

Maßnahmen zur Teillastoptimierung von Ladeelektronik in PV-Heimspeichersystemen

Cornelius Armbruster, Leonhard Probst, Corentin Gasser, Christian Schöner
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel. +49 761 4588-5070, Fax: +49 761 4588-9070
E-Mail: cornelius.armbruster@ise.fraunhofer.de
Internet: www.ise.fraunhofer.de

1. Einleitung

Die Lade- bzw. Entladeelektronik in PV-Heimspeicheranwendungen wird typischerweise für eine bestimmte Nennleistung dimensioniert bzw. ausgewählt. Dabei werden die Systemkomponenten erfahrungsgemäß so ausgelegt, dass sich das Wirkungsgradmaximum etwa zwischen 30 % und 90 % der Nennleistung befindet. Werden jedoch die Energieflüsse für ein PV-Speichersystem in den verschiedenen Betriebsmodi betrachtet, so ist hierbei zu erkennen, dass dies nicht den Anforderungen der konkreten Anwendungen entspricht.

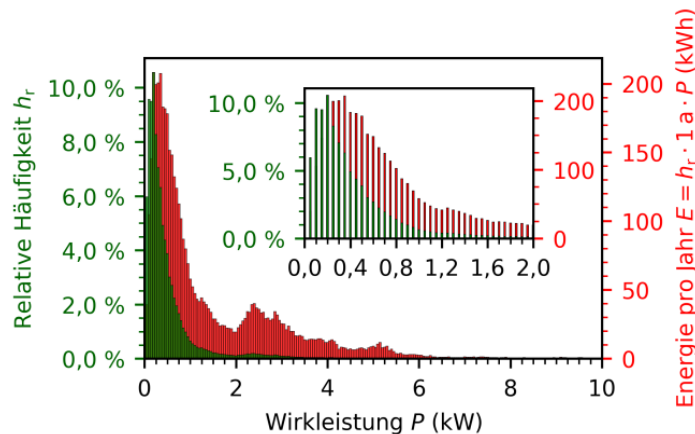


Abb. 1: Relative Häufigkeit und übertragene Energie in Abhängigkeit des Haushaltsverbrauchs eines repräsentativen deutschen Haushalts; Datenquelle [1]

Batteriespeicher in PV-Speichersystemen werden in der Regel über den Tag mit einer hohen Leistung durch die PV-Anlage geladen. Die Entladung des Speichers findet über den restlichen Tagesverlauf verteilt entsprechend des auftretenden Verbrauchs im Haushalt statt. In Abb. 1 wird dieser Eigenverbrauch exemplarisch für 74 Beispielhaushalte dargestellt. Die dargestellte relative Häufigkeit der übertragenen Leistung (in grün) sowie die entsprechend übertragene Energie (in rot) verdeutlichen, dass der Teillastbereich unter 1 kW besonders häufig in Anspruch genommen wird.

Die absolut häufigste elektrische Leistung, die in den Beispielhaushalten gemessen werden konnte, liegt sogar bei lediglich 400 W. Diese geringen Leistungen stellen klassische Ladeelektroniken jedoch vor große Herausforderungen. Wie in der exemplarischen Wirkungsgradkurve in Abb. 2 dargestellt, dominieren im geringen Teillastbereich unter 1/10 der Nennleistung die Ansteuer- und die Leerlaufverluste der Leistungselektronik (Bereich A). Da diese Verluste nahezu konstant sind, fallen sie mit steigender Leistung immer weniger ins Gewicht. Der zweite Bereich der Verluste (B) wird wesentlich durch die Stromrippelverluste innerhalb der Drosseln sowie der Transistoren verursacht. Die Schaltverluste überwiegen hingegen im Bereich C der Wirkungsgradkurve. Für steigende Ströme dominieren im Bereich D letztendlich die Durchlassverluste in den Halbleitern sowie den Drosseln, da diese Verluste quadratisch proportional mit dem Strom ansteigen. [2]

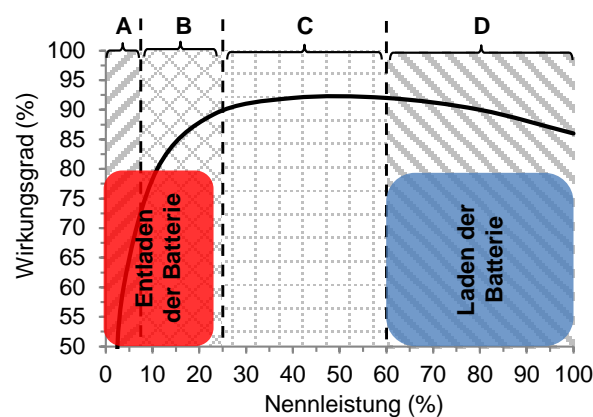


Abb. 2: Exemplarische Wirkungsgradkurve mit einzelnen Bereichen unterschiedlicher Verlustmechanismen und der häufigsten Lade- und Entladeleistungen [2]

Wenn der in Abb. 2 dargestellte Wirkungsgradverlauf mit der relativen Häufigkeit des Haushaltsverbrauchs in Abb. 1 verglichen wird, fällt auf, dass ein Großteil der übertragenen Leistung mit einem nicht zufriedenstellenden Wirkungsgrad übertragen wird. In der vorliegenden Arbeit sollen Methoden zur Optimierung dieses Teillastwirkungsgrades untersucht werden. Diese wurden anhand von Simulationen verglichen und anschließend die vielversprechendsten Konzepte in der Entwicklung einer höchstintegrierten Ladeelektronik berücksichtigt.

2. Systemkonzept

Das vorgestellte Gesamtsystem beinhaltet einen dreiphasigen Wechselrichter mit einer bidirektionalen Batterieladeelektronik (in diesem Fall für eine Hochvolt (HV)-Batterie) und einer MPP-Tracking-Elektronik zur Anbindung eines PV-Strings (siehe Abb. 3). Dabei liegt der Fokus in dieser Arbeit auf der Ladeelektronik der HV-Batterie, die Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf andere Bereiche des Gesamtsystems übertragen.

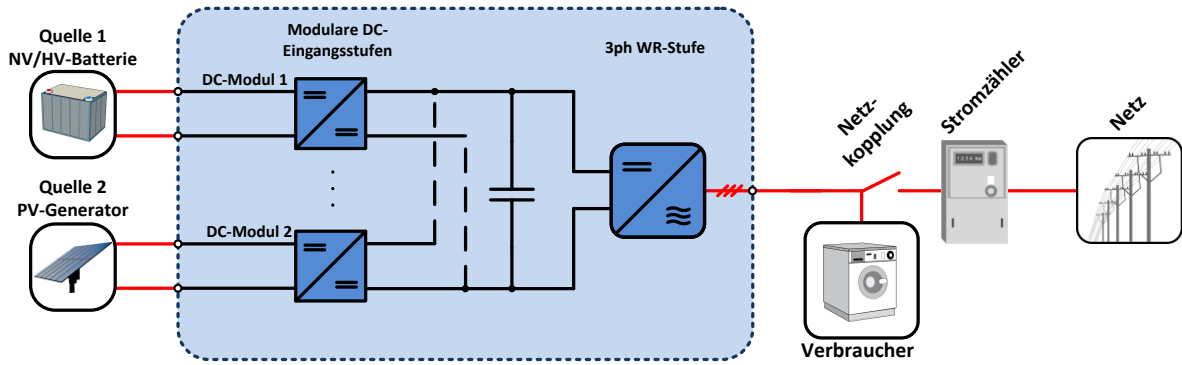


Abb. 3: Systemkonzept des Photovoltaik-Heimspeichers

Für die Auslegung der Ladeelektronik wurden neben den technischen Rahmenbedingungen weitere Einflussfaktoren berücksichtigt. Ein potentieller Zielmarkt könnten die ab 2019/20 aus der Förderung ausscheidenden Anlagen sein („100.000-Dächer-Programm“ im Rahmen des EEG 2000 – siehe Abb. 4). Diese könnten nachträglich durch ein Heimspeichersystem ergänzt werden und durch den erhöhten Eigenverbrauch eine höhere Rendite gegenüber der direkten Einspeisung ohne Förderung aufweisen. Ausgehend von diesen älteren Anlagen würde man zur Maximierung des Eigenbedarfs die Ladeelektronik in einer ähnlichen Größenordnung wie die PV-Leistung dimensionieren.

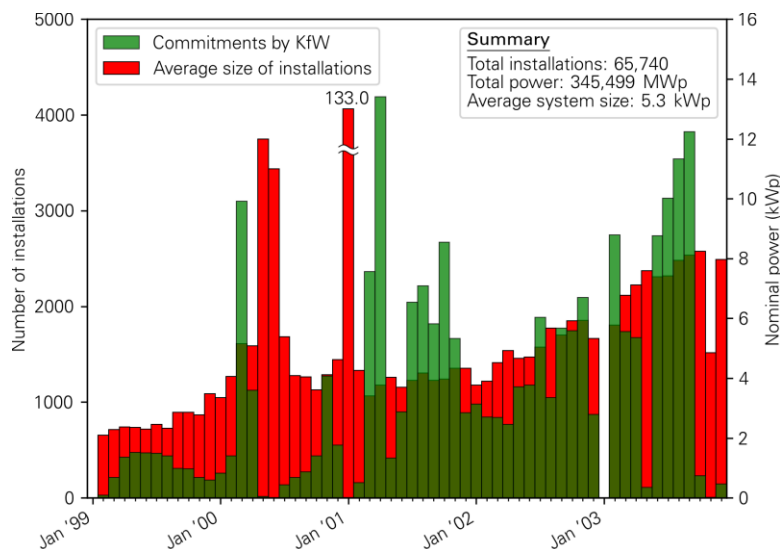


Abb. 4: Installierte PV-Anlagen im Rahmen des „100.000-Dächer-Programms“ – durchschnittliche PV-Leistung 5,3 kWp, Datenbasis [3]

Unter Berücksichtigung von Repowering (dt. Kraftwerkserneuerung) oder der Installation neuer PV-Systeme sollte diese Auslegung der Ladeleistung auf mindestens 50 % bzw. 30 % der PV-Spitzenleistung dimensioniert werden, um die Anforderungen der KfW [4] bzw. des §9 Abs. 2 im EEG 2017 [5] hinsichtlich der maximalen Wirkleistungseinspeisung zu erfüllen. Die ungenutzte Leistung kann dann in möglichst vielen Betriebszuständen im Batteriesystem zwischengespeichert und zu

einem späteren Zeitpunkt eingespeist oder im Idealfall selbst innerhalb des Haushalts verbraucht werden. In Abb. 5 werden die nach EEG geförderten PV-Installationen der letzten Jahre aufgeführt.

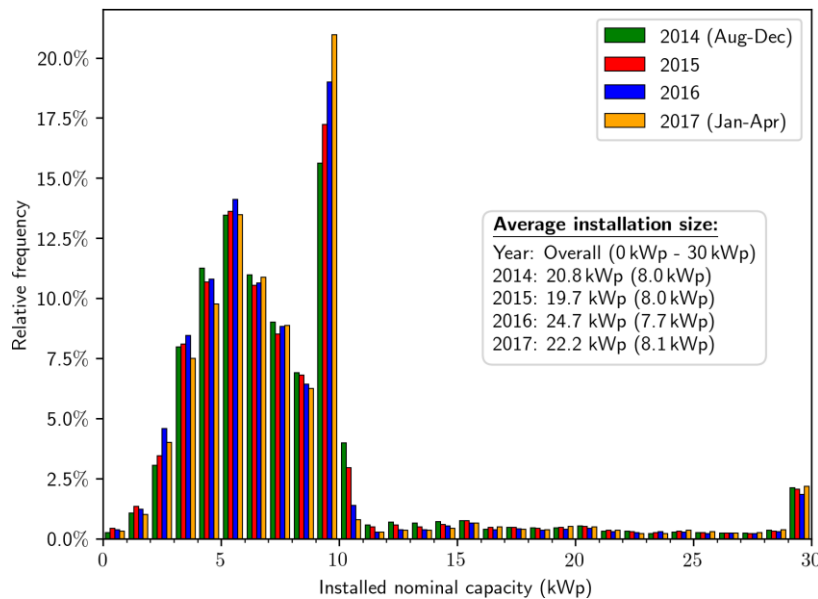


Abb. 5: *Installierte PV-Anlagen nach EEG-Förderung im Zeitraum von 2014 bis 2017 – durchschnittliche PV-Leistung 8 kWp (im Haushaltsbereich), Datenbasis [6]*

Die relative Verteilung der installierten Systeme weist für die Anwendung im Privathaushalt (bis 10 kW) ein Maximum bei Systemen zwischen 5 kWp und 6 kWp sowie zwischen 9 kWp und 10 kWp auf. Zusammenfassend lassen sich die technischen Systemanforderungen der Ladeelektronik wie in Tab. 1 darstellen.

Tab. 1: *Systemanforderungen an den DC/DC-Wandler*

PARAMETER	SYMBOL		WERT
Eingangsspannung	U_{bat}	HV Li-Ion Speicher	150...500 V _{DC}
Ausgangsspannung	U_{DC}	WR-Zwischenkreis	580...1.000 V _{DC}
Schaltfrequenz nominal	$f_{PWM,nom}$		200 kHz
Nennleistung	P_N		6,0 kW
Nennbatteriestrom	$I_{bat,N}$		25,0 A
Maximaler Batteriestromrippel	$I_{bat,ss}$		40 % · $I_{bat,N}$ = 10 A
Relative Überlast	$r_{\bar{u}}$		150 %

3. Topologieauswahl und Systemauslegung

Für die Anbindung der Hochvoltbatterie an den Wechselrichterzwischenkreis soll ein bidirektionaler DC/DC-Wandler eingesetzt werden. Als Hochvoltbatterie sollen Li-

Ionen-Batterien mit Betriebsspannungen zwischen 150 V und 500 V eingesetzt werden können. Die Wechselrichterzwischenkreisspannung wird je nach Betriebszustand zwischen 580 V und 1.000 V betragen. In dieser Anwendung kann auf eine galvanische Trennung verzichtet und somit die in Abb. 6 bis Abb. 10 dargestellten Topologien näher in Betracht gezogen werden.

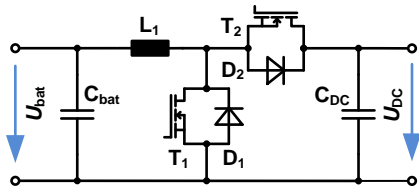


Abb. 6: Bidirektionaler Synchronwandler (auch Halbbrückenwandler)

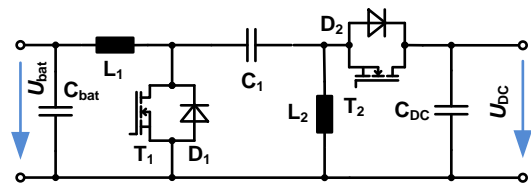


Abb. 7: SEPIC/Luo-Wandler

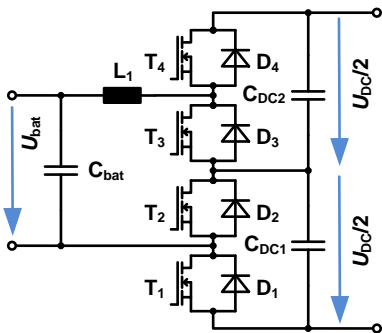


Abb. 8: Bidirektionaler, 3-Level-Gleichspannungswandler

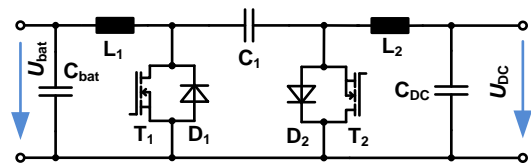


Abb. 9: Ćuk-Wandler

Eine abschließende grobe Übersicht und Bewertung der verschiedenen Wandlertopologien kann Tab. 2 entnommen werden. Die finale Entscheidung wurde für den 3-phasigen bidirektionalen Synchronwandler gefällt. Dabei spielt das gute Teillastverhalten sowie die breite Verfügbarkeit von B6-Modulen eine wesentliche Rolle für diese Auswahl.

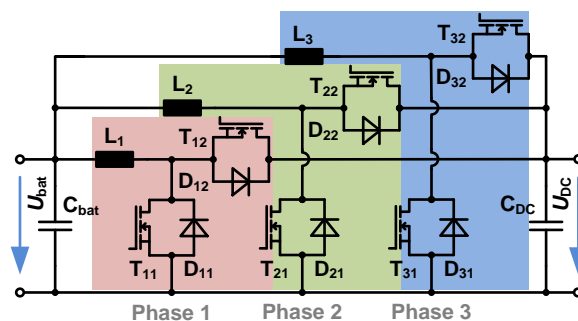


Abb. 10: 3-phasiger, bidirektionaler Synchronwandler

Tab. 2: Vergleich und Bewertung der Wandlertopologien

	1-phasiger Synchronwandler	Cuk-Wandler	SEPIC / Luo-Wandler	3-Level-Gleichspannungswandler	3-phasiger Synchronwandler
Anzahl Transistoren	2	2	2	4	6
Spannungsbelastung	100%	100%	100%	50%	100%
Spannungsverstärkung $U_{\text{Bat}}/U_{\text{DC}}$ - [von, bis]	[0; 1]	[0; -∞]	[0; ∞]	[0; 0,5]	[0; 1]
Strombelastung	0	-	-	+	+
Drosselgröße	0	-	-	++	+
Komplexität	0	-	-	-	-
Wirkungsgrad	0	-	-	+	+
Gewählte Topologie					X

4. Simulation – Modulationsarten zur Teillastoptimierung

Die Simulation des Ladereglers wurde in *PLECS*[®] durchgeführt. Es wurden die Schalt- und Durchlassverluste der Transistoren und Dioden abgebildet sowie Kern- und Durchlassverluste der Drosseln mittels Serien- und Parallelwiderstand modelliert. Der DC/DC-Wandler wird als 3-phasiger (engl. *interleaved*), bidirektionaler Synchronwandler wie in Abb. 10 dargestellt ausgeführt.

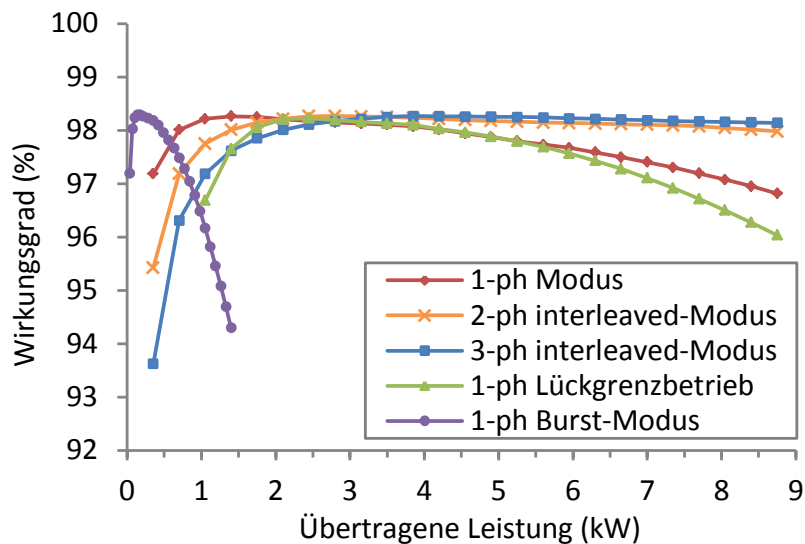


Abb. 11: Simulierte Wirkungsgradkurven für den untersuchten Batteriesteller unter Verwendung unterschiedlicher Ansteuerungsmethoden; $f_{\text{PWM,nom}} = 200 \text{ kHz}$; $f_{\text{PWM,max}} = 800 \text{ kHz}$; $U_{\text{DC}} = 750 \text{ V}$; $U_{\text{bat}} = 350 \text{ V}$

Als Transistoren werden 1,2-kV-SiC-MOSFETs mit einem Durchlasswiderstand ($R_{\text{DS(on)}}$) von 160 mΩ und antiparallelen SiC-Dioden eingesetzt. Die in Abb. 11 dargestellten Wirkungsgradkurven umfassen den ein- bis dreiphasigen Betrieb, einen

Modus mit variabler Schaltfrequenz zur Ansteuerung im Lückgrenzbetrieb und einen Burst-Modus mit nur einer Phase, bei dem der Wandler nur zu 10 % der Zeit aktiv ist.

Falls nicht alle Phasen gleichzeitig betrieben werden, empfiehlt es sich zur gleichmäßigen thermischen Ausnutzung die einzelnen Phasen alternierend zu betreiben [2]. Je nach Leistungsbereich zeigt ein jeweils unterschiedliches Modulationsverfahren den besten Wirkungsgrad [8].

5. Hardwareaufbau und Messergebnisse

Die verschiedenen Verfahren zur Wirkungsgradoptimierung in den unterschiedlichen Lastbereichen werden mit Hilfe eines Demonstrators messtechnisch untersucht. Zentraler Bestandteil des Wandlers ist eine B6-Vollbrücke mit 1,2 kV-SiC-MOSFETs und SiC-Schottky-Dioden. Die Strommessung und die Gate-Treiber wurden für eine maximale Schaltfrequenz von 800 kHz ausgelegt, um auch frequenzvariable Betriebsarten für kleine Leistungen testen zu können.

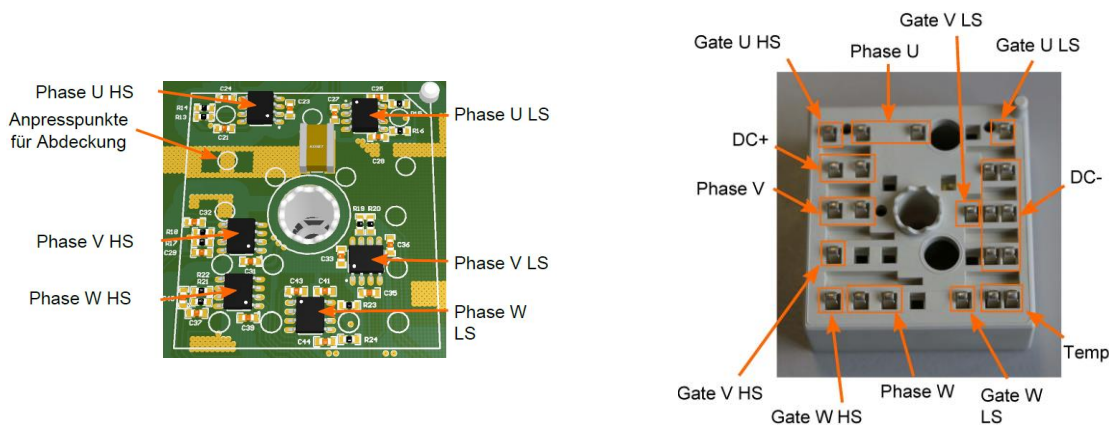


Abb. 12: Anordnung der Treiberschaltung (links) für das kompakte B6-SiC-Modul (rechts); (LS = low-side, HS = high-side)

Ein 3D-Modell sowie ein Foto des fertig aufgebauten, kompakten Batteriestellers ist in Abb. 13 bzw. Abb. 14 dargestellt.

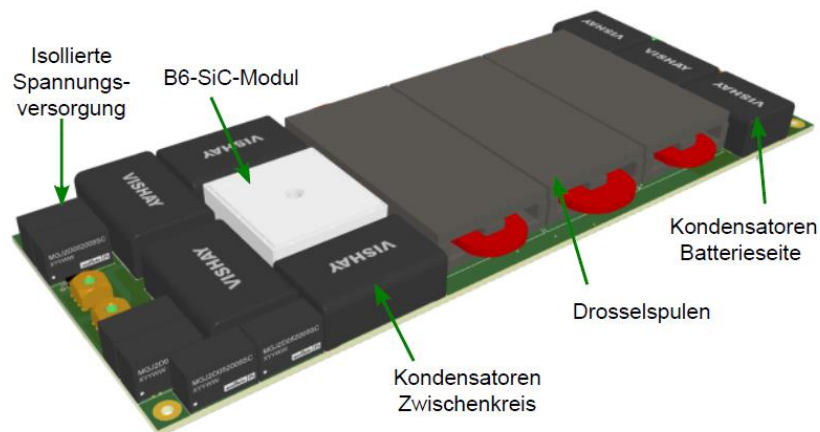


Abb. 13: 3D-Modell des kompakten 3-phasigen Demonstrators ohne Kühlkörper;

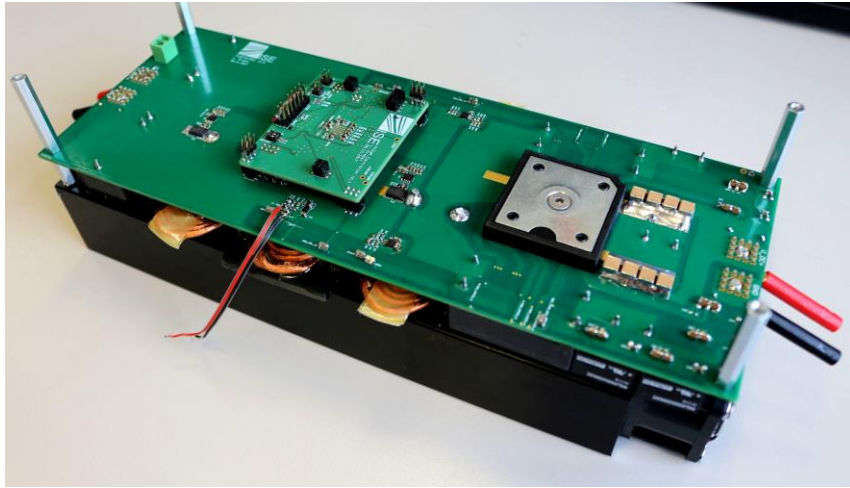


Abb. 14: Foto des fertig bestückten 3-phasigen Demonstrators mit Kühlkörper; Ansicht von unten; Abmessungen: 270 mm x 100 mm x 64,6 mm; $P_{\text{Nenn}} = 6,0 \text{ kW}$

Der fertig bestückte Demonstrator verfügt mit Kühlkörper und einer aktiven Lüftung über eine Gewicht von 2,53 kg. Das entspricht bei einer Nennleistung von 6 kW einem Leistungsgewicht von 2,37 kW/kg und einer aufs Volumen (1,74 dm³) bezogenen Leistungsdichte von 3,45 kW/dm³.

Die ersten ausführlichen Messungen des Demonstrators wurden mit einer Zwischenkreisspannung von 580 V und einer Batteriespannung von 500 V im Buck-Betrieb zur Ladung der Batterie bei einer verringerten Taktfrequenz von 50 kHz durchgeführt. Dieses Best-Case-Szenario wurde als Ausgangsbasis für die allgemeine Implementierung der verschiedenen Betriebsmodi ausgewählt. Die Messungen wurden an einer geregelten DC-Eingangsspannungsquelle und einer Stromsenke durchgeführt. Zur Wirkungsgradmessung wurde das Leistungsmessgerät Yokogawa WT 3000 eingesetzt (*DC: 0.05 % of reading + 0.1 % of range [max. Perror = 2,5 W] [9]*). Abb. 15 stellt die Wirkungsgradmessungen für drei verschiedene Betriebsmodi dar. Im ersten Modus werden alle drei Phasen parallel über den gesamten Leistungsbereich betrieben (rot). Wie zu erwarten ist der Wirkungsgrad für die geringen Leistungsbereiche eher gering. Das Wirkungsgradmaximum erreicht dieser Modus zwischen 4,5 kW und 6 kW. Im zweiten Betriebsmodus werden die einzelnen Phasen jeweils bis zur Nennlast betrieben (grün, blau, orange). Die starken Unterschiede der Phasen (U, V und W) lassen sich durch unterschiedliche Bauweisen der Drosselspulen erklären. Der dritte Betriebsmodus ist der Burst-Betrieb. Hier wurde eine der Phasen (in diesem Fall U) lediglich für 1/5 der Zeit aktiv getaktet (lila).

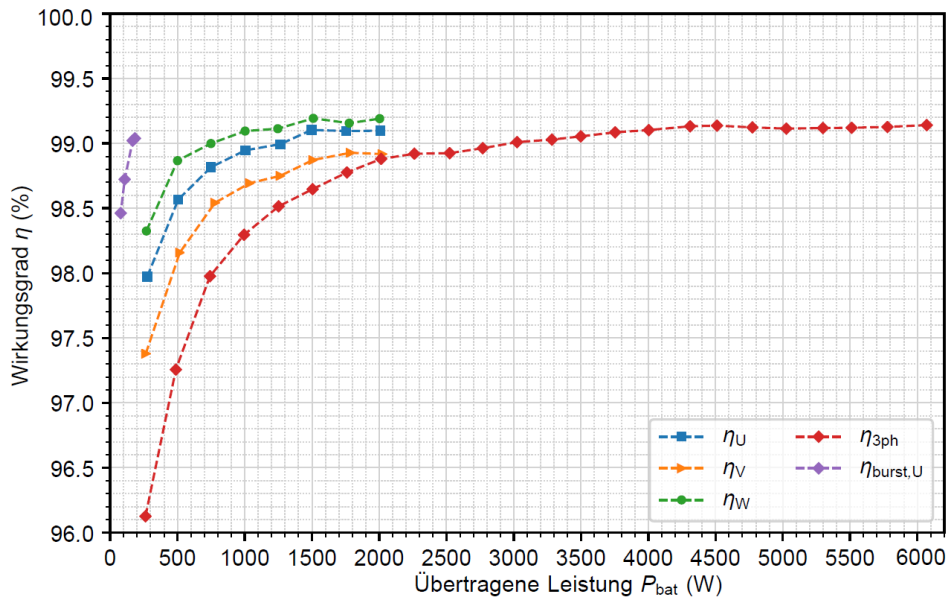


Abb. 15: Wirkungsgradkurven für den untersuchten Batteriesteller unter Verwendung unterschiedlicher Ansteuerungsmethoden; $f_{PWM,norm} = 50 \text{ kHz}$, $U_{DC} = 580 \text{ V}$, $U_{bat} = 500 \text{ V}$

6. Zusammenfassung

Es wurden Konzepte zur Teillastoptimierung untersucht, bewertet und in einer kompakten und effizienten Ladeelektronik implementiert. Die ersten Messergebnisse zeigen, dass die simulierten Maßnahmen zur Teillastoptimierung durchaus in der Hardware realisierbar sind. Der Gesamtaufbau der Ladeelektronik verfügt über ein kompaktes Bauvolumen von $1,74 \text{ dm}^3$ und ein Leistungsgewicht von $2,37 \text{ kW/kg}$.

In der weiteren Entwicklung soll der Teillastwirkungsgrad über den gesamten Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich optimiert werden. Außerdem soll die Regelung für einen automatisierten Betrieb implementiert werden. Neben der Teillastoptimierung ist vor allem auch der große Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich bei der Entwicklung der Ladeelektronik für Heimnetzspeicher eine große Herausforderung.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass ein mehrphasiger Aufbau ein großes Potential bietet um den Wirkungsgrad bei geringer Last zu optimieren. Zudem erlaubt die Verwendung einer integrierten B6-Vollbrücke einen sehr kompakten Aufbau und eine einfache bzw. kostengünstige Montage des Ladereglers. Die Verwendung von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern ermöglicht schließlich über einen weiten Leistungsbereich Wirkungsgrade von mehr als 99 %.



A. Literaturverzeichnis

- [1] Hochschule für Technik und Wirtschaft - HTW Berlin: Repräsentative elektrische Lastprofile für Einfamilienhäuser in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis. Datensatz, Berlin, 2015.
- [2] ZHOU, Siyuan; RINCON-MORA, G. A.: *A high efficiency, soft switching DC-DC converter with adaptive current-ripple control for portable applications*. in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 53, no. 4, pp. 319-323, April 2006. doi: 10.1109/TCSII.2005.859572
- [3] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien: *IWR Solarthermie Photovoltaik 100.000-Dächer-Programm*. <http://www.iwr.de/solar/markt/pvprog.html> Stand: 05.11.2017
- [4] KfW Merkblatt - Erneuerbare Energien: *KfW-Programm Erneuerbare Energien - "Speicher"*, Frankfurt Stand 01.01.2018
- [5] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist
- [6] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/RenewableEnergy/PV_data_tariffs/PV_statistic_node.html. Stand: 27.04.2017
- [7] ARMBRUSTER, Cornelius; SCHÖNER, Christian; SCHÖNBETT, Torben; KLÖNNE, Alfons; MERZ, Rainer: *Development of a High Efficient MPPT for Space Applications Using GaN Power Transistors*. PCIM Europe 2017, Nuremberg, Germany, 2017.
- [8] VAZQUEZ, Aitor; ARIAS, Manuel; RODRIGUEZ, Alberto; LAMAR, Diego G.; LURI, Sergio: *Master-slave technique with direct variable frequency control for interleaved bidirectional boost converter*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 2014. doi: 10.1109/ECCE.2014.6953502
- [9] YOKOGAWA Electric Corporation: *WT3000 Precision Power Analyzer User's Manual*. 8th Edition, (February 2014)