

Untersuchung verschattungsoptimierter Halbzellenmodule mit einlaminiertes Leistungselektronik für das MPP-Tracking auf Substring-Ebene

Cornelius Armbruster, Christoph Kutter, Alexandra Schmid, Ammar Tummali, Gilles Rouffaud, Felix Basler, Bernhard Wille-Hausmann, Jan Famulla, Marc Andre Schüler, Uthman Olayinka Oyebanji

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Cornelius.armbruster@ise.fraunhofer.de

1. Einleitung

Das Zusammentreffen neuer Leistungselektronik Technologien auf Basis von Galliumnitrid (GaN) mit neuen Photovoltaik Anwendungen wie Gebäudeintegrierter Photovoltaik (engl. BIPV) [1, 2, 3] und Fahrzeugintegrierter Photovoltaik (engl. VIPV) [4, 5, 6], bzw. dem rasant wachsenden Bereich der Elektromobilität, ermöglicht neue, verknüpfte Lösungsansätze.

Innerhalb integrierter Photovoltaik Anwendungen erfüllen Photovoltaikmodule neben der Stromerzeugung meist eine Doppelfunktion als Gebäudefassade oder Fahrzeugdach. Durch diese Installationsbedingungen werden die Solarmodule nicht mehr optimal zur Sonne ausgerichtet. Dies hat zur Folge, dass häufiger MPP (engl. Maximum Power Point) unter geringen Einstrahlungsintensitäten und auftretenden Teilverschattung zu erwarten sind. Innerhalb gebogener PV-Module variiert zusätzlich der Einstrahlungswinkel für jede Solarzelle, sodass ein Strom-Mismatch und damit signifikante Ertragseinbußen zu erwarten sind [7]. In Abb. 1 wird der dynamische Verlauf eines Schattens auf einem Halbzellenmodul und die entsprechende relative Einstrahlung schematisch dargestellt.

In Folge der gestiegenen Anforderungen muss also nicht mehr nur das PV-Modul, sondern das Gesamtsystem auf den Anwendungsfall optimiert werden, um einen hohen Ertrag zu erzielen.

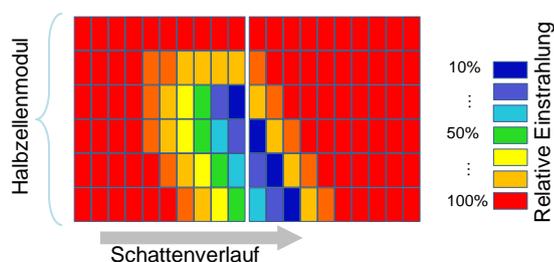


Abb. 1: Schematische Darstellung eines wandernden Schattens und der entsprechenden Einstrahlung auf einem Halbzellenmodul mit 120 Zellen; "Dynamic Shading"

Bei stationären Anwendungen kann der Einsatz von "All-in-One"-Lösungen (PV-Modul + Leistungselektronik) die Installationsphase im Vergleich zu Systemen mit mehreren zu installierenden und zu verkabelnden Elementen vereinfachen. So kann z. B. bei privaten Solaranlagen der Einsatz von vormontierten oder direkt unter dem PV-Modul befestigten Mikro-Wechselrichtern die Montage der Anlage deutlich erleichtern und somit zu einer Reduzierung der Installationskosten führen. Durch modulintegrierte Leistungselektronik könnte für die VIPV zusätzlicher Bauraum für den Wandler eingespart werden.

Der hier vorgestellte Lösungsansatz, die Leistungselektronik direkt in ein PV-Modul zu integrieren, ermöglicht zudem die Entwicklung von MPPT-Funktionen auf Submodul-Ebene anstatt auf Modulebene, wie es derzeit der Fall ist. Somit werden PV-Module durch diese zusätzliche Leistungselektronik auch bei Teilverschattungen wesentlich häufiger im maximalen Arbeitspunkt betrieben. Damit ist es nun

theoretisch möglich, die schädlichen Auswirkungen von Verschattungen in Fassaden und in teilweise nicht optimalen PV-Standorten zu minimieren und somit den PV-Ertrag zu optimieren.

Darüber hinaus ermöglicht eine möglichst kleinteilige MPPT-Funktion auf Submodul-Ebene das Entstehen neuer Anwendungen, insbesondere für Elektrofahrzeuge. Da ein Fahrzeug ständig in Bewegung ist, unterliegt die solare Einstrahlung meistens großen Schwankungen, z. B. durch schnell durchlaufende Schatten (Dynamic Shading). Um somit den PV-Ertrag auch in diesen mobilen Anwendungen zu maximieren, sind neue und äußerst schnelle MPP-Tracker notwendig.

2. Lösungsansatz

Um den in der Einleitung angesprochenen Anforderungen gerecht zu werden, wird in der hier vorgestellten Lösung ein hochdynamisches MPP-Tracking durch den Einsatz moderner schnelltaktender Galliumnitrid Transistoren entwickelt. Durch den Einsatz dieser Wide-Bandgap-Halbleiter kann das Volumen der passiven Komponenten reduziert, die Kompaktheit der Wandler stark verbessert und die Entwicklung äußerst flacher Leistungselektronik-Strukturen ermöglicht werden. Der Einsatz von GaN-Bauelementen in Verbindung mit einer hohen Schaltfrequenz für ein hochdynamisches MPP-Tracking öffnet somit den Weg für die Integration von Leistungselektronik in PV-Modulen.

Die Entwicklung einer flachen Struktur erlaubt es, die Leistungselektronik direkt unter den Photovoltaikzellen des Moduls zu platzieren. Das in Abb. 2 dargestellte System zeigt ein Halbzellen- oder „Butterfly“-Modul, welches an jedem der sechs Substrings mit einem Hochsetzsteller für das MPP-Tracking ausgestattet ist.

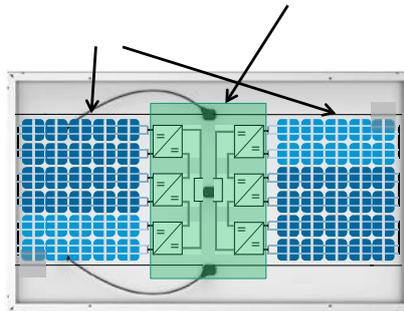


Abb. 2: Symbolische Darstellung eines Halbzellenmoduls mit 6 Substrings und 6 MPP-Trackern

3. Anforderungen an die Hardwareentwicklung

In klassischen stationären Photovoltaikanwendungen kann für die Geschwindigkeit eines MPP-Trackers eine Annahme von 0,1 bis 1 % $\frac{V_{mpp}}{s}$ getroffen werden [8]. In VIPV-Anwendungen sind hoch dynamische Verschattungsfälle anzunehmen und so ein weitaus schnelleres Tracking nötig. Unter Berücksichtigung der Breite eines Substrings und der eigenen Bewegung eines Fahrzeuges ergeben sich somit Trackingzeiten im Bereich von Millisekunden [9, 10, 11, 12]. Durch die Verwendung von GaN-Leistungsschaltern ist der Betrieb mit hohen Schaltfrequenzen möglich und somit ein höchst dynamisches MPP-Tracking realisierbar.

Neben den klassischen Anforderungen für leistungselektronische Entwicklungen, wie beispielsweise einem möglichst hohen Wirkungsgrad, der Minimierung der Kosten und der Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit, spielen in dieser Anwendung weitere Aspekte eine dominante Rolle. So müssen die elektronischen Bauelemente zusätzlich explizit für höhere (Lager-)Temperaturen ausgelegt sein und über eine möglichst geringe Bauhöhe verfügen. Darüber hinaus wurde das gewählte MPPT-System möglichst einfach umgesetzt, um die Fehleranfälligkeit zu minimieren.

Die Leistungselektronikstruktur basiert auf mehreren geschichteten Leiterplatten, um ein sehr flaches Gesamtsystem zu schaffen, in welches die elektronischen Komponenten integriert, bzw.

eingeschlossen sind. Nach außen bildet die Leistungselektronik eine möglichst glatte Struktur, die über gezielte Wärmeleitpfade verfügt und durch eine geringe Bauhöhe gut einlaminiert werden kann.

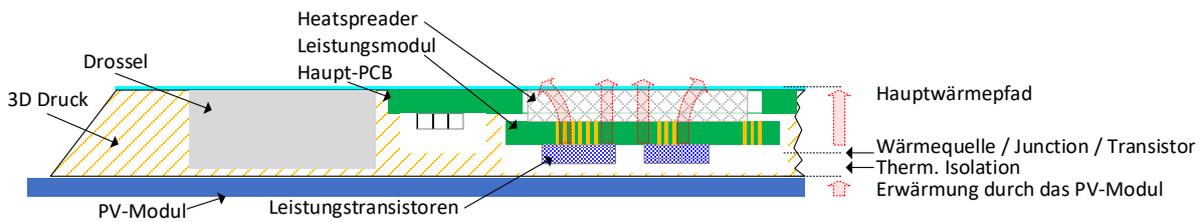


Abb. 3: Schematischer Aufbau unter Berücksichtigung der entsprechenden Wärmepfade für die Leistungselektronik

4. Integration der Leistungselektronik

Die Integration der Leistungselektronik stellt für den Laminationsprozess eine entsprechende Herausforderung dar. Auf der einen Seite darf die eingebrachte Elektronik nicht zur Zerstörung der Solarzellen führen, auf der anderen Seite müssen aus Rücksicht auf die elektronischen Bauelemente die Laminationstemperaturen angepasst werden. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Entwicklung möglichst flacher Drosselspulen gelegt. Hierzu wurde nach Bewertung unterschiedlicher Ansätze ein Ferrit für hohe Frequenzen in Form eines EI-Kerns mit einer HF-Litze eingesetzt. Die entwickelte Leistungselektronik besteht aus sechs einzelnen DC-DC-Wandlern, welche auf einer Platine zusammengeführt werden. In Tab. 1 sind die wesentlichen technischen Eckdaten der Wandler dargestellt. Diese Wandler können in der vorgestellten Hardware zu unterschiedlichen Modi miteinander verschaltet werden (in Serie oder Parallel).

Tab. 1: Spezifikation des DC-DC-Wandlers

PARAMETER	SYMBOL	WERT
Eingangsspannung (Substring)	U_{IN}	7,5...14 V _{DC}
Ausgangsspannung	U_{OUT}	48 V _{DC}
Ausgangsleistung	P_{Out}	60 W (pro Wandler)
Schaltfrequenz	f_{SW}	≈ 500 kHz
MPPT-Reaktionszeit	t_{MPPT}	<10 ms
Maximale Bauhöhe	h	6 mm

Eine pyramidenförmige Struktur sowie eine Optimierung der Laminationsparameter zeigten im Rahmen der ersten Untersuchungen die vielversprechendsten Ergebnisse. Wie in Abb. 4 erkennbar ist, wird die hochkompakte Leistungselektronik direkt unter das Backsheet des PV-Moduls laminiert.

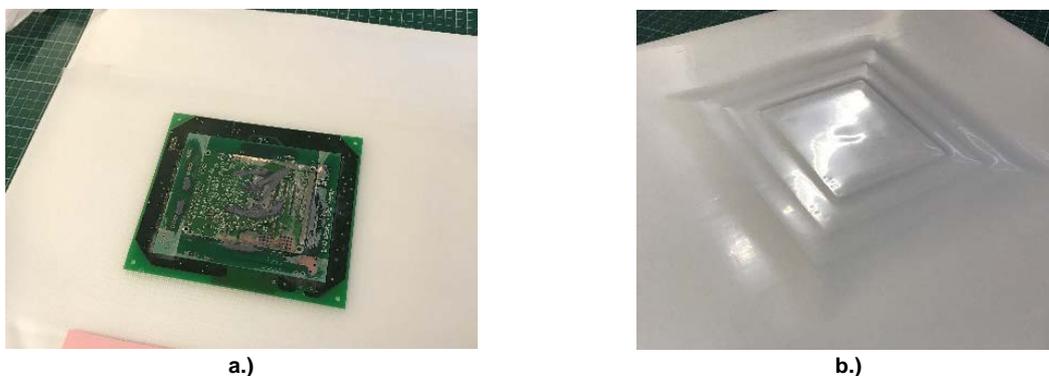


Abb. 4: Prototyp der zu laminierenden Leistungselektronik in Pyramidenstruktur – vor dem Laminierprozess (a.) und die einlamierte Leistungselektronik mit deutlich erkennbaren Pyramidenstufen (b.)

Um den oben beschriebenen Aufbau der Leistungselektronik mit einer entsprechend abgeflachten Kante für die Einlaminiierung zu ermöglichen, wurde ein 3D-Körper mit einem temperaturbeständigen Filament gedruckt. Der 3D-Druck führt zu einer mechanischen Stabilisierung der gesamten Struktur und ermöglicht durch entsprechende Luftschlüssen auch eine thermische Entkopplung zwischen Photovoltaikmodul und Leistungselektronik. Der gesamte Aufbau ist in Abb. 5 dargestellt.

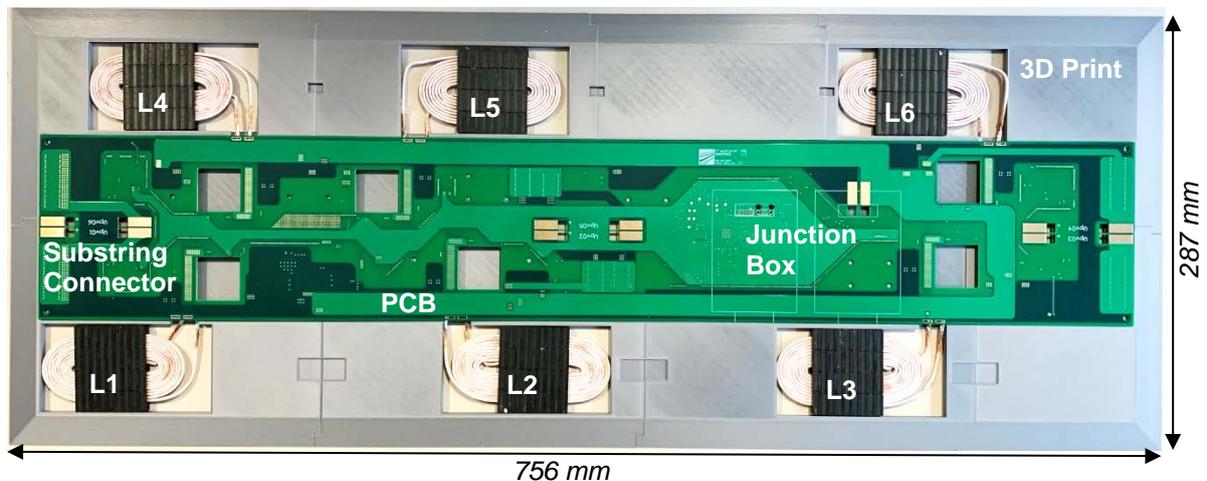


Abb. 5: Entwickelte Leistungselektronik mit den 6 DC-DC-Wandlern und dem 3D-Druck

5. Mehrertrag durch lokales MPPT

Um bewerten zu können, wie viel Mehrertrag das Submodule-MPPT-Konzept erzielen kann, wurde der Ertrag eines Butterflymodul mit 6 eingebetteten MPP-Trackern und ein konventionelles Vollzellenmodul mit 3 Bypass-Dioden in einem Sommertagszenario mit durchlaufener Verschattung eines Kamins simuliert. Die bei der Simulation verwendeten Solarzellen haben die gleichen nach Zellfläche gewichteten elektrischen Parameter für beide Module. In dem in Abb. 6 dargestellten Diagramm ist die Leistung beider Module im Minutentakt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Leistungsverlauf des Moduls mit MPP-Trackern dem solaren Leistungsverlauf deutlich besser folgt als das konventionelle Modul. Das Modul mit integrierten MPP-Trackern erzielte im untersuchten Szenario für einen Sommertag einen Ertrag von 1,75 kWh, etwa 55% mehr als das konventionelle Modul.

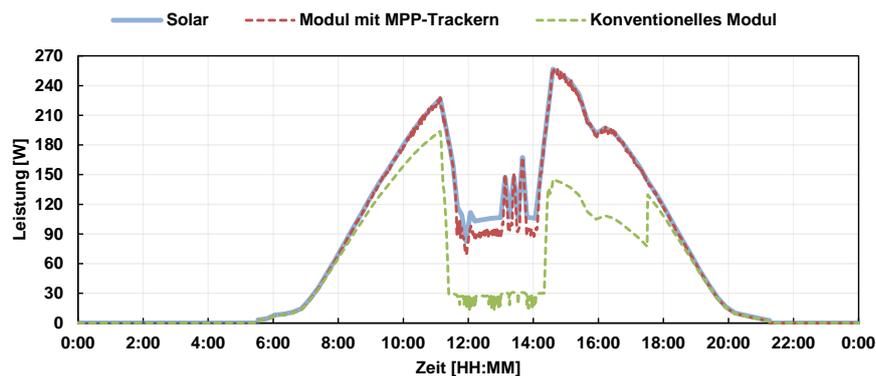


Abb. 6: Leistungsverlauf für die Solareinstrahlung (hellblaue durchgehende Linie), das Modul mit MPP-Trackern (rote gestrichelte Linie) und das konventionelle Modul (grüne gestrichelte Linie)

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt die Notwendigkeit und die Anforderungen einer hoch dynamischen MPPT-Leistungselektronik für den Einsatz in BIPV- oder VIPV-Anwendungen dar. Es wird ein technischer Lösungsansatz für ein dezentral verteiltes MPPT (für sechs Substrings), mit schnellschaltenden GaN-Transistoren und sehr geringer Bauhöhe vorgestellt. Die entwickelte Leistungselektronik erfüllt die

Anforderungen, um in ein Halbzellenmodul einlaminiert zu werden. Dabei wurden die elektronischen Bauelemente sowie der gesamte Aufbau entsprechend ausgelegt und entwickelt.

Im Rahmen der weiteren Untersuchung soll die Hardware hinsichtlich der Wandler-Topologie vermessen und abschließend bewertet werden. Außerdem soll untersucht werden, welchen Einfluss der Laminationsvorgang auf die Leistungselektronik hat. Darüber hinaus bietet der Aufbau die Möglichkeit, die Wirkung einer direkt integrierten Elektronik auf das Halbzellenmodul zu untersuchen. Eine weitere Herausforderung für Photovoltaikmodule mit integrierter Leistungselektronik wird die Charakterisierung und Kalibrierung sowie die Durchführung von Zuverlässigkeitstest sein.

7. Literaturverzeichnis

- [1] B. Bläsi, T. Kroyer, O. Höhn, M. Wiese, C. Ferrara, U. Eitner und T. Kuhn, „Morpho Butterfly Inspired Coloured BIPV Modules,“ in *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, 2017.
- [2] C. Kutter, B. Bläsi, H. Wilson, T. Kroyer, M. Mittag, O. Höhn und M. Heinrich, „Decorated Building-Integrated Photovoltaic Modules: Power Loss, Color Appearance and Cost Analysis,“ in *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2018*, Brüssel, 2018.
- [3] J. G. S. W. H. K. T. Eisenlohr, „DC-DC Power Optimizers for Building-Integrated Photovoltaic Applications - A Simulation-Based Evaluation,“ in *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Brüssel, 2018.
- [4] M. Heinrich, C. Kutter, F. Basler, M. Mittag, L. Alanis, D. Eberlein, A. Schmid, C. Reise, T. Kroyer, D. Neuhaus und H. Wirth, „Potential and Challenges of Vehicle Integrated Photovoltaics for Passenger Cars,“ in *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, München, 2020.
- [5] C. Kutter, F. Basler, L. Alanis, J. Markert, M. Heinrich und D. Neuhaus, „Integrated Lightweight, Glass-Free PV Module Technology for Box Bodies of Commercial Trucks,“ in *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, München, 2020.
- [6] U. Eitner, M. Ebert, T. Zech, C. Schmid, A. Watts und M. Heinrich, „Solar potential on commercial trucks: Results of an irradiance measurement campaign on 6 trucks in Europe and USA,“ in *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, München, 2017.
- [7] S. Neven-du Mont, M. Heinrich, A. Pfreundt, C. Kutter, A. Tummalieh und D.-H. Neuhaus, „Energy Yield Modelling of 2D and 3D Curved Photovoltaic Modules,“ in *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, München, 2020.
- [8] H. Schmidt, B. Burger, U. Bussemas und S. Elies, „How fast does an mpp tracker really need to be?,“ in *24th european photovoltaic solar energy conference*, Hamburg, 2009.
- [9] C. Schuss, B. Eichberger und T. Rahkonen, Impact of solar radiation on the power of moving photovoltaic installations, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC): IEEE, 2018, pp. 1-6.
- [10] S.-H. Ko und R.-M. Chao, „Photovoltaic dynamic mppt on a moving vehicle,“ *Solar Energy*, Bd. vol. 86, Nr. no. 6, pp. 1750-1760, 2012.
- [11] I. Nakir, A. Durusu, H. Akca, A. Ajder, R. Ayaz, E. Ugur und M. Tanrioven, „A new mppt algorithm for vehicle integrated solar energy system,“ *Journal of Energy Resources Technology*, Bd. vol. 138, Nr. no. 2,, 2016.
- [12] M. A. Huque, S. J. Coley und T. S. Key, „Evaluating dynamic maximum power point tracking with variable solar irradiance,“ in *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Piscataway, NJ, 2013.