Übergeordnetes Regelungskonzept für PV-Heimspeichersysteme und deren Anforderungen an die Leistungselektronik

Leonhard Probst, Rebekka Denninger, Corentin Gasser und Cornelius Armbruster
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Tel. 0761 4588-2059
leonhard.probst@ise.fraunhofer.de

1 Motivation

PV-Heimspeichersysteme ermöglichen den Eigenverbrauch einer Photovoltaikanlage zu erhöhen und können gleichzeitig bei geeigneter Betriebsweise die Stromnetze entlasten. Die Speichersysteme können an verschiedenen Stellen in das Hausnetz bzw. in eine Photovoltaikanlage eingebunden werden. So kann ein Anschluss direkt an das AC-Netz, auf der PV-Generator-Seite oder am Zwischenkreis eines Solar-Wechselrichters erfolgen. Im vorliegenden Fall werden für ein am Zwischenkreis gekoppeltes System (Abb. 1) übergeordnete Regelungskonzepte betrachtet und insbesondere auf deren Auswirkung auf die Anforderungen an die Leistungselektronik eingegangen.

Der reale Wirkungsgrad von PV-Heimspeichern unterscheidet sich bei den derzeit am Markt erhältlichen Systemen teils erheblich (Abb. 2), was eine weitergehende Untersuchung der auftretenden Verluste begründet. Die betrachteten Wandler im vorliegenden System sind ein Batterieladeregler, ein MPP-Tracker und ein Wechselrichter. Es wird untersucht, wie sich verschiedene Regelungskonzepte und regulatorischen Begrenzungen, wie beispielsweise eine Einspeisebegrenzung auf 70 % oder 50 %, auf die Leistungs- und Energieverteilungen bei den einzelnen Wandlern auswirken.

Als Datengrundlage für realistische Abschätzungen werden realistische Verbrauchsdaten für deutsche Haushalte [1] sowie gemessene Einstrahlungsdaten auf 60 s-Basis [2] (ebenfalls auf 60 s-Basis) verwendet. Ein exemplarischer Verlauf für einen sonnigen Tag ist für die Stromflüsse auf der Batterieseite in Abb. 3 und für die Stromflüsse auf der Netzseite in Abb. 4 dargestellt. Es wird dabei von einer begrenzten Kapazität der Batterie und einer konstanten Last von 1 kW mit diversen zusätzlichen Lastspitzen ausgegangen. Außerdem wird eine Einspeisebegrenzung auf 50 % der PV-Nennleistung berücksichtigt. Der Eigenverbrauch wird während des Tages über den PV-Generator und nachts über den Speicher und das Netz gedeckt. Bei starken Verbrauchsspitzen um 7:30 Uhr und um 19:30 Uhr muss teilweise dem Netz zusätzliche Leistung entnommen werden.

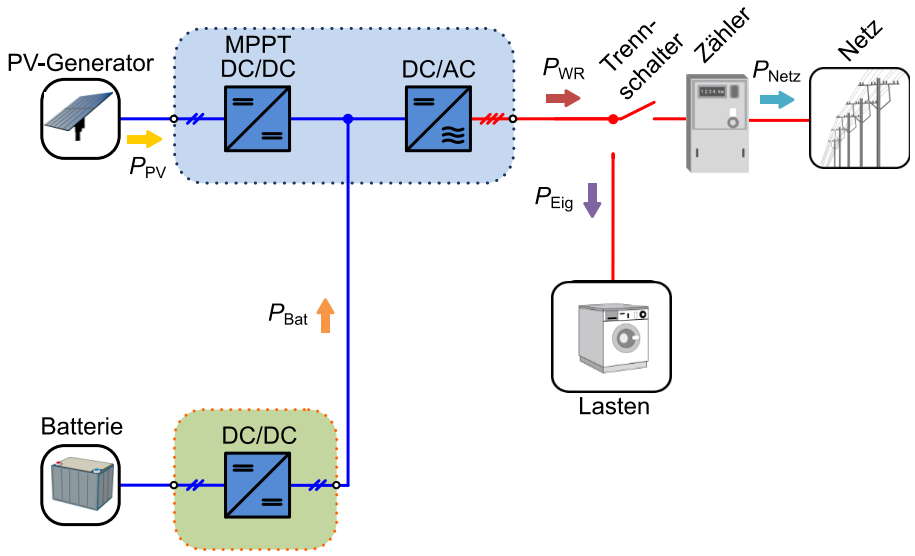

Abb. 1: *Topologie eines PV-Heimspeichersystems mit einem Batteriespeicher am Zwischenkreis*

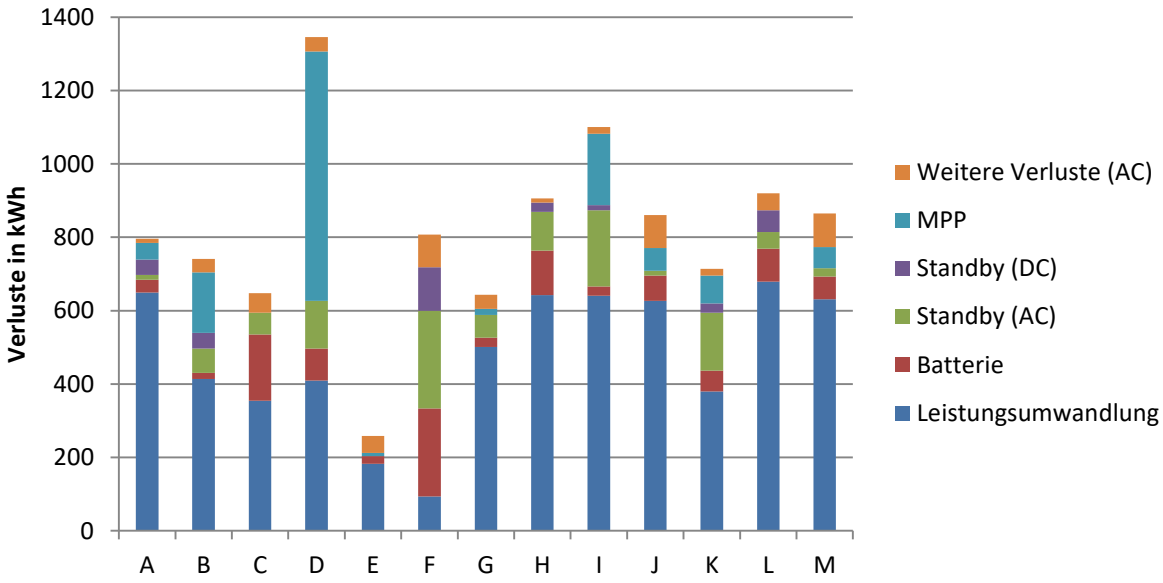

Abb. 2: *Gemessene Energieverluste von kommerziell erhältlichen Speichern für ein Referenzjahr nach VDI 4655 (aus* [3])

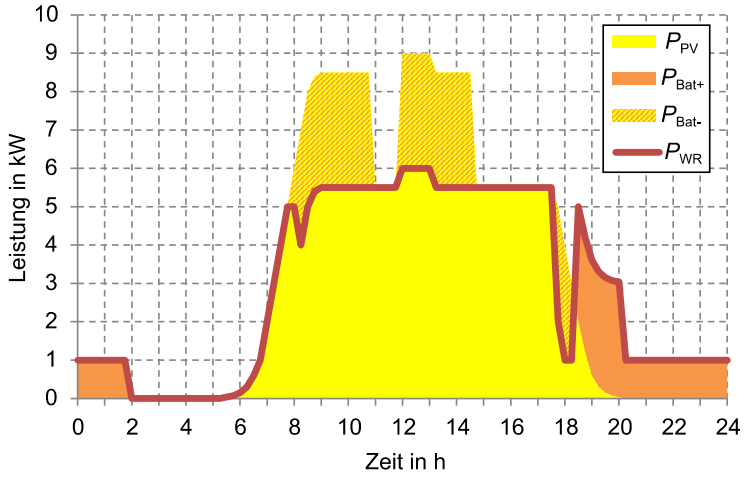

Abb. 3: *Leistungsbilanz mit Stromflüssen am Anschlusspunkt des Speichers*

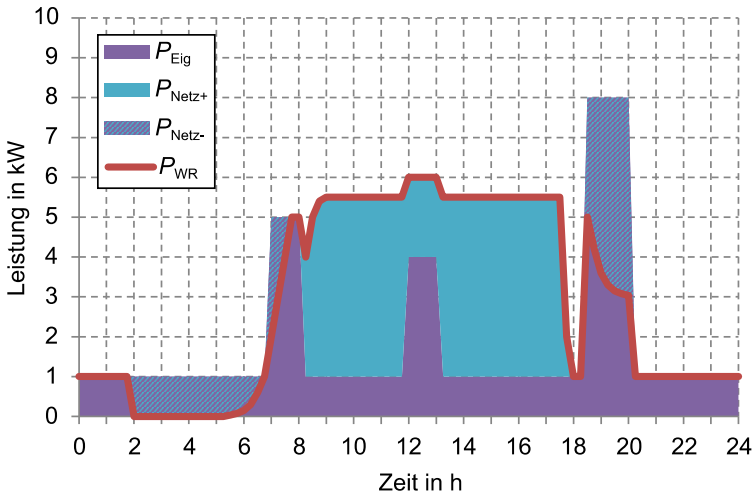

Abb. 4: *Leistungsbilanz mit Stromflüssen am Netzanschlusspunkt*

2 Simulationsmodell eines modularen, DC-gekoppelten Heimnetzspeichers

Ein Simulationsmodell des Heimspeichersystems wie in Abb. 1 dargestellt wurde in der Simulationsplattform PLECS© aufgebaut. Dabei wurde von einer maximalen PV-Leistung von 6,0 kWp, einer maximalen Wechselrichterleistung von 5 kW, einer maximalen Lade- und Entladeleistung der Batterie von 3 kW und einer Kapazität der Batterie von 6 kWh ausgegangen. Als regulatorische Grenze wurde eine spezifische Einspeisegrenze von 0,5 kW/kWp angenommen.

Für die einzelnen Komponenten werden gleichbleibende Wirkungsgrade über den gesamten Leistungsbereich mit den in Tab. 1 angegeben Werten berücksichtigt. Die Last- und Einstrahlungsdaten liegen in auf 60 s gemittelten Werten vor. Auch die Parameter für die Betriebsführung wurden jede Minute neu berechnet. Der Prognoseho-

rizont beträgt bei der entsprechenden Betriebsführung 15 Minuten. Die einzelnen übergeordneten Regelungskonzepte wurden als C-Code in die Simulationsumgebung eingebettet.

Der Simulationszeitraum war ein ganzes Jahr. Es wurde für das Lastprofil ein exemplarischer, deutscher Haushalt [1] und für die Einstrahlung Messwerte der Wetterstation der HTW Berlin mit einer Südausrichtung bei 35° Neigung [2] verwendet.

Tab. 1: *Spezifikation und Nenndaten des Simulationsmodells*

PARAMETER	**SYMBOL**	**WERT**
Leistungen		
PV-Leistung	P_{PV}	6,0 kWp
Maximale Wechselrichterleistung	P_{WR}	5 kW
Maximale Lade-/Entladeleistung der Batterie	P_{Bat}	3 kW
Kapazität der Batterie	C_{Bat}	6 kWh
Spezifische Einspeisegrenze	ρ_{Lim}	0,5 kW/kWp
Wirkungsgrade		
Wechselrichter	η_{WR}	97 %
Batterie (ohne DC/DC-Steller)	η_{Bat}	98 %
Batteriesteller	$\eta_{Bat,DCDC}$	95 %
PV-Steller (MPPT)	η_{MPPT}	98 %
Zeitschritte		
Lastdaten	T_{Last}	60 s
Einstrahlungsdaten	T_{Ein}	60 s
Betriebsführung	$T_{Betrieb}$	60 s
Prognosedaten	$T_{Prognose}$	15 min

3 Regelungskonzepte für PV-Heimspeichersysteme und deren Auswirkungen auf die Leistungsflüsse

Für die Dimensionierung der Leistungselektronik von PV-Systemen ist die Energieverteilung der Solarstrahlung von entscheidender Bedeutung. Es wurden bereits ausführliche Simulationen zur optimalen Dimensionierung von Wechselrichtern für netzgekoppelte PV-Anlagen durchgeführt [4]. Abb. **5** zeigt die Verteilung der relativen Häufigkeit der Leistung und Energie an einem PV-Generator bei einem netzgekoppelten PV-System ohne Batteriespeicher.

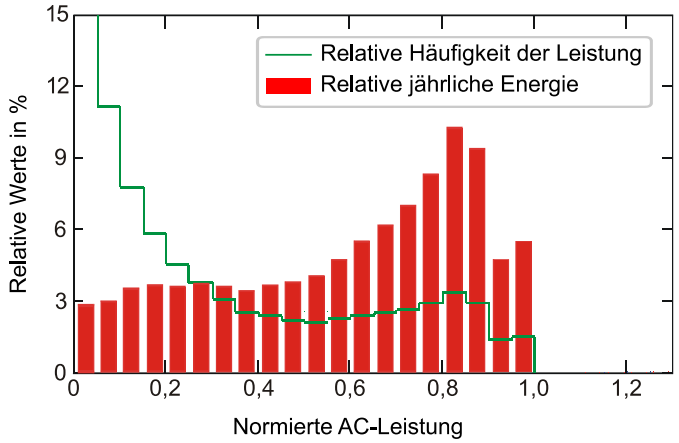

Abb. 5: *Relative Häufigkeit der Leistung an einem PV-Generator und der daraus berechneten Häufigkeit der Energieverteilung (aus* [4]*)*

Für die Auslegung und Dimensionierung eines PV-Systems mit Batteriespeicher oder einer PV-Anlage mit Einspeisebegrenzung ergeben sich jedoch zusätzliche Herausforderungen. Als erste Näherung kann für die Auslegung des DC/DC-Stellers zur Anbindung der Batterie die Verteilung typischer Verbräuche wie in Abb. 6 berücksichtigt werden.

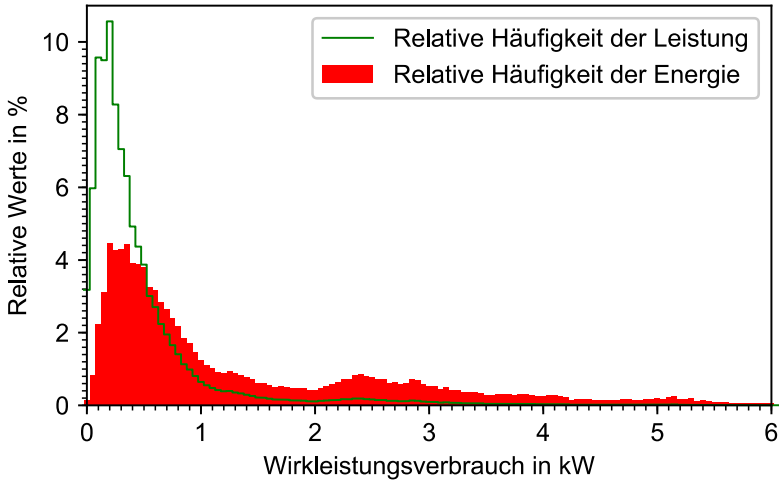

Abb. 6: *Relative Häufigkeit und übertragene Energie in Abhängigkeit des Haushaltsverbrauchs eines repräsentativen deutschen Haushalts (Datenquelle* [1]*)*

Für eine genauere Betrachtung müssen allerdings die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten sowie die Betriebsweise des Systems berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten sollen diese Energieverteilungen für unterschiedliche Betriebsstrategien angegeben werden.

3.1 Eigenverbrauchsoptimierte Betriebsweise

Die einfachste Betriebsweise für ein PV-Heimspeichersystem ist die sogenannte eigenverbrauchsoptimierte Betriebsweise. Dabei wird die PV-Erzeugung nach den folgenden Prioritäten eingesetzt:

1) Eigenverbrauch
2) Speicherung
3) Einspeisung

Dabei müssen natürlich auch noch die einzelnen Beschränkungen wie Leistungsbegrenzung der einzelnen Komponenten, Speicherzustand der Batterie und regulatorische Einspeisebegrenzung berücksichtigt werden.

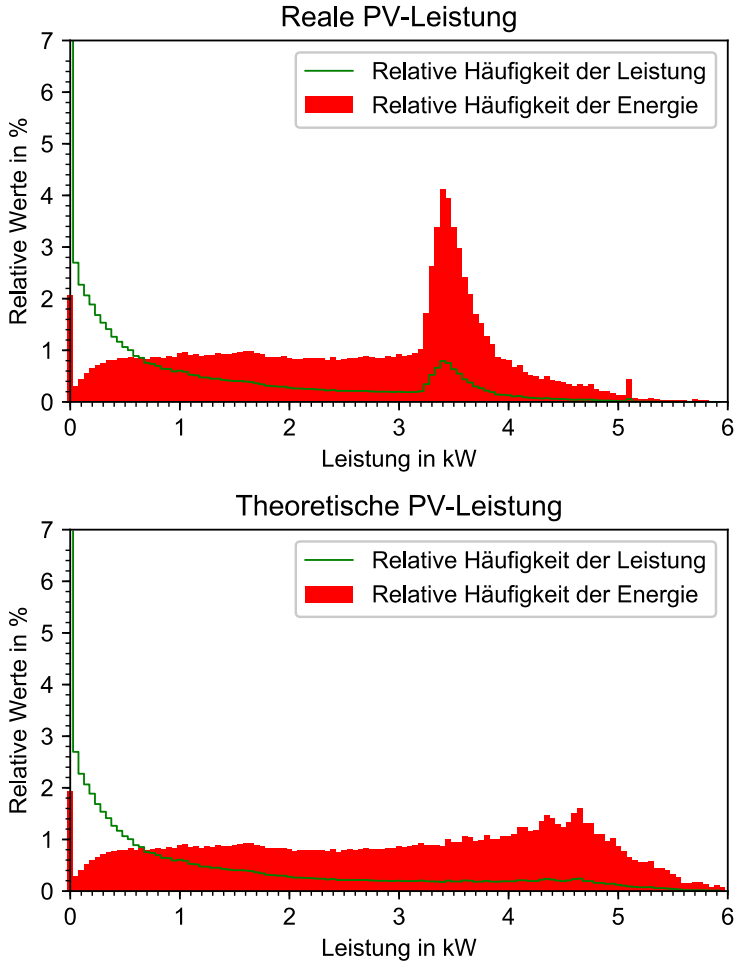

Abb. 7: *Theoretisch verfügbare PV-Leistung im MPP (unten) und simulierte Leistungsabnahme des MPP-Trackers (oben)*

Abb. 7 zeigt sowohl die theoretisch verfügbare PV-Leistung mit den simulierten Einstrahlungsdaten als auch die mit der eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise tatsächlich abgenommene Energie. Dabei befinden sich ein lokales Maximum bei der Leistung und ein globales Maximum bei der Energie zwischen 3 kW und 4 kW. Diese Spitze korreliert mit dem Peak bei der Haushaltslast, verschoben um 3 kW, was der Einspeisebegrenzung am Netzanschlusspunkt entspricht. Die Verschiebung der PV-Spitzenleistungen ist daher einer Abregelung durch Übertreten der Einspeisegrenze geschuldet, was genau dann auftritt, wenn die Batterie bereits vollgeladen ist. Die Jahressumme der generierten Solarenergie beträgt 5642 kWh, wobei die Verluste gegenüber der theoretisch generierbaren Solarenergie durch PV-Abregelung und MPP-Tracker-Verluste bei 6,3 % liegen.

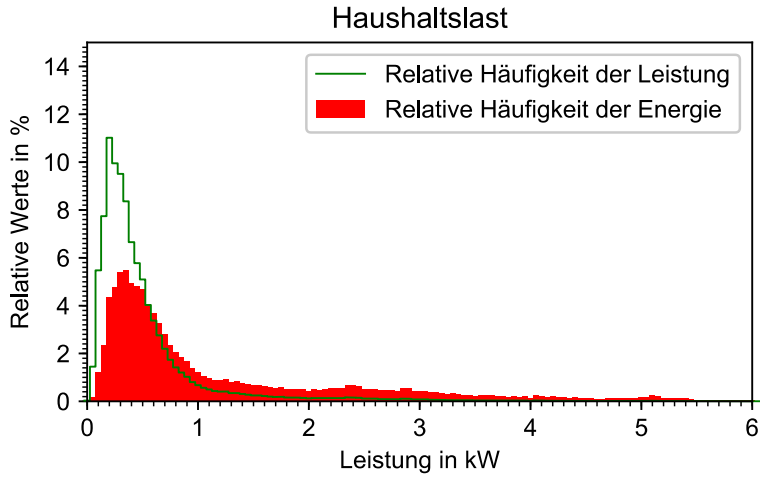

Abb. 8: *Leistungs- und Energieverteilung des in der Simulation berücksichtigten Haushalts*

In Abb. 8 ist die Leistungs- und Energieverteilung des exemplarischen Haushalts aufgetragen, welcher in den Simulationen verwendet wurde. Er unterscheidet sich leicht hinsichtlich der in Abb. 6 angegebenen Durchschnittsverteilung aus 74 deutschen Haushalten aus der Datenquelle [1] (kleinere Leistungen sind stärker vertreten) und weist einen Gesamtjahresverbrauch von 5010 kWh auf.

Die Verteilungen für Leistung und Energie für den Batteriespeicher bei einer eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise sind in Abb. 9 dargestellt. Dabei entspricht die Verteilung der Energie bei der Entladung in etwa der Verteilung der Lasten im Haushalt und die Verteilung bei der Ladung ist sehr gleichmäßig verteilt. Es entstehen deutliche Spitzen bei der maximalen Lade- und Entladeleistung. Diese Betriebsfälle treten auf, falls die PV-Erzeugung größer ist als die Last und die Leistung des Batteriestellers oder für die Entladung, falls die Haushaltslast größer ist als die maximal mögliche Batterieleistung.

Auch bei den Verteilungen der Wechselrichterleistung ergeben sich interessante Zusammenhänge. Die Energieverteilung zeigt zwei Maxima, wobei das erste Maximum in etwa bei 500 W auftritt und mit dem Peak beim Haushaltsverbrauch (s. Abb. 8) korreliert. Das zweite Maximum zwischen 3 kW und 4 kW ist bedingt durch den Er-

zeugungspeak aus Abb. 7 (oben). Eine zusätzliche Spitze tritt bei 3 kW auf, welches genau der maximal erlaubten Einspeisung bei einer Begrenzung von 0,5 kW/kWp entspricht und entsteht genau dann, wenn keine Haushaltslast abgenommen wird. Sie entspricht auch der maximalen Batterieleistung, welche genau dann auftritt, wenn keine Solarenergie zur Verfügung steht, aber eine Last von mehr als 3 kW bereitgestellt werden muss.

Der Eigenverbrauch, also der Anteil der direkt genutzten Energie gegenüber der von der PV-Anlage generierten Energie, beträgt 62,5 %. Der Autarkiegrad hingegen entspricht dem Anteil der vom Netz bereitgestellten Energie zur Haushaltslast und beträgt im vorliegenden Fall 57,9 %.

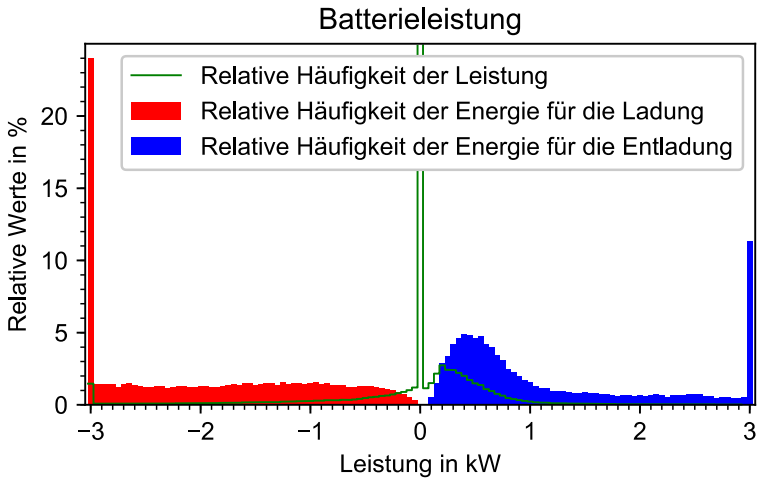

Abb. 9: *Lade- und Entladeleistung der Batterie für die eigenverbrauchsoptimierte Betriebsweise*

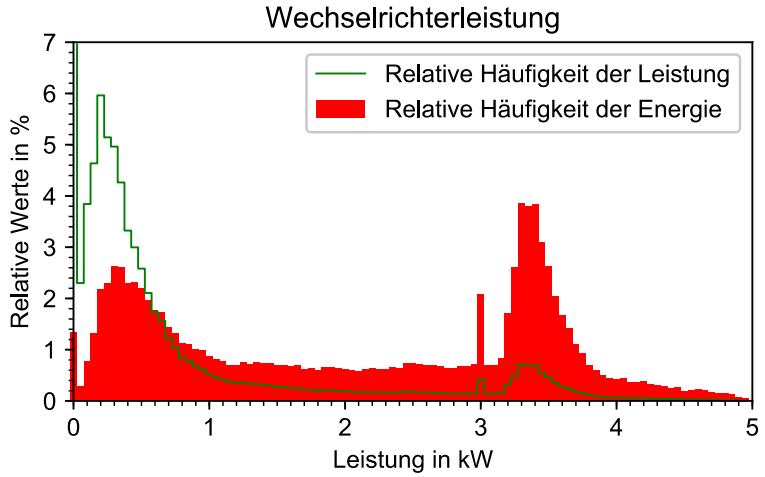

Abb. 10: *Häufigkeitsverteilung der Leistung und Energie für den Wechselrichter bei der eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise*

3.2 Prognosebasierte Betriebsweise

Bei der prognosebasierten Betriebsführung werden anhand von historischen Daten zunächst die Verläufe der PV-Leistung und der Last für einen gesamten Tag auf 15 min Basis prognostiziert. Mit Hilfe einer virtuellen Einspeisegrenze kann der Batteriespeicher gezielt in den Stunden geladen werden, in denen ein hoher PV-Leistungsüberschuss zu erwarten ist. Die Batterie wird dabei nur dann geladen, wenn die Differenz zwischen PV-Leistung und Last größer ist als die virtuelle Einspeisegrenze.

Diese Einspeisegrenze kann über ein iteratives Verfahren bestimmt werden. Als Startwert wird die am Netzanschluss vorgegebene Einspeisegrenze verwendet, welche anschließend schrittweise heruntergesetzt wird. In jedem Iterationsschritt wird die Energie bestimmt, mit der die Batterie geladen wird. Die Iteration wird beendet sobald die Batterie vollgeladen werden kann. Anhand der ermittelten Einspeisegrenze wird nun ein Fahrplan für die Batterieladung erstellt. Um Prognosefehler im Betrieb auszugleichen, wird die Batterieleistung kontinuierlich mit der Abweichung zwischen prognostizierter und realer Differenzleistung angepasst.

Für die folgenden Simulationsergebnisse wurden die gleichen Datensätze für theoretische PV-Leistung sowie die Haushaltslast wie bei der eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise verwendet. Als Prognosekurven wurden die Lastkurve desselben Wochentages eine Woche zuvor sowie die Sonneneinstrahlung des Vortages verwendet.

Die hier untersuchte prognosebasierte Betriebsweise ist soweit wie möglich an den PVprog-Algorithmus der HTW Berlin [5] angelehnt, damit eine bestmögliche Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Der in MATLAB implementierte Algorithmus wurde dafür in die Programmiersprache C portiert und daraufhin als C-Script in PLECS© ausgeführt.

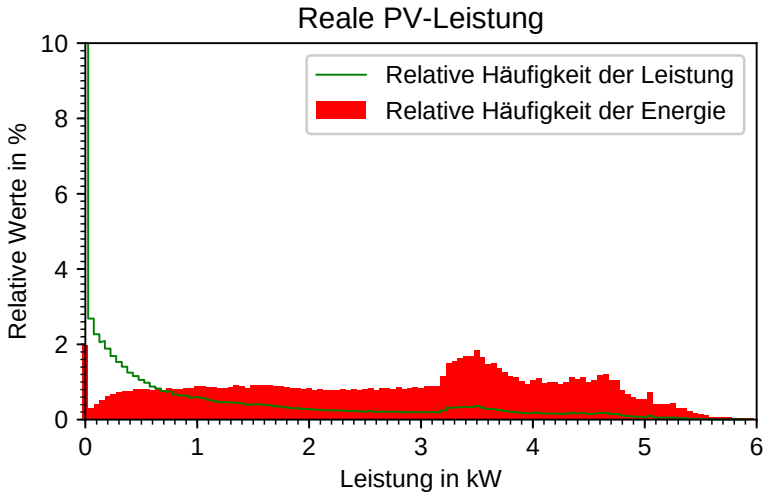

Abb. 11: *Simulierte Leistungsabnahme des MPP-Trackers für die prognosebasierte Betriebsweise*

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die erzeugte PV-Leistung sowie die Wechselrichterleistung. Im Vergleich zur eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise sind die Spitzen bei 3,5 kW deutlich geringer. Stattdessen treten vermehrt höhere PV-Leistungen auf, was darauf zurückschließen lässt, dass die PV-Anlage weniger häufig abgeregelt werden muss. Tatsächlich liegen die Verluste durch Abregelung und MPP-Tracker mit dieser Betriebsweise nur bei 2,9 % und konnten so mehr als halbiert werden (6,3 % bei der eigenverbrauchsoptimierten Betriebsweise).

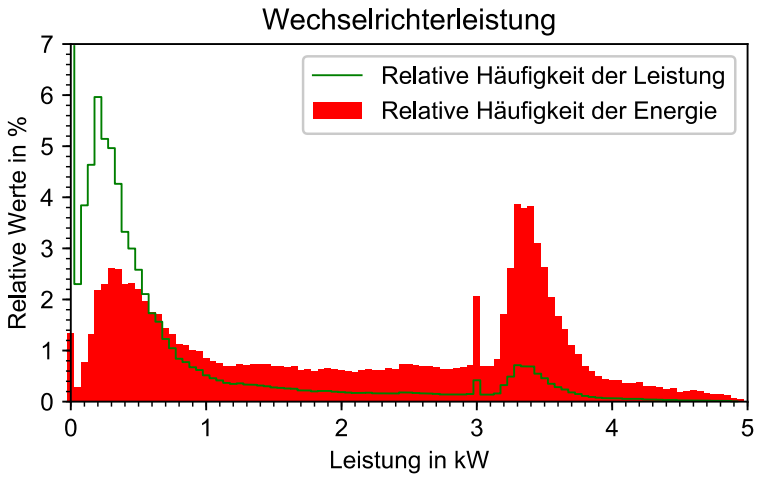

Abb. 12: *Häufigkeitsverteilung der Leistung und Energie für den Wechselrichter bei prognosebasierter Betriebsweise*

Für die Batterieleistung ist in Abb. 13 eine Verschiebung der Häufigkeit der Energie zu geringeren Leistungen zu erkennen. Die Spitzen bei der maximalen Lade- und Entladeleistung sind deutlich kleiner, wodurch der Batteriesteller weniger im Volllastbereich betrieben wird. Zudem steigen die Zeiten, während dessen die Batterie weder geladen noch entladen wird (P_{bat} = 0 W), von 53 % auf 59 %. Da mehr Leistung in das Netz eingespeist werden konnte, sank sowohl der Eigenverbrauch auf 54,1 % (-8,4 % absolut) und Autarkiegrad auf 53,7 % (-4,2 % absolut).

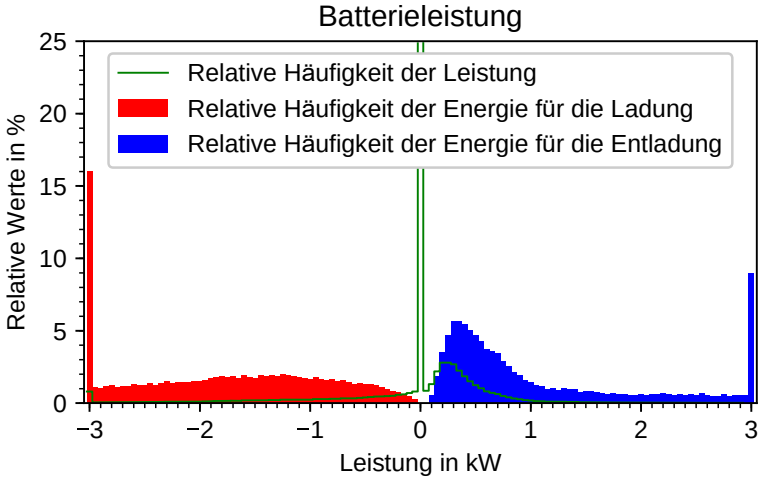

Abb. 13: *Lade- und Entladeleistung der Batterie für die prognosebasierte Betriebsweise*

4 Kritische Bewertung der Simulationsergebnisse

Die in der vorliegenden Veröffentlichung gezeigten Leistungs- und Energieverteilung zeigen sehr interessante Zusammenhänge und können als Grundlage für die Auslegung und Berechnung von PV-Heimspeichersystemen verwendet werden.

Allerdings sind die Aussagen auch nur innerhalb des betrachteten Rahmens gültig. So wurde beispielsweise nur das Lastprofil eines einzigen Haushalts betrachtet, eine abschließende Bewertung ist erst nach einer Simulation von vielen repräsentativen Haushalten und der Mittelung der Ergebnisse zulässig.

Eine weitere Einschränkung der hier betrachteten Ergebnisse ist die Mittelung der Lasten und der Einstrahlung über jeweils einen Zeitraum von 60 s. Eine genauere Betrachtung wäre sicherlich mit Messwerten mit entsprechend höherer Auflösung möglich. Die in Abb. 5 dargestellten Verteilungen wurden mit Messwerten mit einer Auflösung von 20 s (Mittelwerte) berechnet [4] und stimmen sehr gut mit den hier ermittelten Ergebnissen in Abb. 7 überein. Wie aber ebenfalls bereits gezeigt wurde, führt eine weitere Mittelung (beispielsweise mit 15 min-Werten) zu teils erheblichen Abweichungen [4].

Eine weitere wichtige Einschränkung der hier vorliegenden Untersuchung ist, dass nur konstante Wirkungsgrade über den gesamten Lastbereich berücksichtigt wurden. Dies erleichtert zwar die Implementierung der Simulation und die Vergleichbarkeit bzw. Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse, entspricht aber natürlich nicht den Verhältnissen bei realen Systemkomponenten.

Zudem wurden die Prognosedaten für PV- und Lastkurven sehr vereinfacht generiert. Eine Mittelung über mehrere Tage, eine Anpassung durch Parameter, die der aktuellen Wetterlage entsprechen (z.B. Temperatur oder erwartete Sonnenstunden), oder die Nutzung von Wetterprognosen könnten hier deutlich bessere Ergebnisse liefern.

5 Anforderungen an die Leistungselektronik bei einem PV-Heimspeicher

Die Analysen haben gezeigt, dass sowohl für den Batteriesteller als auch für den Wechselrichter sehr geringe Leistungen besonders häufig auftreten und es außerdem beim Wechselrichter - wie erwartet - ein Maximum nahe der maximalen Einspeiseleistung gibt. Beim MPP-Tracker tritt ein Maximum nahe der maximalen Einspeiseleistung auf und die restliche Energie ist sehr gleichmäßig hin zu niedrigeren Leistungen verteilt.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei einem DC-gekoppelten Speichersystem eine Optimierung des Teillastwirkungsgrades sowohl für den Batteriesteller als auch für den Wechselrichter von großer Bedeutung ist. Regelungstechnische Ansätze sind

dabei sehr vielversprechend, da sie größtenteils ohne oder mit nur sehr wenig zusätzlichem Aufwand für die Hardware verbunden sind, was die Kosten in erträglichem Rahmen hält.

Beim Batteriesteller ist ein mehrphasiger Aufbau des DC/DC-Stellers ein vielversprechender Ansatz [6]. Dieser kann mit zusätzlichen Modulationsarten wie einem Burst-Betrieb kombiniert werden.

Bei einem 3-phasigen Wechselrichter kann die Umschaltung in einen 1-phasigen Betrieb bei sehr geringer Haushaltslast vielversprechend sein. Die dabei auftretenden kapazitiven Ableitströme über die PV-Strings als auch der auftretende 100 Hz (120 Hz)-Rippel lassen sich regelungstechnisch in den Griff bekommen.

Grundsätzlich ist die Verwendung der für die Nennlast ausgelegten Filterkomponenten im Teillastbereich ein vielversprechender Ansatz, um bei nur geringfügigen höheren Materialkosten den Wirkungsgrad zu verbessern.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt die Leistungs- und Energieverteilung für die einzelnen Komponenten eines DC-gekoppelten Heimnetzspeichersystems. Die Verteilungen sollen eine Hilfe bei der Auslegung und Dimensionierung der Leistungselektroniken darstellen und geben zudem ein besseres Verständnis der Funktionsweise eines solchen Speichersystems.

Zwei unterschiedliche und gut nachvollziehbare Betriebsweisen von Heimnetzspeichern wurden miteinander verglichen und deren Auswirkungen auf die Energieverteilung diskutiert. Abschließend wurde die besondere Bedeutung des Teillastwirkungsgrades für den Batteriesteller und den Wechselrichter herausgestellt und mögliche Lösungsansätze zur Verbesserung desgleichen aufgezeigt.

Literaturverzeichnis

[1] Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, „Repräsentative elektrische Lastprofile für Einfamilienhäuser in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis," *Berlin,* 2015.

[2] HTW Berlin, „http://wetter.htw-berlin.de/".

[3] Karlsruhe Intitute of Technology (KIT), Flyer, „Vergleich von Heimspeichern: Performance und Netzdienlichkeit im Test," Intersolar, 2017.

[4] B. Burger, „Auslegung und Dimensionierung von Wechselrichtern für netzgekoppelte PV-Anlagen," *Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein,* 2005.

[5] HTW Berlin, „https://pvspeicher.htw-berlin.de/veroeffentlichungen/daten/pvprog/".

[6] C. Armbruster, L. Probst, C. Gasser und C. Schöner, „Maßnahmen zur Teillastoptimierung von Ladeelektronik in PV-Heimspeichersystemen," *Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein,* 2018.

[7] Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, „Effekte der 50%-Einspeisebegrenzung des KfW-Förderprogramms für Photovoltaik-Speichersysteme," *Berlin,* 2016.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen: 16ES0591