

# Performancemessungen an alternativen PV-Speichersystemen

Robert Schreier, Nina Munzke, Marc Hiller

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel.: +49721 608 28323, Fax: +49721 608 28284

E-Mail: [robert.schreier@kit.edu](mailto:robert.schreier@kit.edu)

Internet: [www.batterietechnikum.kit.edu](http://www.batterietechnikum.kit.edu)

## Motivation

Elektrische Energiespeicher in Verbindung mit erneuerbaren Energien, können einen entscheidenden Beitrag zur Strombereitstellung und zur Erreichung der Ziele der Energiewende liefern. Ihr Einsatz wird jedoch erst dann in großem Maße stattfinden, wenn der von ihnen bereitgestellte Strom für den jeweiligen Anwender auch wirtschaftlich ist. Durch die Preisentwicklung im Heimspeichermarkt, sowie die Weiterentwicklung bei stationären Speichersystemen gibt es bereits Systeme, deren Einsatz in Verbindung mit Photovoltaik (PV)-Anlagen in Deutschland wirtschaftlicher sein kann, als der reine Netzbezug.

Einen erheblichen Einfluss auf die Speicherkosten haben dabei nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die Qualität bzw. die Performance des Speichers im Betrieb. 2017 wurde für die Vermessung von PV-Heimspeichersystemen der Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme veröffentlicht [1]. Dieser beschreibt unter anderem die Vermessung der Effizienz, der leistungselektronischen Komponenten eines Systems, der Batterie, des Standby-Verbrauches und der Regeleffizienz von Speichersystemen. Der Fokus des Leitfadens liegt auf der Vermessung von Speichersystemen auf Li-Ionen Basis.

Neben Lithium-Ionen-Batteriesystemen, gibt es inzwischen Systeme mit alternativen Batterietechnologien (z. B. Natrium-Ionen- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien), sowie Stecker-Speicher-Geräte, welche in Privathaushalten vermehrt zum Einsatz kommen. Nicht auf Lithium basierte Batterietechnologien bieten das Potential für sicherere und, durch den Einsatz günstigerer Rohstoffe, insgesamt günstigere Alternativen. Das Konzept der Stecker-Speicher soll zudem die schnellere Verbreitung von Batteriespeichern ermöglichen, da für die Installation keine Fachkraft erforderlich ist. Es ist zu erwarten, dass der Marktanteil alternativer Batterietechnologien und neuer Speichersystemkonzepte am Hausspeichermarkt in absehbarer Zeit steigen wird.

Für die am Markt erhältlichen alternativen Speichersysteme gibt es bisher jedoch keine vergleichenden Effizienzmessungen und Analysen zu den im Betrieb auftretenden Effizienzverlusten. Auch ist unklar, wie sich das Verhalten der Batterien auf den realen Betrieb als PV-Speichersystem auswirkt. Im Rahmen dieses Beitrags sollen die Anwendbarkeit der bereits bestehenden Vermessungsvorschriften getestet sowie notwendige Anpassungen oder Erweiterungen aufgezeigt werden.

Am KIT stehen hierzu durch das Projekt „Perform“ Speichersysteme und Prüfstände für die Vermessungen zur Verfügung.

## Methodik

### Vorgehen

Um die Anwendbarkeit der Messvorschriften des Effizienzleitfadens zu testen, werden zunächst alle Messungen nach den Vorgaben des Leitfadens durchgeführt. Anhand der Ergebnisse sowie dem beobachteten Verhalten des Systems während der Messungen wird entschieden, ob das Vorgehen angepasst werden muss.

Für Eigenschaften der Systeme, die aktuell nicht von Leitfadenmessungen erfasst werden, werden zusätzliche Messungen durchgeführt.

### Prüfstände

Die Prüfstände sind nach den Vorgaben des Effizienzleitfadens aufgebaut. Die Messstellen sind in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich sind mehrere Temperatursensoren an den Systemen angebracht. Alle Messwerte werden in einem 200 ms Raster aufgezeichnet.

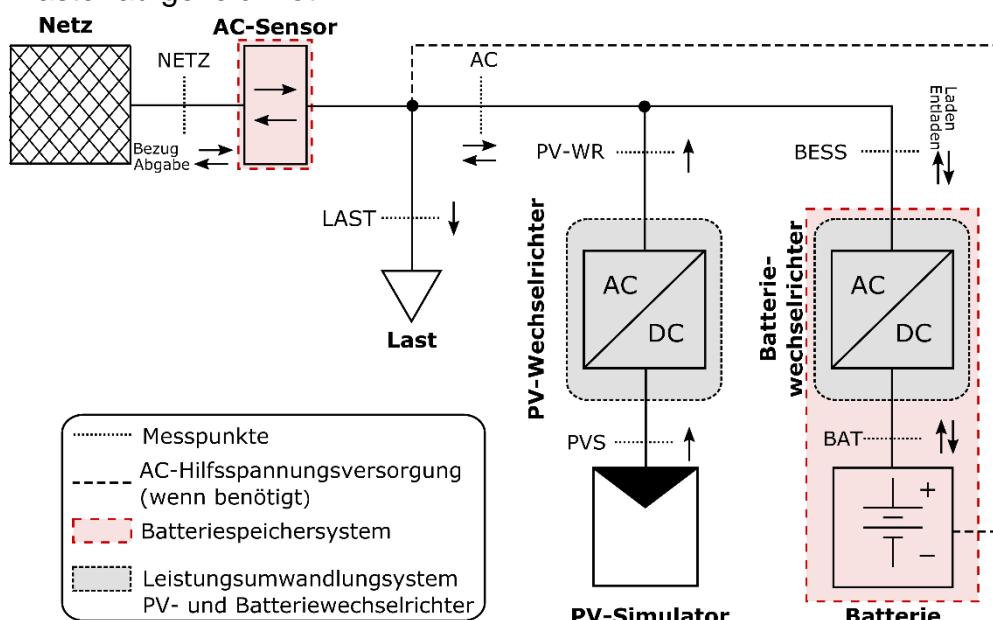


Abbildung 1 Messpunkte im Prüfstand bei einem AC-gekoppelten Speichersystems [1]

## Systeme

Für die Untersuchung stehen zwei Speichersysteme zur Verfügung.

Eines ist mit einer Natrium-Ionen-Batterie ausgestattet. Im weiteren Verlauf wird diese als Salzwasserbatterie bezeichnet.

Das zweite System verfügt über eine Natrium-Nickelchlorid-Batterie, im Weiteren wird diese Hochtemperatursalzbatterie genannt.

Beide Systeme werden in AC-Kopplung aufgebaut und verfügen über einen einphasigen Batteriewechselrichter, einen dreiphasigen AC-Sensor am

Netzanschlusspunkt und eine eigene Energiemanagement-Software. Zusätzlich ist im Prüfstand ein dreiphasiger 5 kW PV-Wechselrichter verbaut. Die Systeme werden eigenverbrauchsoptimiert gesteuert. Die Kenndaten aus den Datenblättern sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Hochtemperatursalzbatterie muss im Betrieb über 260 °C gehalten werden. Dazu verfügt sie über eine Batterieheizung, welche im Gehäuse vom DC-Anschluss versorgt wird. Es ist daher nicht möglich die Leistungsaufnahme der Heizung getrennt zu messen. Die interne Temperatur der Batterie wird über eine Softwareschnittstelle ausgelesen.

*Tabelle 1 Kennwerte der Speichersysteme*

	Salzwasserbatterie	Hochtemperatursalzbatterie
Energieinhalt (kWh)	5	7,7
Entladeleistung (kW)	1	3
Ladeleistung (kW)	1,1	1,6

## Ergebnisse

Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus den Messungen dargestellt. Hierbei soll besonders auf die Durchführung der Vermessungen eingegangen werden, die ein vom Leitfaden abweichendes Vorgehen erfordern. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Messungen findet sich im Effizienzleitfaden [1].

### Nominalleistungsbestimmung

Um das grundsätzliche Verhalten der Batterien zu analysieren, wird je ein Vollzyklus mit maximaler Leistung aufgezeichnet. In Abbildung 2 ist das Verhalten in Abhängigkeit von Zeit und geladener/entladener Energie dargestellt.

Bei der Salzwasserbatterie ist die Leistung sehr stark vom SOC abhängig. Im Entladefall ist kein Plateau in der Leistung zu sehen. Es ist somit keine Nominalleistung bestimmbar. Im Ladefall ist die Leistung lediglich für ca. 20 % der Gesamtenergie konstant.

Für die weiteren Vermessungen wird die nominale Leistung zu einer Leistung gewählt, die das System über ca. 50 % des SOC zur Verfügung stellen kann. Zusätzlich wird die maximale Lade- und Entladeleistung bestimmt, die das System über ca. 10 min zur Verfügung stellen kann. Dieser Wert wird genutzt, um die Pfadwirkungsgrade bei maximaler Leistung zu ermitteln.

Bei der Hochtemperatursalzbatterie kann die normale Vorgehensweise zur Bestimmung der Nominalleistung genutzt werden, da in Lade- und Entladerichtung Leistungsplateaus auftreten.

In der Kennlinie der Hochtemperatursalzbatterie lassen sich weitere Effekte erkennen. Beim Entladen steigt die interne Batterietemperatur bis an ihr Maximum von ca. 317 °C an. Ab diesem Zeitpunkt findet eine Leistungsbegrenzung durch das Batteriemanagementsystem (BMS) statt.

In der Ladekurve zeigt sich die Abhängigkeit der Messabfolge. Hier wurde zunächst die Batterie entladen und anschließend geladen. Im ersten Bereich der Ladekurve ist die Leistung deutlich glatter, da die interne Batterieheizung aufgrund der vom vorherigen Entladevorgang erhöhten Temperatur nicht einschaltet.

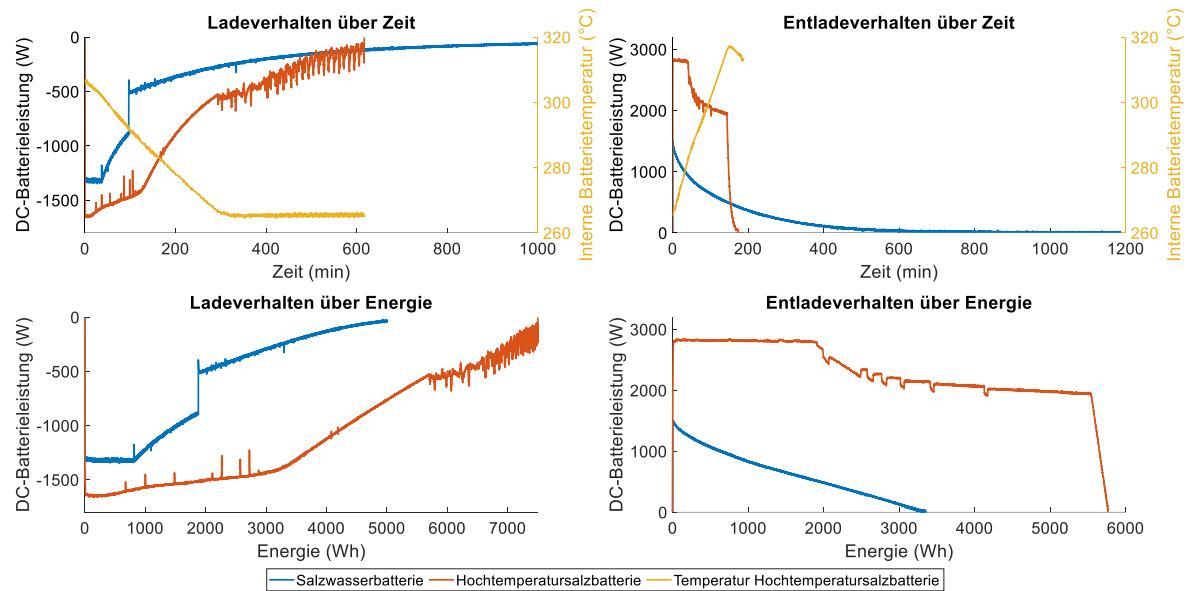


Abbildung 2 Batterieleistung beim Laden und Entladen der Systeme

## Nominalleistungsbestimmung

### Pfadwirkungsgrade

Für die Bestimmung der Wirkungsgrade im Lade- (AC2BAT) und Entladepfad (BAT2AC) werden die Messtellen BESS und BAT genutzt. Daher sind die Wirkungsgrade hauptsächlich von der Leistungselektronik des Batteriewechselrichters bestimmt. Durch die Batterietechnologie wird allerdings die Leistung und die Spannungskurve beeinflusst, wodurch sich in den Pfadwirkungsgraden Unterschiede ergeben.

Da der Salzwasserspeicher in dem für die Vermessung vorgesehen SOC-Bereich ( $SOC_{avg} \pm 10\%p$ ) leistungslimitiert ist, wurde zusätzlich der Ladewirkungsgrad bei  $SOC_{min}$  und der Entladewirkungsgrad bei  $SOC_{max}$  ermittelt, um den gesamten Leistungsbereich abzudecken.

Bei der Hochtemperatursalzbatterie musste der Messablauf angepasst werden. Der Leitfaden sieht vor, das System von  $SOC_{max}$  auf  $SOC_{avg} + 10\%p$ . zu entladen und nach einer 30-minütigen Pause die Vermessung des Entladewirkungsgrads zu beginnen. Durch das Entladen der Batterie erhöht sich hier allerdings die interne Batterietemperatur. Wird die Messung bereits nach 30 Minuten gestartet, erreicht die Batterie noch in der ersten Stufe des Wirkungsgradprofils ihre Maximaltemperatur und

wird durch das Batteriemanagementsystem in der Leistung reduziert. Daher wurde die Pause verlängert, bis die interne Batterietemperatur wieder abgefallen ist. Aufgrund der bereits erhöhten Batterietemperatur ist die Batterieheizung in dieser verlängerten Wartezeit nicht aktiv und sorgt nicht für eine Änderung des SOC.

### Standby-Verbräuche

Auch bei der Bestimmung der Leistungsaufnahme im Standby zeigt sich bei der Hochtemperatursalzbatterie eine Abhängigkeit vom vorherigen Betriebszustand. In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt der AC- und DC-Batterieleistung bei minimalem SOC zu sehen. Vor Beginn der Messung wird die Batterie auf  $SOC_{min}$  entladen und dadurch die interne Temperatur erhöht.

Wird der Standby Verbrauch direkt nach dem Entladen ermittelt, ergibt sich eine AC-Leistungsaufnahme von etwa 30 W. Nach dem Abkühlen der Batterie steigt diese durch die Batterieheizung auf ca. 130 W an.

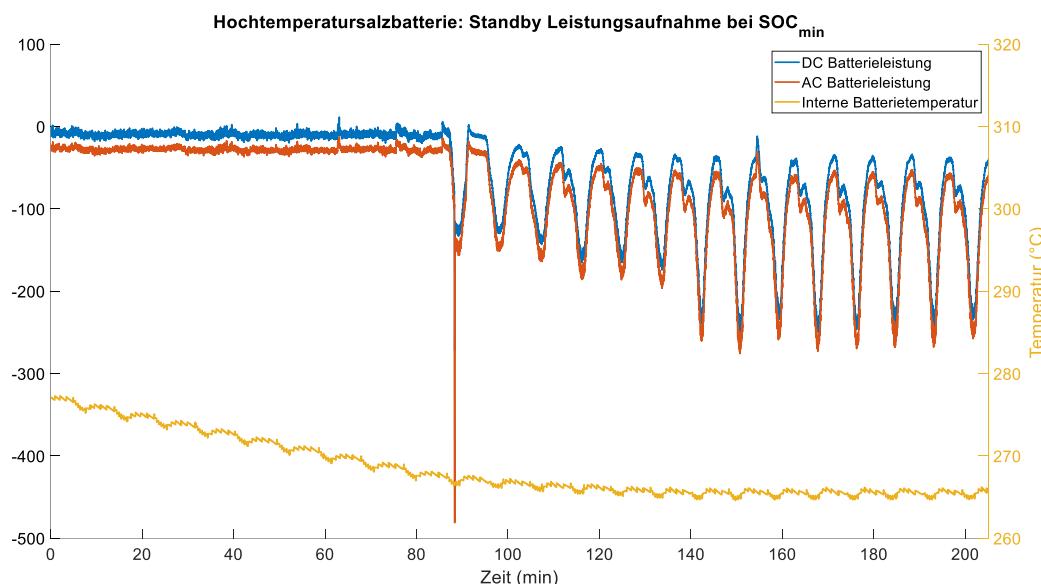


Abbildung 3 Hochtemperatursalzbatterie: Standby Leistungsaufnahme

### Batteriewirkungsgrad und Kapazität

Im Verhalten der Salzwasserbatterie zeigt sich kein klarer Leistungsabfall, der auf eine volle (leere) Batterie schließen lässt. Stattdessen fällt die Leistung kontinuierlich ab. Das alternative Kriterium aus dem Leitfaden, bei dem die Batterieleistung 3 % der Nominalleistung für eine Stunde unterschreiten muss, kann hier aber angewandt werden.

Durch die Batterieheizung der Hochtemperatursalzbatterie beträgt die mittlere Standby Leistungsaufnahme ca. 130 W. Zudem treten periodische Leistungsspitzen mit bis zu 300 W auf. Das Ladeschlusskriterium wird daher auf 7 % der Nominalleistung über eine Stunde erhöht. Zusätzlich wird das Signal durch ein gleitendes Mittelwertfilter mit einem 55 min Fenster geglättet.

In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die Ergebnisse dargestellt. Auffällig ist, dass die tatsächlich erreichte Batterieleistung bei der Salzwasserbatterie sich kaum zwischen den Zyklen unterscheidet, da diese fast im gesamten Bereich durch ihre eigene Kennlinie und nicht durch die zur Verfügung stehende Leistung begrenzt wird.

Der über die Zyklen abfallende Coulomb-Wirkungsgrad der Hochtemperatursalzbatterie lässt sich durch die Batterieheizung erklären. Durch die geringe Leistung in Zyklus 2 und 3 wird die Zeit in der die Heizung betrieben werden muss länger und somit auch ihr Anteil an der Gesamtenergie.

*Tabelle 2 Ergebnisse Batteriewirkungsgrad: Salzwasserbatterie*

		<b>Mittelwerte über zwei Iterationen</b>			
		<b>Zyklus 1</b>	<b>Zyklus 2</b>	<b>Zyklus 3</b>	<b>1-3</b>
$\eta_{\text{BAT,RTE}}$	%	72,89	79,2	84,61	78,9
$\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$	%	98,62	98,63	98,3	98,52
$\bar{P}_{\text{BAT (Laden)}}$	W	240,2	229,8	203,2	224,4
$\bar{P}_{\text{BAT (Entladen)}}$	W	224,6	185,1	117,7	175,8
$t_{(\text{Laden})}$	h	20,7	21,1	23,3	21,7
$t_{(\text{Entladen})}$	h	16,2	20,8	34,0	23,7
$E_{\text{BAT (Laden)}}$	Wh	4983	4853	4727	4854
$E_{\text{BAT (Entladen)}}$	Wh	3632	3844	4000	3825
$C_{\text{BAT (Laden)}}$	Ah	88,23	87,28	87,22	87,58
$C_{\text{BAT (Entladen)}}$	Ah	87,01	86,09	85,73	86,28
$\max(U_{\text{BAT}})$	V	57,7	57,8	57,8	57,8
$\min(U_{\text{BAT}})$	V	40,6	40,6	40,6	40,6

Tabelle 3 Ergebnisse Batteriewirkungsgrad: Hochtemperatursalzbatterie

		Mittelwerte über zwei Iterationen			
		Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	1-3
$\eta_{\text{BAT,RTE}}$	%	76,77	74,48	61,05	70,77
$\eta_{\text{BAT,RTE (Coulomb)}}$	%	91,58	84,26	65,17	80,33
$\bar{P}_{\text{BAT (Laden)}}$	W	796,9	729,4	399,5	641,9
$\bar{P}_{\text{BAT (Entladen)}}$	W	1990	1170	548,3	1236
$t_{(\text{Laden})}$	h	9,4	11,0	23,6	14,7
$t_{(\text{Entladen})}$	h	2,9	5,1	10,4	6,1
$E_{\text{BAT (Laden)}}$	Wh	7502	8019	9498	8340
$E_{\text{BAT (Entladen)}}$	Wh	5760	5971	5799	5843
$C_{\text{BAT (Laden)}}$	Ah	136,96	148,01	180,19	155,05
$C_{\text{BAT (Entladen)}}$	Ah	125,43	124,68	117,43	122,51
$\max(U_{\text{BAT}})$	V	54,5	54,6	54,5	54,5
$\min(U_{\text{BAT}})$	V	44,5	45,2	46,1	45,3

## Zusammenfassung und Ausblick

Die im Effizienzleitfaden beschriebenen Tests können, bis auf die Bestimmung der Nominalleistung, grundsätzlich für die Vermessung von Salzwasserbatterien und Hochtemperatursalzbatterien eingesetzt werden. Da es z. B. bei den Batteriewirkungsgraden notwendig ist, von den Standardwerten abzuweichen, ist davon auszugehen, dass Ergebnisse verschiedener Systeme sich nicht direkt vergleichen lassen.

Bei der Hochtemperatursalzbatterie konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der internen Batterietemperatur notwendig ist, um eine Beeinflussung der Messung durch eine Leistungslimitierung des BMS auszuschließen. Hierzu ist eine Anpassung der Messabläufe notwendig.

Bei der Inbetriebnahme der Hochtemperatursalzbatterie muss diese aufgeheizt werden. Die hierfür notwendige Energie stellt sich als zusätzlicher Verbrauch im Haushalt dar. Durch eine weitere Messung beim Einschalten des Systems kann diese Energiemenge bestimmt werden. Zudem wird die Batterie durch das Energiemanagement nach mehrtägigem Standby aus dem Netz geladen. Auch dieses Verhalten wird durch den Leitfaden nicht ermittelt.

In weiteren Vermessungen mit realen Last- und PV-Verläufen soll die Auswirkung der ermittelten Ergebnisse auf das Verhalten der Systeme im Betrieb untersucht werden. Unter anderem ist zu erwarten, dass die gemessene Kapazität der Salzwasserbatterie im realen Betrieb nicht erreicht wird, da dafür über 20 Stunden PV-Leistungsüberschuss notwendig wäre. Bei der Hochtemperatursalzbatterie soll

ermittelt werden wie häufig die Batterieheizung genutzt wird, um so die gemessenen Standby-Verbräuche bewerten zu können.

## **Danksagung**

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts „Perform“ (Förderkennzeichen: 03EI3039B) erarbeitet, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Literatur**

[1] *Effizienzleitfaden für PV - Speichersysteme 2.0.1*, 1.0 Hrsg., BVES/BSW, 2019.