jeweils bei $U_{\text{MPP,min}}$, $U_{\text{MPP,nom}}$ und $U_{\text{MPP,max}}$. Sollte $U_{\text{MPP,max}}$ nicht möglich sein, kann auch $0,8 \cdot U_{\text{PV,max}}$ gewählt werden.									
simulierte I/U-Kennlinie: c-Si									

Tabelle 10: Zusammenfassung des PV2AC-Wirkungsgrads für DC- und PV-Generatorgekoppelte Systeme.

$P_{\text{AC}}/P_{\text{AC,nom}}$	-	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{\text{PV2AC,t}}$	%								

Tabelle 11: Zusammenfassung des PV2AC-Wirkungsgrads für AC-gekoppelte Systeme.

$P_{\text{PV-WR}}/P_{\text{PV-WR,nom}}$	-	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{\text{PV2AC,t}}$	%								

7.4 Batterieladung und -entladung (allgemein)

Das folgende Kapitel beschreibt allgemein, wie bei der Vermessung der Wandlungspfade zur Ladung und Entladung der Batterie vorzugehen ist. Die Prüfung für beide Pfade (Ladung und Entladung) erfolgt dabei gemäß der nachfolgend beschriebenen Prüfsequenz. Die exakten Prüfbedingungen werden gesondert für die Batterieentladung (Kapitel 7.5) und die Batterieladung (Kapitel 7.6) erläutert.

7.4.1 Prüfbedingungen

Die Batteriespannung hat bei der Vermessung folgender Wandlungspfade Einfluss auf den Wirkungsgrad: PV2BAT, AC2BAT, BAT2AC und BAT2PV. Die Vermessung der Wirkungsgrade erfolgt deshalb in einem Spannungsbereich, der einem mittleren Ladezustandsbereich $SOC_{\text{avg,area}}$ der Batterie entspricht. Die Batterie wird vor Prüfbeginn voll aufgeladen und anschließend auf $SOC_{\text{avg}} + 10\%$ entladen (Abschätzung des SOC, siehe Kapitel 6.3). Der SOC sowie die Spannung bei Prüfbeginn sind im Prüfprotokoll anzugeben. Zusätzlich kann bei weiteren Batteriespannungen im oberen oder unteren Ladezustandsbereich gemessen werden.

Batteriesystem/Modulkonfiguration

Bei Hochvoltssystemen mit modularen, in Serie geschalteten Batteriemodulen werden die Wirkungsgradverläufe mindestens bei mittlerer Modulanzahl aufgenommen. Zudem werden Messungen bei minimaler und maximaler Modulanzahl empfohlen. Bei jeder Konfiguration erfolgt die Prüfung wiederum bei einer Batteriespannung, die einem mittleren Ladezustandsbereich $SOC_{\text{avg,area}}$ entspricht.

7.4.2 Prüfsequenz

Um die Reproduzierbarkeit der Wirkungsgradmessungen zu erhöhen, wird nachfolgend der Ablauf zur Ermittlung des Ladewirkungsgrades (PV2BAT, AC2BAT) und des Entladewirkungsgrades (BAT2AC, BAT2PV) beschrieben.

- 1) **Ausgangszustand herstellen**
 - a) Batterie vollständig laden (siehe Kapitel 6.3)
 - b) Die Batterie wird ca. auf den mittleren $SOC_{\text{avg}} + 10\%$ entladen
 - c) Pause (~30 min)
- 2) **Treppenprofil Entladewirkungsgrad**
 - a) Pause (~30 min)
- 3) **Treppenprofil Ladewirkungsgrad bei $U_{\text{MPP,nom}}$**
 - a) Pause (~30 min)
- 4) **Treppenprofil Entladewirkungsgrad**
 - a) Pause (~30 min)
- 5) **Treppenprofil Ladewirkungsgrad bei $U_{\text{MPP,min}}$**
 - a) Pause (~30 min)

- 6) **Treppenprofil Entladewirkungsgrad**
 - a) Pause (~30 min)
- 7) **Treppenprofil Ladewirkungsgrad** bei $U_{MPP,max}$
- 8) **Ende der Prüfung**

Hinweis: AC-gekoppelte Systeme

Da bei AC-gekoppelten Systemen lediglich der Wandlungspfad AC2BAT vermessen wird, sind bei dieser Topologie die Schritte 1-3 ausreichend.

Treppenprofil

Zur Bestimmung des Lade- und Entladewirkungsgrades wird das Treppenprofil verwendet, das in Abbildung 5 dargestellt ist. Die erste Stufe wird für insgesamt 6 min gehalten. Durch eine dreiminütige Vorlaufzeit t_V soll dem System nach der Pause ausreichend Zeit für den Übergang in den jeweiligen Betriebsmodus gegeben werden (z.B. Starten des PV-Wechselrichters). Alle weiteren Stufen werden für die Haltedauer t_H von jeweils 3 min gehalten. Dabei stehen dem System zur Erreichung des eingeschwungenen Zustands 40 s zur Verfügung. Die Messperiode für die Berechnung des Wirkungsgrades (energetische Mittelung) sowie entsprechende Mittelung der Leistung und Spannung für die Angabe im Prüfprotokoll erfolgt über die Messperiode t_M und beträgt 140 s.

Anmerkung

Bei einzelnen Systemen kann es vorkommen, dass eine Haltedauer von 3 min pro Stufe nicht zum Erreichen eines eingeschwungenen Zustands (siehe Anhang B) genügt. Ist dies der Fall, müssen die Stufen gegebenenfalls über mehr als 3 min gehalten werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Prüfung noch innerhalb des mittleren SOC-Bereichs $SOC_{avg,area}$ erfolgt.

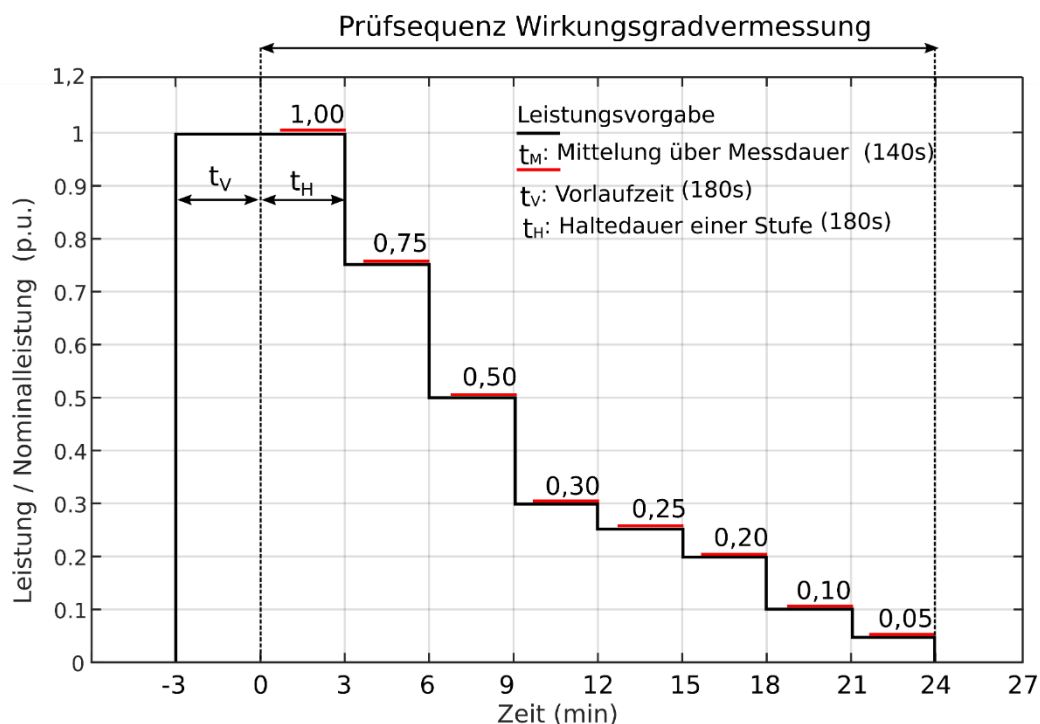


Abbildung 5: Treppenprofil zur Bestimmung der Wirkungsgrade der Pfade PV2BAT, AC2BAT, PV2AC, BAT2PV und BAT2AC. Hinweise zur Bestimmung der Bemessungsleistung sind in Anhang C zu finden. (Quelle: AIT)

7.5 Batterieentladung (BAT2AC, BAT2PV)

In diesem Kapitel werden die Prüfbedingungen bei Entladung der Batterie beschrieben (siehe Tabelle 12). Eine Beschreibung der Prüfbedingungen bei Ladung der Batterie erfolgt in Kapitel 7.6. Der Wirkungsgrad des Systems bei der Batterieentladung hängt von der Entladeleistung der Batterie P_{BAT} und der Batteriespannung U_{BAT} ab, die wiederum vom Ladezustand SOC , dem Batteriestrom I_{BAT} sowie der Batteriekonfiguration abhängig ist.

7.5.1 Prüfbedingungen

PV-Eingangsspannung und -leistung

Während der Prüfung wird keine PV-Erzeugung benötigt.

Batteriezustand

Der Ausgangszustand der Batterie ist in Kapitel 7.4.1 definiert.

Batterieleistung

Durch das Regelkonzept der Batteriespeichersysteme kann die Batterieleistung in einem gewissen Rahmen schwanken. Sind die Schwankungen zu groß (siehe Anhang B), kann unter Umständen keine ausreichende Mittelwertbildung und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Ein solches Verhalten wird protokolliert und im Prüfbericht angegeben.

AC- oder DC-Ausgangsleistung

Die AC- oder DC-Ausgangsleistung kann ebenso wie die Batterieleistung schwanken. Es gelten dementsprechend dieselben Anforderungen aus Anhang B.

Last

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der Last. Die Batterie wird entladen, um den Verbrauch zu decken.

Tabelle 12: Prüfbedingungen für den Pfad BAT2AC und BAT2PV.

Parameter	Wert
P_{LAST}	Vorgabewert
$P_{PVS,MPP}$	0
P_{AC}^{12}	$P_{AC} \sim P_{LAST}$
Batteriezustand	$SOC_{avg,area}$
T_A	$25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$

7.5.2 Betriebspunkte

Die Prüfung erfordert das Vermessen der Betriebspunkte aus Tabelle 13.

Tabelle 13: Betriebspunkte für die Pfade BAT2AC und BAT2PV.

Normierte Leistung der Last $P_{LAST}/P_{BAT2AC,nom}$ bzw. $P_{LAST}/P_{BAT2PV,nom}$							
0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00

7.5.3 Durchführung der Messungen

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der Last. Die Prüfsequenz wird so gestaltet, dass der SOC innerhalb des Bereichs $SOC_{avg,area}$ bleibt. Die Haltedauer der Stufe beträgt für jeden spezifischen Leistungswert mindestens 3 min.

7.5.4 Auswertung

Für jeden Betriebspunkt nach Tabelle 13 wird der Umwandlungswirkungsgrad η_{BAT2AC} bzw. η_{BAT2PV} als energetischer Mittelwert über die Messperiode t_M berechnet. Wird innerhalb der Messperiode kein eingeschwungener Zustand erreicht (vgl. Anhang B) oder treten unerwünschte Leistungsflüsse auf, erfolgt die Vorgehensweise für die Mittelwertbildung nach Kapitel 6.2.

¹²Beim AC-gekoppelten System entspricht die Leistung der Leistung P_{BESS} , insofern keine PV-Erzeugung vorhanden ist und der Eigenverbrauch des PV-Wechselrichters null ist.

* Ist der Messpunkt 0,05 nicht vermessen, ist dies zu kennzeichnen. Bei Interpolationen müssen diese Werte vernachlässigt werden.

Die Berechnung erfolgt für AC-gekoppelte Systeme nach Formel (3), für DC-gekoppelte Systeme nach Formel (7) und für PV-Generatorgekoppelte Systeme nach Formel (13) bzw. (11). Die Mess- und Berechnungsergebnisse für den Umwandlungspfad BAT2AC bzw. BAT2PV sind gemäß Tabelle 14 bis Tabelle 18 zu erstellen.

Tabelle 14: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für den Pfad BAT2AC.

$P_{\text{LAST}}/P_{\text{BAT2AC,nom}}$		0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{BAT2AC}	%								
$P_{\text{LAST,SOLL}}$	W								
\bar{P}_{LAST}	W								
$\bar{P}_{\text{BESS}}^{13}$	W								
$\bar{P}_{\text{BESS}}/P_{\text{BESS,nom}}$ (Entladen) ¹³	%								
\bar{P}_{AC}^{14}	W								
$\bar{P}_{\text{AC}}/P_{\text{AC,nom}}$ (Entladen)	%								
\bar{P}_{BAT}	W								
\bar{U}_{BAT}	V								
C_{BAT} (Entladen)	Ah								
C_{BAT} (Entladen)/ $C_{\text{BAT, nutz}}$	%								
\bar{P}_{NETZ} (Bezug)	W								
\bar{P}_{NETZ} (Abgabe)	W								

Tabelle 15: Zusammenfassung des BAT2AC-Wirkungsgrads für AC-gekoppelte Systeme.

$P_{\text{BESS}}/P_{\text{BESS,nom}}$ (Entladen)	-	0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{BAT2AC}	%								

Tabelle 16: Zusammenfassung des BAT2AC-Wirkungsgrads für DC-gekoppelte Systeme.

$P_{\text{AC}}/P_{\text{AC,nom}}$ (Entladen)	-	0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{BAT2AC}	%								

Tabelle 17: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für den Pfad BAT2PV.

$P_{\text{LAST}}/P_{\text{BAT2PV,nom}}$		0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{BAT2PV}	%								
$P_{\text{LAST,SOLL}}$	W								
\bar{P}_{LAST}	W								
\bar{P}_{BESS}	W								
$\bar{P}_{\text{BESS}}/P_{\text{BESS,nom}}$ (Entladen)	%								
\bar{P}_{AC}	W								
\bar{P}_{BAT}	W								
\bar{U}_{BAT} bzw. $\bar{U}_{\text{BESS}}^{15}$	V								
C_{BAT} (Entladen)	Ah								
C_{BAT} (Entladen)/ $C_{\text{BAT, nutz}}$	%								
\bar{P}_{NETZ} (Bezug)	W								
\bar{P}_{NETZ} (Abgabe)	W								

¹³ nur bei AC-gekoppelten Systemen¹⁴ nur bei DC- und PV-Generatorgekoppelten Systemen¹⁵ \bar{U}_{BESS} bei PV-Generatorgekoppelten System angeben

Tabelle 18: Zusammenfassung des BAT2PV-Wirkungsgrads für PV-Generatorkoppelte Systeme.

$P_{\text{BESS}}/P_{\text{BESS,nom}}$ (Entladen)	-	0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{BAT2PV}	%								

7.6 Batterieladung (PV2BAT, AC2BAT)

In diesem Kapitel werden die Prüfbedingungen bei Ladung der Batterie beschrieben. Der Wirkungsgrad der PV-Batterieladung (PV2BAT) hängt von der MPP-Leistung $P_{\text{PVS,MPP}}$ und Ausgangsspannung $U_{\text{PVS,DC}}$ des PV-Simulators sowie der Batteriespannung U_{BAT} ab, die wiederum vom Ladezustand SOC , dem Batteriestrom I_{BAT} sowie der Batteriekonfiguration abhängig ist. Der Wirkungsgrad der AC-Batterieladung (AC2BAT) bei AC-gekoppelten Systemen entspricht dem Umwandlungswirkungsgrad η_{AC2BAT} des Batterie-Wechselrichters.

7.6.1 Prüfbedingungen

PV-Eingangsspannung und -leistung

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der PV-Erzeugungsleistung und der Spannung. Die Messung des Wirkungsgrads der PV-Batterieladung (PV2BAT) erfolgt bei minimaler, nominaler und maximaler PV-Eingangsspannung. Für jedes Spannungslevel werden Messungen bei Volllast und im Teillastbereich durchgeführt.

Batteriezustand

Der Ausgangszustand der Batterie ist in Kapitel 7.4.1 definiert.

Batterieleistung

Durch das Regelkonzept der Batteriespeichersysteme kann die Batterieleistung in einem gewissen Rahmen schwanken. Sind die Schwankungen zu groß (siehe Anhang B), kann unter Umständen keine ausreichende Mittelwertbildung und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Ein solches Verhalten wird protokolliert und im Prüfbericht angegeben.

AC-Ausgangsleistung

Die AC-Ausgangsleistung P_{AC} des Speichersystems ist im Idealfall null. Abweichungen werden protokolliert und im Prüfbericht angegeben.

Last

Während der Prüfung ist keine Last aktiv. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Prüfbedingungen für den Pfad PV2BAT und AC2BAT.

Parameter	Wert
P_{LAST}	0
$P_{\text{PVS,MPP}}$	Vorgabewert
Batteriezustand	$SOC_{\text{avg,area}}$
T_{A}	25 °C ± 5 °C

7.6.2 Betriebspunkte

Die Prüfung erfordert das Vermessen der Betriebspunkte aus Tabelle 20 bzw. Tabelle 21.

Tabelle 20: Betriebspunkte für den Pfad PV2BAT.

MPP-Leistung der simulierten I/U-Kennlinie bezogen auf die Bemessungseingangsleistung							
$P_{\text{PVS,MPP}}/P_{\text{PV2BAT,nom}}$							
0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
jeweils bei $U_{\text{MPP,min}}$, $U_{\text{MPP,nom}}$ und $U_{\text{MPP,max}}$. Sollte $U_{\text{MPP,max}}$ nicht möglich sein, kann auch $0,8 \cdot U_{\text{PV,max}}$ gewählt werden.							
simulierte I/U-Kennlinie: c-Si							

Tabelle 21: Betriebspunkte für den Pfad AC2BAT bei Vorgabe der Ladeleistung am PV-Simulator.

MPP-Leistung der simulierten I/U-Kennlinie bezogen auf die Bemessungseingangsleistung							
$P_{PVS,MPP}/P_{AC2BAT,nom}$							
0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
bei $U_{MPP,nom}$							

7.6.3 Durchführung der Messungen

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der PV-Erzeugungleistung und Spannung am PV-Simulator. Die Prüfsequenz wird so gestaltet, dass der SOC innerhalb des Bereichs $SOC_{avg,area}$ bleibt. Die Haltedauer der Stufe beträgt für jeden spezifischen Leistungswert mindestens 3 min.

7.6.4 Auswertung

Für jeden Betriebspunkt aus Tabelle 20 wird der statische MPPT- und der Umwandlungswirkungsgrad als energetischer Mittelwert über die Messperiode t_M berechnet. Wird innerhalb der Messperiode kein eingeschwungener Zustand erreicht (vgl. Anhang B) oder treten unerwünschte Leistungsflüsse auf, erfolgt die Vorgehensweise für die Mittelwertbildung nach Kapitel 6.2.

Der statische MPPT-Wirkungsgrad η_{MPPT} wird laut Formel (1) berechnet. Der Umwandlungswirkungsgrad η_{PV2BAT} bzw. $\eta_{PV2BAT,conv}$ wird je nach Topologie anhand von Formel (5), (6) oder (10) berechnet. Der PV-Gesamtwirkungsgrad $\eta_{PV2BAT,t}$ entspricht dem Produkt des statischen MPPT-Wirkungsgrades und des Umwandlungswirkungsgrades (vgl. Formel (15) bzw. (17)). Der Umwandlungswirkungsgrad η_{AC2BAT} wird für AC-gekoppelte Systeme nach Formel (2) berechnet. Bei DC-gekoppelten Systemen mit bidirektionalem Wechselrichter wird optional die Formel (9) zur Bestimmung des Pfades verwendet.

Die Mess- und Berechnungsergebnisse für den Umwandlungspfad PV2BAT bzw. AC2BAT sind gemäß Tabelle 22 bis Tabelle 25 zu erstellen. Falls der Wechselrichter mit zwei Strings betrieben wird, sind die Werte $\bar{U}_{PVS,DC}$, $\bar{P}_{PVS,MPP}$ und η_{MPPT} in der Messwerttabelle als die Mittelwerte der String-bezogenen Größen anzugeben.

Tabelle 22: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für den Pfad PV2BAT.

$P_{PVS,MPP}/P_{PV2BAT,nom}$		0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{PV2BAT,t}$	%								
η_{MPPT}	%								
$\eta_{PV2BAT,conv}$	%								
$\bar{P}_{PVS,MPP}$	W								
$\bar{U}_{PVS,DC}$	V								
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W								
\bar{P}_{AC} (Bezug)	W								
\bar{P}_{AC} (Abgabe)	W								
\bar{P}_{BAT}	W								
$\bar{P}_{BAT}/P_{BAT,nom}$ (Laden)	%								
\bar{U}_{BAT}	V								
C_{BAT} (Laden)	Ah								
C_{BAT} (Laden)/ $C_{BAT, nutz}$	%								
\bar{P}_{NETZ} (Bezug)	W								
\bar{P}_{NETZ} (Abgabe)	W								
jeweils bei $U_{MPP,min}$, $U_{PV,nom}$ und $U_{MPP,max}$. Sollte $U_{MPP,max}$ nicht möglich sein, kann auch $0,8 \cdot U_{PV,max}$ gewählt werden.									
simulierte I/U-Kennlinie: c-Si									

Tabelle 23: Zusammenfassung des PV2BAT-Wirkungsgrads für DC- und PV-Generatorkgekoppelte Systeme.

$P_{BAT}/P_{BAT,nom}$	-	0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{PV2BAT,t}$	%								

Tabelle 24: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für den Pfad AC2BAT.

$P_{PVS,MPP}/P_{AC2BAT,nom}$		0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{AC2BAT}	%								
$\bar{P}_{PVS,MPP}$	W								
$\bar{U}_{PVS,DC}$	V								
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W								
\bar{P}_{PV-WR}	W								
\bar{P}_{AC}	W								
\bar{P}_{BESS}	W								
\bar{P}_{BAT}	W								
$\bar{P}_{BAT}/P_{BAT,nom}$ (Laden)	%								
\bar{U}_{BAT}	V								
C_{BAT} (Laden)	Ah								
C_{BAT} (Laden)/ $C_{BAT, nutz}$	%								
\bar{P}_{NETZ} (Bezug)	W								
\bar{P}_{NETZ} (Abgabe)	W								

Tabelle 25: Zusammenfassung des AC2BAT- und PV2BAT-Wirkungsgrads für AC-gekoppelte Systeme.

$\bar{P}_{BAT}/P_{BAT,nom}$	-	0,05*	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
η_{AC2BAT}	%								
η_{PV2BAT}	%								

7.7 Leistungsaufnahme im Standby oder ausgeschalteten Zustand

Neben den Umwandlungswirkungsgraden gilt es die Leistungsaufnahme des Gesamtsystems im Bereitschaftsbetrieb und im ausgeschalteten Zustand zu bestimmen. Je nach System kann zwischen folgenden Zuständen unterschieden werden (Definitionen: siehe Kap. 4.9.7):

- Standby (Bereitschafts-Modus)
- ausgeschalteter Zustand (Off-Modus)

Gegebenenfalls kann es bei einzelnen Systemen mehrere unterschiedliche Standby-Modi geben. Grundsätzlich sind die Übergangsbedingungen zwischen den verschiedenen Betriebszuständen vom Hersteller anzugeben und vom Prüfinstitut zu bestätigen. Hierbei ist für die einzelnen Systemkomponenten die AC- und DC-Leistungsaufnahme in den einzelnen Betriebszuständen separat zu dokumentieren.

7.7.1 Durchführung der Messungen

Die Verlustleistungen im Standby-Betrieb werden gemessen, wenn sich die Batterie bei SOC_{max} und SOC_{min} befindet. Nachdem das System einen stabilen Zustand erreicht hat, müssen je nach Topologie die Leistungen $P_{PVS,DC}$, P_{Last} , P_{BAT} , P_{AC} , P_{PV-WR} , P_{BESS} und P_{NETZ} über t_M (1 min) gemittelt gemessen werden. Die nachfolgende Liste beschreibt die chronologische Vorgehensweise der Messung:

- 1) **Batteriespeichersystem auf SOC_{max} beladen**
 - a) $P_{PVS,DC} = 0,75 P_{PV2AC,nom}$ und $P_{Last} = 0,25 P_{BAT2AC,nom}$
 - b) Herstellervorgaben befolgen, sodass Standby-Modus aktiv wird
 - c) Messung der Leistungsaufnahme im Standby über 1 min

- d) optional: weitere Standby-Modi nach Herstellervorgaben testen
- 2) **Batteriespeichersystem auf SOC_{min} entladen**
- a) $P_{PVS,DC} = 0$ und $P_{Last} = 0,25 P_{BAT2AC,nom}$
- b) Herstellervorgaben befolgen, sodass Standby-Modus aktiv wird
- c) Messung der Leistungsaufnahme im Standby über 1 min
- d) optional: weitere Standby-Modi nach Herstellervorgaben testen
- 3) **Batteriespeichersystem bei SOC_{min} halten zur Ermittlung des Peripherieverbrauchs**
- a) $P_{PVS,DC} = 0$ und $P_{Last} = 0$
- b) Herstellervorgaben befolgen, sodass Standby-Modus aktiv wird
- c) Messung der Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten über 1 min
- 4) **Batteriespeichersystem nach Herstellervorgabe manuell deaktivieren (Off-Modus)**
- a) $P_{PVS,DC} = 0$ und $P_{Last} = 0$
- b) Messung der Leistungsaufnahme über 1 min

Anmerkung

Liegen keine Herstellerangaben für den Übergang in den Standby-Betrieb vor, gilt ein anderer Prüfablauf. Zunächst wird das Batteriespeichersystem auf SOC_{max} beladen. Anschließend wird in Anlehnung an 1) die Standby-Leistungsaufnahme über t_M (1 min) gemittelt gemessen. Die Messung der relevanten Leistungen (siehe Tabelle 26) wird weiterhin über 3 h hinweg durchgeführt. Sollte sich innerhalb dieser Zeit die Leistungsaufnahme gegenüber der eingangs ermittelten Standby-Leistungsaufnahme ändern, sind der dazugehörige Wert sowie die Zeit zu dokumentieren. Die neu eintretende Standby-Leistungsaufnahme ist über einen Zeitraum von t_M (1 min) zu mitteln. Der gleiche Ablauf wird in Anlehnung an 2) wiederholt, nachdem das Batteriespeichersystem auf SOC_{min} entladen wurde.

7.7.2 Auswertung

Die Darstellung der Mess- und Berechnungsergebnisse erfolgt in Tabelle 26. Die Messwerte von P_{NETZ} (Bezug) und gegebenenfalls P_{NETZ} (Abgabe) enthalten neben der AC-seitigen Standby-Leistungsaufnahme des Leistungsumwandlungssystems auch die Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten (z.B. Stromsensor und ggf. externer Energiemanager).

Tabelle 26: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse für die Verluste im Standby und Off-Mode¹⁶.

Messung		1	2	3	4
Ladezustand		SOC_{max}	SOC_{min}	SOC_{min}	SOC_{min}
Betriebsmodus		Standby	Standby	Standby	Off-Mode
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W				
P_{Last}	W				
P_{BAT} (Entladen)	W				
P_{BAT} (Laden)	W				
P_{NETZ} (Bezug)	W				
P_{NETZ} (Abgabe)	W				
P_{AC} (Bezug)	W				
P_{AC} (Abgabe)	W				
P_{BESS} (Laden) ¹⁷	W				
P_{BESS} (Entladen) ¹⁷	W				
P_{PV-WR} (Bezug) ¹⁸	W				
Berechnung nach Formel (24) bis (28)					
		$P_{Standby,AC}$ ¹⁸	$P_{Standby,AC}$	$P_{PERIPH,AC}$	$P_{Off,AC}$
AC-Leistung	W				
		$P_{Standby,DC}$	$P_{Standby,DC}$		$P_{Off,DC}$
DC-Leistung	W				

¹⁶ Bei mehreren Standby-Modi ist die Tabelle entsprechend zu erweitern.

¹⁷ Nur bei AC- und PV-Generatorgekoppelten Systemen.

¹⁸ Nur bei AC-gekoppelten Systemen.

8 Teilprüfung: Batterie

Der folgende Teil dient sowohl der Charakterisierung von eigenständigen Batteriemodulen als auch von Batterien, die als Komplettsystem in die verschiedenen Systemtopologien eingebunden sind.

8.1 Batteriewirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Batterien variiert unter anderem in Abhängigkeit der Lade- und Entladeleistung. Im Folgenden werden Tests zur Charakterisierung des leistungsabhängigen Batteriewirkungsgrads beschrieben. Ausgangszustand des Tests ist eine vollständig geladene Batterie. Im Testverlauf wird die Batterie durch Vorgabe einer konstanten Last (Erzeugung gleich null) vollständig entladen (vgl. Kapitel 6.3) und anschließend durch Vorgabe einer konstanten Erzeugung (Last gleich null) wieder vollständig geladen (Vollzyklus). Der Wirkungsgrad wird durch das Verhältnis aus zugeführter und entnommener DC-seitiger Energie bestimmt.

8.1.1 Berechnungen

Die Berechnung des Batteriewirkungsgrades findet nach Formel (22) statt.

8.1.2 Prüfbedingungen

Der Prüfaufbau ist je nach Systemtopologie der Abbildung 2 bis Abbildung 4 zu entnehmen. Zum Laden der Batterie wird eine konstante Erzeugung vorgegeben. Durch die Vorgabe einer konstanten Last wird die Batterie vollständig entladen. Verfügt das zu vermessende Speichersystem über eine saisonale Anpassung des minimal zulässigen Ladezustands, ist diese zu deaktivieren.

PV-Eingangsspannung und -leistung

Die PV-Erzeugung wird während der Ladephase konstant gehalten und die Prüfung erfolgt bei nominaler Eingangsspannung. Während des Entladevorgangs wird keine PV-Erzeugung benötigt.

Batteriespannung

Die Batteriespannung steigt während der Ladung über den gesamten SOC-Bereich und sinkt während der Entladung über den gesamten SOC-Bereich.

Batterieleistung

Die Batterieleistung ergibt sich durch die Vorgaben der Erzeugung und der Last.

Last

Der Entladevorgang wird durch die Vorgabe einer konstanten Last herbeigeführt. Die Batterie wird zur Deckung der Last entladen. Während der Ladephase ist keine Last aktiv.

Tabelle 27: Allgemeine Prüfkfiguration zur Messung des Batteriewirkungsgrads.

Parameter	Wert
Batteriezustand	Start mit SOC_{max}
T_A	$25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$

8.1.3 Durchführung der Messung

Die Messung des Batteriewirkungsgrads erfolgt bei den in Tabelle 28 angegebenen Leistungen.

Tabelle 28: Betriebspunkte für die Pfade BAT2AC und PV2BAT.

	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
Entladeleistung	$P_{BAT2AC,nom}$	$0,5 \cdot P_{BAT2AC,nom}$	$0,25 \cdot P_{BAT2AC,nom}$
Ladeleistung	$P_{PV2BAT,nom}$	$0,5 \cdot P_{PV2BAT,nom}$	$0,25 \cdot P_{PV2BAT,nom}$
Iterationen	3	3	3

Um den Testaufwand bei modularen Systemen, bei denen ein (ansonsten baugleiches) Speichersystem mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten ausgeliefert wird, zu begrenzen, wird empfohlen eine mittlere Batteriekapazität zu testen. Es ist anzugeben mit welcher Konfiguration geprüft wurde.

8.1.4 Auswertung

Für jede Iteration jedes Zyklus nach Tabelle 28 wird der energetische Batteriewirkungsgrad $\eta_{\text{BAT,RTE}}$ sowie der Coulomb-Wirkungsgrad $\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$ berechnet. Die Berechnung des Wirkungsgrads erfolgt gemäß der Formel (22) bzw. Formel (23). Die Messergebnisse sind nach Tabelle 29 anzugeben. Für die Berechnung der Mittelwerte (rechts in der Tabelle) wird lediglich die 2. und 3. Iteration jedes Zyklus verwendet. Sollte der erste Zyklus wegen Überschreitung der maximalen Zelltemperaturen nicht durchgeführt werden können, sind diese Werte nicht in die Auswertung zu übernehmen.

Tabelle 29: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse des Batteriewirkungsgrads.

		Zyklus									Mittelwerte			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	1	2	3	1-3
$\eta_{\text{BAT,RTE}}$	%													
$\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$	%													
$\bar{P}_{\text{BAT (Laden)}}$	W													
$\bar{P}_{\text{BAT (Entladen)}}$	W													
$t_{\text{(Laden)}}$	s													
$t_{\text{(Entladen)}}$	s													
$E_{\text{BAT (Laden)}}$	Wh													
$E_{\text{BAT (Entaden)}}$	Wh													
$C_{\text{BAT (Laden)}}$	Ah													
$C_{\text{BAT (Entaden)}}$	Ah													
$\max(U_{\text{BAT}})$	V													
$\min(U_{\text{BAT}})$	V													

Zum Zweck der Visualisierung einer eventuellen Leistungsbegrenzung aufgrund einer Konstantspannungs- oder Konstantleistungsphase erfolgt zusätzlich zur tabellarischen Auswertung jeweils eine grafische Darstellung von P_{BAT} beim Laden und Entladen für den 1. Zyklus (2. Iteration). Die Darstellung erfolgt dabei über die geladene bzw. entladene Energiemenge E_{BAT} .

Die für das Datenblatt relevante Größen (Batteriewirkungsgrad und nutzbare Batteriekapazität) ergeben sich aus den Mittelwerte von $\eta_{\text{BAT,RTE}}$ sowie $E_{\text{BAT (Entaden)}}$, die jeweils aus der letzten Spalte in Tabelle 29 zu entnehmen sind. Der Mittelwert von $E_{\text{BAT (Entaden)}}$ entspricht $E_{\text{BAT,nutz}}$.

8.2 Sonstige Verluste

Auch das Batteriemanagementsystem der Batterie hat einen Energieverbrauch, der in der Regel DC-seitig aus der Batterie oder AC-seitig versorgt wird. Wenn es messtechnisch möglich ist und der Hersteller die Messstellen benennt, sollten diese Verbräuche separat gemessen und im Prüfprotokoll dokumentiert werden. Werden schwankende Werte beobachtet, ist der arithmetische Mittelwert zu bestimmen.

Ist die Messung des BMS-Verbrauchs nicht möglich, muss der Hersteller die Höhe des BMS-Verbrauchs detailliert darstellen. Variiert die Leistungsaufnahme des BMS je nach Betriebszustand, sind die Umschaltbedingungen zwischen den Betriebszuständen vom Hersteller anzugeben. Eine Validierung der Angaben durch Prüfung der technischen Dokumentation des BMS ist zulässig.

Tabelle 30: Tabellarische Darstellung der BMS-Verbrauchs.

		$P_{\text{BMS,Standby}}$
Leistung	W	

9 Regelabweichungen des Speichersystems

Aus Gründen der begrenzten Messgenauigkeit oder aufgrund von regelungstechnischen Einstellungen treten beim Einsatz von Speichersystemen in der Praxis stationäre und dynamische Abweichungen zwischen der geforderten und der bereitgestellten AC-seitigen Batterieleistung auf. Je nach Leistungsbilanz kann dies einen unerwünschten Energieaustausch zwischen dem Batteriespeichersystem und dem Netz zur Folge haben. Die Regelgüte unter stationären und dynamischen Bedingungen ist somit ein weiteres Kriterium, welches zur Charakterisierung der Effizienz von Batteriespeichersystemen erforderlich ist.

9.1 Bestimmung der dynamischen Regelabweichungen

Speichersysteme haben dynamische Regelabweichungen. Aufgrund von zeitlichen Verzögerungen bei der Messwerterfassung und -abfrage sowie bei der Regelung kann die Lade- und Entladeleistung des Batteriespeichers Leistungssprüngen nicht ohne Zeitverzug folgen. Zudem ist aus regelungstechnischen Gründen oftmals eine gedämpfte Anpassung der Batterieleistung gewünscht, wodurch zusätzliche Verzögerungen auftreten können.

In erster Näherung lässt sich das Sprungantwortverhalten mit einer Totzeit, einer Einschwingzeit und der erreichbaren stationären Genauigkeit beschreiben, die durch einen Sprungantworttest ermittelt werden. Die Charakterisierung des dynamischen Regelverhaltens erfordert das Prüfen des Systems im netzgekoppelten Betrieb ohne Ansteuerung über eine Kommunikationsschnittstelle.

9.1.1 Durchführung der Messung

Das Batteriespeichersystem muss einen mittleren Ladezustand SOC_{avg} aufweisen. Durch einen Vorabtest (Sprung von 10% der nominalen Entladeleistung $P_{BAT2AC,nom}$ auf 90% und zurück auf 10%) wird die ungefähre Einschwingzeit $t_{E,ref}$ gerundet auf ganze Sekunden bestimmt (siehe Anhang B). Anschließend wird das Sprungantwortverhalten des Systems gemäß dem in Abbildung 6 dargestellten Stufenprofil erfasst. Die einzustellende Erzeugung $P_{PVS,MPP,SOLL}$ und Last $P_{LAST,SOLL}$ der einzelnen Stufen S1 bis S14 errechnet sich gemäß Formel (29) bis (31):

Erzeugungprofil¹⁹

 $P_{PVS,MPP} \text{ (Profil)}$

$$P_{PVS,MPP,SOLL} = f_{P_{PV2BAT}} \cdot P_{PV2BAT,nom} \quad (29)$$

Lastprofil

 $P_{LAST} \text{ (Profil)}$

$$P_{LAST,SOLL} = f_{P_{BAT2AC}} \cdot P_{BAT2AC,nom} \cdot k \quad (30)$$

k kompensiert etwaige Unterschiede in der nominalen Lade- und Entladeleistung, sodass der Ladezustand der Batterie während des Tests im Bereich $SOC_{avg,area}$ bleibt.

Leistungskompensation

 k

$$k = \frac{P_{PV2BAT,nom}}{P_{BAT2AC,nom}} \quad (31)$$

¹⁹ Bei DC- und PV-Generatorgekoppelten Systemen kann die Last für den Fall $1,4 \cdot P_{PV2BAT,nom} > P_{PV-WR,nom}$ nicht gedeckt werden. Dann ist $P_{PV-WR,nom}/1,4$ anstelle von $P_{PV2BAT,nom}$ zu verwenden und entsprechend im Protokoll zu vermerken.

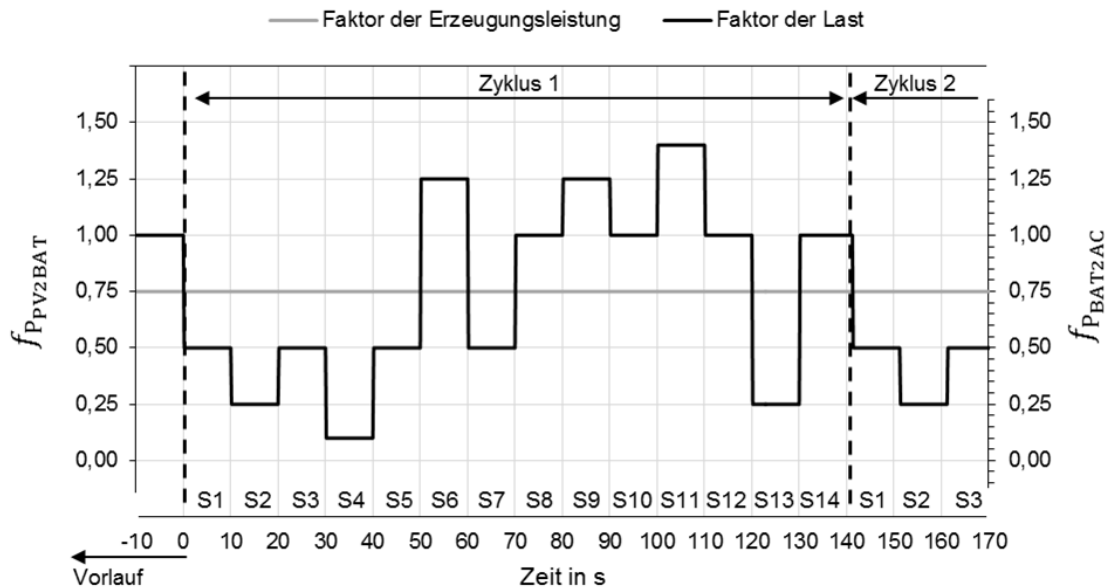


Abbildung 6: Stufenprofil zur Charakterisierung der dynamischen Regelabweichung.

Die Haltedauer t_H der einzelnen Stufen entspricht dem Zweifachen der vorab ermittelten Einschwingzeit $t_{E,ref}$, mindestens jedoch 10 s. Die letzte Stufe (S14) ist dabei um 1 s länger und sollte, wenn möglich, um die gewählte Abtastrate der Messung verlängert werden, da hierdurch eine statische Abtastrate des Energiemanagementsystems sichtbar gemacht werden kann. Das Testprofil wird nahtlos zehnmal hintereinander durchgeföhren. Die zeitliche Auflösung der Messwerterfassung sollte konstant sein und maximal 200 ms betragen.

9.1.2 Auswertung

Die Messergebnisse des Netzaustauschs P_{NETZ} und der Last P_{LAST} sind beispielhaft für den 2. Zyklus grafisch im Prüfbericht in Anlehnung an Abbildung 7 darzustellen. Zusätzlich erfolgt eine Auswertung nach Tabelle 31 und Tabelle 32 (siehe Anhang B). Während des gesamten Tests sollte der Ladezustand im mittleren Ladezustandsbereich $SOC_{avg,area}$ bleiben. Abweichungen hiervon sind im Prüfprotokoll festzuhalten.

Manche Systeme regeln P_{NETZ} temporär über eine oder mehrere Stufen hinweg gar nicht aus. Im Gegensatz zur stationären Regelabweichung ist diese Regelabweichung deutlich größer als die übliche (z.B. $P_{NETZ} > 10\% \cdot P_{PV2BAT,nom}$). Stufen, die dieses Verhalten zeigen, bleiben bei der Mittelwertbildung in Tabelle 31 und Tabelle 32 unberücksichtigt. Die Messung (zehnmaliges Durchföhren des Stufenprofils inkl. längerer Stufe 14) muss ggf. mehrfach wiederholt werden, sodass zu jeder Stufe mind. 8 Messwerte vorliegen. Bei der Mittelwertbildung müssen dann je Stufe alle Werte berücksichtigt werden, sofern es sich nicht um eine zuvor beschriebene temporäre und unübliche Regelabweichung handelt. Die Anzahl der berücksichtigten Werte je Stufe sowie die Anzahl der insgesamt durchgeföhrenen Zyklen sind im Prüfbericht anzugeben.

Tabelle 31: Messergebnisse der Leistungen für den Test zur dynamischen Regelabweichung.

		Stufen													
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
		Mittelwerte der Leistungen ²⁰													
\bar{P}_{Last}	W														
$\bar{P}_{NETZ (Bezug)}$	W														
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe)}$	W														
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W														
\bar{P}_{BAT}	W														

Tabelle 32: Messergebnisse der Tot- und Einschwingzeit für den Test zur dynamischen Regelabweichung.

		Stufen														
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S1-S14
		Zeitliche Analyse der Netzaustauschleistung														
\bar{t}_T	s															
$\max(t_T)$	s															
$\min(t_T)$	s															
\bar{t}_E	s															
$\max(t_E)$	s															
$\min(t_E)$	s															

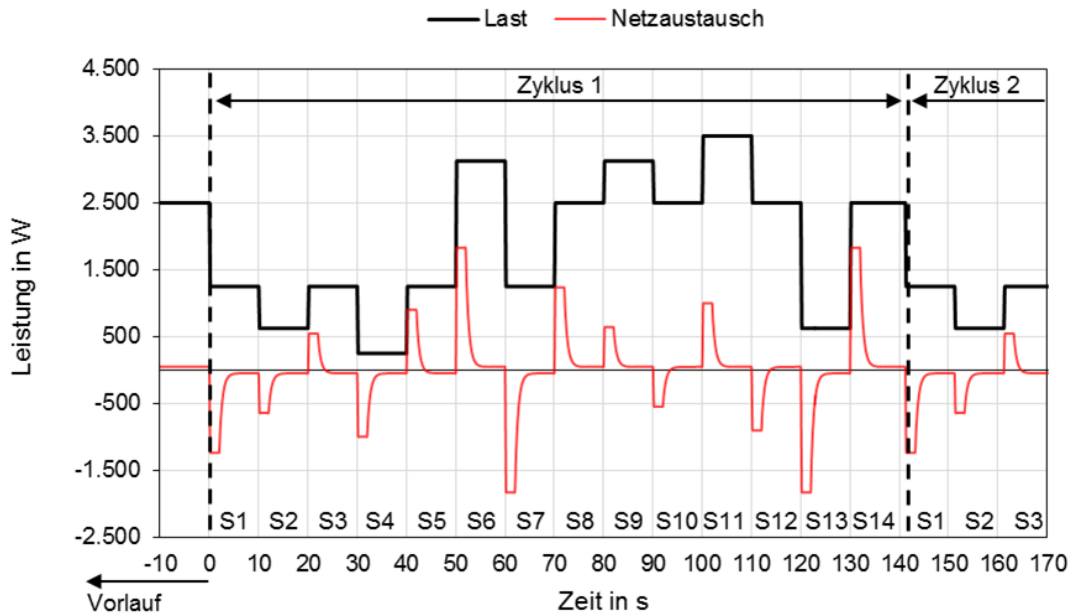


Abbildung 7: Beispielhafte Visualisierung der Leistungsverläufe für ein System mit einer nominalen Lade- und Entladeleistung von 2500 W.

²⁰ für die Dauer im eingeschwungenen Zustand

9.2 Bestimmung der stationären Regelabweichungen bei gemischten Pfaden

Das Lastprofil aus Abbildung 6 wird mit zwei Iterationen und der Prüfkongfiguration aus Tabelle 33 verwendet, um die Werte der stationären Regelabweichungen bei in der Realität vorliegenden Betriebszuständen des Speichersystems zu bestimmen.

Tabelle 33: Allgemeine Prüfkongfiguration zur Messung der stationären Regelabweichung.

Parameter	Wert
$P_{PVS,DC}$	$0,75 * P_{PV2BAT,nom}$
t_H	160 s
t_{Int}	80 s
Batteriezustand	$SOC_{avg} + 5\%$

Aus den zwei Iterationen werden gemäß den Formeln (32) und (33) die Mittelwerte für einen Lastzustand (LZ) berechnet und in Tabelle 35 eingetragen. Die Variable t_{sb} beschreibt den Beginn einer Stufe, die Variable t_{Int} die Integrationszeit und It die Iteration. Falls die Einschwingzeit einer Stufe 60 s überschreiten sollte, beginnt der Integrationszeitraum 20 s nach der Einschwingzeit und endet mit dem Stufenende. Aufgrund der Charakteristik des Profils aus Abbildung 6 werden teilweise Lastzustände durch mehrere Stufen beschrieben. Für den jeweiligen Lastzustand ist jeweils eine geeignete Stufe auszuwählen. Eine Zuordnung der Stufen zu den einzelnen Lastzuständen ist in Tabelle 34 gegeben.

$$\bar{P}_{NETZ(Bezug),LZ} = \frac{1}{2t_{Int}} \left(\int_{t_{sb}+60s}^{t_{sb}+140s} P_{NETZ(Bezug),It 1} dt + \int_{t_{sb}+60s}^{t_{sb}+140s} P_{NETZ(Bezug),It 2} dt \right) \quad (32)$$

$$\bar{P}_{NETZ(Abgabe),LZ} = \frac{1}{2t_{Int}} \left(\int_{t_{sb}+60s}^{t_{sb}+140s} P_{NETZ(Abgabe),It 1} dt + \int_{t_{sb}+60s}^{t_{sb}+140s} P_{NETZ(Abgabe),It 2} dt \right) \quad (33)$$

Mit: LZ: Lastzustand; t_{sb} : Stufenbeginn; It: Iteration; t_{Int} : Integrationszeit

Tabelle 34: Zuordnung der einzelnen Stufen zu den auftretenden Lastzuständen.

Lastzustand (LZ)	Entladen			Laden		
	E1	E2	E3	L1	L2	L3
Zugehörige Stufen	S11	S6, S9	S8, S10, S12, S14	S1, S3, S5, S7	S2, S13	S4

Die berechneten Größen werden anschließend zur Berechnung des arithmetischen Mittels des Leistungsaustauschs mit dem Netz nach Formeln (34) bis (37) über die verschiedenen Lastzustände für die die Betriebszustände „Entladen“ und „Laden“ herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 35 einzutragen.

	$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Laden)}$
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Laden)} = \frac{\sum_{n=1}^3 \bar{P}_{NETZ (Bezug),LZ L n}}{3}$ (Werte aus Spalte "Ladung")	(34)
	$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Laden)}$
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Laden)} = \frac{\sum_{n=1}^3 \bar{P}_{NETZ (Abgabe),LZ L n}}{3}$ (Werte aus Spalte "Ladung")	(35)
	$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Entladen)}$
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Entladen)} = \frac{\sum_{n=1}^3 \bar{P}_{NETZ (Bezug),LZ E n}}{3}$ (Werte aus Spalte "Entladung")	(36)
	$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Entladen)}$
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Entladen)} = \frac{\sum_{n=1}^3 \bar{P}_{NETZ (Abgabe),LZ E n}}{3}$ (Werte aus Spalte "Entladung")	(37)

Abschließend ergeben sich die stationären Regelabweichungen $P_{abw (Laden)}$ für den Lade- und $P_{abw (Entladen)}$ für den Entladefall gemäß Formel (38) und (39). Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 35 einzutragen.

Stationäre Abweichung der Ladeleistung im Ladebetrieb	$P_{abw (Laden)}$
$P_{abw (Laden)} = \bar{P}_{NETZ (Bezug,Laden)} + \bar{P}_{NETZ (Abgabe,Laden)}$	(38)
Stationäre Abweichung der Entladeleistung im Entladebetrieb	$P_{abw (Entladen)}$
$P_{abw (Entladen)} = \bar{P}_{NETZ (Bezug,Entladen)} + \bar{P}_{NETZ (Abgabe,Entladen)}$	(39)

Tabelle 35: Tabellarische Darstellung der Messergebnisse zur stationären Regelabweichung

Lastzustand (LZ)	Stationäre Regelabweichungen bei gemischten Pfaden						
		E1	E2	E3	L1	L2	L3
$\bar{P}_{PVS,DC} / \bar{P}_{LAST}$	-						
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W						
\bar{P}_{LAST}	W						
\bar{P}_{BAT}	W						
$\bar{P}_{NETZ (Bezug),LZ n}$	W						
$\bar{P}_{NETZ,(Abgabe),LZ n}$	W						
		Entladen			Laden		
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Entladen)}$	W				-		
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Entladen)}$	W				-		
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Laden)}$	W	-					
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Laden)}$	W	-					
$P_{abw(Entladen)}$	W				-		
$P_{abw(Laden)}$	W	-					

Anhang A Anforderung an die Messgeräte und den Prüfstand

I. PV-Simulator

Es gelten die Anforderungen der Norm DIN EN 50530.

II. Wechselstromversorgung

Es gelten die Anforderungen der Norm DIN EN 50530.

III. Elektrische Last

Zu Entladung der Batterie wird eine resistive, steuerbare Last benötigt. Arbeitet das Speichersystem nach dem saldierenden Messprinzip [4], spielt die Art der Belastung prinzipiell eine untergeordnete Rolle.

Um Unsymmetrien am Netzanschlusspunkt zu vermeiden, sollte bei dreiphasigen Systemen eine dreiphasige symmetrische Last verwendet werden. Bei einphasigen Systemen sollte die Last auf der Phase des Speichersystems angebunden sein. Unter Berücksichtigung etwaiger Schiefllastgrenzen kann auch hier eine dreiphasige symmetrische Last verwendet werden.

IV. Genauigkeit und Datenaufzeichnung

Es sind die in der DIN EN 61683:2000-08 geforderten Genauigkeitsklassen einzuhalten. Die verwendete Messtechnik (Stromwandler, Shunts, Geräte etc.) inklusive ihrer Genauigkeiten sind im Prüfbericht und ein Verweis dazu im Datenblatt anzugeben. Abhängig von der Art der Leistungsberechnung stehen zwei Möglichkeiten der Wirkungsgradberechnung zur Verfügung [2]. Die Unterschiede sind in der Regel marginal. Die gewählte Methode sollte jedoch im Prüfbericht angegeben werden.

Leistungsgrad:

Verhältnis zwischen Ausgangspegeln und Eingangspegeln der Grundwellenleistung.

Umwandlungsfaktor:

Verhältnis aus Ausgangswirkleistung und Eingangswirkleistung.

Anhang B Umgang mit dynamischen Leistungsflüssen

Im Idealfall ist ein PV-Speichersystem so geregelt, dass sich eine Netzaustauschleistung von exakt null Watt einstellt. Aufgrund von Ungenauigkeiten beim Messen der Energiebilanz des Haushalts, der Verarbeitung der Messdaten oder der Regelung des Speichers können die im Rahmen eines Tests gewollten Betriebszustände nicht oder nur mit unzureichender Genauigkeit eingestellt werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie die reproduzierbare Vermessung solcher Speichersysteme erfolgen soll.

Zur Auswertung der Regelabweichungen werden einige Definitionen, angelehnt an Definitionen aus der Signalanalyse, festgelegt. Abbildung 8 zeigt einen beispielhaften Sprung aus einer Messung und veranschaulicht die Zeitdefinitionen. Um die beiden Signallevele des ursächlichen Signals (PV- bzw. Lastleistung) und der Batterieleistung werden Toleranzbänder bestimmt. Das Band liegt dabei $\pm 5\% \cdot |Level_1 - Level_2|$ um den jeweiligen Signallevele²¹. Ausgehend hiervon werden drei Zeitpunkte im Messverlauf festgelegt:

t_1 : Endgültiges Verlassen des Toleranzbandes der Ursache bzw. des ursächlichen Signals (Last) zu Beginn des Sprungs.

t_2 : Endgültiges Verlassen des Toleranzbandes der Wirkung (Batterieleistung 1. Signallevele) nach Auftreten des Sprungs.

t_3 : Endgültiges Eintreten in das Toleranzband (Batterieleistung 2. Signallevele) bis zum nächsten Sprung des ursächlichen Signals (Last).

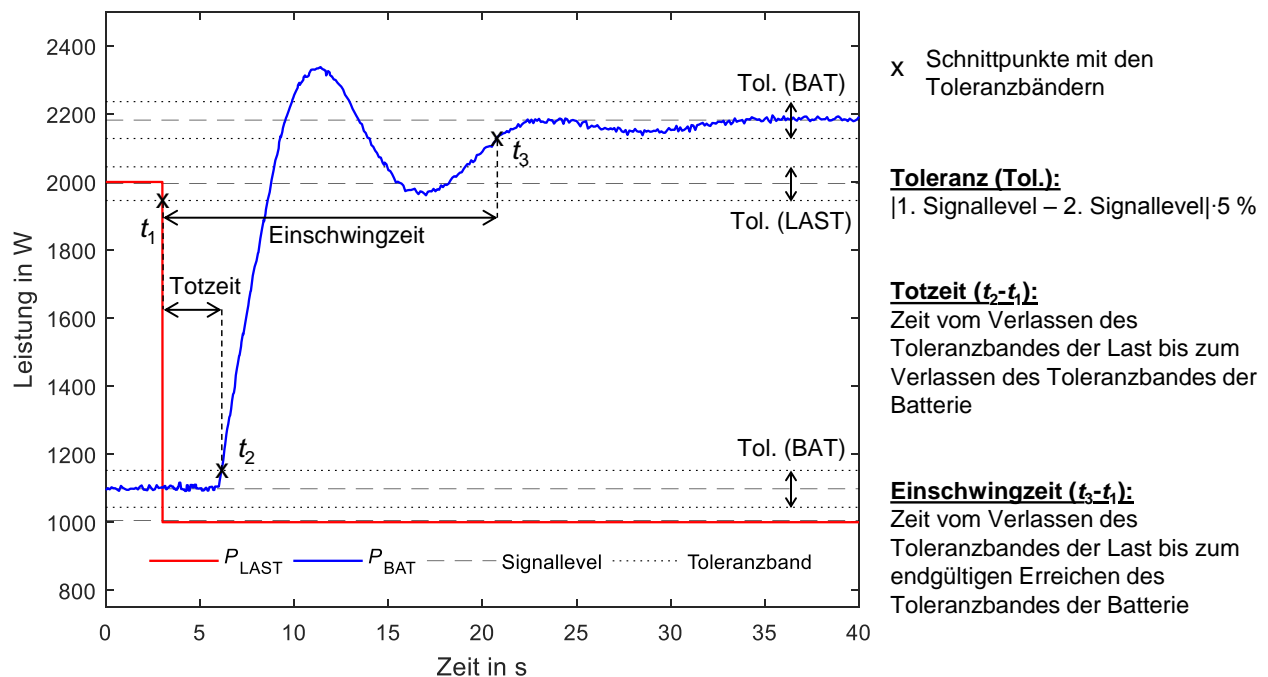


Abbildung 8: Definition der Toleranzbänder. (Quelle: KIT/ Batterietechnikum)

Ausgehend von diesen Zeitdefinitionen lassen sich die folgenden Größen zum Vergleich der Systeme berechnen. Die **Totzeit** ($t_T = t_2 - t_1$) beschreibt die Dauer, die ein System benötigt, um auf eine Leistungsänderung zu reagieren. Die **Einschwingzeit** ($t_E = t_3 - t_1$) gibt an, in welcher Zeit das System die Leistungsänderung ausgeregelt hat. Das ist das Intervall vom Verlassen des Toleranzbandes der Ursache bis zum endgültigen Eintritt der Batterieleistung in das Toleranzband.

Einige Systeme sind nicht in der Lage, eine konstante Ausgangsleistung $P(t) \sim P(t-1)$ zu stellen. Können die Toleranzbanddefinitionen deswegen nicht erfüllt werden, kann eine vorgelagerte Signalglättung (empfohlen wird der gleitende Median) Abhilfe schaffen, um die Zeitpunkte $t_1 \dots t_3$ zu ermitteln. Reicht

²¹ Die Signallevele können nach der Histogrammmethode (IEEE® Standard on Transitions, Pulses, and Related Waveforms, IEEE Standard 181, 2003, pp. 15–17) bestimmt werden, zu denen es entsprechende vorimplementierte Auswerterroutinen, beispielsweise in der Programmierumgebung MATLAB, gibt.

Anhang

dieser Schritt nicht aus, kann die Toleranz der jeweiligen Stufe erhöht werden. \bar{P}_{BAT} in Tab. 35 muss hierbei anhand des ursprünglichen Signals berechnet werden.

Weil diese beiden Ausnahmemöglichkeiten die ermittelten Zeitpunkte beeinflussen, ist größte Sorgfalt bei der Wahl geeigneter Parameter erforderlich. Die Notwendigkeit ist anhand eines grafischen Beispiels aus der Messung nachzuweisen. Ebenso sind die gewählten Glättungsverfahren inkl. Parameter und die gewählten Toleranzen anzugeben.

Anhang C Bestimmung der Bemessungsleistungen

Jedes Prüfinstitut ist verantwortlich für eine technisch korrekte Bestimmung der Bemessungsleistungen. Anhang C stellt eine Hilfestellung zur automatisierten Bestimmung der Bemessungsleistungen dar.

Bei der Bestimmung der jeweiligen Bemessungsleistung kann das Erfassen von Momentanwerten fehlerhafte Werte liefern. Dieses Verhalten tritt zum Beispiel bei Systemen auf, die auch im Bereich ihrer Nennleistung DC-seitig stark schwingende Batterie- und PV-Eingangleistungen erzeugen. Es wird daher generell empfohlen, die Extraktion der Bemessungsleistungen anhand einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung mit ausreichend hoher Abtastrate durchzuführen.

Das nachfolgend beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Bemessungsleistung für die Vermessung der Pfade PV2AC und PV2BAT wird für $U_{MPP,nom}$ erläutert. Da die Bemessungsleistungen nur bedingt von U_{MPP} abhängig sind, kann die ermittelte Bemessungsspannung stellvertretend für alle zu testenden Spannungsbereiche verwendet werden.

I. Nominale PV-Einspeiseleistung (PV2AC)

Berechnung der Bemessungsleistung

Ist die nominelle AC-Ausgangsleistung sowie der dazugehörige Bemessungswirkungsgrad angegeben, kann die Bemessungsleistung durch

$$P_{PV2AC,nom} = \frac{P_{AC,nom}}{\eta_r} \quad (40)$$

bestimmt werden. Ist der Bemessungswirkungsgrad nicht gegeben, kann die Bemessungsleistung über das im Folgenden dargestellte Verfahren ermittelt werden.

Bemessungsleistung bei DC- und PV-Generatorgekoppelten Systemen

MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ an dem Betriebszustand, der durch die Stagnation von P_{AC} und $P_{PVS,DC}$ bei weiterhin steigender MPP-Leistung des PV-Simulators $P_{PVS,MPP}$ definiert ist.

Bemessungsleistung bei AC-gekoppelten Systemen

MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ an dem Betriebszustand, der durch die Stagnation von P_{PV-WR} und $P_{PVS,DC}$ bei weiterhin steigender MPP-Leistung des PV-Simulators $P_{PVS,MPP}$ definiert ist.

a. Vorbereitung

Die Kennlinie des PV-Generators muss auf $P_{PVS,MPP,max} = 1,2 \cdot P_{PV-WR,nom}$ eingestellt werden.

Sollte mit diesem Wert noch keine Sättigung der AC-Ausgangsleistung P_{AC} erreicht werden, kann die Auslastung weiter erhöht werden. Wenn die benötigte Ausgangsleistung über der maximal zulässigen DC-Eingangleistung liegt, wird diese Leistung verwendet.

Während der Bestimmung von $P_{PV2AC,nom}$ gilt $P_{BAT} \sim 0$. Hierfür muss die Batterie zunächst vollgeladen werden. Weiterhin muss der SOC_{max} bei fortlaufender PV-Leistung für ~30 min gehalten werden, um ein sukzessives Nachladen der Batterie abzufangen.

Anmerkung:

Die PV-Leistung sollte nach dem vollständigen Laden der Batterie und vor dem Bestimmen der Bemessungsleistung nicht mehr unter 30% der nominellen AC-Ausgangsleistung ($P_{PV-WR,nom}$ bzw. $P_{AC,nom}$) des Systems fallen, um ein Entladen der Batterie zu unterbinden und den nachgeschalteten Wechselrichter im aktiven Modus zu halten. Ausgehend von diesem Zustand wird die Bemessungsleistung bestimmt.

b. Durchführung

$P_{PVS,DC}$ wird auf 70% bis 80% der angegebenen Nominalleistung gefahren und dort aus Gründen der Einschwingzeit für 180 s gehalten. Anschließend wird eine lineare Rampe mit einer Steigung gefahren, die dem 1,2-fachen der Nominalleistung je 540 s entspricht und in einem Plateau bei dem 1,2-fachen der Nominalleistung endet. Dieses Plateau sollte für weitere 360 s gehalten werden.

$P_{PV2AC,nom}$ entspricht der MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$, die in dem Moment anliegt, in dem das System in den oben beschriebenen Betriebspunkt übergeht.

$P_{PV2AC,nom}$ kann direkt an der Abregelschwelle abgelesen werden, falls $P_{PVS,DC}$ bzw. P_{AC} nach Erreichen der maximal umwandelbaren DC-Leistung kein merkbar schwingendes Verhalten zeigt. Ansonsten kann die PV- bzw. AC-Leistung vor und nach dem Erreichen der Sättigung durch einen linearen Fit beschrieben werden. Der Betriebspunkt wird dann durch den Schnittpunkt der Fitfunktionen bestimmt (siehe Abbildung 9).

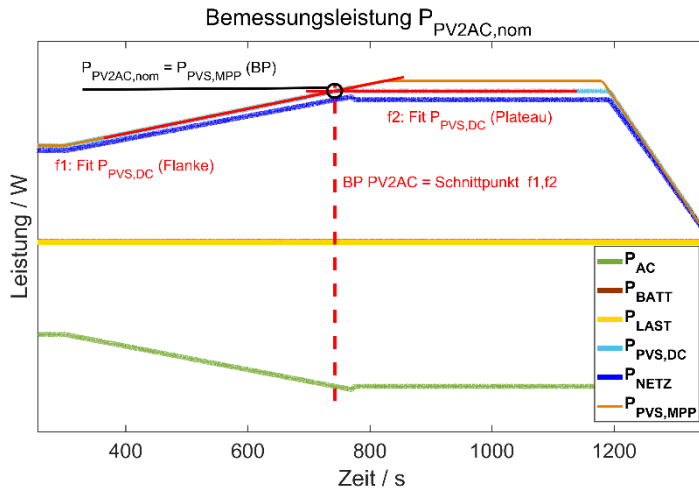


Abbildung 9: Beispielhafte Extraktion der Bemessungsleistung $P_{PV2AC,nom}$ durch Fitting der PV-Leistung vor und nach Erreichen der Abregelschwelle aufgrund Überschwingens (BP = Betriebspunkt)

II. Nominale PV-Ladeleistung (PV2BAT)

Bemessungsleistung bei DC- und PV-Generatorkoppelten Systemen

MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ an dem Betriebspunkt, an dem die Batterieleistung P_{BAT} , bei weiterhin steigender PV-Leistung $P_{PVS,DC}$ nicht weiter steigt bzw. stagniert.

Bemessungsleistung bei AC-gekoppelten Systemen

MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ an dem Betriebspunkt, an dem die Leistung des Batteriewechselrichters P_{BESS} , bei weiterhin steigender PV-Leistung $P_{PVS,DC}$ nicht weiter steigt bzw. stagniert.

Bei einigen Systemen kann es zu starken Schwankungen bzw. Peak-förmigen Abweichungen der PV- und Batterieleistungen kommen. Die Messung kann in diesem Fall mit verringerter Steigung der Rampe wiederholt oder schrittweise manuell durchgeführt werden. Peak-förmige Abweichungen können alternativ im Rahmen einer Nachbearbeitung vor der Extraktion der Bemessungsleistung mit Peak-Filtern entfernt werden. Ansonsten sowie beim Vorliegen hoher dynamischer Regelabweichung sollte der gesuchte Betriebspunkt durch den Zeitpunkt, an dem P_{NETZ} linear mit $P_{PVS,DC}$ zu steigen beginnt, definiert werden (siehe IV. Umgang mit Regelabweichungen und kurzfristigen Maximalleistungen).

a. Vorbereitung

Für die Bestimmung von $P_{PV2BAT,nom}$ muss die Batterie auf einen mittleren SOC_{avg} gebracht werden. Die Kennlinie des PV-Generators muss auf

$$P_{PVS,MPP,max} = 1,2 \cdot P_{BAT,nom} \text{ (Laden) bzw. auf}$$

$$P_{PVS,MPP,max} = 1,2 \cdot P_{PCE/BAT,nom} \text{ (Laden)}$$

bei nomineller Spannung $U_{MPP,nom}$ im Bereich der Grenzen des MPP-Trackers eingestellt werden, vgl. Kapitel 4.7.

b. Durchführung

$P_{PVS,DC}$ wird auf 70% bis 80% der angegebenen Nominalleistung gefahren und dort aus Gründen der Einschwingzeit für 180 s gehalten. Anschließend wird eine lineare Rampe mit einer Steigung gefahren,

die dem 1,2-fachen der Nominalleistung je 540 s entspricht und in einem Plateau bei dem 1,2-fachen der Nominalleistung endet. Dieses Plateau sollte für weitere 360 s gehalten werden.

$P_{PV2BAT,nom}$ entspricht der MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$, die in dem Moment anliegt, in dem das System in den oben beschriebenen Betriebspunkt übergeht.

III. Nominale AC-Entladeleistung (BAT2AC)

Bemessungsleistung bei DC- und PV-Generatorkoppelten Systemen

Lastleistung P_{LAST} an dem Betriebspunkt, an dem die Batterieleistung P_{BAT} bei weiterhin steigender AC-Last P_{LAST} nicht weiter steigt bzw. stagniert.

Bemessungsleistung bei AC-gekoppelten Systemen

Lastleistung P_{LAST} an dem Betriebspunkt, an dem die Batterieleistung P_{BESS} bei weiterhin steigender AC-Last P_{LAST} nicht weiter steigt bzw. stagniert.

Bei einigen Systemen kann es zu starken Schwankungen der AC- und Batterieleistungen kommen. In dem Fall sowie beim Vorliegen hoher dynamischer Regelabweichung sollte der gesuchte Betriebspunkt durch den Zeitpunkt, an dem P_{NETZ} bei steigender Lastleistung P_{LAST} linear zu fallen beginnt, definiert werden (siehe IV. Umgang mit Regelabweichungen und kurzfristigen Maximalleistungen).

c. Vorbereitung

Für die Bestimmung von $P_{BAT2AC,nom}$ muss die Batterie auf einen mittleren SOC_{avg} gebracht werden.

DC-gekoppelte Systeme

Die maximale Last beträgt $P_{LAST,max} = 1,2 \cdot P_{BAT,nom}$ (Entladen).

AC- und PV-Generatorkoppelte Systeme

Die maximale Last beträgt $P_{LAST,max} = 1,2 \cdot P_{PCE/BAT,nom}$ (Entladen).

d. Durchführung

Es wird für P_{LAST} eine lineare Rampe mit einer Steigung gefahren, die dem 1,2-fachen der Nominalleistung je 540 s entspricht und in einem Plateau bei dem 1,2-fachen der Nominalleistung endet ($m = 1,2 \cdot P_{Last,max} / 540 \text{ s}$). Dieses Plateau sollte für weitere 360 s gehalten werden.

$P_{BAT2AC,nom}$ entspricht der Lastleistung P_{LAST} , die in dem Moment anliegt, sobald das System in den oben beschriebenen Betriebspunkt übergeht.

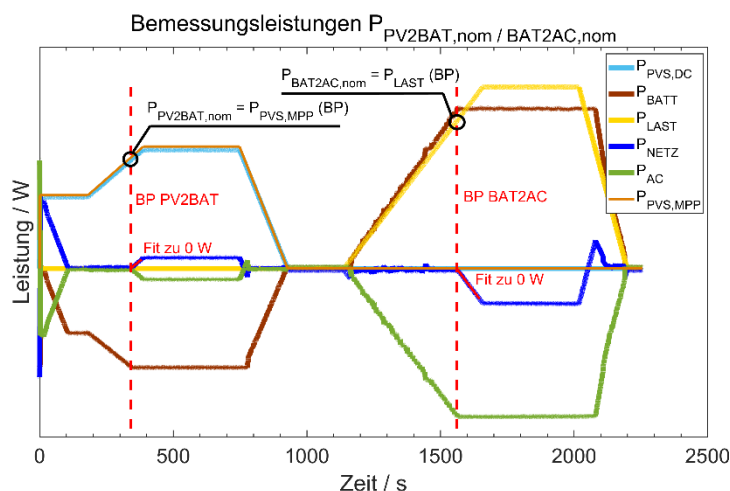


Abbildung 10: Beispielhafte Extraktion der Bemessungsleistungen $P_{PV2BAT,nom}$ und $P_{BAT2AC,nom}$ durch lineares Fitting der Netzaustauschleistungen (BP = Betriebspunkt)

IV. Umgang mit Regelabweichungen und kurzfristigen Maximalleistungen

Bestimmung des Betriebspunktes über die Netzleistung

Der Betriebspunkt für die Bestimmung der Lade- und Entladebemessungsleistungen kann generell und sollte bei hohen dynamischen Regelabweichungen unbedingt durch einen linearen Fit der steigenden bzw. fallenden Netzleistung und dessen Schnittpunkt mit der x-Achse bestimmt werden (siehe Abbildung 10). Bei großen stationären Regelabweichungen oder PV-Generator gekoppelten Systemen ist der Schnittpunkt mit dem bei konstanter PV- oder Lastleistung anliegenden Niveau der Netzleistung zu bestimmen (siehe Abbildung 11 a)). Beim Durchfahren eines Rampenprofils kann bei sehr langsamen Systemen aufgrund dynamischer Regelabweichungen eine zusätzliche Hintergrundnetzleistung auftreten. Diese wird bei der Bestimmung des gesuchten Betriebspunktes nicht berücksichtigt (siehe Abbildung 11 b)). Die jeweilige Bemessungsleistung entspricht dann der MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ bzw. Lastleistung P_{LAST} am so bestimmten Betriebspunkt.

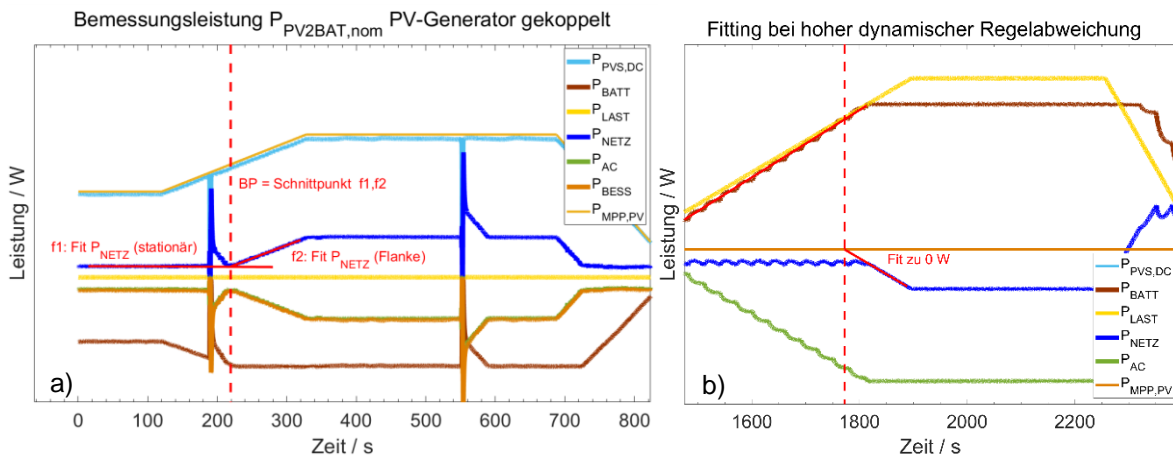


Abbildung 11: a) Bestimmung des Betriebspunktes über die Netzleistung bei Systemen mit großem stationären Regelleistungsniveau b) Rein dynamische Regelabweichung wird bei Systemen mit großen Reaktionszeiten bei der Extrapolation der Netzleistung nicht berücksichtigt

Korrektur des Betriebspunktes bei kurzfristig anliegenden Maximalleistungen

Bei einigen Systemen nimmt die Lade- bzw. Entladeleistung der Batterie nach dem Erreichen des Betriebspunktes über die Haltedauer des Plateaus hin ab, da die Systeme kurzzeitig mit Maximalleistungen laden bzw. entladen, welche die kontinuierlichen Nominalleistungen $P_{BAT,nom}$ (Laden/Entladen) übersteigen. Falls in diesem Fall die Relaxation der Entladeleistung auf ein konstantes Niveau bis zum Ende der Haltedauer des Plateaus nicht abgeschlossen ist, muss die Haltezeit entsprechend verlängert werden, sollte jedoch 420 s nicht überschreiten. Zeigt der am Punkt P2 am Ende des Plateaus abzulesende, relaxierte Wert der Lade- bzw. Entladeleistung eine Abweichung von mehr als 2 % zu dem am Betriebspunkt BP 1 bestimmten Wert, sollte eine Korrektur des Betriebspunktes vorgenommen werden.

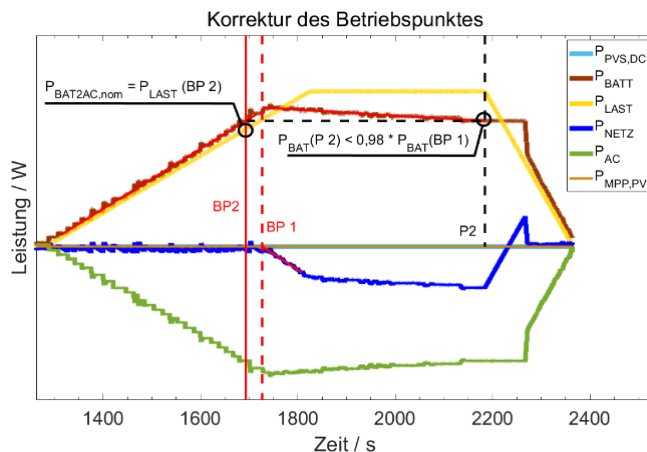


Abbildung 12: Beispiel für die Korrektur des Betriebspunktes bei der Bestimmung der Entladebemessungsleistung $P_{BAT2AC,nom}$

Anhang

Der neue Betriebspunkt BP 2 wird als Punkt auf der steigenden Flanke der Batterieleistung definiert, an dem die Lade- bzw. Entladeleistung der bei P2 anliegenden, relaxierten Batterieleistung entspricht (siehe Abbildung 12).

Die jeweilige Bemessungsleistung entspricht dann der MPP-Leistung $P_{PVS,MPP}$ bzw. der Lastleistung P_{LAST} am neu definierten Betriebspunkt. Ist die kontinuierliche Relaxation der Entladeleistung durch einen steileren Verlauf der Spannungskurve der verwendeten Batterie bedingt, sollte keine Korrektur vorgenommen werden. Es ist dann jedoch darauf zu achten, die Wirkungsgradvermessung mit Nominalleistung bei derselben Batteriespannung durchzuführen.

Anhang D Bestimmung von Kenngrößen und Datenblattangaben

Mittlere Pfadwirkungsgrade

Zur Bestimmung der mittleren Pfadwirkungsgrade wird für jeden vermessenen Energiepfad das arithmetische Mittel der Wirkungsgrade an den Stützstellen (0,05; 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55; 0,65; 0,75; 0,85; 0,95) gebildet und angegeben. Für die Pfade PV2AC und PV2BAT sind die Gesamtwirkungsgrade bei nominaler PV-Eingangsspannung inklusive der MPP-Wirkungsgrade zu verwenden.

Mittlerer Batteriewirkungsgrad

Zur Bestimmung des mittleren Batteriewirkungsgrads ist das arithmetische Mittel der Batteriewirkungsgrade der Zyklen 1 bis 3 aus Tabelle 29 zu verwenden.

Einschwingzeit (dynamische Regelabweichung)

Zur Bestimmung der mittleren Einschwingzeit ist das arithmetische Mittel der Einschwingzeiten der Stufen 1 bis 14 aus Abbildung 6 zu verwenden.

Systemverbrauch im Standby-Modus

Zur Bestimmung des Systemverbrauchs im Standby-Modus im entladenen Zustand wird die Summe aus der AC- und DC-seitigen Standby-Leistungsaufnahme des Leistungsumwandlungssystems und die Leistungsaufnahme aller weiteren Systemkomponenten (z. B. Stromsensor und ggf. externer Energiemanager) aus Tabelle 26 gebildet.

Systemverbrauch im Standby-Modus

 P_{System}

$$P_{\text{System}} = P_{\text{Standby,DC}} + P_{\text{Standby,AC}} + P_{\text{PERIPH,AC}}$$

(41)

Anhang E Normative Verweise

Die folgenden Dokumente, die in diesem Leitfadens teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

- [1] DIN EN 50530 (VDE 0126-12:2013-12):2013-12, Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern; Deutsche Fassung EN 50530:2010 + A1:2013
- [2] DIN EN 61683:2000-08, Photovoltaische Systeme - Stromrichter - Verfahren zur Messung des Wirkungsgrades (IEC 61683:1999); Deutsche Fassung EN 61683:2000
- [3] DIN EN 61427-2 (VDE 510-41):2016-09; Wiederaufladbare Zellen und Batterien für die Speicherung erneuerbarer Energien - Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 2: Netzintegrierte Anwendungen; (IES 61427-2:2015); Deutsche Fassung EN 61427-2:2015
- [4] VDE-AR-N 4400:2011-09, Messwesen Strom (Metering Code), VDE Verlag, 2009.

Anhang F Danksagung

An der Erstellung des Effizienzleitfadens waren folgende Firmen/Institute aktiv beteiligt:

Austrian Institute of Technology (AIT)	Christian Messner, Christian Seidl
Berner Fachhochschule	Jonas Welten, Douglas Urena Hunziker, Luciano Borgna, Urs Muntwyler
BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V.	Maria Roos
BVES - Bundesverband Energiespeicher e.V.	Miriam Hegner, Christian Brenning
DGS - Landesverband Berlin Brandenburg e.V.	Kevin Gajkowski
Fraunhofer ISE	Naqqash Abbassi, Raphael Hollinger, Thofa Tazkia, Stephan Lux
Fraunhofer IEE	Fabian Niedermeyer
Fraunhofer UMSICHT	Volker Knappertsbusch, Tobias Kappels
Fronius International GmbH	Jürgen Wolfahrt
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin	Johannes Weniger, Tjarko Tjaden
Institut für Solarenergieforschung (ISFH)	Michael Knoop, Matthias Littwin
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Nina Munzke, Michael Mast, Bernhard Schwarz, Felix Büchle
KOSTAL Industrie Elektrik GmbH	Thomas Vogel
RWTH Aachen	Kai-Philipp Kairies, David Haberschusz, Jan Figgenger
SGS Germany GmbH	Detlef Hoffmann
SMA Solar Technology AG	Martin Rothert, Nico Kreutzer
Solarwatt GmbH	Christian Zahn, Thomas Timke
sonnen GmbH	Christian Mayr
TÜV Rheinland LGA Products GmbH	Nicolas Bogdanski, Romica Kiesewetter, Ralf Müller
TÜV SÜD Battery Testing GmbH	Alexander Person
TU Braunschweig	Hauke Loges
TU München	Holger Hesse
VARTA Storage GmbH	Florian Ermer
Voltavision GmbH	Julian Stentenbach
ZSW Baden-Württemberg	Joel Wenske, Jann Binder

Besonderer Dank gebührt:

Miriam Hegner (BVES), Martin Rothert (SMA), Kai-Philipp Kairies, David Haberschusz und Jan Figgenger (RWTH), Hauke Loges (elenia), Christian Messner (AIT), Nina Munzke, Bernhard Schwarz und Felix Büchle (KIT), Johannes Weniger und Tjarko Tjaden (HTW Berlin)

Anhang G Kurzfassung der Prüfergebnisse nach Effizienzleitfaden

Die Grundlage für vergleichbare Datenblattangaben bilden Prüfberichte, die auf dem Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme basieren. Bei den nachfolgend aufgelisteten Angaben handelt es sich um Mindestangaben, die in der Kurzfassung der Prüfergebnisse aufzuführen sind. Weitere Kennwerte oder Informationen des Prüfberichts können ergänzend übernommen werden. Die Begrifflichkeiten sind stets in Anlehnung an die Vorgaben des Effizienzleitfadens zu wählen. Es sind die einzelnen Systemkomponenten zu benennen, für die die aufgeführten Messwerte ermittelt wurden. Da viele Systemeigenschaften von der Wahl und Dimensionierung der einzelnen Systemkomponenten abhängen, ist die Kurzfassung für jede vermessene Systemkonfiguration separat zu erstellen. Bei einem Batteriespeicher ohne Wechselrichter/Konverter sind die im Abschnitt „Batterie“ aufgeführten Eigenschaften anzugeben.

- fett:** Angabe ist obligatorisch.
normal: Angabe, wenn betreffende Komponente/Funktion Teil des Datenblatt-Produkts ist.
k. A.: Keine Angabe notwendig.
grün: tabellarische Angabe der Umwandlungswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung zur Bemessungsausgangsleistung.

AC-gekoppelte Systeme	DC-gekoppelte Systeme	PV-Generatorkgekoppelte Systeme
Information zur Topologie		
Grafische Übersicht, welche Pfade die Datenblattkomponente bedient und welche Pfade noch notwendig sind, damit die Kette von PV-DC bis AC-Last abgedeckt ist.		
PV-Anbindung		
k. A.	$U_{PV,min}, U_{PV,nom}, U_{PV,max}$	$U_{PV,min}, U_{PV,nom}, U_{PV,max}$
k. A.	$U_{MPP,min}, U_{MPP,max}$	$U_{MPP,min}, U_{MPP,max}$
k. A.	$P_{PV,nom}$	$P_{PV,nom}$
AC-Anbindung		
$P_{BESS,nom}$ (Entladen)	$P_{AC,nom}$ (Abgabe)	$P_{AC,nom}$ (Export)
$P_{BESS,nom}$ (Laden)	$P_{AC,nom}$ (Bezug)	k. A.
	$P_{AC,nom}$ (Entladen)	$P_{AC,nom}$ (Entladen)
DC-Anbindung		
k. A.	k. A.	$P_{BESS,nom}$ (Entladen)
k. A.	k. A.	$P_{BESS,nom}$ (Laden)
Batterie-Anbindung		
$U_{PCE/BAT,min}$	$U_{PCE/BAT,min}$	$U_{PCE/BAT,min}$
$U_{PCE/BAT,nom}$	$U_{PCE/BAT,nom}$	$U_{PCE/BAT,nom}$
$U_{PCE/BAT,max}$	$U_{PCE/BAT,max}$	$U_{PCE/BAT,max}$

Anhang

$P_{PCE/BAT,nom}$ (Laden) $P_{PCE/BAT,nom}$ (Entladen)	$P_{PCE/BAT,nom}$ (Laden) $P_{PCE/BAT,nom}$ (Entladen)	$P_{PCE/BAT,nom}$ (Laden) $P_{PCE/BAT,nom}$ (Entladen)
Batterie		
Nach dem Effizienzleitfaden müssen die batteriebezogenen Angaben mindestens für eine Systemkonfiguration mit mittlerer Batteriekapazität gemacht werden.		
$P_{BAT,nom}$ (Laden) , $P_{BAT,nom}$ (Entladen)		
$U_{BAT,min}$, $U_{BAT,nom}$, $U_{BAT,max}$		
$E_{BAT,nutz}$		
$\eta_{BAT,RTE}$		
$P_{BMS,Standby}$		
Wirkungsgrade		
k. A.	$\eta_{PV2AC,t}(P)$	$\eta_{PV2AC,t}(P)^1$
$\eta_{BAT2AC}(P)$	$\eta_{BAT2AC}(P)$	$\eta_{BAT2AC}(P)^1$
k. A.	k. A.	$\eta_{BAT2PV}(P)$
k. A.	$\eta_{PV2BAT,t}(P)$	$\eta_{PV2BAT,t}(P)$
$\eta_{AC2BAT}(P)$	$\eta_{AC2BAT}(P)$	k. A.
Bereitschaftsverluste		
$P_{Standby,AC} (SOC_{max})$		
$P_{Standby,DC} (SOC_{max})$	$P_{Standby,DC} (SOC_{max})$	$P_{Standby,DC} (SOC_{max})$
$P_{Standby,AC} (SOC_{min})$	$P_{Standby,AC} (SOC_{min})$	$P_{Standby,AC} (SOC_{min})$
$P_{Standby,DC} (SOC_{min})$	$P_{Standby,DC} (SOC_{min})$	$P_{Standby,DC} (SOC_{min})$
$P_{PERIPH,AC}$	$P_{PERIPH,AC}$	$P_{PERIPH,AC}$
Regelungseigenschaften		
\bar{P}_{NETZ} (Bezug, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Bezug, Entladen) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Entladen)	\bar{P}_{NETZ} (Bezug, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Bezug, Entladen) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Entladen)	\bar{P}_{NETZ} (Bezug, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Laden) \bar{P}_{NETZ} (Bezug, Entladen) \bar{P}_{NETZ} (Abgabe, Entladen)
\bar{t}_T, \bar{t}_E	\bar{t}_T, \bar{t}_E	\bar{t}_T, \bar{t}_E
Anwendungsunabhängige Kennwerte		
k. A.	$\bar{\eta}_{PV2AC,t}$	$\bar{\eta}_{PV2AC,t}$
$\bar{\eta}_{BAT2AC}$	$\bar{\eta}_{BAT2AC}$	$\bar{\eta}_{BAT2AC}$
k. A.	k. A.	$\bar{\eta}_{BAT2PV}$
k. A.	$\bar{\eta}_{PV2BAT,t}$	$\bar{\eta}_{PV2BAT,t}$
$\bar{\eta}_{AC2BAT}$	$\bar{\eta}_{AC2BAT}$	k. A.
$\eta_{BAT,RTE}$	$\eta_{BAT,RTE}$	$\eta_{BAT,RTE}$
\bar{t}_E	\bar{t}_E	\bar{t}_E
$P_{System} (SOC_{min})$	$P_{System} (SOC_{min})$	$P_{System} (SOC_{min})$

¹ Sofern aufgeführt, ist der verwendete PV-Wechselrichter anzugeben. Der Wert kann bei der Verwendung von anderen PV-Wechselrichtern abweichen.

Beispiel für ein AC-gekoppeltes System mit integriertem Speicher

Charakterisierung des PV-Speichersystems										
	PV2AC	PV2BAT	AC2BAT	BAT	BAT2AC	BAT2PV				
Energiewandlungspfade	fehlt ¹	--	✓	✓	✓	--				
Sofern nicht anders gekennzeichnet, basieren alle Angaben auf dem „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme 2.0“.										
AC-Anbindung										
Nominale Ladeleistung (AC)						2500	W			
Nominale Entladeleistung (AC) ²						2500	W			
Batterie-Anbindung										
Batterieeingangsspannung ³						30 / 48 / 60	V			
Nominale Ladeleistung (DC) ⁴						2325	W			
Nominale Entladeleistung (DC)						2600	W			
Batterie										
Batteriespannung ³						40 / 48 / 52	V			
Nutzbare Batteriekapazität (DC) ⁵						5,0	kWh			
Batteriewirkungsgrad ⁵						94,0	%			
Leistungsaufnahme des BMS im Standby						5	W			
Bereitschaftsverluste										
Leistungsaufnahme im vollgeladenen Zustand (AC / DC)						10 / 2	W			
Leistungsaufnahme im entladenen Zustand (AC / DC)						5 / 1	W			
Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten (AC)						2	W			
Regelungseigenschaften des Leistungsumwandlungssystems										
Mittlere stationäre Abweichung der Ladeleistung (Bezug / Abgabe)						12 / 1	W			
Mittlere stationäre Abweichung der Entladeleistung (Bezug / Abgabe)						14 / 3	W			
Mittlere Totzeit						2	s			
Mittlere Einschwingzeit						10	s			
Wirkungsgrade der Energiewandlungspfade										
Pfad	Mittlere Spannung		normierte Ausgangsleistung							
	PV	Batterie	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
AC2BAT	-	50 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
BAT2AC	-	48 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
Anwendungsunabhängige Kennwerte										
Mittlerer AC2BAT-Umwandlungswirkungsgrad ⁶						93,2	%			
Mittlerer BAT2AC-Umwandlungswirkungsgrad ⁶						92,8	%			
Batteriewirkungsgrad ⁵						94	%			
Mittlere Einschwingzeit						10	s			
Systemverbrauch im Standby-Modus						8	W			

¹ Ist nicht Bestandteil des Produkts, aber für ein funktionsfähiges Gesamtsystem erforderlich.

² Bemessungsausgangsleistung BAT2AC

³ Minimale / nominale / maximale Spannung

⁴ Bemessungsausgangsleistung AC2BAT

⁵ Mittelwert der Messungen bei 100%, 50% und 25% der nominalen Lade-/Entladeleistung.

⁶ Mittelwert des Wirkungsgrads an den zehn gleichverteilten Stützstellen zwischen 5% und 95% der nominalen Leistung.

Beispiel für ein DC-gekoppeltes System mit integriertem Speicher

Charakterisierung des PV-Speichersystems										
	PV2AC	PV2BAT	AC2BAT	BAT	BAT2AC	BAT2PV				
Energiewandlungspfade	✓	✓	--	✓	✓	--				
Sofern nicht anders gekennzeichnet, basieren alle Angaben auf dem „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme 2.0“.										
PV-Anbindung										
PV-Bemessungseingangsleistung						5000	W			
PV-Eingangsspannung ¹						200 / 350 / 500	V			
MPP-Spannung ²						250 / 450	V			
AC-Anbindung										
PV-Bemessungsausgangsleistung ³						4600	W			
Nominale Entladeleistung (AC)						3000	W			
Batterie-Anbindung										
Batterieeingangsspannung ¹						35 / 48 / 60	V			
Nominale Ladeleistung (DC) ⁴						3300	W			
Nominale Entladeleistung (DC) ⁵						3300	W			
Batterie										
Batteriespannung ¹						40 / 48 / 52	V			
Nutzbare Batteriekapazität ⁶						5,0	kWh			
Batteriewirkungsgrad ⁶						94,0	%			
Leistungsaufnahme des BMS im Standby						5	W			
Bereitschaftsverluste										
Standby-Leistungsaufnahme im vollgeladenen Zustand (DC)						2	W			
Standby-Leistungsaufnahme im entladenen Zustand (AC / DC)						5 / 1	W			
Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten (AC)						2	W			
Regelungseigenschaften										
Mittlere stationäre Abweichung der Ladeleistung (Bezug / Abgabe)						12 / 1	W			
Mittlere stationäre Abweichung der Entladeleistung (Bezug / Abgabe)						14 / 3	W			
Mittlere Totzeit						2	s			
Mittlere Einschwingzeit						10	s			
Wirkungsgrade der Energiewandlungspfade										
Pfad	Mittlere Spannung		normierte Ausgangsleistung							
	PV	Batterie	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
PV2AC	200 V (min.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2AC	350 V (nom.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2AC	500 V (max.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	200 V (min.)	52 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	350 V (nom.)	52 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	500 V (max.)	52 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
BAT2AC	-	48 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
Anwendungsunabhängige Kennwerte										
Mittlerer PV2AC-Umwandlungswirkungsgrad ⁷						94,1	%			
Mittlerer PV2BAT-Umwandlungswirkungsgrad ⁷						93,2	%			
Mittlerer BAT2AC-Umwandlungswirkungsgrad ⁷						92,8	%			
Batteriewirkungsgrad ⁶						94	%			
Mittlere Einschwingzeit						10	s			
Systemverbrauch im Standby-Modus						8	W			

¹ Minimale / nominale / maximale Spannung

² Minimale / maximale Spannung

³ Bemessungsausgangsleistung PV2AC

⁴ Bemessungsausgangsleistung PV2BAT

⁵ Bemessungsausgangsleistung BAT2AC

⁶ Mittelwert der Messungen bei 100%, 50% und 25% der nominalen Lade-/Entladeleistung.

⁷ Mittelwert des Wirkungsgrads an den zehn gleichverteilten Stützstellen zwischen 5% und 95% der nominalen Leistung.

Beispiel für ein PV-Generatorkoppeltes System mit integriertem Speicher

Charakterisierung des PV-Speichersystems										
	PV2AC	PV2BAT	AC2BAT	BAT	BAT2AC	BAT2PV				
Energiewandlungspfade	✓ ¹	✓	--	✓	--	✓				
Sofern nicht anders gekennzeichnet, basieren alle Angaben auf dem „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme 2.0“.										
PV-Anbindung										
PV-Bemessungseingangsleistung						5000	W			
PV-Eingangsspannung ²						200 / 350 / 500	V			
MPP-Spannung ³						250 / 450	V			
AC-Anbindung										
PV-Bemessungsausgangsleistung ⁴						4600	W			
Nominale Entladeleistung (AC) ⁵						1900	W			
Batterie-Anbindung										
Batterieeingangsspannung ²						40 / 120 / 220	V			
Nominale Ladeleistung (DC) ⁶						2000	W			
Nominale Entladeleistung (DC) ⁷						2000	W			
Batterie										
Batteriespannung ²						50 / 60 / 70	V			
Nutzbare Batteriekapazität ⁸						5,0	kWh			
Batteriewirkungsgrad ⁸						94,0	%			
Leistungsaufnahme des BMS im Standby						7	W			
Bereitschaftsverluste										
Standby-Leistungsaufnahme im vollgeladenen Zustand (DC)						2	W			
Standby-Leistungsaufnahme im entladenen Zustand (DC)						1	W			
Leistungsaufnahme der weiteren Systemkomponenten (AC)						2	W			
Regelungseigenschaften										
Mittlere stationäre Abweichung der Ladeleistung (Bezug / Abgabe)						12 / 1	W			
Mittlere stationäre Abweichung der Entladeleistung (Bezug / Abgabe)						14 / 3	W			
Mittlere Totzeit						2	s			
Mittlere Einschwingzeit						10	s			
Wirkungsgrade der Energiewandlungspfade										
Pfad	Mittlere Spannung		normierte Ausgangsleistung							
	PV	Batterie	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
PV2AC	200 V (min.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2AC	350 V (nom.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2AC	500 V (max.)	-	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	200 V (min.)	65 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	350 V (nom.)	65 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
PV2BAT	500 V (max.)	65 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
BAT2PV	-	60 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%
BAT2AC	-	60 V	80,4%	85,6%	90,2%	92,1%	93,2%	95,4%	95,6%	95,5%

¹ Ist nicht Bestandteil des Produkts, aber für ein funktionsfähiges Gesamtsystem erforderlich.

² Minimale / nominale / maximale Spannung

³ Minimale / maximale Spannung

⁴ Bemessungsausgangsleistung PV2AC

⁵ Bemessungsausgangsleistung BAT2AC

⁶ Bemessungsausgangsleistung PV2BAT

⁷ Bemessungsausgangsleistung BAT2PV

⁸ Mittelwert der Messungen bei 100%, 50% und 25% der nominalen Lade-/Entladeleistung.

Anwendungsunabhängige Kennwerte		
Mittlerer PV2AC-Umwandlungswirkungsgrad ¹	94,1	%
Mittlerer PV2BAT-Umwandlungswirkungsgrad ¹	93,2	%
Mittlerer BAT2PV-Umwandlungswirkungsgrad ¹	95,3	%
Mittlerer BAT2AC-Umwandlungswirkungsgrad ¹	92,8	%
Batteriewirkungsgrad ⁸	94	%
Mittlere Einschwingzeit	10	s
Systemverbrauch im Standby-Modus	8	W

Beispiel für eine Batterie

Charakterisierung des PV-Speichersystems						
	PV2AC	PV2BAT	AC2BAT	BAT	BAT2AC	BAT2PV
Energiewandlungspfade	--	--	--	✓	--	--

Sofern nicht anders gekennzeichnet, basieren alle Angaben auf dem „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme 2.0“.

Batterie		
Nominale Ladeleistung (DC)	3000	W
Nominale Entladeleistung (DC)	3000	W
Batteriespannung ²	38 / 48 / 58	V
Nutzbare Batteriekapazität ^{3,4}	5,0	kWh
Batteriewirkungsgrad ³	94,0	%
Leistungsaufnahme des BMS im Standby	5	W
Anwendungsunabhängige Kennwerte		
Batteriewirkungsgrad ³	94	%

¹ Mittelwert des Wirkungsgrads an den zehn gleichverteilten Stützstellen zwischen 5% und 95% der nominalen Leistung.

² Minimale / nominale / maximale Spannung

³ Mittelwert der Messungen bei 100%, 50% und 25% der nominalen Lade-/Entladeleistung.

⁴ Die nutzbare Batteriekapazität ist von den Einstellungen der Systemregelung abhängig und kann je nach Wechselrichter variieren.