#### Offenes Simulationsmodell für netzgekoppelte PV-Batteriesysteme

Tjarko Tjaden<sup>1</sup>, Johannes Weniger<sup>1</sup>, Christian Messner<sup>2</sup>, Michael Knoop<sup>3</sup>, Matthias Littwin<sup>3</sup>, Kai-Philipp Kairies<sup>4</sup>, David Haberschusz<sup>4</sup>, Hauke Loges<sup>5</sup>, Volker Quaschning<sup>1</sup>

> <sup>1</sup>Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin Forschungsgruppe Solarspeichersysteme Wilhelminenhofstr. 75A, 12459 Berlin Internet: http://pvspeicher.htw-berlin.de Email: pvspeicher@htw-berlin.de

<sup>2</sup>Austrian Institute of Technology (AIT), 1210 Wien <sup>3</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), 31860 Emmerthal <sup>4</sup>Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA), 52066 Aachen <sup>5</sup>Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia), 38106 Braunschweig

#### 1 Zusammenfassung des Beitrags

Fehlende Standards zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen erschweren den Vergleich zwischen verschiedenen am Markt erhältlichen Produkten. Grundsätzlich existieren mehrere Verfahren zur Charakterisierung von netzgekoppelten PV-Batteriesystemen. Mit detaillierten Labortests (White-Box-Tests) kann beispielsweise das Betriebsverhalten von Speichersystemen unabhängig von der Dimensionierung und Topologie analysiert und in Prüfberichten festgehalten werden. Hieraus lassen sich wiederum Datenblattangaben ableiten. Allerdings lassen die Messergebnisse oftmals keine Rückschlüsse über die Relevanz der verschiedenen Verlustmechanismen für den Anwender zu. Werden Simulationsmodelle mit den Labormessdaten parametriert, können modellbasierte Simulationstests Abhilfe schaffen. Bislang fehlte es jedoch an validierten, einfach parametrierbaren Simulationsmodellen.

Unter Leitung der Bundesverbände Energiespeicher (BVES) und Solarwirtschaft (BSW) erarbeiteten die Autoren sowie zahlreiche weitere Vertreter\*innen von Verbänden, Forschungsinstituten und Herstellern den sogenannten Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme. Das Dokument stellt im Wesentlichen eine Anleitung zur topologieübergreifenden Vermessung der Wirkungsgrade, Standby-Verbräuche und Regelungseffizienz von netzgekoppelten Batteriespeichersystemen dar. Der Leitfaden kann sowohl von Herstellern als auch von Prüfinstituten angewendet werden und ermöglicht durch die Vorgabe definierter Prüfberichte einheitliche Datenblattangaben und den Aufbau einer harmonisierten Datenbasis zur Analyse der Effizienz von Batteriespeichersystemen. Im Rahmen dieses Beitrags wurde der Leitfaden für vier AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme an verschiedenen Instituten angewendet. Die entstandenen Prüfberichte sowie jeweils eine einwöchige Messreihe des realen Systembetriebs dienten als Grundlage zur Validierung des in diesem Beitrag vorgestellten und frei verfügbaren Simulationsmodells zur Bewertung der energetischen Performance von AC-gekoppelten PV-Batteriesystemen (PerModAC). Das Simulationsmodell wurde beispielhaft in der Simulationsumgebung Matlab umgesetzt und erlaubt die Jahressimulation verschiedener Systeme auf Basis einsekündig aufgelöster Zeitreihen der Last und PV-Generatorleistung. Die Validierung des Modells zeigt eine hohe Genauigkeit, sodass es eine geeignete Grundlage für die Entwicklung einer transparenten und nachvollziehbaren Endkundenkennzahl darstellt.

# 2 AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme

AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme sind gegenüber DC-gekoppelten und PV-Generatorgekoppelten Systemen die Topologie mit dem höchsten Marktanteil in Deutschland. Bei diesem Systemaufbau wird die DC-Leistung des PV-Generators zunächst durch einen PV-Wechselrichter in AC-Leistung gewandelt (PV2AC-Pfad). Die Beund Entladung des Batteriespeichers (BAT-Pfad) erfolgt über einen Batterieumrichter (AC2BAT- und BAT2AC-Pfad). Bild 1 stellt die wesentlichen Komponenten eines ACgekoppelten PV-Batteriesystems sowie die erforderlichen Messpunkte zur Bestimmung der Energieflüsse dar. Des Weiteren sind die genannten Energieumwandlungspfade in den Systemkomponenten zu sehen, die in Anlehnung an die Energieflussrichtung zwischen den Mess- bzw. Knotenpunkten bezeichnet sind. Jede Energieumwandlung ist dabei mit Verlusten behaftet.

Um ein Verständnis für das Betriebsverhalten von PV-Batteriesystemen zu entwickeln, ist es sinnvoll, die einzelnen Verlustmechanismen näher zu betrachteten. Grundsätzlich können die Eigenschaften eines realen Systems als Systemverluste betrachtet werden, die gegenüber einem verlustfreien System zum Anstieg des Netzbezugs oder zur Reduktion der Netzeinspeisung führen. Demnach werden dazu die Systemeigenschaften gezählt, die Abweichungen gegenüber dem idealen Betriebsverhalten hervorrufen. Darunter fallen sämtliche Verlustmechanismen der leistungselektronischen Komponenten, des Batteriespeichers und der Systemregelung. Zusätzlich werden etwaige Energieverluste aufgrund der Begrenzung der Netzeinspeiseleistung den Energiemanagementverlusten zugeordnet. Die Verlustmechanismen in PV-Batteriesystemen lassen sich in fünf Kategorien unterteilen (Bild 2). Für eine detaillierte Analyse der einzelnen Verlustmechanismen und deren Auswirkungen auf Netzbezug und Netzeinspeisung sei auf [1] verwiesen.



**Bild 1:** Komponenten, Messpunkte und Umwandlungspfade bei AC-gekoppelten PV-Batteriesystemen (Nomenklatur nach dem PerModAC-Modell).





# 3 Anwendung des Effizienzleitfadens für PV-Speichersysteme

Der *Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme* [2] ist ein Prüfleitfaden zur Charakterisierung der Wirkungsgrade, Standby-Verbräuche und Regelungseffizienz von stationären Batteriespeichersystemen. Er beschreibt dabei die einheitliche und topologieübergreifende Messung verschiedenster Verlustfaktoren, die von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung der Energieeffizienz von PV-Batteriesystemen sind.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein ursprünglicher Entwurf des Leitfadens für vier AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme angewendet (Tabelle 1). Abweichungen zum final veröffentlichten Effizienzleitfaden bestanden hierbei im Wesentlichen in der geforderten Messgenauigkeit und der Plausibilitätsüberprüfung der Leistungsaufnahme durch das Batterie-Management-System (BMS). Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse sollten sich durch Anwendung des veröffentlichten Leitfadens nach Ansicht der Autoren jedoch hinreichend genau reproduzieren lassen.

System Nr.	1	2	3	4		
Institut	AIT	ISFH	ISEA	elenia		
PV-Wechselrichter	SMA Sunny Boy 5000TL	Kostal Piko BA	SMA Sunny Boy 5000TL	SMA Tripower 9000TL		
Speichersystem	SMA Sunny Boy Storage 2.5 mit Tesla Powerwall 6.4	Solarworld SunPac LiOn 6	sonnen Sonnenbatterie eco 4,5	SMA Sunny Island 8.0H mit Sony Fortelion 6		
PV-Simulator	AIT PVAS3	Magna-Power TS Series IV	Ametek ETS600	Elektro Automatik EA PSI 91000-3U		
AC-Last	AIT LB1.1	STATRON Typ 3224.1	Höcherl & Hackl ZSAC Series	Chroma 63802		
Messtechnik	Dewetron DEWE800 mit LEM LF 205-S/SP3	YOKOGAWA WT 1800	AC: Gantner A127 DC: Janitza UMG 104 mit MBS ASK31.3	DEWESoft SIRIUS		

Tabelle 1: Übersicht untersuchter PV-Batteriesysteme und verwendeter Messtechnik.

Resultat der Anwendung des Effizienzleitfadens ist ein ausführlicher Prüfbericht mit größtenteils tabellarischer Darstellung der Messergebnisse. Für jedes der vier Systeme wurde ein solcher Bericht erstellt und zur Verfügung gestellt. Tabelle 2 fasst hierbei zusammen, welche Informationen für die spätere Parametrierung des Simulationsmodells verwendet wurden. Darüber hinaus liegt für jedes System eine grafische Darstellung der Ladeleistungsbegrenzung aufgrund der Konstantspannungsoder Konstantleistungsphase vor.

 
 Tabelle 2: Bereitgestellte Informationen aus Labortests der untersuchten PV-Batteriesysteme (Nomenklatur nach dem Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme).

Bezeichnung	Formelzeichen
PV-Bemessungseingangsleistung	P <sub>PV,nom</sub>
PV-Bemessungsausgangsleistung	P <sub>PV-WR,nom</sub>
Nominale Ladeleistung des Batterieumrichters	P <sub>BESS,nom (Laden)</sub>
Nominale Entladeleistung des Batterieumrichters	P <sub>BESS,nom (Entladen)</sub>
Auslastungsabhängige Batteriekapazität (Wh)	$E_{\text{BAT (Entladen)}}(P)$
Auslastungsabhängiger Batteriewirkungsgrad	$\eta_{\text{BAT,RTE}}(P)$
Auslastungsabhängiger AC2BAT-Pfadwirkungsgrad	$\eta_{ m AC2BAT}(P)$
Auslastungsabhängiger BAT2AC-Pfadwirkungsgrad	$\eta_{_{ m BAT2AC}}(P)$
Verbrauch des Batterieumrichters im Leerlauf und Standby	P <sub>V,Idle,AC</sub> , P <sub>V,Idle,DC</sub>
	$P_{ m V,Standby,AC}$ , $P_{ m V,Standby,DC}$
Verbrauch des Batteriemanagementsystems	${m P}_{{\sf BMS},{\sf Idle},{\sf DC}}$
Auslastungsabhängige Abweichungen der AC-Ladeleistung	$P_{abw(Laden)}(P)$
Auslastungsabhängige Abweichungen der AC-Entladeleistung	$P_{abw(Entladen)}(P)$
Mittlere Totzeit der Regelung	t <sub>T</sub>
Mittlere Einschwingzeit der Regelung	t <sub>E</sub>

# 4 PerModAC-Simulationsmodell

Das offene und frei verfügbare *Performance-Simulationsmodell für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme* (PerModAC) [3] dient der simulationsbasierten Analyse der energetischen Systemperformance. Hierzu kann das Systemverhalten in einsekündiger zeitlicher Auflösung über einen beliebig langen Zeitraum simuliert werden. Die Eingangszeitreihen in Form einer DC-seitigen PV-Generatorleistung und AC-seitigen Last sind frei wählbar. Ein Jahresdatensatz der normierten PV-Generatorleistung basierend auf Strahlungsdaten des Standorts Oldenburg [4] und elektrischen Last eines Einfamilienhauses [5] liegen dem Modell bei.

Der Fokus des Modells liegt auf der energetischen Charakterisierung der Betriebsergebnisse und Analyse der resultierenden Energieflüsse. Das Simulationsmodell kann mit der Simulationsumgebung Matlab ausgeführt werden. Dabei ist die Überführung des Programmcodes in andere Programmiersprachen grundsätzlich möglich. Nachfolgend wird auf die benötigten Modellparameter, die modellierten Verlustmechanismen und den Aufbau des Modells eingegangen.

# 4.1 Modellparameter

Das PerModAC-Modell wird zusammen mit einem Tabellenblatt bereitgestellt, in das die Ergebnisse nach Kapitel 7 bis 9 des Effizienzleitfadens übertragen werden (siehe exemplarisches Beispiel für System 3 in Bild 3 und 4). Dabei erfolgt die Übernahme der in Tabelle 2 aufgeführten Prüfergebnisse und automatische Zuweisung der im Programm-Code verwendeten Variablenbezeichnungen. Zum besseren Verständnis sind die Formelzeichen nach Effizienzleitfaden den abweichenden Bezeichnungen des PerModAC-Modells gegenübergestellt.



#### Parametrierung des Performance-Simulationsmodells für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme (PerModAC)

Mit den nachfolgenden Tabellen und Grafiken lässt sich das PerModAC-Modell mittels Datenblattangaben oder eines Prüfberichts auf Basis des Effizienzleitfadens für PV-Speichersysteme parametrieren.

Effizienzleitfaden	nklatur PerModAC-Modell	Version vom: Modellparamter sind 03.03.17 Eingabefelder/Messwerte				ter sind sswerte	grau i grün i	markiert markiert						
PV-Wechselrichter (PV2	AC)													
Leistungen														
P_PV,nom	P_PV2AC_DC	4,742 kW DC		P_PV-W	/R / P_PV-WR,nom		0,043	0,094	0,194	0,244	0,293	0,489	0,727	0,958
P_PV-WR,nom	P_PC2AC_AC	4,600 kW AC			P_PVS,MPP	W DC	230	460	920	1.150	1.380	2.300	3.450	4.600
					P_PVS,DC	W DC	228	459	919	1.149	1.378	2.295	3.442	4.555
					U_PVS,DC	V DC	500	402	399	402	402	399	398	413
					P_PV-WR	WAC	198	431	893	1.122	1.350	2.249	3.343	4.405
			U_	PVS,DC = 400 V	P_PV/P_PV,nom	-	0,049	0,097	0,194	0,243	0,291	0,485	0,728	0,970
			-		eta PV2AC,MPPT	-	99,1%	99,7%	99,9%	99,9%	99,8%	99,8%	99,8%	99,0%
					eta PV2AC.CONV	-	86.8%	94.0%	97.2%	97.7%	98.0%	98.0%	97.1%	96.7%
					eta PV2AC.t	-	86,1%	93.7%	97.1%	97.6%	97.8%	97.8%	96,9%	95.8%
					spez. Verluste	W/kW	6.7	6.1	5.7	5.9	6.3	10.9	22.6	41.1
Umwandlungsverluste					opoz. Fondoto		0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	10,0	22,0	,.
-	PV2AC a	57 4602												
	PV2AC b	-21 2535			eta_PV2AC,t	spez. Ve	rluste —	- Polyn	omisch (s	pez. Ver	luste)			
	PV2AC c	7 6437	10	00%	_									100
-	1 1240.0	1,0401					•				_			≥
				90%										80 ≸
														اج ~~
			ad	000/										<u>ه</u>
			- bg	00%	<b></b>									° 51
			ő.		f(x) = 57,460	2X^2 - 21,2	535X + 7,	6437						eie.
			Š (	/0%								_		40 듌
			N N							-	_			득
			6	60%				_		-				20 🎽
		1					-							8i
			5	50%	• • •		-				-			0 ğ
				0,0 0,1	0,2 0,3	0,4	0,5	0,6	0,	7	0,8	0,9	1,0	
						p D	//P PVm	m						
			L			· _ F								
Batterieumrichter (BAT2	2AC)													
Leistungen														
P_BESS,nom (Entladen)	P_BAT2AC	2,370 kW AC		P_BESS / P	BESS,nom (Entladen)		0,052	0,099	0,202	0,253	0,305	0,512	0,761	0,996
					P_Last	W AC	136	247	496	620	747	1.251	1.870	2.427
					P_BAT	W DC	143	255	506	630	758	1.266	1.889	2.485
					U BAT	V DC	45.9	45.8	45.7	45.6	45.5	45.2	44.9	44.7
				$B\Delta T min = 44.7 V$	P BESS	WAC	123	234	479	600	724	1 213	1 804	2 361
			U B	SAT mittel = 45.6 V	P NETZ(Bezug)	WAC	12	14	17	20	23	38	67	133
			Ŭ F	BAT max = 46.2 V	P NETZ(Abgabe)	WAC	0	0	0	0		0	0	0
					D BESS(D BESS nom	11740	0.052	0.000	0.202	0.252	0.205	0 512	0.761	0.006
					P_BESS/P_BESS,IIUIII	-	0,052	01.5%	04.79/	0,200	0,303	0,512	05.5%	0,990
					eta_BATZAC	-	80,2%	91,5%	94,7%	95,2%	95,5%	95,8%	95,5%	95,0%
					spez. veriuste	VV/KVV	8,3	9,1	11,4	12,8	14,4	22,4	35,9	52,4
Umwandlungsverluste														
-	BAT2AC.a	33,1966			● eta BAT2AC ◆	spez. Ve	duste —	- Polyn	omisch (s	pez. Ver	luste)			I
	BAT2AC.b	11,9006	10	00%							,			100
	BAT2AC.c	7,6361	1 "	0070										<sup>100</sup> >
				000/						•			1.	≩∣
			g	90%		_	-			•				80 ¥
			g g	90%						•				g in W/kV
			grad Brad	90%						•				ung in W/KV
			ngsgrad æ	80%	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,90	)5883328	x + 7,636	0571515	1			9 09 sistung in W/KV
			kungsgrad 2	90%	f(x) = 33,196	5956377x^2	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	0571515	]			07 09 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08
			Witkungsgrad	90%	f(x) = 33,196	5956377x^2	2 + 11,90	05883328	x + 7,636	0571515	]			rlustleistung in W/KV
			9 8 Riknudsgrad 7 7	90% • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	0571515				00 05 09 08 Verlustleistung in W/KV
			8 Wirkungsgrad	90% • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	f(x) = 33,196	5956377x^2	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	0571515				07 07 09 09 08 22. Verlustleistung in W/KV
			9 8 7 7 8 7 8 9 7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	0571515				o 0 07 09 09 08 spez. Verlustleistung in W/KV
			9 8 7 7 8 7 8 5 5	90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	0571515	0,8	0,9	1.0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
			9 Nirkungsgrad 7 5	90% 90% 70% 60% 0,0 0,1	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,900	05883328	x + 7,636	7	0,8	0,9	1,0	0 07 05 05 09 08 spez. Verlustleistung in W/KV
			9 8 8 7 7 6 5	90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	f(x) = 33,196	5956377x^: 0,4 	2 + 11,900 0,5 BESS,nom	0,5883328	x + 7,636	0571515	0,8	0,9	1,0	0 07 05 07 09 08 spez. Verlustleistung in W/KV
			9 8 8 7 7 8 8 9 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	90% 0,0 0,1	f(x) = 33,196	5956377x^2 0,4 	2 + 11,900 0,5 BESS,nom	0,5883328	x + 7,636	0571515	0,8	0,9	1,0	0 07 07 09 08 spez. Verlustleistung in W/K/
Batterjeumrichter (AC2)	BAT)		9 8 8 7 7 6 5 5	90% 80% 0,0 0,1	f(x) = 33,196	5956377x^:	2 + 11,900	0,6 (Entlader	x + 7,636	0571515	0,8	0,9	1,0	0 07 07 09 09 08 09 08 09 08 09 09 09 09 09 09 09 09 09 09 09 09 09
Batterieumrichter (AC28	BAT)		9 8 8 7 7 6 5	90% 90% 00% 00% 0,0 0,1	f(x) = 33,196	0,4	2 + 11,900	0,6	x + 7,636	7	0,8	0,9	1,0	0 07 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P EFSS nom (Laden)	BAT) P. AC2BAT	2.840 kW AP	9 8 8 7 7 8 8 9 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	90%	f(x) = 33,196 (f(x) = 33,196) (f(x) = 33,196 (f(x) = 33,196) (f(x)	5956377x^1 5956377x^1 0,4 	2 + 11,900 0,5 BESS,nom	05883328 0,6 (Entlader	x + 7,636 0,	0571515 7 0.231	0,8	0,9	1,0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW AC	9 8 8 7 7 6 5 5	90%	(f(x) = 33,196 (f(x) = 33,196) (f(x) = 33,196)(f(x) = 33,196) (f(x) = 33,196)(f(x) = 33,196) (f(x) = 33,196)(f(x) = 3	5956377x <sup>A</sup> 5956377x <sup>A</sup> 0,4 BESS /P_	2 + 11,900 0,5 BESS,nom	0,097	x + 7,636 0,101	0571515 7 0,231	0,8	0,9	1,0 0,702	AN/W 60 60 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2.840 kW AC	9 peuSSunyliv 6 5	90%	P BESS.nom (Laden) P P WWR P P WWR	5956377x^2 0,4 BESS /P_ WAC	2 + 11,900 0,5 BESS,norr	0,5883328 0,6 0,6 0,097 259 254	x + 7,636 0,1) 0,181 492 485	0571515 7 0,231 626 618	0,8 0,273 742 733	0,9 0,463 1.254	<b>0,702</b> <b>1,859</b>	0,944 20.00 20.00 2,502 2,602 2,702 2,
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW/AC	9 8 8 8 7 7 6 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	90%	P BESS,nom (Laden) P P-PV-WR P BAT U DAT	5956377x^; 5956377x^; 0,4 	2 + 11,900 0,5 BESS,norr 0,049 125 121	0,6 0,6 0,6 0,097 259 254	x + 7,636 0, 1) 0,181 492 485	0571515 7 0,231 626 618	0,8	0,9 0,9 0,463 1.254 1.254 1.239	0,702 1.885 1.889	40 Milk 40 20 7. Aeutratia in Milk 20 7. Aeutratia in Milk 20 8. Aeutratia in Milk 20 9. Aeutratia in
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P. BESS,nom (Laden)	BAT) P AC2BAT	2,840 kWAC	9 g per 8 a 7 7 6 5	90%	P_BESS,nom (Laden) P_PUWR P_BAT U BAT D D D D D D D D D D D D D D D D D D D	5956377x^2 0,4 BESS /P_ WAC WDC VDC	0,5 BESS,norr	0,66 (Entlader	x + 7,636 0, 1) 0,181 492 485 46,8 545	00571515 → 7 0,231 626 618 46,9 955	0,8 0,8 0,8 742 733 46,9 46,9	0,9 0,9 0,9 0,9	0,702 1.885 1.859 47,5	80 Mul 60 Units 20 Normal 20 Normal
Batterleumrichter (AC2) Leistungen P BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 KW AC	9 9 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	90%	P_BESS,nom (Laden) P_PV-WR P_BAT U BAT P_BESS	5956377x^2 5956377x^2 0,4  0,4   0,4    WAC WAC WAC WAC WAC WAC	2 + 11,900 0,5 BESS,nom 125 121 46,5 138	0,6 (Entlader 0,097 259 254 46,7 275	x + 7,636 0,1) 0,181 492 485 46,8 515	0571515 7 0,231 626 618 46,9 655	0,8 0,273 742 733 46,9 776	0,9 0,9 0,9 47,2 1.316	0,702 1.885 1.859 47,5 1.995	ANIM II ANIM I
Batterieumrichter (AC2I Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW AC		90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	P BESS.nom (Laden) P P-V-WR P BAT U BAT P BESS P NETZ(Bezug) VETZ(Bezug)	5956377x^/; 0,4 BESS /P	0,5 BESS,nom 0,049 125 121 46,5 138 13	0,5883328 0,6 0,6 0,6 0,097 259 254 46,7 275 16	0,181 492 485 46,8 515 24	0571515 7 0,231 626 618 46.9 655 29	0,8 0,273 742 733 46,9 776 34	0,9 0,9 0,9 0,9 0,9	0,702 1.885 1.859 47,55 1.995 110	80 (Milk) 60 (200 - 200
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW AC	U_B U_B	BAT.min = 44,7 V 3AT.mitle = 45,6 V BAT.max = 46,2 V	P BESS.nom (Laden) P - PV-WR P - BAT U - BAT P - NETZ(Bezug) P - NETZ(Abgabe)	0,4 BESS /P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC	2 + 11,900 0,5 BESS,norr	0,5883328 0,6 (Entlader 0,097 259 254 46,7 275 16 0 0	0,181 492 485 46.8 515 24 0	00571515 7 7 0,231 626 618 46,9 655 29 0 0	0,8 0,8 0,8 742 733 46,9 776 34 0 0	0,9 0,9 0,9 47.2 1.316 62 0 0	<b>0,702</b> 1.885 1.859 47,5 1.995 110 0	80 Nill Constant of the second
Batterleumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW/AC	9 period 2 5 U_E U_E	BAT,min = 44,7 V BAT,mit = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	P BESS,nom (Laden) P V-WR P BAT U BAT P BESS P NETZ(Bezug) P NETZ(Abgabe) P NETZ(Abgabe) P SESS(P DESS,nom	5956377x^2 0,4 BESS /P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC -	0,5 BESS,norr 0,5 BESS,norr 125 121 146,5 138 13 0 0,049 07,049	0,5883328 0,6 0,6 0,6 0,097 259 254 46,7 275 16 0 0,097 0,097	0,181 492 485 515 24 0 0,181 492 485 515 24 0 0,181	0571515 7 0,231 626 618 46,9 655 29 0 0,231	0,8 0,8 742 733 742 733 776 34 0 0,273 0,273	0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,463 0,463 0,0463	0,702 1.885 1.859 47,5 1.995 100 0,702	80 NJ/M ii 60 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P BESS,nom (Laden)	BAT) P AC2BAT	2.840 kW AC	U_E	BAT,min = 44,7 V BAT,mit = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P         BAT           U         BAT           U         BAT           P         NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P         BESS,nom           eta Ac28AT	0,4 BESS /P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC	2 + 11,900 0,5 BESS,nom 0,049 125 121 46,5 138 13 0 0,049 87,6%	0,55883328 0,60 0,60 0,007 259 254 46,7 275 16 0,097 92,2%	0,181 492 485 46.8 515 24 0 0,181 94,1%	0571515 7 0,231 626 618 46.9 655 29 0,231 94,4%	0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8	0,9 0,9 0,9 1.254 1.239 47,2 1.316 62 0,463 94,1%	0,702 1.885 1.859 47,55 1.995 1.995 1.995 1.995 1.995 93,2%	80 Nilion 40 Sector 40 Sec
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden)	BAT) P_AC2BAT	2,840 KW AC	9 8 8 7 7 6 5 5 5 0 1 9 0 1 9 0 1 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	90% 80% 50% 0,0 0,1 P BESS / F BAT,min = 44,7 V BAT,mittel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P         P.V.WR           P         BAT           U         BAT           P         BESS           P.NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           peta         AC2BAT           spez. Vertuste         Vertuste	5956377x^* 0,4 BESS /P W AC W DC V DC V DC V DC V DC V AC W AC W AC W AC	0,5 BESS,norr 0,049 125 121 46,5 138 133 0 0,049 87,6% 6,0	0,66 0,66 0,66 0,097 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5	0,181 0,181 492 485 46,8 515 24 0 0,181 94,1% 10,8	0571515 7 7 0,231 626 618 46,9 655 29 0 0,231 94,4% 13,0	0,8 0,8 0,273 733 46,9 776 34 0 0,273 94,5% 15,1	0,9 0,463 1.254 1.239 47,2 1.316 62 0 0,463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.859 47.5 1.995 110 0 0,702 93,2% 47,9	80 (M)
Batterieumrichter (AC2I Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT	2,840 kW AC		90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           0,2         0,3           P         PUWR           P         BAT           U         BAT           P         PESS           P.NETZ(Bezug)         P_NETZ(Abgabe)           P         BESS/P BESS,nom           eta_AC2BAT         spez. Verluste	0,4 BESS / P_ WAC WDC WAC WAC WAC WAC WAC	0,5 BESS,norr	0,66 (Entlader 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5	0,181 492 485 46,8 515 24 0 0,181 94,1% 10,8	00571515 7 7 0,231 626 618 618 618 618 618 618 618 618 618 61	0,8 0,273 742 733 46.9 776 34 0 0.273 94,5% 15,1	0,9 0,9 1.254 1.239 47.2 1.316 62 0 0.463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.859 1100 0,702 93,2% 47,9	80 MMM iii 600 m11912 m200 m200 m200 m200 m200 m200 m200 m2
Batterleumrichter (AC2) Leistungen P BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BATa	2,840 kW AC		90% 80% 60% 60% 0,0 0,1 P BESS / I BAT.min = 44,7 V BAT.min = 44,7 V BAT.max = 46,2 V	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         PESS.nom (Laden)           P, PV-WR         P           P BAT         U           U BAT         P           P NET2(Bezug)         P           P NETZ(Abgabe)         P           P ESS, nom         eta AC2BAT           spez. Verluste         eta AC2BAT	5956377x** 0,4 BESS / P_ WAC W DC V DC W AC W AC W AC W AC W AC	0,5 BESS,nom 125 121 46,5 138 133 0 0,049 87,6% 6,0	0,66 (Entlader 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5	0,181 492 485 46.8 515 24 0 0,181 94,1% 10,8 0,181 94,1%	00571515 7 7 0,231 626 618 626 618 626 626 618 625 625 0 0 0,231 94,4% 13,0	0,273 742 733 46,9 776 34 0 0,273 94,5% 15,1	0,463 1.254 1.239 47.2 0 0.463 94,1% 27,2	1,0 0,702 1,885 1,859 1,995 1100 0 0 0,702 93,2% 47,9	80 (V)
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden) 	BAT) P_AC2BAT AC2BATa AC2BATa AC2BAT.b	2,840 kW AC 54,5926 23,0135		90%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P. BESS.nom (Laden)           P. PV-WR           P. BESS           P. NETZ(Bezug)           P. NETZ(Abgabe)           P. NETZ(Abgabe)           P. SESS/P. BESS,nom           eta_AC2BAT           spez. Verluste           eta_AC2BAT	0,4 BESS / P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC WAC WAC Spez. Ve	0,5 0,049 125 121 138 13 0 0,049 87.6% 6.0 	0,097 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5 - Polyn	0,181 94,182 94,185 24 46,8 515 24 0,0,181 94,1% 10,8	00571515 7 7 0,231 626 618 46,9 655 29 0,231 94,4% 94,4% 13,0 13,0	0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8	0,9 0,9 0,9 0,9 0,463 1.254 1.254 1.254 1.254 0.47.2 0.0463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.859 100 0,702 93,2%	80 N/M ui Burnise)tsanta 80 0.9442 20 7. 2845 2.5022 2.5022 2.5022 4.47.7. 2.6752 1733 0.942 9.24622 1733 0.942 9.2462 1733 0.942 9.2462 1733 0.942 1733 174.9 100 100 100 100 100 100 100 10
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P BESS.nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	U - E	BAT,min = 44,7 V 3AT,mit = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         PEXS           0,2         0,3           P         PEVWR           P_BAT         U           U         BAT           P_NETZ(Bezug)         P_NETZ(Abgabe)           P_NETZ(Abgabe)         P_BESS/P_BESS,nom           eta_AC2BAT         spez. Verluste	5956377x^* 0,4 BESS / P_ W AC W DC W AC W AC W AC W AC W AC W AC	2+11,900 0,5 BESS,norr 125 138 13 0 0,049 87,6% 6,0 rduste –	0,097 259 254 46,7 275 16 0,097 92,2% 7,5 Polyn	0,181 492 468 515 515 24 0 0,181 94,1% 10.8	7 7 0,231 626 618 618 618 618 618 618 618 618 94,4% 13,0 94,4% 13,0 92,211 94,4%	0,273 742 733 46,9 776 34 0,273 94,5% 15,1	0,463 1.254 1.239 47.2 0 47.2 0 0.463 94,1% 27,2	1,0 0,702 1.885 1.859 47,5 1.095 100 0,702 93,2% 47,9	80 0,000 60 0,000 40 20 0,000 2,502 2,50
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kWAC 54,5926 23,0135 4,7813	U I U B U B U B U B U B U B U B U B U B U B	P BESS / F BAT,min = 44,7 V BAT,mitel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	f(x) = 33,196 f(x) = 33,196 0,2 0,3 P BESS,nom (Laden) P PV-WR P BESS P NETZ(Bezug) P NETZ(Abgabe) P NETZ(Abgabbabe)	0,4 BESS / P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC	0,5 BESS.nor 0,6 BESS.nor 125 121 138 133 0 0,049 87.6% 6.0	0,66 (Entlader 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5 92,2% 7,5	(0,181) (0,	00571515 7 7 0,231 626 618 46,9 0 0,231 13,0 0,231 13,0	0,273 742 733 46,9 776 34 4,9 94,5% 15,1 10,273 94,5%	0,463 1.254 1.239 47.2 1.316 2.0 0.463 0.0,463 9.47,2 2.7,2	1,0 1,0 1,859 47,5 1,995	80 M/M, iii buny iii source iiii source iii source iii source iii source iii source iii
Batterieumrichter (AC21 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813		90% 80% 60% 0,0 0,0 0,1 P_BESS / F BAT,min = 44,7 V 3AT,mittel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           p         BESS,nom (Laden)           p         BAT           U         BAT           U         BAT           U         BAT           P         NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P         DESS,nom           eta_AC2BAT         spez. Verluste	5956377x^* 0,4 BESS / P_ W AC W DC V DC W AC W AC W AC W AC	0,049 125 121 138 0,049 125 121 138 13 0,049 87,6% 6,0 0,049	0,683328 0,66 (Entlader 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 7,5 Polyn	0,181 492 468 515 515 24 46,8 515 24 10,8 0 0,181 10,8 10,8 10,8 10,8 10,8 10,8 10,8 10,8 10,9	7 7 7 0,231 626 618 618 655 29 0,231 94,4% 13,0	0,273 742 733 46,9 776 34 34 94,5% 15,1	0,9 0,9 1.254 1.239 47,2 1.316 62 0,0463 94,1% 27,2	1,00 1,885 1,859 1,995 1100 0,702 93,2% 47,9	80 0.000 60 0.000 40 20 0.000 2.2502 2.460
Batterieumrichter (AC21 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813		90%	P_BESS.nom (Laden) P_V-WR P_BAT U_BAT P_NETZ(Bezug) P_NETZ(Abgabe) P_NET	0,4 BESS /P WAC WDC VDC WAC WAC WAC WAC WAC WKW	0,049 125 121 138 13 0,049 87.6% 6,0	0,087 0,087 259 254 46,7 275 16 0 0,097 7,5 92,2% 7,5 Polyn	0,181 492 485 515 244 0 0,181 94,1% 10,8	7 7 7 0,231 626 618 46,9 9 0,231 46,9 9 0,231 1,0 0,231 1,0 2,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1	0,273 742 733 46,9 776 34 40,9 15,1 15,1	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0,463 94,1% 27,2	1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0	80 000 000 000 000 000 000 000 000 000
Batterieumrichter (AC22 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste 	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.a AC2BAT.c	2,840 kWAC 54,5926 23,0135 4,7813	U E	90% 80% 60% 50% 0,0 0,0 0,1 P_BESS/f BAT,min = 44,7 V BAT,min = 44,7 V BAT,min = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS.nom (Laden)           P_PV-WR         P           P_BESS         P. NETZ(Bezug)           P_NETZ(Bacug)         P_NETZ(Bacug)           P_NETZ(Bacug)         P	0,4 	0,049 125 138 0,049 125 138 138 0,049 87.6% 6,0	0,097 254 46,7 254 46,7 7,5 7,5 Polyn Polyn	0,181 492 485 515 515 24 46,8 515 515 0,181 94,1% 10,8	0,231 626 618 46,9 9 0,231 94,4% 13,0	0,8 0,8 0,8 0,8 0,273 742 733 742 733 742 733 742 733 94,5% 15,1 15,1	0,9 0,9 1.254 1.239 4.7,2 0 0,463 94,1% 27,2	1,0 0,702 1,885 1,855 1,859 47,5 110 0 0,702 93,2% 47,9 •	80 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0
Batterleumrichter (AC2) Leistungen P BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2.840 kW AC 54.5926 23.0135 4.7813	9         9	90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P_BESS.nom (Laden)           P_PV-WR           P_BAT           U_BAT           P_NET2(Abgabe)           P_NETZ(Abgabe)           P_BESS.nom           eta_AC2BAT           spez. Verluste           eta_AC2BAT           f(x) = 54,5926x <sup>2</sup>	5956377x** 5956377x** 0,4 BESS / P_ WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC	0,049 125 121 125 121 125 121 125 121 126 121 125 121 125 121 125 121 125 121 125 121 125 121 125 121 125 125	0,097 259 254 46,7 275 7,5 7,5 7,5 Polyn 13	x + 7,636 0,181 492 485 515 24 46,8 515 24 0 0,181 10,8 10,8	7 7 0,231 626 618 46.9 0 0,231 13,0 0,231 13,0 0,231	0,273 742 7733 46.9 776 0 0.273 46.9 776 0 15,1	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0,463 27,2	0,702 1.885 1.855 1.957 1.910 0,002 93,2% 47,9	80 0.9422 0 0.9422 2.5022 2.4622 2.4622 2.477,7 0.942 92,0% 74,9 100 MWM ui Burnsi
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BATa AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2.840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	U	90% 80% 50% 0,0 0,1 P BESS / F BAT,min = 44,7 V BAT,mitel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00% 00% 00%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P         P.V.WR           P         BAT           U         BAT           P         RESS           P.NETZ(Bezug)         P           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           gez. Verluste         eta_AC2BAT           f(x) = 54,5926x'	5956377x** 0,4 	0,5 BESS.nor 0,6 BESS.nor 125 121 138 138 13 13 0,049 87.6% 6.0 rluste — 5x + 4,78	0,683328 0,66 (Entlader 259 254 46,7 275 16 0 0,097 92,2% 92,2% 92,2% 92,2% 92,2%	0,181 492 468 516 516 516 0,181 94,1% 10,8 10,8	7 7 0,231 626 618 94,9 94,9 94,9 13,0 13,0	0,273 742 733 46,9 94,5% 0,273 94,5% 15,1 10,1	0,463 1.254 1.239 47.2 1.316 62 0.463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.859 47,5 110 0 0,702 93,2% 47,9	80 0,942 0,942 2,502 0,942 2,74,9 100 MWW ui burnstep 2,502 0,942 92,0% 100 MWW ui burnstep 100 MWW ui burnstep 100 MWW ui burnstep 100 MWW ui burnstep
Batterieumrichter (AC21 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	S S S S S S S S S S S S S S S S S S S	90% 80% 60% 50% 0,0 0,0 0,1 P_BESS / F BAT,min = 44,7 V 3AT,mitl = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00% 90% 00%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS.nom (Laden)           P         PV-WR           P_BAT         U           U         BAT           P         NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P_SESS/P_BESS,nom           eta_AC2BAT           spez. Verluste           eta_AC2BAT           f(x) = 54,5926x <sup>4</sup>	5956377x* 0,4 BESS / P_ WAC W AC W AC W AC W AC W AC W AC W AC	0,049 125 121 138 0,049 125 121 138 13 0 0,049 87.6% 6.0 rtluste 5x + 4,78	0,097 259 254 46,7 275 16 0,097 92,2% 7,5 Polyn	x + 7,636 0,181 492 485 515 24 46,8 515 24 0,0181 94,1% 10,8	7 7 0,231 626 618 46,9 0,031 0,031 9,4,4% 13,0 0,031 9,4,4%	0,273 742 733 746,9 776 46,9 776 46,9 776 46,9 776 46,9 776 15,1	0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,1254 1,234 0,03 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9 0,9	0,702 1.885 1.859 110 0 0,702 93,2% 47,5 110 0,702 93,2%	80 0.0942 20 2.25022 2.45022 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 2.4502 110 0.9442 110 0.9442 110 0.9442 110 0.9442 110 0.9442 110 0.9442 110 0.9442 110 110 110 110 110 110 110 11
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	ре 10 стр. 10	90% 80% 50% 0,0 0,1 P BESS / F BAT,min = 44,7 V BAT,mittel = 45,6 V BAT,mittel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00% 00%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P         P.V.WR           P         BAT           U         BAT           P         BESS           P.NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           eta_AC2BAT           spez. Vertuste           f(x) = 54,5926x'	5956377x*2 0,4 BESS/P_ WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC	0,5 0,049 125 121 138 13 0,049 87.6% 6,0 rfuste	0,683328 0,66 (Entlader 2559 2554 46,7 275 16 0,097 7,5 92,2% 7,5 Polyn	0,181 492 485 515 515 24 46.8 515 515 24 40 0 0,181 194,1%	7 7 0,231 626 618 46,9 0 0,231 44,9 9 0,0,231 94,4% 13,0 94,4%	0,273 742 733 46,9 776 0,273 94,5% 15,1	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0 0.463 94,1% 27,2	1,0 0,702 1.885 1.855 1.995 110 0,702 93,2% 47,9 47,9	80 0,942 0,944 0 20 0,942 2,502 2,262 0,944 2,2502 0,944 2,502 0,944 2,502
Batterieumrichter (AC22 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	5 PERSONNAUM U_B_ U_B_ U_E 10 2 PERSONNAUM F F F F F F F F F F F F F	90% 80% 60% 0,0 0,1 P_BESS / F 80% 0,0 0,1 P_BESS / F 80% 80% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 90% 9	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P_BAT         U           U         BAT           U         BAT           U         BAT           V         BESS           P_NETZ(Bezug)           P_NETZ(BESS,nom           eta_AC2BAT           spez. Verluste           eta_AC2BAT	5956377x^* 0,4 BESS / P_ W AC W DC W AC W AC W AC W AC W AC W AC W AC W A	0,049 125 121 138 87,6% 6,0 140,5 87,6% 6,0 140,5 87,6% 6,0 140,5 87,6% 6,0 140,5 1	0,097 254 46,7 275 16 0,097 7,5 7,5 Polyn Polyn	0,181 492 485 515 24 46.8 515 24 0 0,181 94,1% 0,181 94,1%	7 7 0.2311 626 618 46.9 0.031 94.4% 13.0 0.231 94.4%	0,8 0,273 742 733 742 733 742 739 776 0,273 94,5% 15,1 1uste)	0,9 0,463 1.254 1.239 47.2 0 0.463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.859 110 0,702 93,2% 47,9	80 0.942 20 0.942 2.50202 2.4622 2.4622 2.4622 2.4622 2.462 2.4622 2.462 2.4
Batterieumrichter (AC21 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 2,840 kW AC 54,5926 23,0136 4,7813	9         9         8         8         7         7         7         7         7         5         5         5         10	90% 80% 60% 50% 0,0 0,1 P BESS / I BAT.min = 44,7 V BAT.min = 44,7 V BAT.min = 45,6 V BAT.max = 46,2 V 00% 60% 60% 60% 60% 60% 60% 60%	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS.nom (Laden)           P         P.V-WR           P         BAT           U         BAT           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P attack         eta_AC2BAT           spez. Verluste         eta_AC2BAT           f(x) = 54.5926x'         f(x) = 54.5926x'	5956377x*2 0,4 BESS/P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC WAC WKW spez. Ve	0,049 125 121 138 13 0,049 87,6% 6,0 rluste - 6,x + 4,78	0,097 259 254 46,7 275 10 0,097 7,5 - Polyn	0,181 492 485 515 24 40,181 94,1% 10,8	7 7 7 0,231 626 618 46.9 655 29 0,231 13,0 0,231 13,0 0,231	0,273 742 733 94,5% 15,1 15,1 15,1	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0,0463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.855 1.995 100 0,702 0,702 47,5 1.995 100 0,702 47,5 1.995 100 0,702 47,5 1.995 100 0,702 1.885 1.995 1.00 0,702 1.885 1.059 1.00	80 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0
Batterieumrichter (AC21 Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste 	BAT) P_AC2BAT AC2BAT:a AC2BAT:a AC2BAT.c	2,840 kWAC 54,5926 23,0135 4,7813	5 pedastary U_B_4 U_B_5 U_E 10 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	90% 80% 60% 50% 0,0 0,0 0,1 P_BESS/f BAT,min = 44,7 V BAT,min = 44,7 V BAT,min = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00% 00% 00% 00% 00% 00% 00% 00	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BAT           0,2         0,3           P         BAT           U         BAT           P         BESS           P.NETZ(Bezug)         P.NETZ(Abgabe)           P         BESS           eta_AC2BAT         eta_AC2BAT           eta_AC2BAT         eta_AC2BAT           0,2         0,3	5956377x^* 0,4 	0,049 0,5 BESS,norr 0,049 125 138 0 0,049 87,8% 6,0 13 87,8% 6,0 13 5x + 4,78 0,5 5x + 4,78 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	0,097 259 254 46,7 275 16 0 0,097 7,5 7,5 Polyn 13	0,181 492 468 516 516 516 0,181 94,1% 10.8 10.8	7 7 0,231 626 618 655 29 9 0,231 94,4% 13,0 13,0 7	0,273 742 733 46,9 94,5% 15,1 10,273 94,5% 15,1 10,273 94,5% 10,273 94,5% 10,273 10,275 10,275 10,275 10,27	0,9 0,463 1.254 1.254 1.259 47,2 1.316 62 0,463 94,1% 27,2	0,702 1.885 1.995 1.095 110 0 0,702 93,2% 47,9	80 0,942 0,944 0,00 0,942 2,2502 0,0 0,942 2,2502 0,0 0,942 2,0 0,0 0,942 2,0 0,0 0,942 2,0 0,0 0,942 2,0 0,0 0,0 0,942 2,0 0,0 0,0 0,942 2,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
Batterleumrichter (AC21 Leistungen P BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	5 pelősőunyu U U U U U U U B B C U Pelősőunyu M E S C F C S C S C S C S C S C S C S C S C	90% 80% 60% 50% 0,0 0,0 0,1 P_BESS / f BAT,min = 44,7 V BAT,min = 44,7 V BAT,min = 45,6 V BAT,max = 46,2 V 00% 00% 00% 00% 00% 00% 00% 00	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS           P_BAT         U           U_BAT         P           P_NETZ(Bezug)         P_NETZ(Abgabe)           P_NETZ(Abgabe)         P_BESS.nom           eta_AC2BAT         spez. Verluste           eta_AC2BAT            goto         0,2           0,2         0,3	5956377x** 0,4 BESS / P_ WAC WDC VDC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WA	0,049 125 121 125 121 125 121 146.5 138 13 10 0 0,049 0,040 0,049 0,040 0,00000000	0,097 259 254 46,7 275 46,7 275 7,5 7,5 7,5 7,5 7,5 7,5 7,5 13	x + 7,636 0,181 492 485 515 24 46,8 515 24 0 0,181 10,8 0,181 10,8	7 7 0,231 626 618 46,9 0 0,231 13,0 0,231 13,0 0,231 13,0 0,231	0,273 742 733 742 776 0,273 15,1 15,1 10,213 15,1 10,8	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0,463 47.2 1.316 62 0,463 27,2	0,702 1.885 1.855 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9555 1.9	80 (MWA) 80 (MW
Batterieumrichter (AC2) Leistungen P_BESS,nom (Laden) Umwandlungsverluste	BAT) P_AC2BAT AC2BAT.a AC2BAT.b AC2BAT.c	2,840 kW AC 54,5926 23,0135 4,7813	9         8         8         9         9         8         8         9	00% BAT,min = 44,7 V BAT,min = 44,7 V BAT,mitel = 45,6 V BAT,mitel = 45,6 V BAT,max = 46,2 V	f(x) = 33,196           f(x) = 33,196           0,2         0,3           P         BESS,nom (Laden)           P         P.V.WR           P         BAT           U         BAT           P         BESS           P.NETZ(Bezug)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           P         NETZ(Abgabe)           f(x) = 54,5926x <sup>T</sup> o         o           0,2         0,3	5956377x*: 0,4 BESS/P_ WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC WAC	0,5 0,049 125 121 138 13 0,049 87.6% 6,0 rfuste - 5x + 4,78 0,5 BESS,nor	0,6853328 0,66 (Entlader 2559 2554 46,7 275 16 0,097 7,5 92,2% 7,5 Polyn 13	0,181 492 485 515 24 46.8 515 515 24 10,181 94,1% 10,8	0571515 7 7 0,231 626 618 46,9 0 0,231 4,626 655 29 0 0,231 13,0 13,0 13,0 13,0 7	0,273 94,5% 94,5% 0,273 94,5% 15,1 0,273 94,5% 0,0,8	0,9 0,463 1.254 1.316 62 0 0.463 94,1% 2.7,2	1,0 0,702 1.885 1.855 1.995 10 0,702 93.2% 47,9 47,9 47,9 1,0	80 (VI/M ul Burnsteinstein) 0,9442 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Bild 3: Tabellenblatt des PerModAC-Modells zur Bestimmung der Modellparameter (Seite 1).

Batterie (BAT)	1		(nur bei externer Batterie, sonst leer) Nominale DC-Leistung der Batterie in kW:
Leistungen	Ρ ΒΔΤ	2 495 KM/ DC	P BAT(Laden) W DC 2.031 1.047 600
P BMS.Idle.DC	P BMS	2,495 KW DC	$F_{\text{control}}$ (i.den) b 172 3.06 6.06 1)
		0,0 11 20	Ziel der Berechnung ist die E BAT(Laden) KWh 3,840 3,810 3,810 P BAT ist das Minimum aus:
Kapazität			Bestimmung der Verlustleistungsfunktion P_BAT(Entladen) W DC 2.512 1.250 612 P_BAT,nom(Laden)
siehe Hinweis 2)	E_BAT	3,704 kWh	der Batterie ohne den t_(Entladen) h 1,42 2,84 5,77 P_BAT,nom(Entladen)
E_BAT,nom	-	3,570 kWh	Einfluss des BMS. E_BAT(Entladen) kWh 3,570 3,550 3,530 P_PCE/BA1,nom(Laden)
eta_BAT,RTE,nom	-	93,0%	eta_BAT,RTE - 93,0% 93,2% 92,7%
			Die Enigabe des F_DMS eta_BAI,RIE exxI. BMS - 93,4% 93,9% 94,2% 2)
			dass BAT.c kleiner als null P_BAT(mittel) / P_BAT 035 1246 020 E_BAT ist der Mittelwert der
			wird. Verluste inkl. BMS W/kW 33.8 17.4 9.3 Energie bei Nominalleistung
			Verluste exkl. BMS W/kW 31.9 15.4 7.4
Umwandlungsverluste			
-	BAT.a	7,1659	Nedware and intel DNO (company)
	BAT.b	26,6636	Wirkungsgrad inki, BMS (gemessen)     Linear (Wirkungsgrad inki, BMS (gemessen))
-	BAT.c	0,3004	Wirkungsgrad exk. Dwis (berechner)     Linear (Wirkungsgrad exk. Dwis (berechner))     Space (construction)     Space (construction)
			100%
			-50 ≩
			95% 40 ±
			30 - 30 30 30
			20 5
			> f(x) = 7 1721678356x^2 + 26 66355528x + 0.3001729099 10 <sup>∞</sup>
			85%
			0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0
			P_BAT(mittel) / P_BAT
l eistungsbegrenzung			A B C D
Lossangabegrenzung	CM.mod	CP	E BAT(t)/E BAT(Laden) - 0.85 0.85 1.00 1.00
-	CM.SOE a	0,85	Bei einer Begrenzung der P BAT(t) W DC - 1.105 1.105 1.105
-	CM.SOE b	1,00	Ladeelestung durch eine P AC2BAT(t) WAC - 1.126 1.126 1.126 1.126
-	CM.SOE_c	1,00	_CV" eintragen, ansonsten P_AC2BAT(t)/P_AC2BAT - 1,00 0,40 0,40 0,40 0,40
-	CM.a	0,40	"CP".
-	CM.b	0,40	Woos CV: Abbildung aus Prüfbericht nach Kan, 81.4
	CM.c	0,40	Weinicov Foolidary as Francischer Rep. 6.1.4
			A=Start der CV-Phase 2500
			B=beliebig ≥ 2000
			C=beliebig
			Wenn CP: n <sup>1</sup> coo
			A=1. Stufe 500
			B=2. Stute (sonst = 1) 0 <sup>+</sup>
			D=P BAT @ Ladeschluss F BAT(I) / F BAT(Laden) in %
Bagalahusiahungan			
statisch Laden	1	1	
-	AC2BAT abw.a	156,287	P Überschuss / P BESS nom (Laden) - 0.044 0.091 0.173 0.221 0.261 0.442 0.664 0.881
-	AC2BAT abw.b	46,078	P abw(Laden) WAC 13 16 24 29 34 62 110 173
-	AC2BAT_abw.c	10,990	
statisch, Entladen			
-	BAT2AC_abw.a	-71,680	P_Defizit / P_BESS,nom (Entladen) - 0,057 0,104 0,209 0,261 0,315 0,528 0,789 0,789
	BAT2AC_abw.b	-13,563	P_abw(Entladen) WAC -12 -14 -17 -20 -23 -38 -67 -67
-	BATZAC_abw.c	-11,377	
dynamiech			
-	t TOT	5.0 %	t TOT entregisht dom \$1 \$2 \$3 \$4 \$5 \$6 \$7
-	TAU	2.0 s	
			LE s 8,4 9,4 10,4 8,4 9,4 10,4 9,4
			TAU als Zeitkonstante 58 59 510 511 512 513 514
			entspricht dem Mittelwert <u>t_T s 4,5 5,5 5,0 4,5 5,5 5,0 5,0</u>
			<u>tEs</u> 8,4 9,4 10,4 8,4 9,4 10,4 9,4
Paraita abatta undus t	I	I	
bei SOC max		1	hei SOC may
	PL BWR AC SOF1	2 0 W AC	
-	PL BWR DC SOF1	11.0 W DC	P Vide.DC WDC 11
		,5 20	
bei SOC_min			bei SOC_min
	PL_BWR_AC_SOE0	2,0 W AC	P_V.Idle,AC WAC 5
-	PL_BWR_DC_SOE0	11,0 W DC	P_V,Idle,DC W DC 11
ŀ	PL_PVWR	1,0 W AC	Der Standbyverbrauch des Wechselrichters PL_PVWR und die Summe des Peripherieverbrauchs P_PERI (Leistungssensor,
- D. D.MO. 04-0, 11, D.O.	P_PERI	2,0 W AC	Energiemanager, etc.) sind den Datenblättern der Komponenten zu entnehmen. Wenn kein Standbyverbrauch des BMS bekannt ist, ist der Verbrauch mit P. BMS disichtzusetzen.
P_BMS,Standby,DC	PL_BMS	5,0 W DC	
Sonstige Systemporan	l neter (nicht Bestandtoil d	es Prüfberichte	
-	P PV	5.000 kW DC	DC-Nennleistung des PV-Generators in kWp
-	SOE h1	0.95	SQE-Schwellwert für die PV-Nachladung
-	SOE_h2	-0,05	SOE-Schwellwert für die Netznachladung
		0.7	

Bild 4: Tabellenblatt des PerModAC-Modells zur Bestimmung der Modellparameter (Seite 2).

Die leistungsabhängigen Wirkungsgrade des Batterieumrichters werden in Verlustleistungen umgerechnet, auf die jeweilige Bemessungsleistung normiert und durch ein Polynom zweiten Grades funktional abgebildet. Der Batterieteil wird über einen ähnlichen Ansatz berechnet, mit der Annahme, dass sich die leistungsabhängigen Verluste symmetrisch auf den Lade- und Entladefall aufteilen. Darüber hinaus wird das Ladeschlussverhalten durch Eingabe von bis zu vier Stützpunkten und die Information, ob es sich um eine Konstantleistungs- oder Konstantspannungsphase handelt, bestimmt. Die Übertragung der verschiedenen Prüfergebnisse der Bereitschaftsverluste schließt die Parameterbestimmung ab.

## 4.2 Modellierte Verlustmechanismen

Bei der Systemmodellierung gibt es drei gegensätzliche Anforderungen: Neben einer hohen Modellgenauigkeit soll gleichzeitig ein geringer Aufwand für die Parametrierung sowie eine hohe Allgemeingültigkeit des Simulationsmodells gewährleistet werden. Um dieses Ziel zu erreichen, mussten im Hinblick auf die modellierten Verlustmechanismen Kompromisse bei der Modellentwicklung gemacht werden. Tabelle 3 stellt die bereits implementierten sowie nicht berücksichtigten Einflussfaktoren auf die Systemperformance dar. Neben der Leistungsabhängigkeit der Speicher- und Umwandlungsverluste sind die Standby-Verbräuche und Verluste der Systemregelung in der PerModAC-Version 1.0 abgebildet. Weitere Einflussfaktoren wie die Spannungsabhängigkeit der Wirkungsgrade sowie eine zeitabhängige Überlastfähigkeit der Wechselrichter lassen sich implementieren, sofern die dazu erforderlichen Daten zur Modellparametrierung vorliegen.

Bereits im Modell enthalten Nicht im Modell enthalten Dimensionierungsverluste Leistungsbeschränkung der Wechselrichter sowie Kurzzeitige Überlastfähigkeit der Wechselrichter der Batterie Umwandlungsverluste · Leistungsabhängigkeit der Umwandlungsverluste · Spannungs- und Temperaturabhängigkeit der Umder Wechselrichter und der Batterie wandlungsverluste · Alterungseinflüsse auf die Umwandlungsverluste Leistungsaufnahme des BMS Regelungsverluste • Stationäre Maximum Power Point Tracking (MPPT)- • Dynamische MPPT-Verluste des PV-Wechselrichters Verluste des PV-Wechselrichters Variable Tot- und Einschwingzeiten · Begrenzung der Ladeleistung während der Lade-• Einfluss von Maßnahmen zum Ladungsausgleich schlussphase zwischen den Batteriezellen (Balancing) sowie zur · Hysterese der PV- sowie Netznachladeregelung (Er-Zellpflege haltungsladung) · Leistungsabhängigkeit der stationären Regelabweichungen der Lade- und Entladeleistung · Tot- und Einschwingzeit der Lade und Entladeleistung Energiemanagementverluste Abregelungsverluste aufgrund der Begrenzung der · Prognosebasierte Betriebsstrategien Einspeiseleistung Schieflastbegrenzung Blindleistungsbereitstellung Bereitschaftsverluste · Leistungsaufnahme der Wechselrichter sowie des · Zeitabhängigkeit der Bereitschaftsverluste (Um-BMS im Leerlauf- oder Standby-Modus schaltbedingungen zwischen den Betriebsmodi) • Leistungsaufnahme der Peripheriekomponenten · Selbstentladung der Batterie (Zähler, Energiemanager, etc.)

Tabelle 3: Überblick über die implementierten und fehlenden Einflussfaktoren in PerModAC (v1.0).

Darüber hinaus können regulatorische Anforderungen wie die Blindleistungsbereitstellung und Restriktionen der Schieflastgrenze ebenso wie prognosebasierte Betriebsstrategien in das Modell integriert werden.

# 4.3 Aufbau des Modells

Bild 5 gibt einen schematischen Überblick über den Aufbau des Simulationsmodells. Für jeden Zeitschritt werden zunächst die Wandlungsverluste des PV-Wechselrichters auf Basis der DC-Leistung des PV-Generators bestimmt. Anschließend wird aus der AC-seitigen PV-Leistungsabgabe und der elektrischen Last unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der Peripheriekomponenten die Differenzleistung ermittelt, die als Sollwertvorgabe der AC-seitigen Batteriesystemleistung dient. Im Anschluss erfolgt die Abbildung der einzelnen Verluste des AC-gekoppelten Batteriesystems. Zunächst wird der Einfluss der systemspezifischen Totzeit und Regelgüte sowie der Nennleistungsbegrenzung und Einschwingzeit berücksichtigt. Je nach Ladezustand erfolgt im Ladebetrieb die Begrenzung der maximal zulässigen Ladeleistung. Im Anschluss werden die Umwandlungsverluste des Batterieumrichters und die Verluste des Batteriespeichers berücksichtigt. Aus der ermittelten DC-Batterieleistung lässt sich wiederum die Änderung des Ladezustands ableiten. Letzterer kann zudem von der DC-Leistungsaufnahme des Batteriespeichers und Batterieumrichters während des Bereitschaftsbetriebs beeinflusst werden.



**Bild 5:** Vereinfachte Modellstruktur von PerModAC und Reihenfolge der modellierten Verlustmechanismen

# 5 Validierungsansatz

Zur Validierung des beschriebenen PerModAC-Modells wurden alle vier Systeme unter Laborbedingungen durch Emulation eines einsekündig aufgelösten Erzeugungs- und Lastprofils mittels eines PV-Simulators und einer AC-Last betrieben. Die Erzeugung erfolgte durch Vorgabe einer PV-Generatorleistung von 5 kWp sowie der Bereitstellung eines Temperatur- und Einstrahlungsprofils eines PV-Generators mit 35° Neigung und südlicher Ausrichtung. Prognosebasierte Betriebsstrategien wurden, sofern vorhanden, deaktiviert. Die zeitliche Auflösung der Messung (Messpunkte, siehe Bild 1) betrug 1 s bei System 1, 3 und 4 sowie 2 s bei System 2. Der Messpunkt am Netzanschlusspunkt (G) wurde aus den Zeitreihen der PV-Erzeugung (PVS), Last (L) und Batteriesystemleistung (BS) berechnet. Anschließend wurde das PerModAC-Modell mit den Messdaten der PV-Erzeugung (PVS) und der Last (L) als Eingangszeitreihen simuliert. Die simulierten und gemessenen Zeitreihen der AC- und DC-Batteriesystemleistung dienten zur Validierung des Simulationsmodells. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

#### 6 Validierungsergebnisse

In Bild 6 ist für jedes System die gemessene Zeitreihe der Differenzleistung aus der PV-Erzeugung (PVS) und Last (L) mit der AC-Batteriesystemleistung gegenübergestellt. Die Zeitreihen beginnen und enden allesamt mit einer leeren Batterie. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Systeme wie erwartet mit der Betriebsstrategie der frühzeitigen Batterieladung geladen und anschließend direkt im Rahmen ihrer maximalen Entladeleistung wieder entladen werden.



**Bild 6:** Darstellung der gemessenen Differenzleistung und AC-Batteriesystemleistung der vier untersuchten Systeme- (Grafische Darstellung mit einer Zeitschrittweite von 30 s).

Darüber hinaus gibt es aber auch von dem erwarteten Betriebsverhalten abweichende Situationen. Bei System 1 ist eine verspätet beginnende Batterieladung am Tag 2 (morgens) aufgetreten. System 2 weist an sonnigen Tagen wenige kurze Unterbrechungen der Ladung auf. Darüber hinaus trittkommt es im vollgeladenen Zustand gelegentlich zureine Nachladung bzw. zumein Zellpflege-Balancing. Dies ist ebenfalls bei System 3 an Tag 1 (mittags) und Tag 6 (morgens und nachmittags) der Fall. Zuletzt weist System 4 ein zyklisierendes Be- und Entladeverhalten im vollgeladenen Zustand auf. Aus Platzgründen wird von weiteren Darstellungen der Roh-Messdaten abgesehen.

## 6.1 Anpassung der Modell-Parameter

Ziel des PerModAC-Modells ist die simulative Abbildung von AC-gekoppelten Batteriesystemen im Neuzustand bei gleichzeitig einfacher Parametrierung des Modells durch Übernahme der Informationen der Prüfberichte nach Effizienzleitfaden. Dieser erfordert aktuell keine Durchführung einer Validierungsmessung, so wie sie für diesen Beitrag durchgeführt wurde. Dabei lassen sich gegenüber den Ergebnissen nach dem Prüfleitfaden weitere wertvolle Erkenntnisse für die Parametrierung des Modells aus einem mehrtägigen Anwendungstest ableiten. Die Modellvalidierung erfolgt daher im weiteren Verlauf mit dem Original-Parametersatz (Quelle: Prüfbericht) und mit einem angepassten Parametersatz (Quelle: Validierungswoche), um aufzuzeigen, welche zusätzlichen Vorteile eine detaillierte Kenntnis der Funktionsweise der Systeme im Realbetrieb mit sich bringt. Tabelle 4 stellt die Beobachtungen und abgeleiteten Änderungen gegenüber.

Tabelle 4:	Systemspezifische Anpassungen des PerModAC-Modells oder der Eingangsparameter
	nach Detailanalyse der Messdaten der Validierungswoche.

	Beobachtung	Änderung						
	System 1							
•	Der Batterieteil enthält zusätzliche Leistungselektro- nik, sodass sich die Batterieverluste nicht aus- schließlich auf symmetrische Lade- und Entladever- luste auf Zellebene sowie den BMS-Verbrauch zu- rückführen lassen.     Verri 0,15	ingerung der konstanten, batterieinternen Ver- eistung im Ladefall gegenüber dem Entladefall 9 W. ingerung der mittleren Speicherkapazität um kWh.						
•	Die im Prüfbericht ermittelte Speicherkapazität wur- de systematisch, leicht unterschritten.							
•	• <u>Fazit für PerModAC</u> : Für Batterien mit integrierter Leistungselektronik sollte ggf. eine weitere auslastungsab- hängige Verlustleistungsfunktion integriert werden. Offen bleibt dabei, wie diese mit Ergebnissen des Prüfbe- richts parametriert werden kann.							
	System 2							
•	Es kommt mehrmals am Tag im vollgeladenen Zu- stand zu einer Art Zellpflege-Balancing. Das System ist bereits zwei Jahre alt.     Einfü	ührung einer konstanten, zusätzlichen batteriein- en Verlustleistung von 160 W bei einem State- nergy (SOE) von größer 90%.						
•	<ul> <li><u>Fazit f ür PerModAC</u>: Beobachteter Verlust sollte bei Systemer gig auftreten. Daher sind keine weiteren Änderungen notwend</li> </ul>	n im Neuzustand nicht oder nur sehr geringfü- dig.						
	System 3							
•	An zwei Tagen tritt eine Art Zellpflege-Balancing auf.     Einfü Das System ist bereits drei Jahre alt.     terne	ührung einer konstanten, zusätzlichen batteriein- en Verlustleistung von 110 W bei SOE > 90%.						
•	• <u>Fazit für PerModAC</u> : Beobachteter Verlust sollte bei Systemen im Neuzustand nicht oder nur sehr geringfü- gig auftreten. Daher sind keine weiteren Änderungen notwendig.							
	System 4							
•	Auftreten einer zyklisierenden Ladung und Entla- dung nach Abschluss der normalen Ladephase.     Nach	nbildung des zyklisierenden Verhaltens über n zeitlich variablen Standby-Verbrauch.						
•	Die im Prüfbericht ermittelte Speicherkapazität wur-     Erhö     de systematisch, leicht überschritten.     0,35	bhung der mittleren Speicherkapazität um kWh.						
•	• <u>Fazit für PerModAC</u> : Mit Anwendung des final veröffentlichen Effizienzleitfadens wäre die mittlere Speicher- kapazität genauer ermittelt worden. Zyklisierende Standby-Phasen werden ebenfalls im Prüfbericht doku- mentiert und können daher im Modell berücksichtigt werden.							

#### 6.2 Vergleich der Umwandlungswirkungsgrade

Zunächst werden die Umwandlungswirkungsgrade für die Batterieladung (AC2BAT)

$$\overline{\eta}_{AC2BAT} = \frac{\int P_{BAT (Laden)} \cdot dt}{\int P_{BS (Laden)} \cdot dt} = \frac{DC-Batterieladung}{AC-Batterieladung}$$
(1)

und Batterieentladung (BAT2AC)

$$\overline{\eta}_{\text{BAT2AC}} = \frac{\int P_{\text{BS (Entladen)}} \cdot dt}{\int P_{\text{BAT (Entladen)}} \cdot dt} = \frac{\text{AC-Batterieentladung}}{\text{DC-Batterieentladung}}$$
(2)

aus der Messung und Simulation über den Zeitraum des Validierungsprofils zur Überprüfung der Umrichter-Wirkungsgrade berechnet (Bild 7, oben). Darüber hinaus werden der mittlere Umwandlungswirkungsgrad der Batterie

$$\overline{\eta}_{BAT} = \frac{\int P_{BAT (Entladen)} \cdot dt}{\int P_{BAT (Laden)} \cdot dt} = \frac{DC-Batterieentladung}{DC-Batterieladung}$$
(3)

und der AC-Systemnutzungsgrad

$$\overline{\eta}_{AC} = \frac{\int P_{BS (Entladen)} \cdot dt}{\int P_{BS (Laden)} \cdot dt} = \frac{AC-Batterieentladung}{AC-Batterieladung}$$
(4)

als weitere Vergleichsgrößen bestimmt (Bild 7, unten).





Die Abweichungen der Umwandlungswirkungsgrade zwischen Messung und Simulation sind mit kleiner 0,6 Prozentpunkten (System 1 bis 3) vernachlässigbar (Bild 7, oben). Lediglich bei System 4 treten ohne Anpassungen Abweichungen von +1,7 Prozentpunkte bei der Ladung und -3,3 Prozentpunkte bei der Entladung auf. Dies ist jedoch nicht auf eine fehlerhafte Abbildung der Verlustleistungsfunktion zurückzuführen, sondern auf eine abweichende Auslastung des Batterieumrichters zwischen Messung und Simulation. Nach der Anpassung des Systems 4 auf die zyklisierende Standby-Phase wird der Batterieumrichter im Ladefall verstärkt bei niedrigeren Leistungen betrieben, sodass der Wirkungsgrad sinkt. Der simulierte Wirkungsgrad im Entladefall steigt bedingt durch die gestiegene Speicherkapazität an. Dies ist auf eine erhöhte Nutzungsdauer bei mittleren Leistungen und eine verkürzte Dauer im Standby-Modus zurückzuführen. Nach den Anpassungen sind die Abweichungen kleiner als 0,8 Prozentpunkte.

Die mittleren Umwandlungswirkungsgrade der Batterie zeigen Abweichungen zwischen -0,8 und +3,5 Prozentpunkte und damit eine größere Ungenauigkeit als die Umwandlungswirkungsgrade des Batterieumrichters (Bild 7, unten links). Die Fehlerursache ist dabei im Wesentlichen die Verlustleistung durch das Zellpflege-Balancing bei System 2 und 3. Nach Anwendung der beschriebenen Anpassungen reduzieren sich die Abweichungen auf +0,2 bis +0,4 Prozentpunkte. Dies zeigt zugleich auf, dass Simulationsmodelle wie PerModAC in Zukunft vor allem um Modellparameter und -funktionen zum Balancing ergänzt werden sollten.

Mit den bisherigen Ausführungen wurde deutlich gemacht, dass die Umwandlungswirkungsgrade AC-gekoppelter PV-Batteriesysteme im Neuzustand mit dem PerModAC-Modell gut abgebildet werden können. Betrachtet man den AC-Systemnutzungsgrad, also das Verhältnis aus AC-seitig entnommener zu AC-seitig zugeführter Energie während der Validierungswoche, ergeben sich nur geringe Abweichungen (Bild 7, unten rechts). Folglich werden die Speichersysteme hinsichtlich ihrer Effizienz sehr gut abgebildet. Wie in [1] ausführlich beschrieben ist, eignet sich der AC-Systemnutzungsgrad jedoch nur bedingt für eine ökonomische Bilanzierung des Systemnutzens. Stationäre und dynamische Regelabweichungen führen darüber hinaus zu Unterschieden in der Netzeinspeisung und dem Netzbezug. Weiterhin kann die Speicherkapazität trotz perfekt simulierter Umwandlungswirkungsgrade zu klein oder zu groß abgebildet sein, was sich ebenfalls in unterschiedlichen Energiemengen beim Netzaustausch widerspiegelt. Daher werden nachfolgend noch die gemessenen und simulierten Energiemengen einem Vergleich unterzogen.

#### 6.3 Vergleich der Energiesummen

Möchte man den ökonomischen Beitrag eines PV-Batteriesystems zur Eigenversorgung bewerten, ist in erster Linie dessen Beitrag zur Reduktion des Netzbezugs von Interesse. Durch die Speicherung der überschüssigen PV-Energie geht die Verringerung der Netzeinspeisung einher, die sich ebenfalls ökonomisch auswirkt. Ohne die Anpassungen aus Tabelle 4 wird bei System 1 die Netzeinspeisung und der Netzbezug aufgrund der zu hohen Ladeverluste leicht unterschätzt (-1,1 kWh / -0,4 kWh). Bei System 2 (+1,5 kWh / 0 kWh) und System 3 (+0,4 kWh / -0,1 kWh) führt vor allem das nicht berücksichtigte Balancing zu einer Überschätzung der Netzeinspeisung, während der Netzbezug korrekt abgebildet wird.



**Bild 8:** Vergleich der wesentlichen Energiesummen der Messung und Simulation auf Basis der Validierungswoche für System 1 bis 4 (Angaben in kWh).

Bei System 4 (+1,7 kWh / +1,2 kWh) ergeben sich die größten Abweichungen, da vor allem das zyklisierende Standby-Verhalten die Netzeinspeisung beeinflusst.

Mit Anwendung der Anpassungen aus Tabelle 4, die die spezifischen Eigenarten der unterschiedlichen Systeme berücksichtigen, können die Abweichungen der Netzaustauschenergie für alle Systeme auf weniger als 0,4 kWh reduziert werden. Insgesamt zeigen damit alle simulierten Energiesummen mit Abweichungen von maximal 1,5% sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Werten (Bild 8).

# 7 Fazit und Ausblick

Mit PerModAC wurde ein Simulationsmodell vorgestellt, mit dem sich AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s sehr detailliert und trotzdem schnell (Rechenzeit ca. 40 s für eine Jahressimulation) simulieren lassen. Die Parametrierung des Modells auf Basis der Prüfberichte nach dem *Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme* ist hinreichend genau. Gleichzeitig wurde ersichtlich, dass vor allem die Abbildung des Zell-Balancings sowie die genaue Abbildung des generieinternen Verlustleistung Herausforderungen für die weitere Entwicklung des generischen Modells darstellen.

## Danksagung

Die präsentierten Ergebnisse sind unter anderem im "Verbundvorhaben: Langlebige Qualitätsmodule für PV-Systeme mit Speicheroption und intelligentem Energiemanagement (LAURA) Teilvorhaben: Energiemanagement und Optimierung von Photovoltaiksystemen mit Batterie- und Wärmespeichern (PVstore)" entstanden (Förderkennzeichen: 0325716G). Darüber hinaus basieren Teilergebnisse auf der Arbeit im Forschungsvorhaben "Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher" (Förderkennzeichen: 0325666). Die Autoren danken dem Projektträger Jülich (PtJ) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Ein besonderer Dank gilt zudem den Co-Autoren und ihren Teams für die Bereitstellung der Prüfberichte und Hintergrundinformationen zur Parametrierung und Validierung des vorgestellten PerModAC-Simulationsmodells.

#### Literatur

- [1] J. Weniger, T. Tjaden, und V. Quaschning, "Vergleich verschiedener Kennzahlen zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen", in *32. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, 2017.
- [2] BVES Bundesverband Energiespeicher e.V. und BSW Bundesverband Solarwirtschaft e.V., "Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme", Berlin, März 2017.
- [3] J. Weniger und T. Tjaden, "Performance-Simulationsmodell für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme (PerModAC Version 1.0)", *Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://pvspeicher.htwberlin.de/permod.
- [4] J. Kalisch, T. Schmidt, D. Heinemann, und E. Lorenz, "Continuous meteorological observations in high-resolution (1Hz) at University of Oldenburg in 2014". 10.1594/PANGAEA.847830, 2015.
- [5] T. Tjaden, J. Bergner, J. Weniger, und V. Quaschning, "Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis", *Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://pvspeicher.htw-berlin.de/daten/.