

# Prüfbericht zur Vermessung des Heimspeichersystems Sax Power Homespeicher

gemäß Auftrags-Nr. 35051147  
6. September 2024

Bestimmung von Leistungsumwandlungs- und Batteriewirkungsgraden, stationären und dynamischen Regelabweichungen sowie Standby-Verbräuchen nach Effizienzleitfaden

Vorgelegt von:

Robert Schreier, Heike Bolz, Bernhard Schwarz, Nina Munzke

ETI Batterietechnikum



Karlsruher Institut für Technologie  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen



KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Spezifikationen</b>	<b>4</b>
1.1	Prüfling und verwendete Messgeräten . . . . .	4
1.2	Ergänzende Angaben . . . . .	5
1.3	Typenschilder . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Ablauf der Prüfungen</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung und Ergebnisse</b>	<b>9</b>
3.1	Bestimmung der Bemessungsleistungen . . . . .	9
3.1.1	Bemessungsleistungen PV2BAT und BAT2AC . . . . .	9
3.2	Wirkungsgrade des Leistungsumwandlungssystems . . . . .	10
3.2.1	Wirkungsgrade PV2BAT (optional), AC2BAT und BAT2AC . . . . .	12
3.3	Stand-By Verbräuche . . . . .	15
3.4	Batteriewirkungsgrad . . . . .	20
3.5	Regelungseffizienz . . . . .	22
3.5.1	Dynamische Regelabweichungen . . . . .	22
3.5.2	Stationäre Regelabweichungen . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>28</b>
4.1	Übersicht Bemessungsleistungen und Pfadwirkungsgrade . . . . .	28
4.2	Übersicht Stand-By Verbräuche . . . . .	29
4.3	Übersicht Batteriewirkungsgradmessung . . . . .	30
4.4	Übersicht Regelungseffizienz . . . . .	30
4.4.1	Dynamische Regelungsabweichungen . . . . .	30
4.4.2	Stationäre Regelungsabweichungen . . . . .	30
4.5	Datenblattrelevante Angaben . . . . .	31

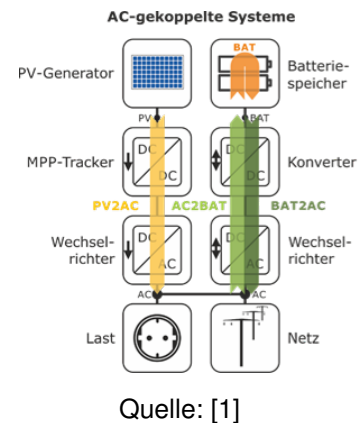
# Abbildungsverzeichnis

1.1	Datenblatt Batteriewechselrichter . . . . .	6
1.2	AC - Meter . . . . .	6
1.3	Typenschild PV-Wechselrichter . . . . .	6
1.4	Messaufbau . . . . .	7
3.1	Bemessungsleistung der Pfade PV2BAT und BAT2AC . . . . .	10
3.2	Treppenprofil zur Bestimmung der Wirkungsgrade aus [1] . . . . .	11
3.3	Wirkungsgradmessung AC2BAT/PV2BAT . . . . .	13
3.4	Wirkungsgrade AC2BAT/PV2BAT . . . . .	13
3.5	Wirkungsgradmessung BAT2AC . . . . .	14
3.6	Wirkungsgrade BAT2AC . . . . .	14
3.7	Messung Standby- Verbrauch - $SOC_{max}$ . . . . .	16
3.8	Messung Standby- Verbrauch - $SOC_{min}$ . . . . .	16
3.9	Messung Verbrauch im OFF-Modus . . . . .	16
3.10	Bestimmung des Peripherieverbrauchs bei $SOC_{min}$ und $P_{Last} = 0W$ . . . . .	18
3.11	Messung des Batteriewirkungsgrades, Zyklus 1 . . . . .	20
3.12	Leistungsverlauf in Abhängigkeit der ge- bzw. entladenen Energie, 1.Zyklus, 2.Iteration	21
3.13	Stufenprofil dynamische Regelungseffizienz aus [1]. . . . .	23
3.14	Lastprofil und Netzaustauschleistung, 2. Zyklus . . . . .	23
3.15	Vermessung der stationären Regelabweichungen mit dem Profil aus Abbildung 3.13 bei Batterieladung und -entladung, 1. Zyklus . . . . .	27
3.16	Stationäre Regelabweichungen aus der Messung in Abbildung 3.15 . . . . .	27
3.17	Gemittelte stationäre Regelabweichungen $\bar{P}_{NETZ, Bezug}$ , $\bar{P}_{NETZ, Abgabe}$ und $\bar{P}_{abw}$ über ge- mischte Pfadzustände bei Batterieladung und -entladung . . . . .	27

# 1 Spezifikationen

## 1.1 Prüfling und verwendete Messgeräten

<b>Prüfling</b>	- Name / Hersteller <b>Sax Power Homespeicher,</b> Batteriespeichersystem: - Topologie: AC-gekoppelt, 1-phasiger Anschluss - Verwendeter PV-Wechselrichter: SMA Sunny Boy SB5.0																															
<b>Herstellerangaben</b>	<b>Heimspeichersystem / Batterie</b> - Batteriekapazität nutzbar 7,7kWh - Nennleistung Batterieladung 1,5 / 4,6kW /-entladung: - Module Anzahl/ Bezeichnung: 1/ - - AC Bemessungsleistung Batterie Wechselrichter: - Max. Wirkungsgrad Batterie: $\geq 99\%$ <b>PV-Wechselrichter</b> - Max. DC-Leistung: 7500kW - AC Bemessungsleistung: 5kVA - Spannungsbereich $U_{min} / U_{max}$ : 175 / 600V - Spannungsbereich 175/ 400/ 480V $U_{mpp,min./-nom./-max.}$ : - Max. DC-Eingangsstrom 20 / 20A $I_{max, Str1 / -Str2}$ : - Max. Wirkungsgrad Wechselrichter: 97%																															
<b>Messpunkte und Messgeräte</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Messpunkt</th> <th>PVS DC</th> <th>BATT DC (24x)</th> <th>AC / 1 ~</th> <th>Last AC / 1 ~</th> <th>NETZ AC / 3 ~</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Messgerät</b></td> <td>HBK Genesis GN310B</td> <td>HBK Genesis GN310B</td> <td>HBK Genesis GN310B</td> <td>HBK Genesis GN310B</td> <td>HBK Genesis GN310B</td> </tr> <tr> <td><b>Genauigkeit</b></td> <td>0,015 + 0,02%</td> <td>0,015 + 0,02%</td> <td>0,015 + 0,02%</td> <td>0,015 + 0,02%</td> <td>0,015 + 0,02%</td> </tr> <tr> <td><b>Messwandler</b></td> <td>PCT200</td> <td>PCT200</td> <td>PCT200</td> <td>PCT200</td> <td>PCT200</td> </tr> <tr> <td><b>Genauigkeit</b></td> <td>0,0035%</td> <td>0,0035%</td> <td>0,0035%</td> <td>0,0035%</td> <td>0,0035%</td> </tr> </tbody> </table>		Messpunkt	PVS DC	BATT DC (24x)	AC / 1 ~	Last AC / 1 ~	NETZ AC / 3 ~	<b>Messgerät</b>	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	<b>Genauigkeit</b>	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	<b>Messwandler</b>	PCT200	PCT200	PCT200	PCT200	PCT200	<b>Genauigkeit</b>	0,0035%	0,0035%	0,0035%	0,0035%	0,0035%
Messpunkt	PVS DC	BATT DC (24x)	AC / 1 ~	Last AC / 1 ~	NETZ AC / 3 ~																											
<b>Messgerät</b>	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B	HBK Genesis GN310B																											
<b>Genauigkeit</b>	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%	0,015 + 0,02%																											
<b>Messwandler</b>	PCT200	PCT200	PCT200	PCT200	PCT200																											
<b>Genauigkeit</b>	0,0035%	0,0035%	0,0035%	0,0035%	0,0035%																											
<b>Hardware der HiL Umgebung</b>	<b>PV-Simulatoren</b> - Gerät / Hersteller: 1x G5.SAS / Regatron <b>Elektronische Last</b> - Gerät / Hersteller: 1x ZSAC5644 / Höcherl & Hackl <b>Wechselstromversorgung</b> - konform zu DIN EN 50530 [2]																															



## 1.2 Ergänzende Angaben

Parameter	Wert
Ladezyklen / SoH	100 %
Seriennummer	1012400034
$U_{\text{BAT,min}}$	300 V
$U_{\text{BAT,max}}$	420 V
DoD	ca. 92 %

## 1.3 Typenschilder

## SYSTEMDATEN

# 7,7 KWH

Batterietyp	LiFePO4 (LFP)
Zelldaten	3,2 V; 20 Ah
Installierte Kapazität	7,68 kWh
Nutzbare Kapazität	7,0 kWh
Modular erweiterbar	bis 21 kWh
Nennspannung	230 V AC, 1-phasig
Nennleistung nominal	4,6 kW
Nennleistung bei Plug-In	3,68 kW
Nennstrom nominal	20 A
Nennstrom bei Plug-In	16 A
Speichergewicht	72 kg
Speicherabmessungen	620 x 620 x 250 mm
Kühlung	passiv
Displaytyp	ePaper Display

Abbildung 1.1: Datenblatt Batteriewechselrichter

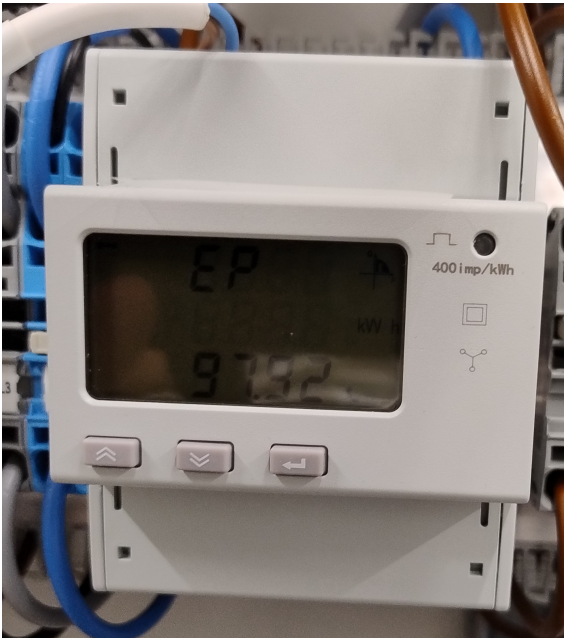
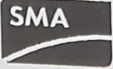


Abbildung 1.2: AC - Meter

SMA Solar Technology AG  
Sonnentallee 1  
34266 Niestetal  
Germany  
www.SMA.de



## SUNNY BOY


Solar Inverter  
Engineered in Germany, made in China

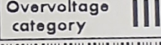
Model  
**SB5.0-1AV-40**


Serial No.  
**1992060025**

PIC: 003420000060025  
RID: LRXUPE  
WPA2-PSK:AJFK3PJYHMY3L2JP

DC	V <sub>DC max</sub>	600 V
	V <sub>DC MPP</sub>	175 - 480 V
	I <sub>DC max</sub>	2x15 A
	I <sub>SC PV</sub>	2x20 A
AC	V <sub>AC,r</sub>	220/230/240V
	P <sub>AC,r</sub>	5000 W *1
	S <sub>max</sub>	5000 VA *1
	f <sub>AC,r</sub>	50/
	I <sub>AC max</sub>	22 A *2
	COS(φ)	0.8...1...0.8 overexcited underexcited

IP65  max 16kg

Protective class I  Overvoltage category III

CE 

Date of manufacture 2017-09-18

\*1: VDE AR-N 4105;  
P<sub>ac, r</sub> 4600W' i  
S<sub>max</sub> 4600 VA

\*2: AS4777; I<sub>ac max</sub>: 21.7 A


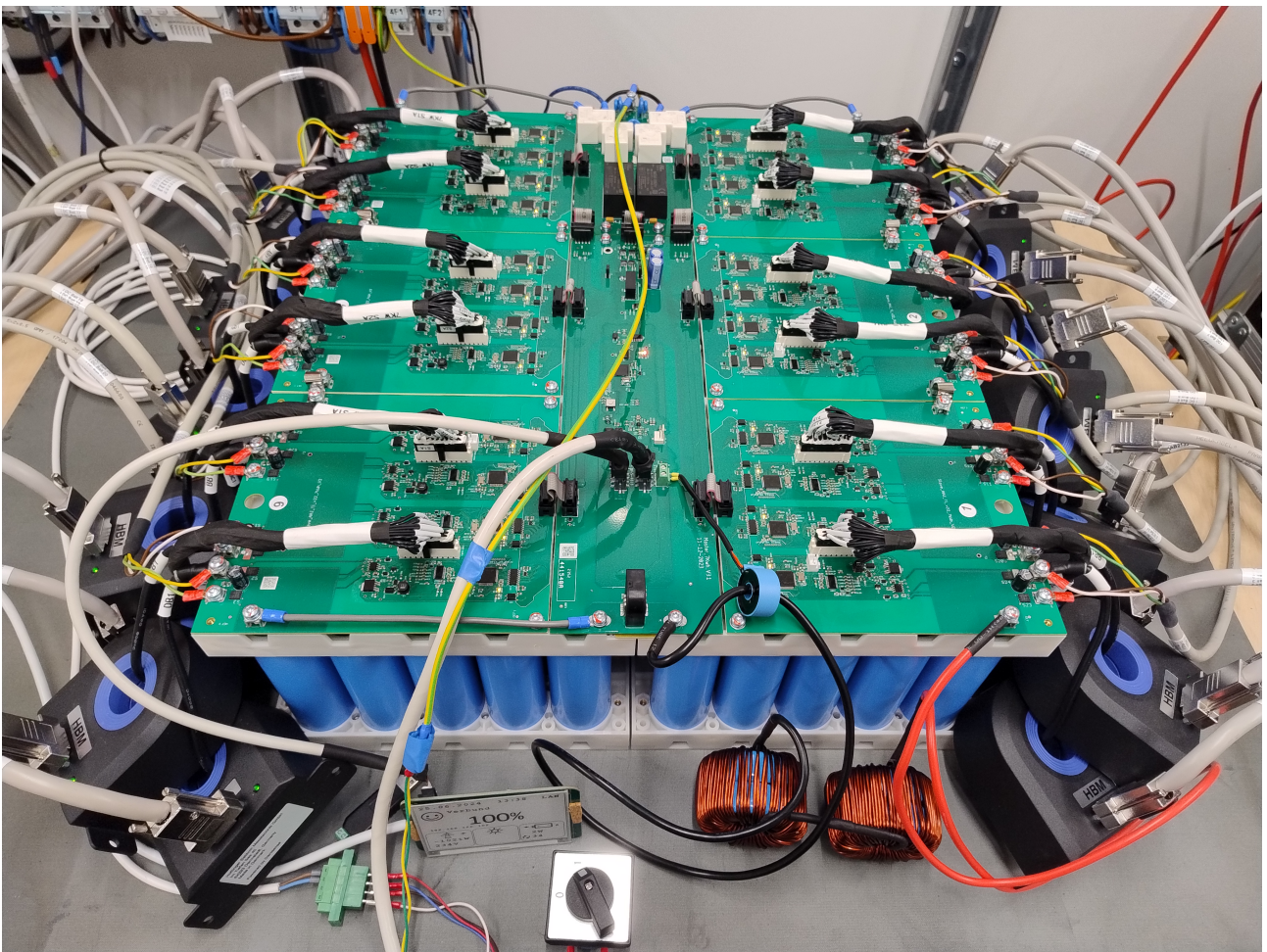


Abbildung 1.3: Typenschild PV-Wechselrichter



**Abbildung 1.4: Messaufbau**

Da für die benötigten Stromwandler im Gehäuse des Systems kein Platz war, wurde das System ohne Gehäuse aufgebaut. Im Betrieb wurde der Aufbau abgedeckt.

## 2 Ablauf der Prüfungen

Alle Prüfungen erfolgen ausschließlich durch Vorgabe von PV und Last nach [1], Kapitel 6.1 Option A und werden nach Vorgaben aus [1], Kapitel 6 - 9 durchgeführt. Es werden die Abkürzungen, Begriffe und Formelzeichen aus [1], Kapitel 3 und 4 verwendet.

### Allgemeiner Prüfablauf

- Bestimmung der Bemessungsleistungen nach [1], Anhang C
- Ermittlung der Wirkungsgrade des Leistungsumwandlungssystems
- Ermittlung des Wirkungsgrads der Batterie
- Bestimmung der Standby-Verbräuche
- Ermittlung der statischen und dynamischen Regelabweichungen

### MPP-Spannungen

Die verwendeten MPP-Spannungen lassen sich wie folgt bestimmen:

MPP-Spannungen		$U_{MPP, \min}$	$U_{MPP, \text{nom}}$	$U_{MPP, \max}$
Datenblattangabe 1Tr / 2 Tr	V	175	400	480
<b>Berechnungsgrundlage</b>				
Messung PV2AC (2Tr.)	V		400	
Messung PV2BAT (2Tr.)	V		400	

### Angabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden mit der aus den Genauigkeiten des jeweiligen Messpunktes resultierenden, leistungsabhängigen Präzision angegeben (siehe Spezifikationen). Die Fehlerbalken in grafischen Darstellungen stellen ein Maß für die statistische Streuung der betrachteten Größe dar und ergeben sich aus den anhand Größtfehlerabschätzung fortgepflanzten Standardfehlern der beteiligten Signalverläufe. Größere Fehlerbalken können hier sowohl aus Signalschwankungen als auch durch vom System oder dem Wechselrichter verursachte, peakförmige Regelungsvorgänge entstehen.

### Interpolation

Die Ergebnisse der Pfadwirkungsgrade müssen nach [2] bei größeren Abweichungen zwischen Eingangs- und Ausgangsleistungsverhältnissen auf die normierten Ausgangsleistungsverhältnisse interpoliert werden. Abweichend von dem Vorgehen in [2] werden die Wirkungsgrade in diesem Protokoll für alle Leistungsstufen konform zu [1], Kapitel 7 durch ein quadratisches Fitting der Verlustleistungen [3] interpoliert.



## 3 Durchführung und Ergebnisse

### 3.1 Bestimmung der Bemessungsleistungen

#### 3.1.1 Bemessungsleistungen PV2BAT und BAT2AC

Die Bemessungsleistungen  $P_{PV2BAT,nom}$  und  $P_{BAT2AC,nom}$  werden nach [1], Anhang C II - III als die Sollleistung  $P_{PVS,MPP}$  bzw. die am Messpunkt LAST AC anliegende Leistung  $P_{LAST}$  bestimmt, bei der mit weiter steigender PV- bzw. Lastleistung die Batterieleistung  $P_{BATT}$  in Stagnation übergeht. Ändert sich die Leistung  $P_{BATT}$  über eine definierte Mindestdauer hinweg um mehr als 2%, wird eine Korrektur der Bemessungsleistung nach [1], Anhang C III durchgeführt.

#### Vorbereitung

- Laden / Entladen der Batterie auf  $SOC_{avg}$  (s. [1], Kapitel 6.3). Dies entspricht einer Batterieruhe-spannung von  $U_{BATT} \sim 259,1$  V.
- Einstellen der PV-Kennlinien auf  $P_{PVS,MPP,max} = 1800$  W (  $1,2$  s \*  $P_{BAT,nom}$  (Laden, Entladen)) bei einer mittleren PV-Spannung  $U_{MPP,nom} = 400$  V.
- Einstellen der Last auf  $P_{LAST,max} = 5520$  W (  $0,8$  % \*  $P_{BAT,nom}$  (Laden, Entladen)).

*Hinweis: Die Vorlauf- und Integrationszeiten werden gegebenenfalls zugunsten genauerer Ergebnisse von den Vorgaben abweichend angepasst.*

#### Durchführung

- Halten von  $P_{PVS,MPP} = 1800$  W für 120 kW (  $0,8$  s%  $P_{PVS,DC}$  ).
- Lineare Rampe mit Steigung  $m = \sim 10$  W s<sup>-1</sup> bis  $P_{PVS,DC} = P_{PVS,MPP,max}$ .
- Halten des Plateaus für 360 W., anschließend  $P_{PVS,MPP} = 0$  W anfahren.
- Lineare Rampe mit Steigung  $m = \sim 10$  W s<sup>-1</sup> bis  $P_{LAST} = P_{LAST,max}$ .
- Halten des Plateaus für 360 W., anschließend  $P_{LAST} = 0$  W anfahren.
- Bestimmung der Bemessungsleistungen  $P_{PV2BAT,nom}$  und  $P_{BAT2AC,nom}$  nach [1], Anhang C III.

### Ergebnisdarstellung Bemessungsleistung PV2BAT/BAT2AC

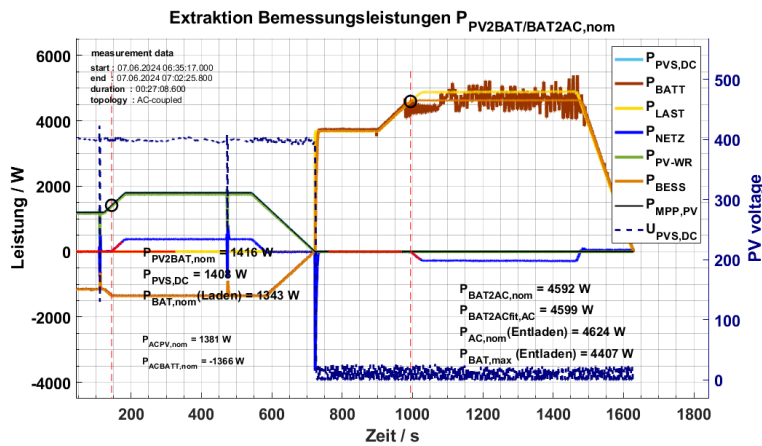


Abbildung 3.1: Bemessungsleistung der Pfade PV2BAT und BAT2AC

Parameter	Wert
$P_{PVS,MPP,max}$	1800 W
$U_{MPP}$	400 V
$P_{Last,max}$	5520 W
$m_{Rampe,PV}$	$10 \text{ W s}^{-1}$
$m_{Rampe,Last}$	$10 \text{ W s}^{-1}$
<b>Ladezustand</b>	$SOC_{avg,area}$

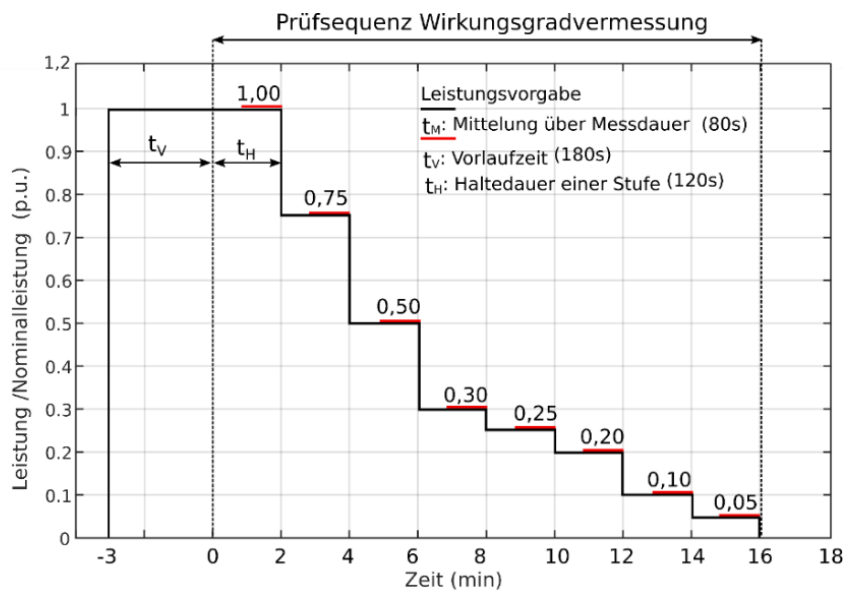
Ergebnis	Wert
$P_{PV2BAT,nom}$	1416 W
$P_{BAT2AC,nom}$	4592 W
$P_{BAT,nom(Laden)}$	1343 W
$P_{BESS,nom(Entladen)}$	4624 W

## 3.2 Wirkungsgrade des Leistungsumwandlungssystems

Es werden die Wirkungsgrade des Leistungsumwandlungssystems des Heimspeichersystems nach [1], Kapitel 7.3 – 7.6 entlang der Pfade AC2BAT, PV2BAT (optional) und BAT2AC bestimmt. Die finale Angabe der Wirkungsgrade erfolgt hierbei nach der DIN EN 50530 [2] aufgetragen über die normierten Ausgangsleistungen des jeweiligen Pfades. Abweichend von [2] werden *alle* Werte außer der Stufe 1.0 konform zu [1], Kapitel 7 durch ein quadratisches Fitting der Verlustleistungen auf die Werte der normierten Pfadleistung aus Tabelle 1 interpoliert. Für die Bestimmung der Wirkungsgrade des Leistungsumwandlungssystems wird für die vorgegebenen PV- und Lastleistungen das Stufenprofil aus [1], Kapitel 7.4.2 als Prüfsequenz verwendet (siehe Abbildung 6). Die Berechnung der Wirkungsgrade erfolgt nach [1], Kapitel 4.9.3, Formeln (6) - (8).

MPP-Leistung / Last-Leistung bezogen auf die Pfadbemessungsleistung $P_{PV/LAST,Pfad} / P_{Pfad,nom}$							
0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
jeweils bei $U_{MPP, min}$ , $U_{PV, nom}$ und $U_{MPP, max}$ simulierte I/U-Kennlinie: c-Si							

Tabelle 3.1: Stufenprofil der normierten Pfadleistungen für die Wirkungsgradmessungen



**Abbildung 3.2:** Treppenprofil zur Bestimmung der Wirkungsgrade aus [1]

### 3.2.1 Wirkungsgrade PV2BAT (optional), AC2BAT und BAT2AC

Die hier vermessenen Wirkungsgrade treten bei der Leistungsumwandlung beim Laden bzw. Entladen der Batterie auf.

Der Ausgangszustand der Batterie für die Wirkungsgradbestimmungen dieser Pfade ist durch einen SOC im mittleren Ladezustandsbereich  $SOC_{avg} + 10\%$  vorgegeben (s. [1], Kapitel 6.3). Die Bestimmung der Wirkungsgrade erfolgt nach [1], Kapitel 7.4.2.

*Hinweis: Bei AC-gekoppelten Systemen ist bei der optionalen Vermessung des Pfades PV2BAT anzumerken, dass die Verwendung eines anderen Wechselrichters in der Regel zu Abweichungen von den hier bestimmten Werten für die Wirkungsgrade  $\eta_{PV2BAT}$  führt.*

#### Allgemeiner Ablauf

Für die Spannung  $U_{MPP,nom}$  wird in einer zusammenhängenden Messung zunächst der Entladewirkungsgrad  $\eta_{BAT2AC}$  und dann nach 30 min Ruhezeit der Ladewirkungsgrad  $\eta_{AC2BAT}$  sowie optional  $\eta_{PV2BAT}$  durch Abfahren jeweils eines Treppenprofils (s. 3.2 im Voll- und Teillastbereich bestimmt).

#### Prüfsequenz Entladen/Laden:

1. Ausgangszustand herstellen:
  - a) Batterie wird vollständig geladen
  - b) Die Batterie wird ca. auf den mittleren  $SOC_{avg} + 10\%$  entladen
  - c) Pause (-30min)
2. Treppenprofil Entladewirkungsgrad mit anschließender Pause (-30min)
3. Treppenprofil Ladewirkungsgrad bei  $U_{MPP,nom}$

#### Vorbereitung der Wirkungsgradmessungen $\eta_{AC2BAT/PV2BAT}$ und $\eta_{BAT2AC}$

- Ladezustand der Batterie auf  $SOC_{avg}$  (s. [1], Kapitel 6.3)
- Einstellen der PV-Kennlinien auf  $P_{PVS1,MPP,max} + P_{PVS2,MPP,max} = W$ , bei MPP- Spannungen  $U_{MPP,nom} = 400\text{ V}$

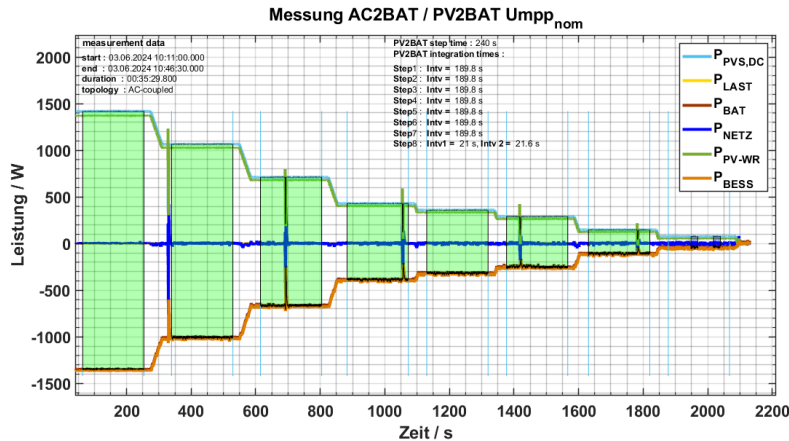
#### Durchführung

- Durchfahren des Treppenprofils mit Haltezeiten  $T_H = 240\text{ s}$  und Messzeiten von  $T_M = 190\text{ s}$  pro Leistungsstufe

*Hinweise zur Messung:*

1. Die Halte- und Integrationszeiten werden zugunsten genauerer Ergebnisse verlängert (siehe auch [2])

### Ergebnisdarstellung Wirkungsgrade AC2BAT/PV2BAT

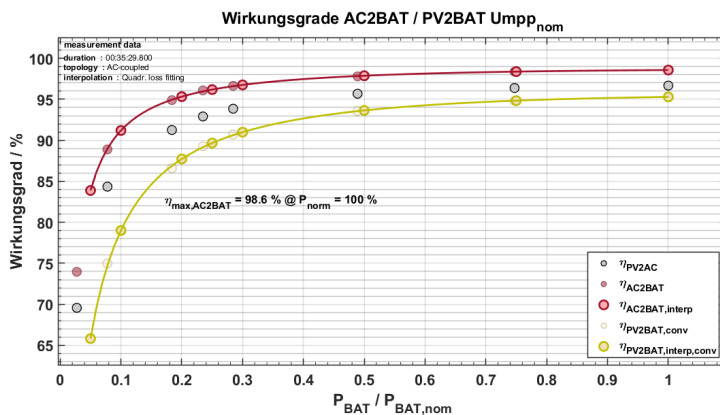


Parameter	Wert
$P_{PVS,MPP,max}$	1414 W
$U_{MPP}$	400 V
$P_{Last}$	- W
$SOC_{Start}$	40 %
$T_H$	240 s
$T_M$	190 s
Stufen	8
$T_A$	$25 \pm 5^\circ C$

Abbildung 3.3: Wirkungsgradmessung AC2BAT/PV2BAT

$P_{PVS,MPP}/P_{PV2BAT,nom}$		0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
$\eta_{AC2BAT}$	%	74	88,9	94,9	96,1	96,6	97,8	98,4	98,6
$\bar{U}_{PVS,MPP}$	V	402,3	392,6	400,9	397,2	398	396,3	397,3	399,2
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W	78	146	287	360	427	708	1066	1419
$\bar{P}_{PV-WR}$	W	54,2	123,4	262,2	334,1	401	677,3	1026,9	1371,6
$\bar{P}_{BESS}$	W	49,9	117,6	260,3	328,6	395,7	672,2	1021,1	1363,7
$\bar{P}_{BAT}$	W	37	105	247	316	382	657	1004	1344
$\bar{P}_{BAT}/\bar{P}_{BAT,nom(Laden)}$	-	0,027	0,078	0,184	0,235	0,284	0,489	0,747	1
$\bar{U}_{BAT}$	V	396,9	397,3	397,8	398	398,2	399	399,7	400
$C_{BAT(Laden)}$	Ah	0,026	0,332	0,785	1,001	1,212	2,082	3,172	4,239
$C_{BAT(L)}/C_{BAT,nom}$	%	0,01	0,09	0,2	0,26	0,31	0,54	0,82	1,09
$\bar{P}_{NETZ}$ (Bezug)	W	4,9	6,34	4,95	5,65	7,5	8,34	5,33	4,75
$\bar{P}_{NETZ}$ (Abgabe)	W	2,93	2,84	5,59	2,51	4,6	6,02	2,56	0,67
$P_{BAT}/P_{BAT,nom}$		0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{AC2BAT}$	%	<b>83,9</b>	<b>91,2</b>	<b>95,3</b>	<b>96,2</b>	<b>96,8</b>	<b>97,9</b>	<b>98,4</b>	<b>98,6</b>
$\eta_{PV2BAT}$	%	65,8*	79*	87,7*	89,7*	91*	93,6*	94,8*	95,3*

\* Interpolierte Werte nach [1], Kapitel 7

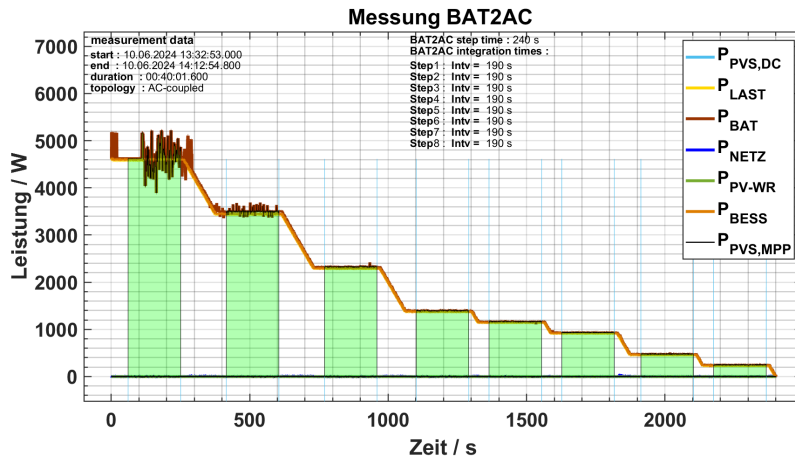


Parameter	Wert
$\eta_{max}$	98,5 %
$\eta_{min}$	94 %
$P_{Bat,max}$	1344 W
$P_{BESS,max}$	1363,7 W
$P_{BESS,min}$	49,9 W
$\bar{U}_{BAT}$	397 - 400 V

Abbildung 3.4: Wirkungsgrade AC2BAT/PV2BAT

Wirkungsgrade AC2BAT / PV2BAT  $U_{mpp,nom}$

## Ergebnisdarstellung Wirkungsgrade BAT2AC

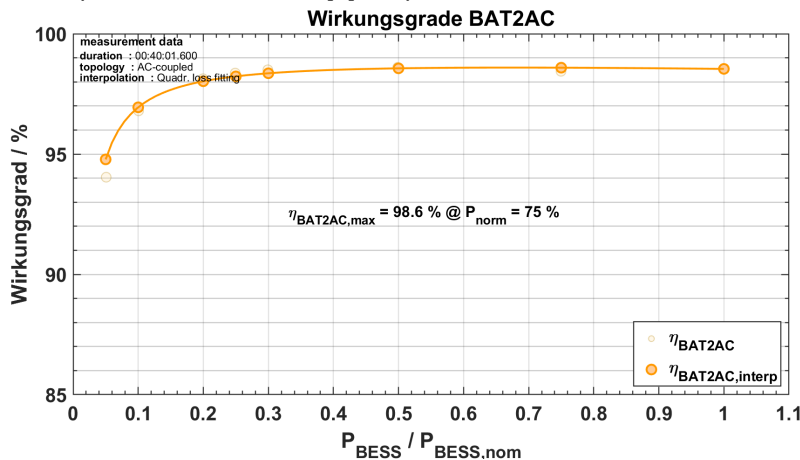


Parameter	Wert
$P_{PVS,MPP,max}$	- W
$P_{Last}$	4583 W
$SOC_{Start}$	60 %
$T_M$	190 s
<b>Stufen</b>	8
$T_A$	25 ± 5°C

Abbildung 3.5: Wirkungsgradmessung BAT2AC

$P_{LAST}/P_{BAT2AC,nom}$		0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$\eta_{BAT2AC}$	%	94	96,8	98,1	98,4	98,5	98,6	98,4	98,5
$P_{LAST,SOLL}$	W	229,2	458,3	916,6	1145,8	1374,9	2291,5	3437,3	4583
$\bar{P}_{LAST}$	W	229,1	458	915,7	1144,4	1373,3	2289,1	3434,3	4579,9
$\bar{P}_{BESS}$	W	233,8	462,8	918,5	1146	1376,6	2295	3449,5	4601,2
$\bar{P}_{BESS}/\bar{P}_{BESS,nom}$		0,051	0,101	0,2	0,249	0,299	0,499	0,75	1
$\bar{P}_{BAT}$	W	249	478	936	1165	1397	2327	3504	4669
$\bar{U}_{BAT}$	V	393,5	392,8	391,8	391,3	390,9	389,2	387,3	385,9
$C_{BAT}$ (Entladen)	Ah	0,81	1,54	3,03	3,78	4,54	7,62	11,55	15,43
$C_{BAT(E)}/C_{BAT,nom}$	%	0,21	0,4	0,78	0,97	1,17	1,96	2,98	3,98
$\bar{P}_{NETZ}$ (Bezug)	W	2,51	2,39	3,58	4,79	4,5	4,86	2,82	4,3
$\bar{P}_{NETZ}$ (Abgabe)	W	4,31	4,16	2,69	2,17	3,09	2,9	4,1	3,14
$P_{BESS}/P_{BESS,nom}$		0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
$\eta_{BAT2AC}$	%	94,8*	96,9*	98*	98,2*	98,4*	98,6*	98,6*	98,5*

\* Interpolierte Werte nach [1], Kapitel 7



Parameter	Wert
$\eta_{max}$	98,5 %
$\eta_{min}$	94 %
$P_{Bat,max}$	4669 W
$P_{BESS,max}$	4601,2 W
$P_{BESS,min}$	233,8 W
$\bar{U}_{BAT}$	385,9 - 393,5 V

Abbildung 3.6: Wirkungsgrade BAT2AC

Wirkungsgrade BAT2AC

### 3.3 Stand-By Verbräuche

Die Bestimmung der Leerlauf- und Standby-Verbräuche erfolgt prinzipiell nach den Angaben aus [1], Kapitel 7.7.1 des Leitfadens.

#### Allgemeiner Ablauf:

Für die beiden Systemzustände  $SOC_{max}$  und  $SOC_{min}$  werden die Leistungen  $P_{BAT}$ ,  $P_{AC}$  sowie  $P_{NETZ}$  gemittelt über die Messdauer von  $T_m = 600$  s bestimmt. Hierbei liegt während der Messung bei  $SOC_{max}$  eine PV-Leistung von  $P_{PVS,MPP} = 0,75 * P_{PV2AC,nom}$  und eine Lastleistung von  $P_{LAST} = 0,25 * P_{BAT2AC,nom}$  an. Während der Messung bei  $SOC_{min}$  liegt keine PV-Leistung und eine Lastleistung von  $P_{LAST} = 0,25 * P_{BAT2AC,nom}$  an. Die gemessenen Leistungen werden im Anschluss weiterhin über ~3h hinweg aufgenommen. Bei einer signifikanten und dauerhaften Änderung der Verbräuche innerhalb dieser Zeit wird nach deren Eintreten eine erneute Messung über  $T_m = 600$  s durchgeführt. Die Messung wird zur Bestimmung der leistungsunabhängigen Peripherieverbräuche ein weiteres Mal bei  $SOC_{min}$  und leistungsfrei ( $P_{LAST/PV} = 0W$ ) sowie bei nach Herstellerangaben deaktiviertem System durchgeführt. Wenn möglich, werden die Verbräuche zusätzlich über längere Messzeiten evaluiert. Die Verbräuche werden nach den Formeln (24) – (27) aus [1], Abschnitt 4.9.7 getrennt nach DC-, AC- und Peripherie-Verbräuchen bestimmt.

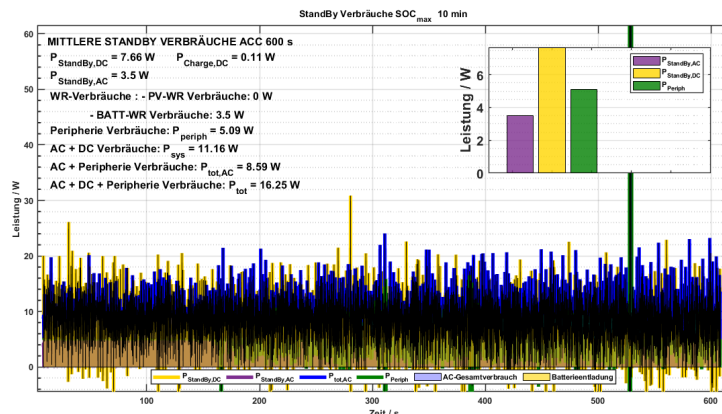
#### Vorbereitung der Messungen

- Standby-Messungen:
  - $SOC_{max}$ : PV-Kennlinie auf  $P_{PVS,MPP} = 0,75 * P_{PV2AC,nom} = 2970$  W/  
Last auf  $P_{LAST} = 0,25 * P_{BAT2AC,nom} = 1145,75$  W einstellen.
  - $SOC_{min}$ : Last auf  $P_{LAST} = 0,25 * P_{BAT2AC,nom} = 1145,75$  W einstellen
- Peripherieverbrauch leistungsfrei:  $SOC_{min}$  - PV/Last getrennt
- Off-Modus:  $SOC_{min}$  - PV/Last getrennt und System ausgeschaltet

#### Durchführung

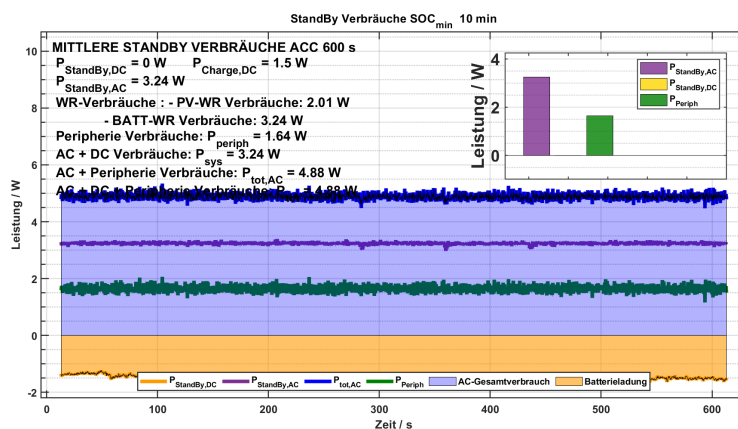
- Messung der Standby-Verbräuche anhand der Leistungen  $P_{BAT}$ ,  $P_{AC}$  sowie  $P_{NETZ}$  gemittelt über  $T_m = 600$  s direkt nach Messbeginn.
- Im Weiteren erfolgt eine Aufnahme der Signalverläufe über 3h. Bei Eintritt einer Verbrauchsänderung wird eine erneute Messung über  $T_m = 600$  s durchgeführt, ansonsten wird eine weitere Messung gemittelt über 10 min durchgeführt.

## Ergebnisdarstellung Standby-Verbräuche



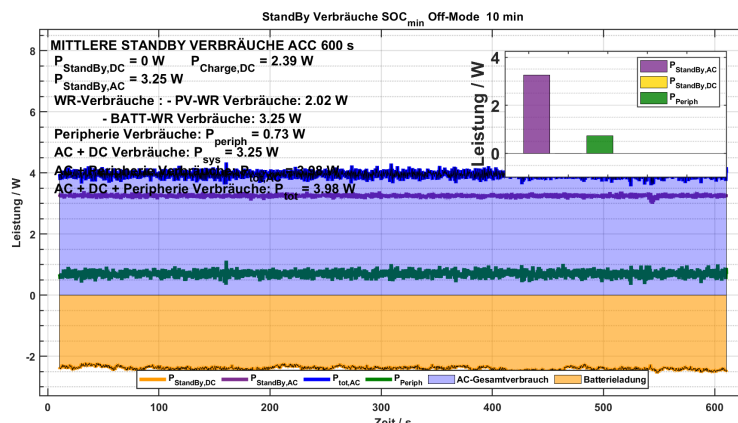
Parameter	Wert
$P_{PVS,DC}$	2970 W
$P_{LAST}$	1145.75 W
$SOC_{Start}$	$SOC_{max}$
$T_H$	10 min
$T_M$	60 s
$T_A$	$25 \pm 5^\circ C$

Abbildung 3.7: Messung Standby-Verbrauch -  $SOC_{max}$



Parameter	Wert
$P_{PVS,DC}$	0 W
$P_{LAST}$	1145.75 W
$SOC_{Start}$	$SOC_{min}$
$T_H$	10 min
$T_M$	60 s
$T_A$	$25 \pm 5^\circ C$

Abbildung 3.8: Messung Standby-Verbrauch -  $SOC_{min}$



Parameter	Wert
$P_{PVS,DC}$	- W
$P_{LAST}$	0 W
$SOC_{Start}$	$SOC_{min}$
$T_H$	10 min
$T_M$	60 s
$T_A$	$25 \pm 5^\circ C$

Abbildung 3.9: Messung Verbrauch im OFF-Modus

### Hinweise:

- Die Standby-Verbräuche bei  $SOC_{max/min}$  sowie dem OFF-Modus werden über die ersten 60 s sowie über 10 min nach dem Abschalten von PV und Last gemittelt angegeben
- OFF-Modus: Das System wurde nach Herstellerangaben abgeschaltet

Standby-Verbräuche



## Ergebnisdarstellung Leerlauf-Verbräuche

		Standby SOC <sub>max</sub>			Standby SOC <sub>min</sub> <sup>4.</sup>		
		60s M1 Standby	60s M2 Standby	10min Mittel	60s M1 Standby	60s M2 Standby	10min Mittel
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W	2963,2	2960,5	2960	0	0	0
$\bar{P}_{Last}$	W	1144,5	1144,3	1144,4	1154,8	1155,7	1154,2
$\bar{P}_{BAT}$ (Entladen)	W	9,1	7	7,7	0	0	0
$P_{BAT}$ (Laden)	W	0,1	0,1	0,1	1,4	2	1,5
$P_{NETZ}$ (Bezug)	W	0	0	0	1161,7	1162,6	1161,1
$P_{NETZ}$ (Abgabe)	W	1725,2	1723,6	1721,1	0	0	0
$P_{BESS}$ (Bezug)	W	2,7	4,1	3,5	3,2	3,2	3,2
$P_{BESS}$ (Abgabe)	W	1,3	0,6	0,7	0	0	0
$P_{PV-WR,Standby}$	W						
<b>Standby-Verbräuche</b>		$P_{AC+Periph}$			$P_{AC+Periph}$		
<b>AC-Verluste<sup>1</sup></b>	W	7,7	9,1	8,6	4,9	4,9	4,9
<b>davon</b>							
$P_{periph}^*$	W	5,0	5,0	5,1	1,6	1,6	1,6
$P_{Standby,AC/ Off,AC}$	W	2,7	4,1	<b>3,5</b>	3,2	3,2	<b>3,2</b>
$P_{PV-WR,Standby}^{**}$	W	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	2,0
		$P_{Standby, DC}$			$P_{Standby, DC}$		
<b>DC-Bezüge</b>	W	9,1	7	<b>7,7</b>	0	0	<b>0</b>

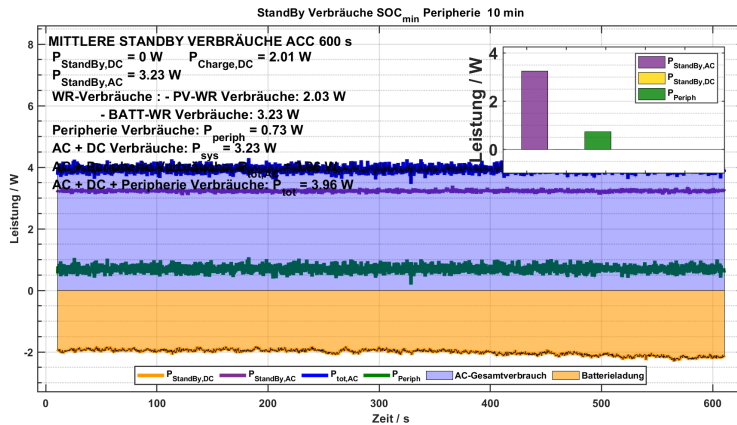
Standby-Verbräuche

### Hinweise:

1. Die AC-Verbräuche wurden weiterhin um einen als systematischen Fehler identifizierten und in einer separaten Messung extrahierten Offset von  $\Delta P -0,1$  W korrigiert.
2. Der OFF-Modus wurde bei nach Herstellerangaben abgeschaltetem System vermessen
3. Die Ergebnisse für die AC-Verbräuche wurden wenn nötig um leckstrombedingte Verluste der elektronischen Lasten korrigiert

\* Die Peripherieverbräuche der  $P_{Periph}$  aus den Messungen  $SOC_{max}$  und  $SOC_{min}$  enthalten leistungsabhängige Verluste. Die realen Peripherieverbräuche werden aus einer separaten Messung ohne externe Leistungsflüsse extrahiert \*\* Optionale Angabe der Verbräuche des PV-Wechselrichters

## Ergebnisdarstellung Standby-Verbräuche



Parameter	Wert
$P_{\text{PVS,DC}}$	- W
$P_{\text{LAST}}$	- W
$\text{SOC}_{\text{Start}}$	$\text{SOC}_{\text{min}}$
$T_{\text{H}}$	10 min
$T_{\text{M}}$	60 s
$T_{\text{A}}$	$25 \pm 5^\circ\text{C}$

Standby-Verbräuche

**Abbildung 3.10:** Bestimmung des Peripherieverbrauchs bei  $\text{SOC}_{\text{min}}$  und  $P_{\text{Last}} = 0 \text{ W}$

Um die Peripherie-Verbräuche des Systems frei von leistungsabhängigen Verlusten zu bestimmen, wird eine Messung bei  $\text{SOC}_{\text{min}}$  und getrennter Last durchgeführt. Der aus dieser Messung gewonnene Wert für die Peripherie-Verbräuche  $P_{\text{Periph}}$  entspricht dem, nach Effizienzleitfaden anzugebenden, leistungsunabhängigen Verbrauch des AC Sensors

## Ergebnisdarstellung Standby-Verbräuche

		Peripherie-Verbräuche P=0W			OFF-Modus		
		60s M1 Standby	60s M2 Standby	10min Mittel	60s M1 Standby	60s M2 Standby	10min Mittel
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W	0	0,3	0	0,2	0,2	0,1
$\bar{P}_{Last}$	W	0	0	0	0	0	0
$\bar{P}_{BAT}$ (Entladen)	W	0	0	0	0	0	0
$P_{BAT}$ (Laden)	W	1,9	2,7	2	2,3	2,4	2,4
$P_{NETZ}$ (Bezug)	W	6	6	6	6	6	6
$P_{NETZ}$ (Abgabe)	W	0	0	0	0	0	0
$P_{BESS}$ (Bezug)	W	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
$P_{BESS}$ (Abgabe)	W	0	0	0	0	0	0
$P_{PV-WR,Standby}$	W						
<b>Standby-Verbräuche</b>		<b><math>P_{AC+Periph}</math></b>			<b><math>P_{OFF, AC+Periph}</math></b>		
<b>AC-Verluste<sup>1</sup></b>	W	4	3,9	4	4	4	4
<b>davon</b>							
$P_{periph}^*$	W	0,7	0,7	<b>0,7</b>	0,7	0,7	0,7
$P_{Standby,AC/ Off,AC}$	W	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
$P_{PV-WR,Standby}^{**}$	W	2	2	2	2	2	2
		<b><math>P_{Standby, DC}</math></b>			<b><math>P_{OFF, DC}</math></b>		
<b>DC-Bezüge</b>	W	0	0	0	0	0	0

Standby-Verbräuche

### Hinweise:

1. Die AC-Verbräuche am Netzmesspunkt wurden weiterhin um einen als systematischen Offset identifizierten und in einer separaten Messung extrahierten Wert von  $\Delta P = 0,1$  W korrigiert.
2. Die Ergebnisse für die AC-Verbräuche bei der Messung der Peripherieverbräuche wurden um leckstrombedingte Verluste der elektronischen Lasten korrigiert

\* Die aus der Messung bei  $P_{PV/Last} = 0$  W bestimmten Peripherieverbräuche  $P_{Periph}$  entsprechen den leistungsunabhängigen Peripherie-Verbräuchen des Systems \*\* Optionale Angabe der Verbräuche des PV-Wechselrichters

### 3.4 Batteriewirkungsgrad

Die Vermessung des Batteriewirkungsgrades erfolgt nach [1], Kapitel 8. Es werden Lade- und Entladezyklen unter Voll- und Teillast durchgeführt und der energetische Batteriewirkungsgrad  $\eta_{\text{BAT,RTE}}$  als auch der Coulomb-Wirkungsgrad  $\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$  nach [1], Formel (22) bzw. Formel (23) aus Abschnitt 4.9.7 bestimmt. Der Ausgangszustand für die Messungen ist eine auf  $\text{SOC}_{\text{max}}$  vollgeladene Batterie. Die Entladebegrenzung ist standardmäßig auf 5% SOC eingestellt, der Speicher wird daher mit 95% DoD betrieben.

#### Allgemeiner Ablauf:

Es werden Zyklen bei drei Lade-/ Entladeleistungsniveaus mit jeweils drei Iterationen für jedes Leistungsniveau durchgeführt. Die Messungen erfolgen sukzessive, wobei vor jeder Zyklenmessung der Ausgangszustand  $\text{SOC}_{\text{max}}$  durch Entladen und Laden der Batterie wiederhergestellt wird. Das Vollastniveau des ersten Zyklus ist hierbei durch die Lade- und Entlade-Bemessungsleistungen  $P_{\text{PV2BAT,nom}}$  und  $P_{\text{BAT2AC,nom}}$  vorgegeben.

	Zyklus1	Zyklus2	Zyklus3
<b>Entladeleistung</b>	$P_{\text{BAT2AC,nom}}$	$0,5 \cdot P_{\text{BAT2AC,nom}}$	$0,25 \cdot P_{\text{BAT2AC,nom}}$
<b>Ladeleistung</b>	$P_{\text{PV2BAT,nom}}$	$0,5 \cdot P_{\text{PV2BAT,nom}}$	$0,25 \cdot P_{\text{PV2BAT,nom}}$
<b>Iterationen</b>	3	3	3

#### Durchführung eines Zyklus:

- Automatisiert: Laden der Batterie auf  $\text{SOC}_{\text{max}}$  (s. [1], Kapitel 6.3) mit der jeweiligen Ladeleistung
- Automatisiert: Abwechselndes Entladen und Laden der Batterie mit den jeweiligen (Ent-) Ladeleistungen (3-mal)
- Zur Erkennung von  $\text{SOC}_{\text{max}}$  und  $\text{SOC}_{\text{min}}$  wird das erste Kriterium (s. [1], Kapitel 6.3) verwendet: Die Batterieleistung  $P_{\text{BAT}}$  unterschreitet 1% der jeweiligen Nominalleistung ( $P_{\text{BAT2AC,nom}}$  bzw.  $P_{\text{PV2BAT,nom}}$ ) über 5 Minuten.

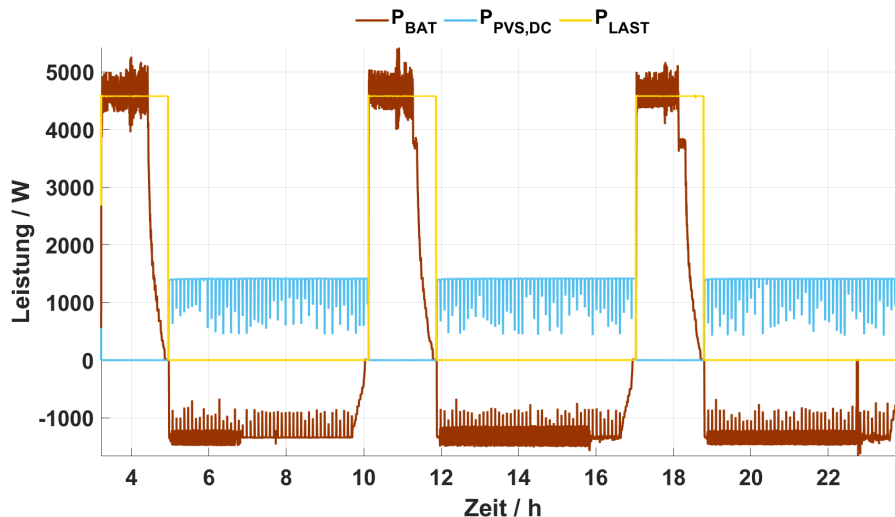
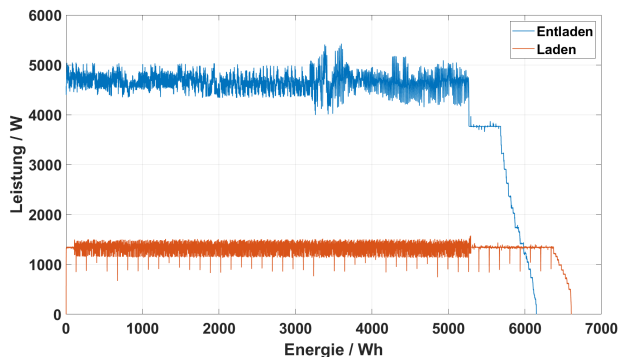


Abbildung 3.11: Messung des Batteriewirkungsgrades, Zyklus 1

### Ergebnisdarstellung Batteriewirkungsgrad



Parameter	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
$P_{PVS,MPP}$	1414 W	707 W	353,5 W
$P_{LAST}$	4583 W	2291,5 W	1145,75 W
$SOC_{Start}$	100 %	100 %	100 %
$SOC_{min}$	0 %	0 %	0 %
$U_{MPP}$	400 V	400 V	400 V
$T_A$	$25 \pm 5^\circ C$	$25 \pm 5^\circ C$	$25 \pm 5^\circ C$

Abbildung 3.12: Leistungsverlauf in Abhängigkeit der ge- bzw. entladenen Energie, 1. Zyklus, 2. Iteration

		Zyklus 1			Zyklus 2			Zyklus 3		
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
$\eta_{BAT,RTE}$	%	94,38	94,19	94,52	95,97	95,91	95,8	96,79	95,51	95,9
$\eta_{BAT,RTE(Coulomb)}$	%	99,62	99,15	99,56	99,57	99,55	99,44	99,47	98,17	98,56
$\bar{P}_{BAT}$ (Laden)	W	1279,9	1286,5	1281,0	656,6	655,9	656	314,3	314,5	314,4
$\bar{P}_{BAT}$ (EntLaden)	W	3744,9	3690,2	3701,9	2163,6	2179	2169,5	1151,2	1147	1148,4
$t_{Laden}$	s	18386	18284	18362	35779	35840	35886	73869	74616	75027
$t_{Entladen}$	s	5927	6000	6003	10420	10347	10396	19522	19539	19697
$E_{BAT}$ (Laden)	Wh	6604	6605	6594	6527	6531	6541	6452	6520	6553
$E_{BAT}$ (EntLaden)	Wh	6233	6221	6233	6264	6264	6266	6245	6227	6285
$C_{BAT}$ (Laden)	Ah	393,26	393,31	392,57	389,94	390,05	390,75	386,36	390,35	392,53
$C_{BAT}$ (EntLaden)	Ah	391,75	389,97	390,85	388,26	388,29	388,56	384,3	383,22	386,89
$\max(U_{BAT})$	V	409,6	409,6	409,6	409,7	409,8	409,7	406,9	407,3	408
$\min(U_{BAT})$	V	376,6	377,7	377,6	379,2	379,2	379,2	380,7	380,7	380,6

		Mittelwerte *			
		Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	1-3
$\eta_{BAT,RTE}$	%	94,35	95,89	96,07	<b>95,73</b>
$\eta_{BAT,RTE(Coulomb)}$	%	99,36	99,52	98,73	99,48
$\bar{P}_{BAT}$ (Laden)	W	1283,76	656,2	314,4	756
$\bar{P}_{BAT}$ (EntLaden)	W	3696,04	2170,7	1148,9	2332,3
$t_{Laden}$	s	18323	35835	74504	42934
$t_{Entladen}$	s	6001	10388	19586	12037
$E_{BAT}$ (Laden)	Wh	6600	6533	6508	6534
$E_{BAT}$ (Entladen)	Wh	6227	6265	6252	<b>6255</b>
$C_{BAT}$ (Laden)	Ah	392,94	390,25	389,75	390,19
$C_{BAT}$ (Entladen)	Ah	390,41	388,37	384,8	388,17
$\max(U_{BAT})$	V	409,6	409,8	407,4	409,1
$\min(U_{BAT})$	V	377,6	379,2	380,6	379,3

\* Die Mittelwerte der Zyklen werden aus den Werten der zweiten und dritten Iteration des jeweiligen Zyklus gebildet.

## 3.5 Regelungseffizienz

Es werden die stationären und dynamischen Regelabweichungen des Speichersystems beim Laden bzw. Entladen der Batterie nach [1], Kapitel 9 bestimmt. Hierbei wird das System auf Abweichungen zwischen geforderter und bereitgestellter Batterieleistung untersucht, welche einen unerwünschten Energieaustausch mit dem Netz zur Folge haben.

### 3.5.1 Dynamische Regelabweichungen

Die dynamischen Regelabweichungen treten durch die zeitlich verzögerte Regelung der Lade- und Entladeleistung bei sprunghaften Änderungen der Last bzw. der PV auf. Die Bestimmung der dynamischen Regelabweichung wird nach [1], Kapitel 9.2 durch die Messung des Sprungantwortverhaltens des Speichersystems durchgeführt. Zur Quantifizierung der Regelabweichungen dienen hier die in Anhang B des Effizienzleitfadens beschriebenen Größen der Totzeit  $t_T$  und der Einschwingzeit  $t_E$ , sowie die Aufnahme der Netzaustauschleistung nach jedem Leistungssprung.

#### Allgemeiner Ablauf:

Nachdem das Speichersystem auf einen mittleren Ladezustand  $SOC_{avg,area}$  gebracht ist, wird in einem Vorabtest die ungefähre Größe der Einschwingzeit  $t_{E,ref}$  durch einen Sprung der Last von  $P_{BAT2AC,nom}$  auf 90% dieses Wertes bestimmt. Hieraus ergibt sich die Haltezeit für das Stufenprofil aus Abbildung 3.13 zu  $t_H = 2 \cdot t_{E,ref}$ , mindestens jedoch zu  $t_H = 10s$ . Im Folgenden wird ein aus einem Lastprofil  $P_{LAST(Profil)}$  und einem konstant gehaltenen PV-Profil  $P_{PVS,MPP(Profil)}$  resultierendes Belastungsprofil mit 14 Stufen nahtlos 10 mal hintereinander durchgeführt. Die Profile für PV und Last ergeben sich mit den Faktoren aus Abbildung 3.13 sowie den Bemessungsleistungen aus 3.1 wie folgt:

<b>Erzeugungprofil</b>	$P_{PVS, MPP (Profil)}$
$P_{PVS, MPP(Profil)} = f_{PV2BAT} \cdot P_{PV2BAT, nom} = 0,75 \cdot P_{PV2BAT, nom}$	
<b>Lastprofil</b>	$P_{LAST (Profil)}$
$P_{LAST(Profil)} = f_{BAT2AC} \cdot P_{BAT2AC, nom} \cdot k = f_{BAT2AC} \cdot P_{PV2BAT, nom}$	
wobei k etwaige Unterschiede in der nominalen Lade- und Entladeleistung kompensieren soll, sodass der Ladezustand der Batterie während des Tests im Bereich $SOC_{avg,area}$ bleibt	
<b>Leistungskompensation</b>	k
$k = \frac{P_{PV2BAT, nom}}{P_{BAT2AC, nom}}$	

#### Vorbereitung der Messung

- Bestimmung der Haltezeit  $t_H$  aus einem Vortest zu  $t_H = 20 s$ .
- Erstellen des Testprofils mit der Leistung  $P_{PV2BAT, nom} = PV2BATnom / 1,4 = 1414 W$  und den Stufen-dauern S1-S13  $t_H = 10s$  und  $t_{S14} = t_H + 1,2s = 21,2s$ .
- Ladezustand der Batterie auf  $SOC_{avg,area}$  (s. [1], Kapitel 6.3)

#### Durchführung

- Die PV-Leistung wird konstant auf  $P_{PVS, MPP} = 0,75 \cdot P_{PV2BAT, nom} / 1,4 = 1414 W$  eingestellt
- Nachdem der MPP angefahren ist, startet das zuvor erstellte Messprofil (10-maliges Durchfahren der Prüfsequenz)

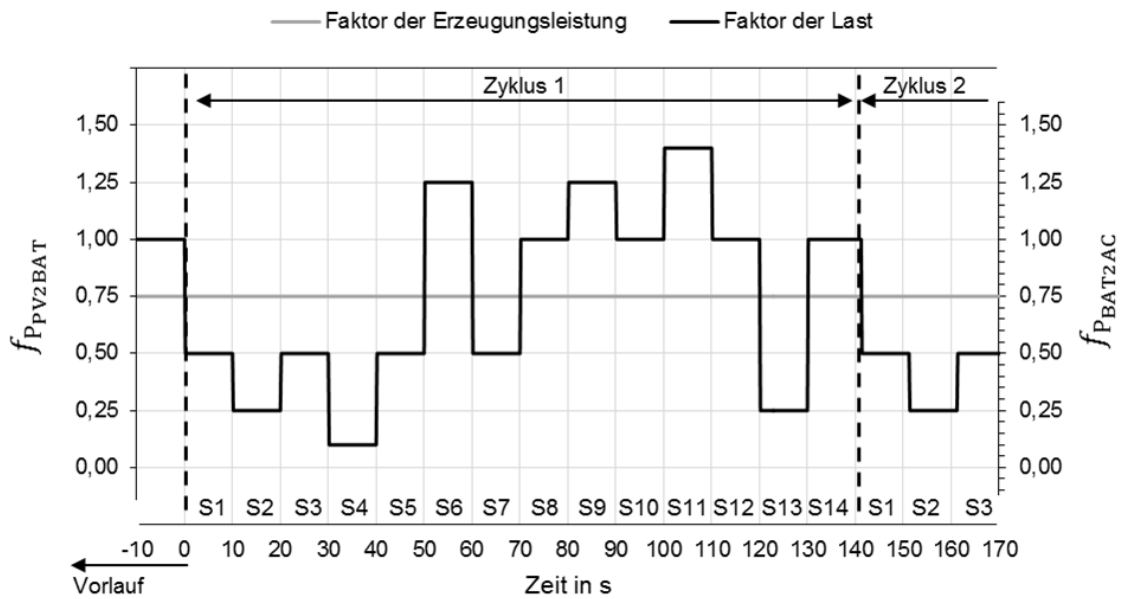
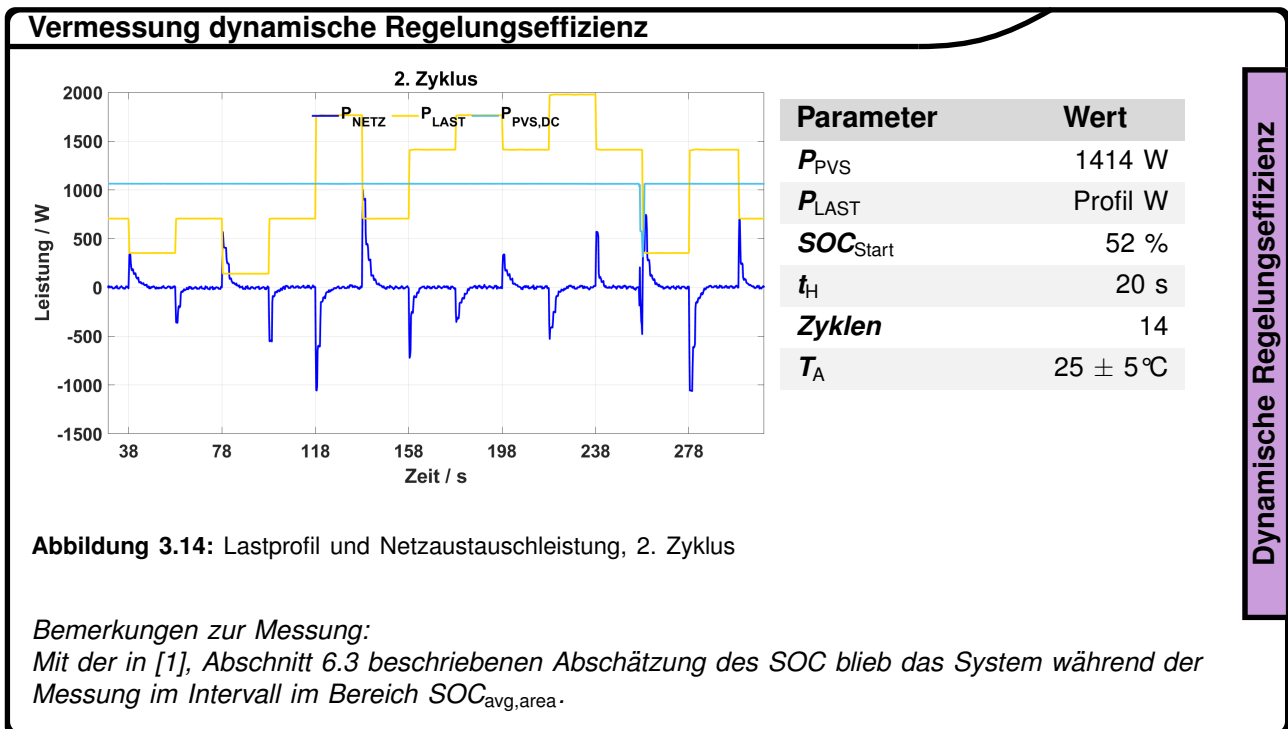


Abbildung 3.13: Stufenprofil dynamische Regelungseffizienz aus [1]



### Ergebnisdarstellung dynamische Regeleffizienz

		Stufen													
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
		Mittelwerte der Leistungen													
$\bar{P}_{\text{Last}}$	W	706	353	706	141	706	1766	706	1413	1766	1413	1978	1412	353	1413
$\bar{P}_{\text{Netz (Bezug)}}$	W	2,82	3,4	3,41	3,17	3,39	7,12	2,42	3,49	3,07	2,18	4,54	3,71	2,92	4,96
$\bar{P}_{\text{Netz (Abgabe)}}$	W	6,6	4	4,9	5,4	4,6	3,5	8,4	4,9	20,4	6,2	4,1	5,7	7,1	4,5
$\bar{P}_{\text{PVS,DC}}$	W	1061	1061	1061	1061	1061	1061	1061	1061	1060	1061	1061	1059	1061	1061
$\bar{P}_{\text{BAT}}$	W	302	658	304	866	305	753	300	403	774	405	969	404	654	401

**Tabelle 3.6:** Leistungsmessungen dynamische Regelabweichungen

*Hinweis: Die Angabe der Schwingungsamplitude  $\bar{A}$  entfällt, da die Toleranzbänder bei allen Messungen nach den Prüfbedingungen [1], Anhang B erreicht wurden.*

		Stufen													
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
		Zeitliche Analyse der Netzaustauschleistung													
$\bar{t}_T$	s	0,93	0,8	0,82	1,19	0,76	1,07	0,91	0,98	0,75	0,64	0,82	1,17	0,99	1,07
$\max(t_T)$	s	1,6	1,02	1,39	3,21	1,22	1,4	2,19	1,4	1,03	1,19	1,21	2,6	1,49	1,96
$\min(t_T)$	s	0,54	0,55	0,44	0,02	0,43	0,76	0,52	0,54	0,38	0,09	0,33	0,33	0,64	0,25
$\bar{t}_E$	s	4,81	7,37	7,7	4,68	5,8	5,14	5,58	5,35	7,33	6,49	4,79	4,42	6,23	5,57
$\max(t_E)$	s	9,53	13,07	13,61	7,02	12,8	5,75	8,63	7,17	10,43	9,16	10,83	5,74	13,58	6,53
$\min(t_E)$	s	3,69	4,02	4,62	2,77	3,76	4,64	4,28	4,38	5,72	4,37	3,18	3,49	4,92	4,38

**Tabelle 3.7:** Tot- und Einschwingzeiten dynamische Regelabweichungen

*Hinweis: Die Messrate beträgt 200 ms. Die in Tabelle 3 dargestellten Werte resultieren aus der Mittelwertbildung über mehrere Stufen und der Interpolation in den Auswerteroutinen.*

Dynamische Regelungseffizienz



### 3.5.2 Stationäre Regelabweichungen

Um die Werte der stationären Regelabweichungen  $P_{\text{NETZ (Bezug)}}$ ,  $P_{\text{NETZ (Abgabe)}}$  und  $P_{\text{abw}}$  bei in der Realität vorliegenden Betriebszuständen des Speichersystems zu bestimmen, wird das Lastprofil aus 3.5.1 Dynamische Regelabweichungen mit verlängerten Haltezeiten herangezogen.

Die unterschiedlichen Lastniveaus des Profils erzeugen bei konstanter PV-Leistung  $P_{\text{PVS,DC}}$  Zustände gemischter Pfadbelastung mit variierenden Verhältnissen von Batterieleistung  $P_{\text{BAT}}$  und Wechselrichter-Ausgangsleistung  $P_{\text{AC}}$ . Die aus diesen Messungen erhaltenen Werte für  $P_{\text{abw}}$  beschreiben, wie gut das System bei einer gleichzeitigen und konstanten Auslastung beider Umwandlungspfade den AC-seitigen Bezug und die Einspeisung unterbinden kann. Die Leistungen für Netzbezug und Einspeisung,  $P_{\text{NETZ (Bezug)}}$  und  $P_{\text{NETZ (Abgabe)}}$ , werden für jede Stufe durch Integration über ein Intervall innerhalb der jeweiligen Stufenhaltezeit bestimmt.

Parameter	Wert
$P_{\text{PVS,DC}}$	$0,75 \cdot P_{\text{PV2BAT,nom}}$
$P_{\text{LAST}}$	Profil
$t_{\text{H}}$	160s
$t_{\text{int}}$	80s
<b>Batteriezustand</b>	$\text{SOC}_{\text{avg}} + 5\%$

Tabelle 3.8: Prüfkonfiguration zur Messung der stationären Regelabweichung

#### Allgemeiner Ablauf

Das verwendete Profil entspricht dem Profil aus Abbildung 27 mit verlängerten Haltezeiten von  $t_{\text{H}} = 160 \text{ s}$  und lediglich 2 Iterationen. Durch das Profil werden insgesamt 6 Zustände gemischter Pfadbelastung erzeugt, welche durch 6 Lastzustände (LZ), bestehend aus Stufen mit jeweils gleichem Lastniveau  $P_{\text{LAST}}$ , repräsentiert werden. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die durch das Profil erzeugten Betriebszustände gemischter Pfadbelastung sowie der den jeweiligen Zustand repräsentierenden Stufen:

Lastzustand(LZ)	E1	E2	E3	L1	L2	L3
$\bar{P}_{\text{PVS, MPP}}$	$0,75 \cdot P_{\text{PV2BAT, nom}}$					
$\bar{P}_{\text{LAST}}$	1,4 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$	1,25 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$	1 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$	0,5 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$	0,25 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$	0,1 · $P_{\text{PV2BAT, nom}}$
<b>zugehörige Stufen</b>	S11	S6, S9	S8, S10, S12, S14	S1, S3, S5, S7	S2, S13	S4
<b>Batterie</b>	Entladen			Laden		

Tabelle 3.9: Definition der Betriebszustände bei gemischten Pfaden durch Lastzustände

Für die Auswertung werden zunächst die gemessenen Werte  $P_{\text{NETZ (Bezug)}}$  und  $P_{\text{NETZ (Einspeisung)}}$  für jede einem Betriebszustand zugeordnete Stufe über die 2 Iterationen gemittelt, woraus sich die Werte  $\bar{P}_{\text{NETZ (Bezug), LZ Ln}$ ,  $\bar{P}_{\text{NETZ (Bezug), LZ En}$  sowie  $\bar{P}_{\text{NETZ (Abgabe), LZ Ln}$  und  $\bar{P}_{\text{NETZ (Abgabe), LZ En}$  für jeden Betriebszustand ergeben. Die stationären Regelabweichungen  $P_{\text{abw}}$  werden getrennt für durch das Profil erzeugte Betriebszustände der Batterieladung sowie -entladung bestimmt.

Um  $P_{\text{abw}}$  für Zustände der Batterieladung und -entladung zu erhalten, werden abschließend die Mittelwerte  $\bar{P}_{\text{NETZ, (Bezug, Laden)}}$ ,  $\bar{P}_{\text{NETZ, (Bezug, Entladen)}}$ ,  $\bar{P}_{\text{NETZ, (Einspeisung, Laden)}}$  und  $\bar{P}_{\text{NETZ, (Einspeisung, Entladen)}}$  aus der jeweiligen Mittelung über die Betriebszustände der Batterieladung (L1,L2,L3) und -entladung (E1,E2,E3) gebildet.

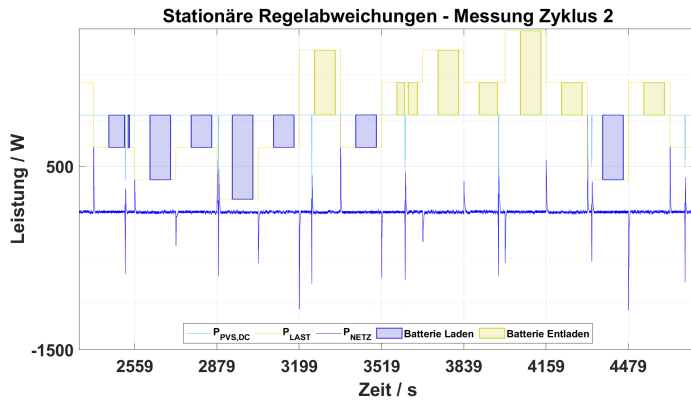
Die Werte für  $P_{\text{abw (Laden/Entladen)}}$  ergeben sich dann aus der Summe der Beträge der gemittelten Netzaustauschleistungen:

<b>Stationäre Regelabweichungen gemischte Pfade Batterieladung</b>	$P_{\text{abw (Laden)}}$
$\bar{P}_{\text{abw(Laden)}} = \bar{P}_{\text{NETZ (Bezug, Laden)}} + \bar{P}_{\text{NETZ (Abgabe, Laden)}}$	
<b>Stationäre Regelabweichungen gemischte Pfade Batterieentladung</b>	$P_{\text{abw (Entladen)}}$
$\bar{P}_{\text{abw(Entladen)}} = \bar{P}_{\text{NETZ (Bezug, Entladen)}} + \bar{P}_{\text{NETZ (Abgabe, Entladen)}}$	

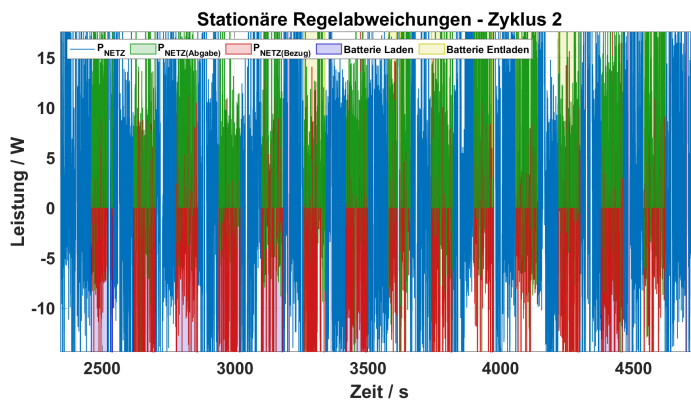
## Durchführung

- Einstellen der PV-Leistung auf  $P_{PVS,MPP} = 1414 \text{ W}$ .
- Fahren des Lastprofils aus Abbildung 27 mit Haltezeiten  $t_H = 160 \text{ s}$ .
- Aufnahme und Mittelung der Netzaustauschleistungen  $P_{\text{Netz,Bezug}}$  und  $P_{\text{Netz,Abgabe}}$  über ein Integrationsintervall von  $t_{\text{int}} = 80 \text{ s}$  zwischen Einschwingzeit  $t_{E,i}$  und Stufenende  $t_{\text{End},i}$  der jeweiligen Stufe, beginnend bei 60 s nach Stufenbeginn.
- Bestimmung der Leistungen  $P_{\text{Netz,Bezug}}$ ,  $P_{\text{Netz,Abgabe}}$  sowie  $P_{\text{abw}}$  aus Mittelung über Integrationszeiten, Iterationen und Lastzuständen

### Ergebnisdarstellung stationäre Regelabweichungen - Gemischte Pfade

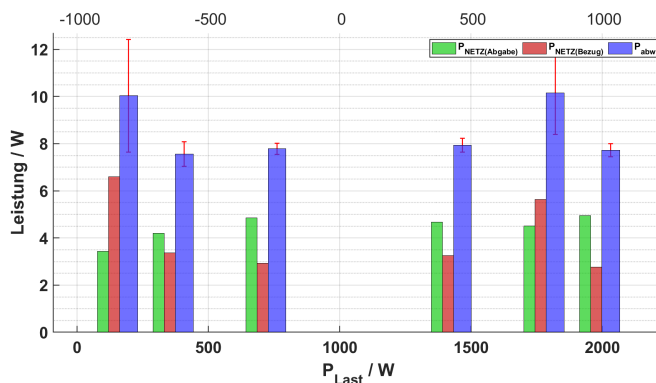


**Abbildung 3.15:** Vermessung der stationären Regelabweichungen mit dem Profil aus Abbildung 3.13 bei Batterieladung und -entladung, 1. Zyklus



**Abbildung 3.16:** Stationäre Regelabweichungen aus der Messung in Abbildung 3.15

Stationäre Regelabweichungen bei gemischten Pfaden							
Lastzustand(LZ)		E1	E2	E3	L1	L2	L3
$\bar{P}_{PVS,DC} / \bar{P}_{LAST}$	-	0,5	0,6	0,7	1,5	3,0	7,5
$\bar{P}_{PVS,DC}$	W	1059	1060	1059	1059	1059	1059
$\bar{P}_{LAST}$	W	1978	1766	1412	706	353	141
$\bar{P}_{BAT}$	W	972	754	403	-304	-655	-870
$\bar{P}_{NETZ(Bezug),Lz,n}$	W	2,77	5,64	3,25	2,93	3,36	6,60
$\bar{P}_{NETZ(Abgabe),Lz,n}$	W	4,96	4,51	4,68	4,86	4,19	3,43
Batteriezustand		Entladen			Laden		
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Entladen)}$	W	3,89					-
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Entladen)}$	W	4,71					-
$\bar{P}_{NETZ (Bezug,Laden)}$	W				4,29		
$\bar{P}_{NETZ (Abgabe,Laden)}$	W				4,16		
$\bar{P}_{abw(Entladen)}$	W	8,60					-
$\bar{P}_{abw(Laden)}$	W				8,45		



**Abbildung 3.17:** Gemittelte stationäre Regelabweichungen  $\bar{P}_{NETZ, Bezug}$ ,  $\bar{P}_{NETZ, Abgabe}$  und  $\bar{P}_{abw}$  über gemischte Pfadzustände bei Batterieladung und -entladung

Stationäre Regelabweichungen - gemischte Pfade

## 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 4.1 Übersicht Bemessungsleistungen und Pfadwirkungsgrade

Bemessungsleistungen		Ergebnis	Vermessene Spannungen		Wert
$P_{PV2BAT, nom}$		1414 W	$U_{MPP, min}$	V	-
$P_{BAT2AC, nom}$		4592 W	$U_{MPP, nom}$	V	400 V
			$U_{MPP, max}$	V	-

Ausgangsbesmessungsleistung		Ergebnis
$P_{BAT, nom}$	@ $P_{PV2BAT, nom}$	1343 W
$P_{BESS, nom}$	@ $P_{BAT2AC, nom}$	4624 W

Pfadwirkungsgrade		Ergebnisse							
Normierte Ausgangsleistung		0,05	0,10	0,20	0,25	0,3	0,5	0,75	1,00
$\eta_{PV2AC, conv}$	%								
$U_{MPP, min}$									
$\eta_{PV2AC, conv}$	%								
$U_{MPP, nom}$									
$\eta_{PV2AC, conv}$	%								
$U_{MPP, max}$									
$\eta_{AC2BAT, conv}$	%	83,9 *	91,2 *	95,3 *	96,2 *	96,8 *	97,9 *	98,4 *	98,6 *
$\eta_{PV2BAT, conv}$	%								
$U_{MPP, min}$									
$\eta_{PV2BAT, conv}$	%	65,8 *	79,0 *	87,7 *	89,7 *	91,0 *	93,6 *	94,8 *	95,3 *
$U_{MPP, nom}$									
$\eta_{PV2BAT, conv}$	%								
$U_{MPP, max}$									
$\eta_{BAT2AC}$	%	94,8 *	96,9 *	98,0 *	98,2 *	98,4 *	98,6 *	98,6 *	98,5 *

\* Interpolierter Wert nach [1] Kapitel 7

\*\* Die Entladewirkungsgrade  $\eta_{BAT2AC}$  wurden bei einer mittleren Batteriespannung von  $\bar{U}_{BAT} = 390,3V$  bestimmt.

## 4.2 Übersicht Stand-By Verbräuche

Standby-Verbräuche		Standby $T_M = 60s$	Standby (autom.)	Standby gemittelt $T_H = 10 m$	OFF- Modus	OFF- Modus $T_M = 60s$	OFF-Modus gemittelt $T_H = 10 m$
<b>SOC<sub>max</sub></b>	<b>AC-Verluste</b>	W	7,7	-	8,6		
	davon						
	$P_{Periph}$	W	5,0		5,1		
	$P_{Standby,AC}$	W	2,7		3,5		
	$P_{Standby,DC}$	W	9,1	-	7,7		
<b>SOC<sub>min</sub></b>	<b>AC-Verluste</b>	W	4,9	-	4,9	4	4
	davon						
	$P_{Periph}$	W	1,6		1,6	0,7	0,7
	$P_{Standby,AC}$	W	3,2		3,2	3,3	3,3
	$P_{Standby,DC}$	W	0	-	0	0	0
<b>Peripherie- Verbräuche bei <math>P_{LAST} = 0 W</math></b>		<b>Standby <math>T_M = 60s</math></b>	<b>Standby (autom.)</b>	<b>Standby gemittelt <math>T_H = 10 m</math></b>	<b>Keine weiteren Hersteller-Modi</b>		
<b>SOC<sub>min</sub></b>	<b>AC-Verluste</b>	W	4	-	4		
	davon						
	$P_{Periph}$	W	0,7		0,7		
	$P_{Standby,AC}$	W	3,2		3,2		
	$P_{Standby,DC}$	W	0	-	0		

## 4.3 Übersicht Batteriewirkungsgradmessung

Zyklus	Batteriewirkungsgrad / Batteriekapazität					
	$\eta_{\text{BAT,RTE}}$	$\eta_{\text{BAT,RTE}}$ (Coulomb)	$C_{\text{BAT, Laden}}$	$C_{\text{BAT, Entladen}}$	$E_{\text{BAT, Laden}}$	$E_{\text{BAT, Entladen}}$
	%	%	Ah	Ah	Wh	Wh
1	94,35	99,36	392,94	390,41	6600	6227
2	95,89	99,52	390,25	388,37	6533	6265
3	96,07	98,73	389,75	384,8	6508	6252
<b>Mittel 1-3</b>	95,42	99,20	390,92	387,86	6547	6248

• Die Batteriewirkungsgrade wurden bei einer Umgebungstemperatur von 25 +/- 5 °C bestimmt.

## 4.4 Übersicht Regelungseffizienz

### 4.4.1 Dynamische Regelungsabweichungen

Stufenmittelwerte der Zeitkonstanten und der Netzaustauschleistung	Totzeit $\bar{t}_T$	Einschwingzeit $\bar{t}_E$	$\bar{P}_{\text{Netz}}$ (Bezug)	$\bar{P}_{\text{Netz}}$ (Abgabe)
Min. Zyklusmittelwert	0,64 s	4,42 s	2,18 W	3,5 W
Max. Zyklusmittelwert	1,19 s	7,7 s	7,12 W	20,39 W
Absoluter Mittelwert	0,92 s	5,8 s	3,61 W	6,46 W

Hinweise:

- Der absolute Mittelwert ist der über alle Stufen gemittelte Zyklusmittelwert
- Die Messrate beträgt 200 ms. Die dargestellten Werte resultieren aus der Mittelwertbildung über mehrere Stufen und der Interpolation in den Auswerteroutinen.

### 4.4.2 Stationäre Regelungsabweichungen

Lastzustand(LZ) Batteriezustand	Stationäre Regelabweichungen bei gemischten Pfaden					
	E1	E2	E3	L1	L2	L3
$\bar{P}_{\text{BAT}}$	W 972	754	403	-304	-655	-870
$\bar{P}_{\text{NETZ(Bezug),Lz,n}}$	W 2,77	5,64	3,25	2,93	3,36	6,60
$\bar{P}_{\text{NETZ(Abgabe),Lz,n}}$	W 4,96	4,51	4,68	4,86	4,19	3,43
$\bar{P}_{\text{Netz,Bezug}}$	W	3,89			4,29	
$\bar{P}_{\text{Netz,Abgabe}}$	W	4,71			4,16	
$P_{\text{abw}}$	W	8,60			8,45	

## 4.5 Datenblattherelevante Angaben

Pfadwirkungsgrade		Ergebnisse										
Normierte Ausgangsleistung		0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	
$\eta_{PV2AC,t}$	$U_{MPP,min}$											
$\eta_{PV2AC,t}$	$U_{MPP,nom}$											
$\eta_{PV2AC,t}$	$U_{MPP,max}$											
$\eta_{AC2BAT}$		%	83,9	93,9	96,2	97,2	97,7	98	98,2	98,4	98,5	98,5
$\eta_{PV2BAT,t}$	$U_{MPP,min}$											
$\eta_{PV2BAT,t}$	$U_{MPP,nom}$	%	65,8	84,6	89,7	91,9	93,2	94	94,5	94,8	95,1	95,2
$\eta_{PV2BAT,t}$	$U_{MPP,max}$											
$\eta_{BAT2AC}$		%	94,8	97,7	98,2	98,4	98,5	98,6	98,6	98,6	98,6	98,6

Messung	AC2BAT	PV2BAT	BAT2AC
Parameter	$\bar{\eta}_{AC2BAT}^1$	$\bar{\eta}_{PV2BAT,t}$	$\bar{\eta}_{BAT2AC}^1$
Wert	96,1	%	89,9
			%
			98,1
			%

<sup>1</sup> Mittlerer Pfadwirkungsgrad. Entspricht dem Mittelwert der interpolierten Werte aus Tabelle 12

Messung	Batteriewirkungsgrad			Standby-Verbräuche			
Parameter	$\eta_{RTE}$	$\eta_{BAT, RTE(Coulomb)}$		$P_{Periph}^3$		$P_{Standby, AC+DC}$	
Wert	95,73	%	99,48	%	0,7	W	3,2
							W
Parameter	$C_{BAT, nutz}$			$P_{System(AC + DC + Periph)}^2$			
Wert	388,17			Ah	3,9		W
Messung	Dyn. Regelabweichung			Stationäre Regelabweichungen			
Parameter	Totzeit $\bar{t}_T$	Einschwingzeit $\bar{t}_E$		Batterie	$\bar{P}_{Netz, Bezug}$	$\bar{P}_{Netz, Abgabe}$	$P_{abw}$
Wert	0,92	s	5,8	s	Laden	4,29	4,16
					Entladen	3,89	4,71
							8,45
							8,60
							W
							W

<sup>2</sup> Entspricht dem mittleren, AC- und DC-seitigen Gesamtverbrauch im Standby bei entladener Batterie ( $SOC_{min}$ ), exklusive PV-Wechselrichter-Verbräuchen und inklusive Peripherieverbräuchen (bestimmt bei  $P_{Last} = 0$  W)

<sup>3</sup> Entspricht dem leistungsunabhängigen Peripherieverbrauch aus der Messung  $SOC_{min}$  bei  $P_{Last} = 0$  W.

## Referenzen

- [1] Effizienzleitfaden für PV - Speichersysteme Version 2.0.1, 2.0.1 Hrsg., BVES/BSW, 2019.
- [2] CENELEC, EN 50530:2014-02-01 Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik Wechselrichtern (Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters), OVE/ASI, 2014.
- [3] MATLAB, PCHIP <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/pchip.html>.