Offenes Simulationsmodell für netzgekoppelte PV-Batteriesysteme

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

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

[2]Austrian Institute of Technology (AIT), 1210 Wien
[3]Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), 31860 Emmerthal
[4]Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA), 52066 Aachen
[5]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 Be- und Entladung des Batteriespeichers (BAT-Pfad) erfolgt über einen Batterieumrichter (AC2BAT- und BAT2AC-Pfad). Bild 1 stellt die wesentlichen Komponenten eines AC-gekoppelten 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.

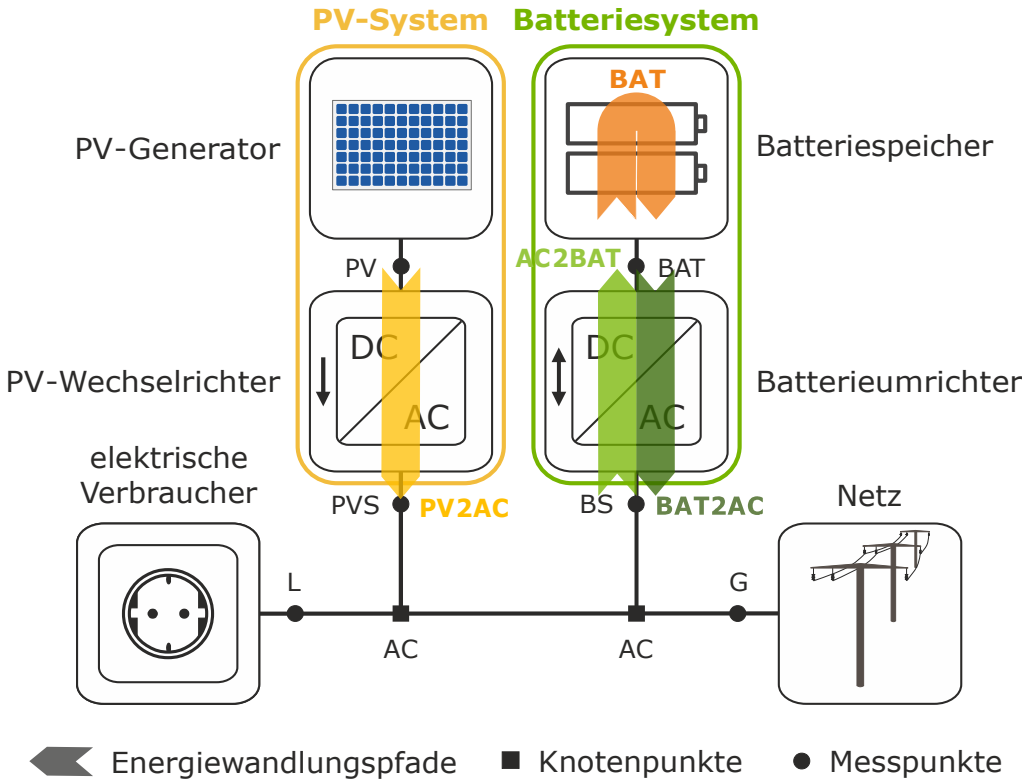


Bild 1: Komponenten, Messpunkte und Umwandlungspfade bei AC-gekoppelten PV-Batteriesystemen (Nomenklatur nach dem PerModAC-Modell).

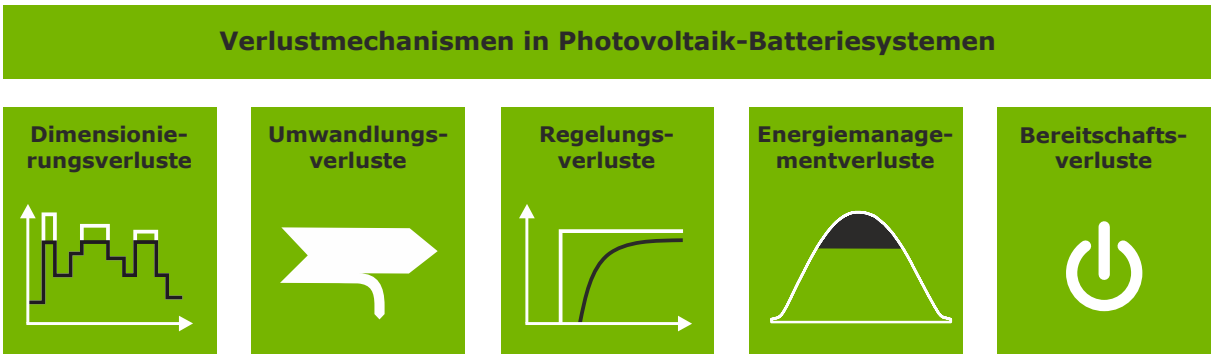


Bild 2: Klassifizierung der Energieverlustmechanismen in netzgekoppelten PV-Batteriesystemen.

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.

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

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

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 Konstantspannungs- oder Konstantleistungsphase vor.

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

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

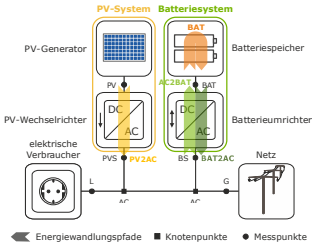
4 PerModAC-Simulationsmodell

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.

Nomenklatur		Version vom:	Modellparamter sind	grau	markiert
Effizienzleitfaden	PerModAC-Modell	03.03.17	Eingabefelder/Messwerte	grün	markiert

PV-Wechselrichter (PV2AC)

Leistungen

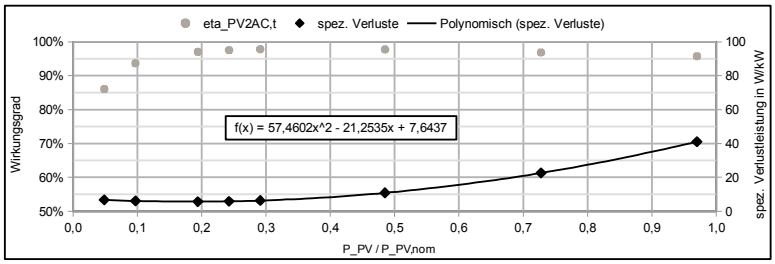
P_PV,nom	P_PV2AC_DC	4,742 kW DC
P_PV-WR,nom	P_PC2AC_AC	4,600 kW AC

Umwandlungsverluste

-	PV2AC.a	57,4602
-	PV2AC.b	-21,2535
-	PV2AC.c	7,6437

U_PVS,DC = 400 V

P_PV-WR / P_PV-WR,nom		0,043	0,094	0,194	0,244	0,293	0,489	0,727	0,958
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	W AC	198	431	893	1.122	1.350	2.249	3.343	4.405
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



Batterieumrichter (BAT2AC)

Leistungen

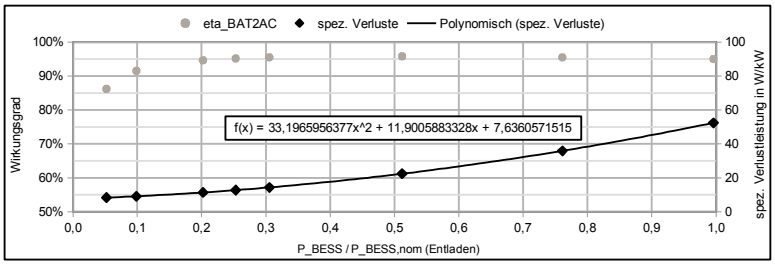
P_BESS,nom (Entladen)	P_BAT2AC	2,370 kW AC

Umwandlungsverluste

-	BAT2AC.a	33,1966
-	BAT2AC.b	11,9006
-	BAT2AC.c	7,6361

U_BAT,min = 44,7 V
U_BAT,mittel = 45,6 V
U_BAT,max = 46,2 V

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
P_BESS	W AC	123	234	479	600	724	1.213	1.804	2.361
P_NETZ(Bezug)	W AC	12	14	17	20	23	38	67	133
P_NETZ(Abgabe)	W AC	0	0	0	0	0	0	0	0
P_BESS/P_BESS,nom	-	0,052	0,099	0,202	0,253	0,305	0,512	0,761	0,996
eta_BAT2AC	-	86,2%	91,5%	94,7%	95,2%	95,5%	95,8%	95,5%	95,0%
spez. Verluste	W/kW	8,3	9,1	11,4	12,8	14,4	22,4	35,9	52,4



Batterieumrichter (AC2BAT)

Leistungen

P_BESS,nom (Laden)	P_AC2BAT	2,840 kW AC

Umwandlungsverluste

-	AC2BAT.a	54,5926
-	AC2BAT.b	23,0135
-	AC2BAT.c	4,7813

U_BAT,min = 44,7 V
U_BAT,mittel = 45,6 V
U_BAT,max = 46,2 V

P_BESS / P_BESS,nom (Laden)		0,049	0,097	0,181	0,231	0,273	0,463	0,702	0,942
P_PV-WR	W AC	125	259	492	626	742	1.254	1.885	2.502
P_BAT	W DC	121	254	485	618	733	1.239	1.859	2.462
U_BAT	V DC	46,5	46,7	46,8	46,9	46,9	47,2	47,5	47,7
P_BESS	W AC	138	275	515	655	776	1.316	1.995	2.675
P_NETZ(Bezug)	W AC	13	16	24	29	34	62	110	173
P_NETZ(Abgabe)	W AC	0	0	0	0	0	0	0	0
P_BESS/P_BESS,nom	-	0,049	0,097	0,181	0,231	0,273	0,463	0,702	0,942
eta_AC2BAT	-	87,6%	92,2%	94,1%	94,4%	94,5%	94,1%	93,2%	92,0%
spez. Verluste	W/kW	6,0	7,5	10,8	13,0	15,1	27,2	47,9	74,9

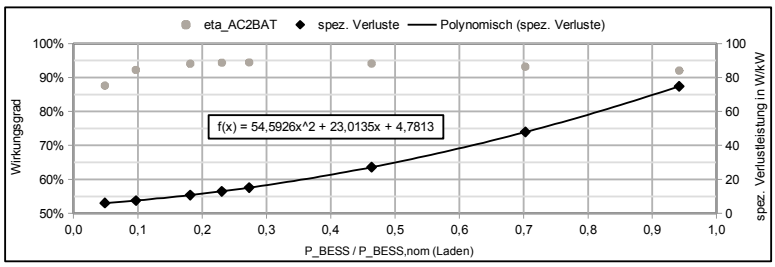


Bild 3: Tabellenblatt des PerModAC-Modells zur Bestimmung der Modellparameter (Seite 1).

Batterie (BAT) — (nur bei externer Batterie, sonst leer) Nominale DC-Leistung der Batterie in kW:

Leistungen		
siehe Hinweis 1)	P_BAT	2,495 kW DC
P_BMS,Idle,DC	P_BMS	5,0 W DC
Kapazität		
siehe Hinweis 2)	E_BAT	3,704 kWh
E_BAT,nom	-	3,570 kWh
eta_BAT,RTE,nom	-	93,0%
Umwandlungsverluste		
-	BAT.a	7,1659
-	BAT.b	26,6636
-	BAT.c	0,3004
Leistungsbegrenzung		
	CM.mod	CP
-	CM.SOE_a	0,85
-	CM.SOE_b	1,00
-	CM.SOE_c	1,00
-	CM.a	0,40
-	CM.b	0,40
-	CM.c	0,40

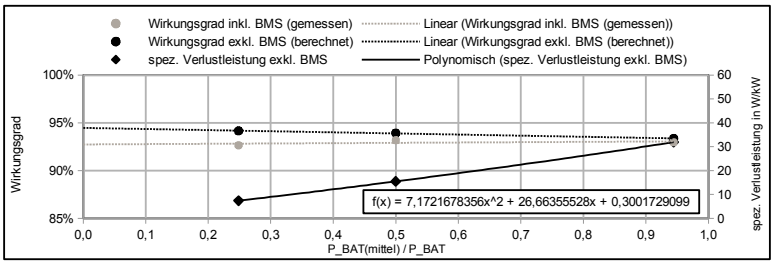
Ziel der Berechnung ist die Bestimmung der Verlustleistungsfunktion der Batterie ohne den Einfluss des BMS.

Die Eingabe des P_BMS sollte nicht dazu führen, dass BAT.c kleiner als null wird.

P_BAT(Laden)	W DC	2.231	1.247	629	
t_(Laden)	h	1,72	3,06	6,06	
E_BAT(Laden)	kWh	3,840	3,810	3,810	
P_BAT(Entladen)	W DC	2.512	1.250	612	
t_(Entladen)	h	1,42	2,84	5,77	
E_BAT(Entladen)	kWh	3,570	3,550	3,530	
eta_BAT,RTE	-	93,0%	93,2%	92,7%	
eta_BAT,RTE exkl. BMS	-	93,4%	93,9%	94,2%	
P_BAT(mittel)	W	2358	1248	620	
P_BAT(mittel) / P_BAT	-	0,95	0,50	0,25	
Verluste inkl. BMS	W/kW	33,8	17,4	9,3	
Verluste exkl. BMS	W/kW	31,9	15,4	7,4	

1)
P_BAT ist das Minimum aus:
P_BAT,nom(Laden)
P_BAT,nom(Entladen)
P_PCE/BAT,nom(Laden)
P_PCE/BAT,nom(Entladen)

2)
E_BAT ist der Mittelwert der geladenen und entladenen Energie bei Nominalleistung

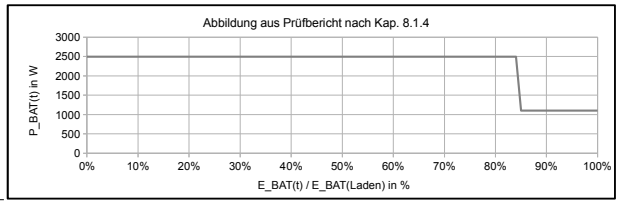


Bei einer Begrenzung der Ladeleistung durch eine CV-Phase bei CM.mod ein „CV" eintragen, ansonsten „CP".

			A	B	C	D
E_BAT(t)/E_BAT(Laden)	-	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00
P_BAT(t)	W DC	-	1.105	1.105	1.105	1.105
P_AC2BAT(t)	W AC	-	1.126	1.126	1.126	1.126
P_AC2BAT(t)/P_AC2BAT	-	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40

Wenn CV:
4 Stützstellen mit
A=Start der CV-Phase
B=beliebig
C=beliebig
D=P_BAT @ Ladeschluss

Wenn CP:
A=1. Stufe
B=2. Stufe (sonst = 1)
C=3. Stufe (sonst = 1)
D=P_BAT @ Ladeschluss



Regelabweichungen

statisch, Laden										
-	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)	W AC	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)	W AC	-12	-14	-17	-20	-23	-38	-67	-67
-	BAT2AC_abw.c	-11,377										
dynamisch										
-	t_TOT	5,0 s			**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**	**S7**	
-	TAU	2,0 s	t_TOT entspricht dem Mittelwert von t_T.	t_T s	4,5	5,5	5,0	4,5	5,5	5,0	5,0	
				t_E s	8,4	9,4	10,4	8,4	9,4	10,4	9,4	
					S8	**S9**	**S10**	**S11**	**S12**	**S13**	**S14**	
			TAU als Zeitkonstante entspricht dem Mittelwert von t_E.	t_T s	4,5	5,5	5,0	4,5	5,5	5,0	5,0	
				t_E s	8,4	9,4	10,4	8,4	9,4	10,4	9,4	

Bereitschaftsverluste

bei SOC_max			bei SOC_max		
-	PL_BWR_AC_SOE1	2,0 W AC	P_V,Idle,AC	W AC	5
-	PL_BWR_DC_SOE1	11,0 W DC	P_V,Idle,DC	W DC	11
bei SOC_min			bei SOC_min		
-	PL_BWR_AC_SOE0	2,0 W AC	P_V,Idle,AC	W AC	5
-	PL_BWR_DC_SOE0	11,0 W DC	P_V,Idle,DC	W DC	11
-	PL_PVWR	1,0 W AC			
-	P_PERI	2,0 W AC			
P_BMS,Standby,DC	PL_BMS	5,0 W DC			

Der Standbyverbrauch des Wechselrichters PL_PVWR und die Summe des Peripherieverbrauchs P_PERI (Leistungssensor, Energiemanager, etc.) sind den Datenblättern der Komponenten zu entnehmen. Wenn kein Standbyverbrauch des BMS bekannt ist, ist der Verbrauch mit P_BMS gleichzusetzen.

Sonstige Systemparameter (nicht Bestandteil des Prüfberichts)			
-	P_PV	5,000 kW DC	DC-Nennleistung des PV-Generators in kWp
-	SOE_h1	0,95	SOE-Schwellwert für die PV-Nachladung
-	SOE_h2	-0,05	SOE-Schwellwert für die Netznachladung
-	pac2gmax	0,7	Einspeisegrenze in kW/kWp

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.

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

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

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.

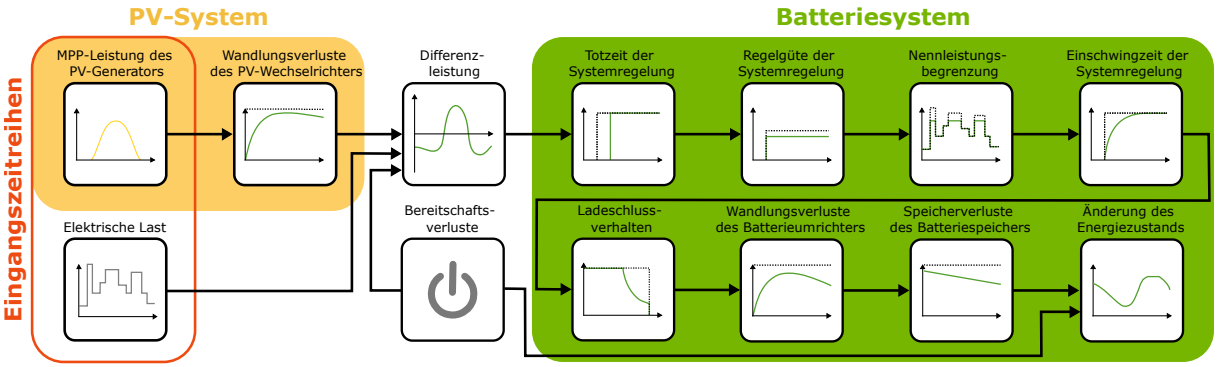


Bild 5: Vereinfachte Modellstruktur von PerModAC und Reihenfolge der modellierten Verlustmechanismen

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.

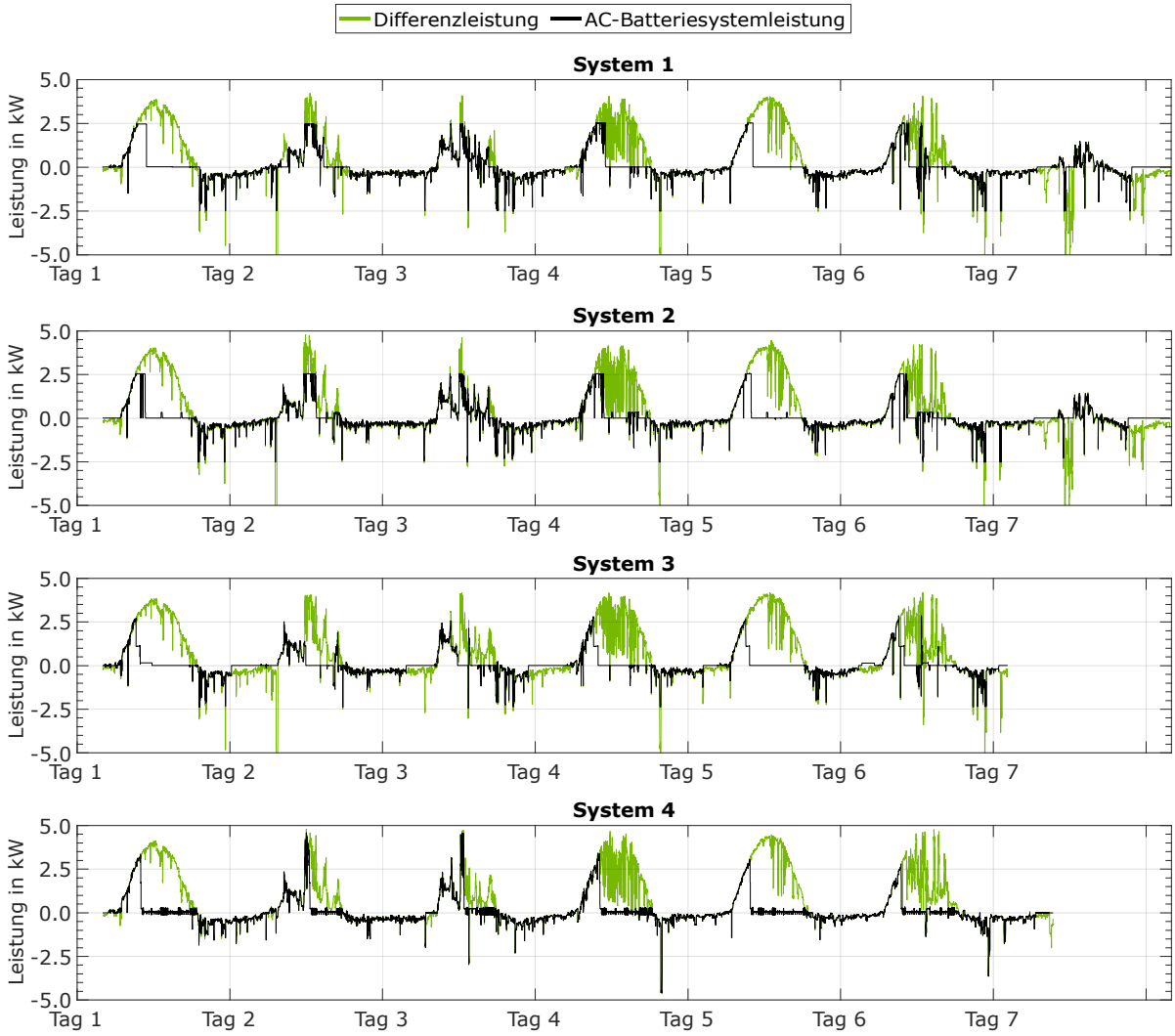


Bild 6: Darstellung der gemessenen Differenzleistung und AC-Batteriesystemleistung der vier untersuchten Systeme. (Grafische Darstellung mit einer Zeitschrittweite von 30 s).

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 Leistungselektronik, sodass sich die Batterieverluste nicht ausschließlich auf symmetrische Lade- und Entladeverluste auf Zellebene sowie den BMS-Verbrauch zurückführen lassen. • Die im Prüfbericht ermittelte Speicherkapazität wurde systematisch, leicht unterschritten.	• Verringerung der konstanten, batterieinternen Verlustleistung im Ladefall gegenüber dem Entladefall um 9 W. • Verringerung der mittleren Speicherkapazität um 0,15 kWh.
• Fazit für PerModAC: Für Batterien mit integrierter Leistungselektronik sollte ggf. eine weitere auslastungsabhängige Verlustleistungsfunktion integriert werden. Offen bleibt dabei, wie diese mit Ergebnissen des Prüfberichts parametriert werden kann.	
System 2	
• Es kommt mehrmals am Tag im vollgeladenen Zustand zu einer Art Zellpflege-Balancing. Das System ist bereits zwei Jahre alt.	• Einführung einer konstanten, zusätzlichen batterieinternen Verlustleistung von 160 W bei einem State-of-Energy (SOE) von größer 90%.
• Fazit für PerModAC: Beobachteter Verlust sollte bei Systemen im Neuzustand nicht oder nur sehr geringfügig auftreten. Daher sind keine weiteren Änderungen notwendig.	
System 3	
• An zwei Tagen tritt eine Art Zellpflege-Balancing auf. Das System ist bereits drei Jahre alt.	• Einführung einer konstanten, zusätzlichen batterieinternen Verlustleistung von 110 W bei SOE > 90%.
• Fazit für PerModAC: Beobachteter Verlust sollte bei Systemen im Neuzustand nicht oder nur sehr geringfügig auftreten. Daher sind keine weiteren Änderungen notwendig.	
System 4	
• Auftreten einer zyklisierenden Ladung und Entladung nach Abschluss der normalen Ladephase. • Die im Prüfbericht ermittelte Speicherkapazität wurde systematisch, leicht überschritten.	• Nachbildung des zyklisierenden Verhaltens über einen zeitlich variablen Standby-Verbrauch. • Erhöhung der mittleren Speicherkapazität um 0,35 kWh.
• Fazit für PerModAC: Mit Anwendung des final veröffentlichen Effizienzleitfadens wäre die mittlere Speicherkapazität genauer ermittelt worden. Zyklisierende Standby-Phasen werden ebenfalls im Prüfbericht dokumentiert und können daher im Modell berücksichtigt werden.	

6.2 Vergleich der Umwandlungswirkungsgrade

Zunächst werden die Umwandlungswirkungsgrade für die Batterieladung (AC2BAT)

$$\overline{\eta}_{\text{AC2BAT}} = \frac{\int P_{\text{BAT (Laden)}} \cdot \mathrm{d}t}{\int P_{\text{BS (Laden)}} \cdot \mathrm{d}t} = \frac{\text{DC-Batterieladung}}{\text{AC-Batterieladung}} \tag{1}$$

und Batterieentladung (BAT2AC)

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

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

$$\overline{\eta}_{\text{BAT}} = \frac{\int P_{\text{BAT (Entladen)}} \cdot \mathrm{d}t}{\int P_{\text{BAT (Laden)}} \cdot \mathrm{d}t} = \frac{\text{DC-Batterieentladung}}{\text{DC-Batterieladung}} \tag{3}$$

und der AC-Systemnutzungsgrad

$$\overline{\eta}_{\text{AC}} = \frac{\int P_{\text{BS (Entladen)}} \cdot \mathrm{d}t}{\int P_{\text{BS (Laden)}} \cdot \mathrm{d}t} = \frac{\text{AC-Batterieentladung}}{\text{AC-Batterieladung}} \tag{4}$$

als weitere Vergleichsgrößen bestimmt (Bild 7, unten).

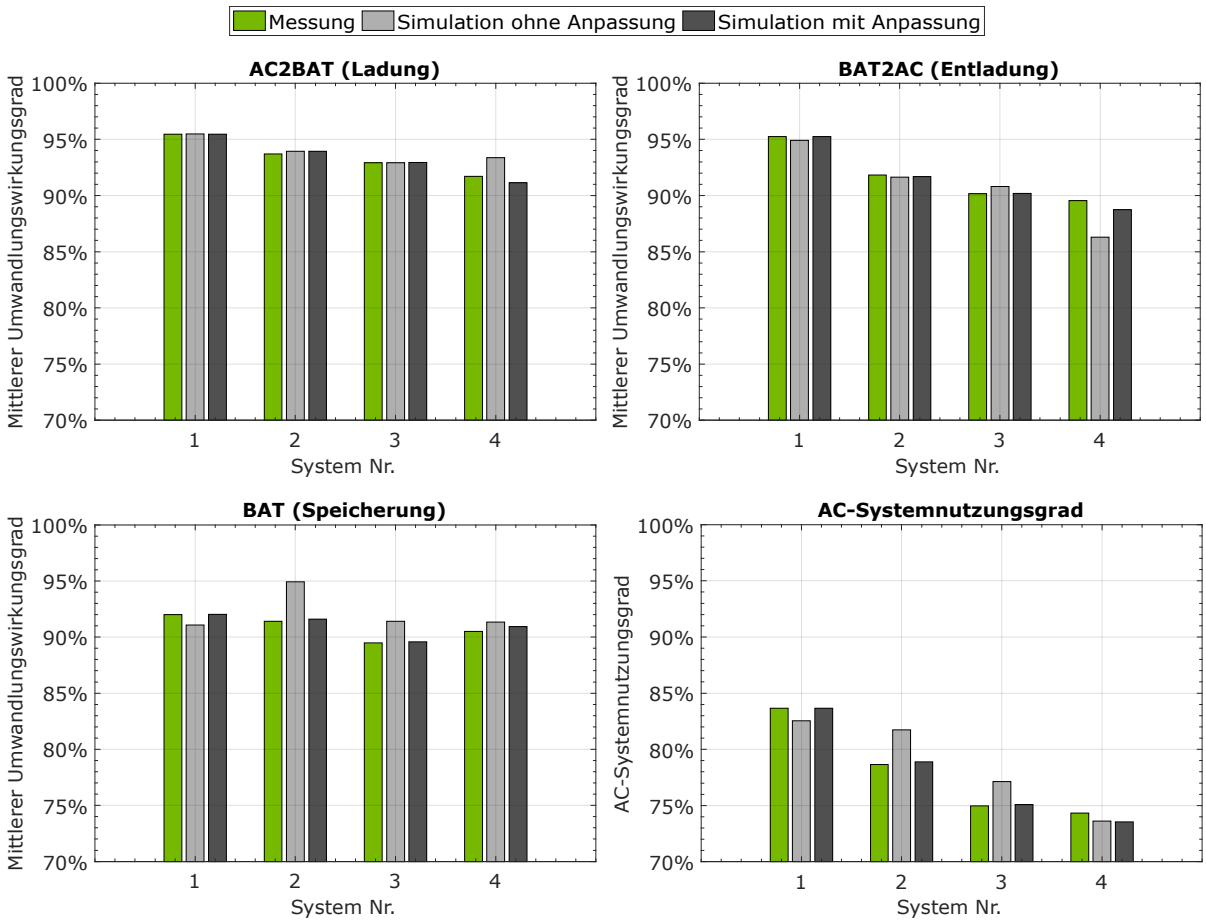


Bild 7: Mittlere Umwandlungswirkungsgrade der Ladung, Entladung und Batterie sowie AC-Systemnutzungsgrad bezogen auf die Messung und Simulation (Darstellung der Ergebnisse ohne und mit Anpassung der Parameter nach Tabelle 4).

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.

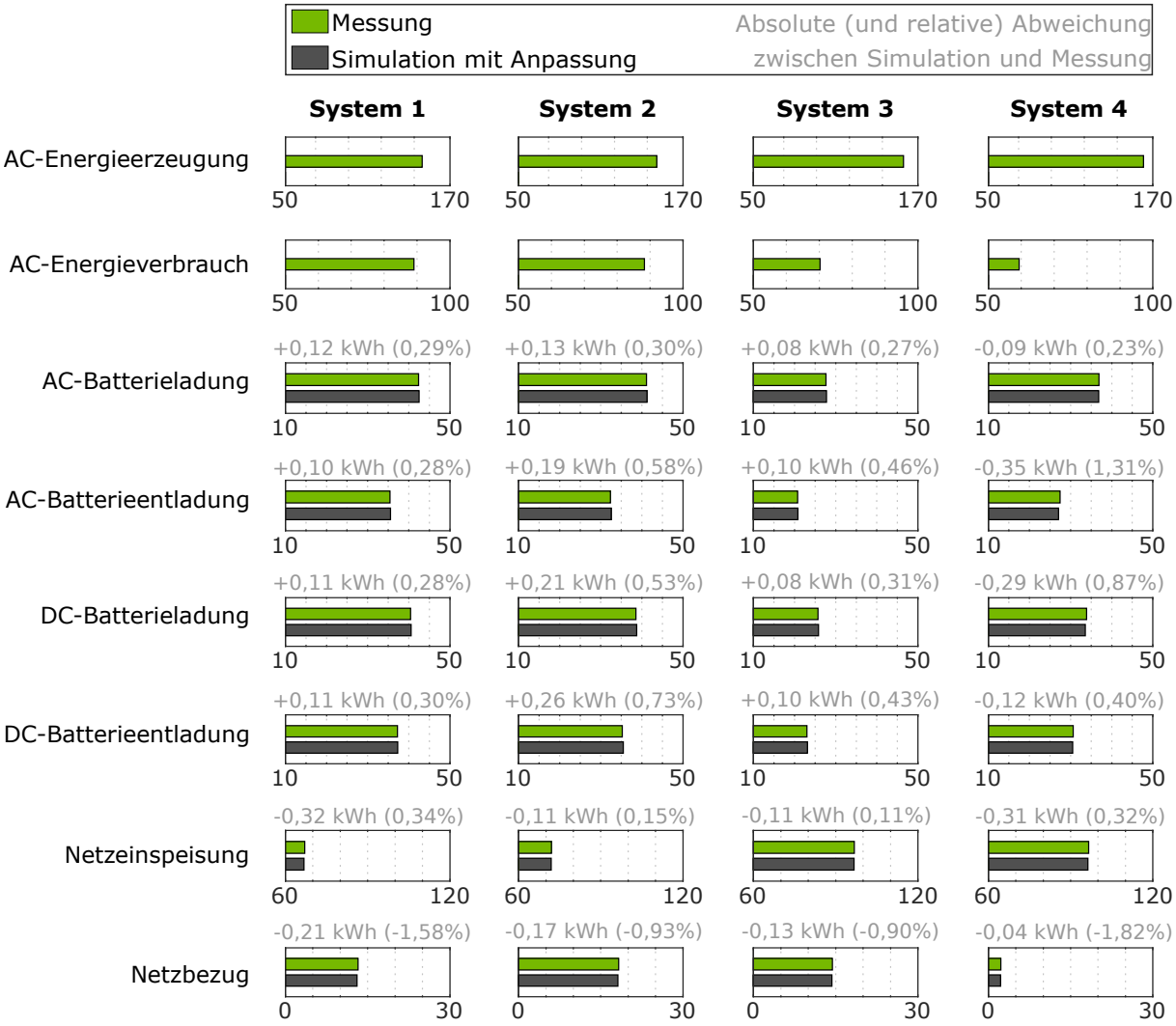


Bild 8: Vergleich der wesentlichen Energiesummen der Messung und Simulation auf Basis der Validierungswoche für System 1 bis 4 (Angaben in kWh).

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 der batterieinternen 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.htw-berlin.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/.