

PV-Systemtechnik für die Energiewende



Fraunhofer IWES

Dr. Marco Jung
marco.jung@iwes.fraunhofer.de

Maria Roos
maria.roos@iwes.fraunhofer.de

Fabian Niedermeyer
fabian.niedermeyer@iwes.fraunhofer.de

Dr. Philipp Strauß
philipp.strauss@iwes.fraunhofer.de

ISFH

Michael Knoop
knoop@isfh.de

Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Bruno Burger
bruno.burger@ise.fraunhofer.de

ZAE

Dr. Christian Camus
christian.camus@zae-bayern.de

Dr. Andreas Baumann
andreas.baumann@zae-bayern.de

ZSW

Peter Lechner
peter.lechner@zsw-bw.de

Einleitung

Die Energiewende und der damit verbundene Anteil von Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV)-Systemen fordert eine stetige Weiterentwicklung aller Komponenten, die eine PV-Anlage ausmachen (PV-Systemtechnik), damit PV-Anlagen ihrer steigenden Systemverantwortung dauerhaft gerecht werden können. Im Wesentlichen wird durch die PV-Systemtechnik die Photovoltaik effizient und nutzbar gemacht. Dies reicht von Kleinstanlagen (z. B. Dachanlage oder gebäudeintegrierte Anlage) bis hin zum Kraftwerksmaßstab der Multimegawattklasse.

Das Herzstück solcher PV-Anlagen stellt der Wechselrichter dar. Mit ihm kann die erzeugte Leistung konform ins Verbundnetz eingespeist, ein autarkes Inselnetz bereitgestellt und auch eine Direktversorgung ermöglicht werden.

Neben reinen PV-Systemen rücken aktuell zunehmend PV-Eigenverbrauchsanlagen und PV-Diesel-Lösungen stärker in den Vordergrund. PV-Eigenverbrauchsanlagen zeichnen sich dadurch aus, dass mit Hilfe von Batteriesystemen oder durch die Kopplung mit Wärmepumpen, ein höherer lokaler Verbrauch der erzeugten Energie realisiert wird. PV-Diesel-Lösungen kommen vor allem in Inselnetzen und netzfernen Regionen zum Einsatz, um den Dieselerverbrauch zu reduzieren (*Abbildung 1*).

Durch solche Entwicklungen, die Erschließung neuer internationaler Absatzmärkte, die energetische Aktivierung von weiteren Gebäudeflächen neben der Dachfläche und die Elektrifizierung des Verkehrs werden neue Anforderungen und Herausforderungen an die PV-Systemtechnik gestellt.

Dieser Beitrag stellt einen Ausschnitt der aktuellen Forschungstätigkeiten im Bereich der PV-Systemtechnik der Autoren dar und adressiert aktuelle Fragestellungen und Lösungen zur Verbesserung der PV-Systemtechnik.

Gebäudeintegrierte Photovoltaik in Dächern und Fassaden (BIPV)

Die Nutzung der Gebäudehülle zur lokalen Stromerzeugung durch Photovoltaik spielt in mehrfacher Hinsicht eine wichtige Rolle für die Umsetzung der Energiewende. Für den Ausbau der Photovoltaik in Deutschland können Bauwerke die überwiegenden Flächen zur Verfügung stellen. 1,9 GW PV-Leistung sollen laut EEG (§4, §28) bis 2025 jährlich an Bauwerken installiert werden. Die EU-Richtlinie für energieeffiziente Gebäude von 2010 fordert Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) ab 2019 für öffentliche Gebäude und ab 2021 auch für private Gebäude. Die Umsetzung erfolgt in Deutschland durch das Energieeinspargesetz EnEG und die Energieeinsparverordnung EnEV. Schon die aktuell gültige EnEV 2014 mit den verschärften Anforderungen seit Januar 2016 bei Neubauten erfordert häufig die Einbindung lokaler Energiequellen, dabei ist der Niedrigstenergiestandard noch nicht umgesetzt. Bei der energetischen Optimierung von Gebäuden wird die Photovoltaik eine wichtige Rolle spielen und somit langfristig die Baukultur beeinflussen. Der weitere Ausbau von Photovoltaik an Gebäuden wird daher nicht nur kosteneffiziente Systeme benötigen, sondern auch die Akzeptanz und das Interesse von Architekten, Investoren, Kommunen, Stadtplanern und der Bevölkerung. Hier kann die BIPV gestalterisch hochwertige Lösungen bieten.

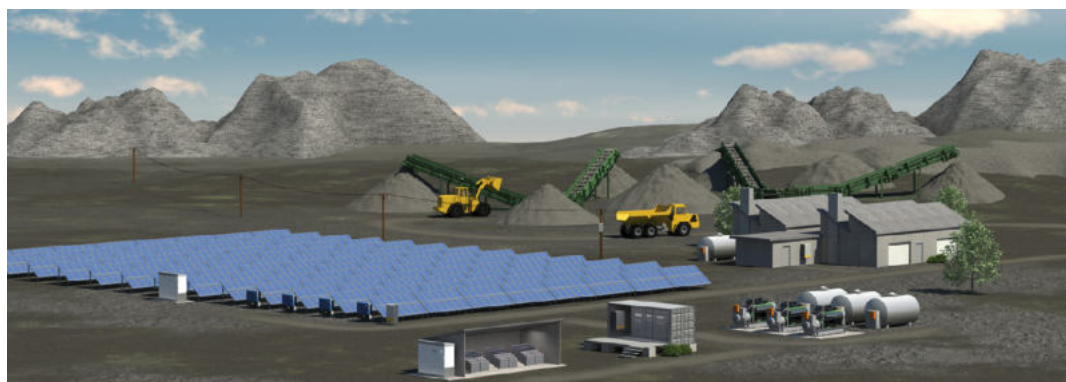


Abbildung 1
PV-Diesel Inselnetz
(Quelle: SMA)



Abbildung 2
PV-Testfassaden
am Fraunhofer IWES

Mit zunehmender Nutzungskonkurrenz der Dächer (Rückkühler, Zuluft/Abluft, usw.) stellen auch PV-Fassaden ein zu erschließendes Potenzial dar, insbesondere bei Bürogebäuden im urbanen Bereich. Die Energieaktivierung der Fassaden zur Stromerzeugung bietet daher eine weitere Möglichkeit den lokalen Energieerzeugungsanteil zu erhöhen. Für die Nutzung sind jedoch intensive Forschungsanstrengungen notwendig, da die komplexen Einstrahlungs- und Verschattungssituationen an Fassaden sowie die Doppelfunktion der PV-Anlagen als Energieerzeuger und Teil der Gebäudehülle Anforderungen an die PV stellen, die über die von PV-Aufdachanlagen hinausgehen.

Bei BIPV-Systemen sind im Vergleich zu Aufdachanlagen in der Regel höhere Ertragseinbußen durch Verschattung und Anforderungen an die Sicherheit zu beachten. Der Einsatz von elektronischen Komponenten, wie DC/DC Optimierer oder Modulwechselrichter (MLPE) ist hier eine hilfreiche Option. Aufgrund erhöhter Temperatur und erschwelter Zugänglichkeit zur PV-Fassade, ist aber eine hohe Zuverlässigkeit der elektronischen Komponenten eine wichtige Voraussetzung. Die Evaluation von Lebensdauer und Ausfallraten von MLPE-Komponenten mittels Accelerated Life Testing (ALT), liefert dafür wertvolle Informationen. ALT-Untersuchungen müssen dazu auf die spezifische Stressbelastung des BIPV-Anwendungsfalls bezüglich der Stressparameter angepasst werden. *Abbildung 2* zeigt PV-Testfassaden zur Ermittlung der Betriebsbedingungen in hinterlüfteten Fassadensystemen.

Schließlich erfolgt die Auslegung der optimalen Systemtechnik für ein BIPV-System in Abstimmung mit dem jeweiligen Modultyp, wie z. B. der CIGS-Dünnschicht oder der c-Si Technologie.

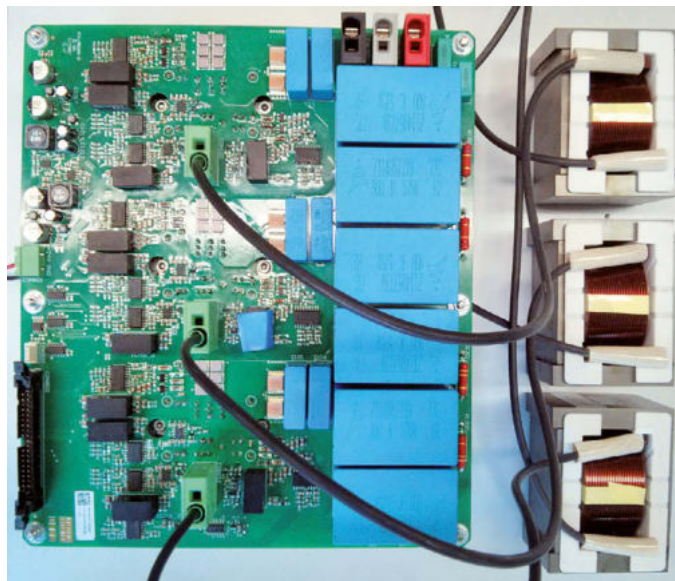
Entsprechende Komponentenverbesserungen und die Prozessverbesserung bei der Planung und Zulassung von BIPV-Anlagen können helfen, die Wettbewerbsfähigkeit von PV-Fassaden zu erhöhen und eine schnellere Erschließung des vorhandenen Fassadenpotenzials ermöglichen.

PV-Wechselrichter der nächsten Generation

PV-Wachstumsmärkte liegen heute überwiegend in Regionen, die härtere Umweltauflagen an den Wechselrichter stellen. Hitze, Kälte, Staub- und Salzablagerungen, Feuchtigkeit, Druck und kosmische Strahlung sind Herausforderungen für den zuverlässigen Betrieb der Anlagen in Wüstenregionen, Tropen, Meeresgegenden, Gebirgen und in arktischen Klimazonen. Zusätzlich stellt der Kostendruck auf den Stromrichter von ca. 10% pro Jahr eine weitere wesentliche Größe für neue Technologieanstrengungen dar.

Aktuell werden neue Wechselrichterlösungen erforscht, die durch neue Halbleitertechnologien (Siliziumkarbid und Galliumnitrid) einen Einsatz der Wechselrichter in den neuen Regionen zuverlässig und kostengünstig ermöglicht.

Abbildung 3
PV Wechselrichter für erhöhte Umwelthanforderungen mit 25kVA und SiC-Halbleitern
 (Quelle: Fraunhofer IWES)



Die demonstrierte Erhöhung der Leistungsdichte auf 1 kg/kW bei einem 25 kVA Wechselrichter mit SiC-Halbleitern (Abbildung 3) und bei einem 1,8 kVA Wechselrichter mit GaN-Halbleitern, lässt eine signifikante Reduzierung des Materialeinsatzes bei z. B. den neuen passiven Komponenten zu (konventionell 2–2,5 kg/kW).

Netzintegration bei Stromrichter dominierten Netzen

Eine besondere Herausforderung für einen sicheren Netzbetrieb der Zukunft stellt die Verdrängung der konventionellen Kraftwerke durch stromrichtergekoppelte dezentrale Erzeugungsanlagen dar, wie z. B. Photovoltaik und Windanlagen. Das heißt, zukünftig müssen die räumlich verteilten Erzeugungsanlagen mehr und mehr die Aufgabe der konventionellen Kraftwerke übernehmen und damit auch die Netzspannungsführung.

Netzbildende spannungseinprägende Stromrichter können grundsätzlich die geforderte Netzregelung unterstützen. Derzeitig werden in der Praxis netzbildende Stromrichter nur in Inselnetzen und insbesondere bei unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen (USV) eingesetzt. Zukünftig könnten die verteilten Anlagen in Stromrichter dominierten Netzen bzw. im klassischen Verbundnetz einen Beitrag zur Systemstabilität und für eine zuverlässige Stromversorgung liefern. Ein Konzept ist die Überführung von konventionellen Kraftwerksstatiken ($f(P)/U(Q)$ -Kennlinien) in die Stromrichter [1], [2]. Einer der Vorteile wäre die kommunikationslose Interaktion der Netzbildner in Echtzeit über die Netzfrequenz und der Netzspannung [3].

Im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken sind ca. 60% der installierten PV-Leistung im Niederspannungsnetz angeschlossen. Die Leitungsimpedanz des Hochspannungsnetzes bzw. Mittelspannungsnetzes ist überwiegend induktiv und ermöglicht eine einfache Entkopplung der Wirkleistung und der Spannung. Im Niederspannungsnetz überwiegt der ohmsche Anteil der Leitungsimpedanz. Somit ergeben sich hohe Anforderungen an die Güte und Robustheit der Stromrichterregelung. Eine große Herausforderung wird zukünftig die Vermeidung der Blindleistungspendelungen zwischen den netzbildenden Stromrichtern sein und damit ein stabiler und effizienter Betrieb im Verbundnetz.

Eigenverbrauch durch PV-Batteriesysteme

PV-Speicher werden in der Regel geladen, sobald ein Überschuss an Erzeugungsleistung existiert. Somit wird der solare Deckungsanteil und der Eigenverbrauch vor Ort gesteigert und der Netzbezug reduziert.

Um ein netzdienliches Verhalten zum Beispiel durch Kappung von Einspeisespitzen während der Mittagszeit zu erreichen oder eine mögliche Abregelung von Anlagen durch den Netzbetreiber zu verhindern, bietet sich der Einsatz von prognosebasierten Betriebsstrategien an.

Die sinkende Einspeisevergütung auf der einen und steigende Stromkosten auf der anderen Seite, lassen die Speicherung von überschüssigem PV-Strom zum späteren Verbrauch bei mangelnder PV-Erzeugung stets lukrativer werden. Dieser Trend wird durch die Preisdegression dezentraler Solarstromspeicher auf Basis von Blei-Säure oder Lithium-Ionen, den verbreitetsten Batterietechnologien, verstärkt.

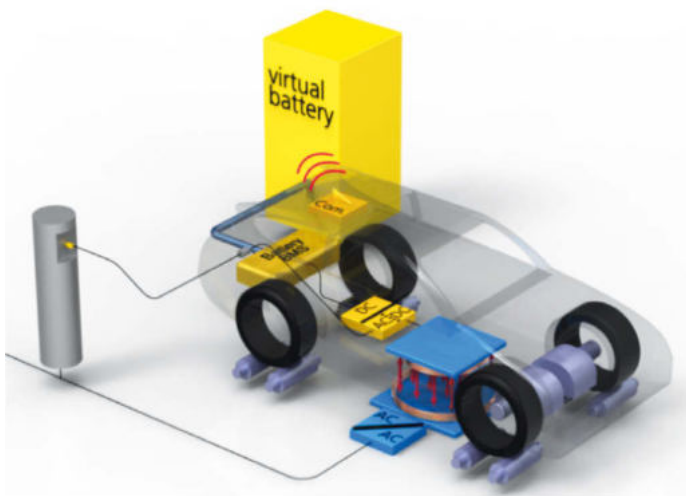


Abbildung 4

Konzept des multifunktionalen Ladens

(Quelle: Fraunhofer IWES)

Vor allem Lithium-Ionen-Batteriesysteme, bei denen die Endverbraucherpreise über die letzten Jahre hinweg um 15–20%/a gesunken sind, spielen mit einem Anteil von über 90% der in Deutschland neu installierten Systeme Ende 2015 eine immer wichtigere Rolle.

Für Investitionsentscheidungen ist es wichtig, die Effizienz von PV-Speichersystemen abschätzen zu können. Diese ist, neben der eingesetzten Speichertechnologie, von der verwendeten Leistungselektronik und deren Regelung abhängig. Dabei spielt insbesondere die Regelung der Betriebszustände eine wichtige Rolle. Diese werden durch die Systemdimensionierung, die Solarstrahlung und die nutzerabhängige elektrische Haushaltslast beeinflusst. Aufbauend auf dem unter Leitung des Fraunhofer IWES entwickelten Hybrid-Benchmark-Verfahren [4], werden aktuell verschiedene Vermessungs- und Bewertungsansätze diskutiert. Diese basieren auf der Systemcharakterisierung im Labor. Dafür werden unter anderem die Effizienzkennlinien der Wandlungspfade, die Leistungsaufnahme der Komponenten im Betriebs- und Ruhemodus, sowie die durch das Batteriemanagementsystem verursachten Verzögerungen erfasst. Mit Hilfe standardisierter Anwendungstests oder Systemsimulationen können anschließend Effizienz-Kennzahlen für unterschiedliche Betriebsstrategien berechnet werden. Um die Transparenz und die Vergleichbarkeit der verschiedenen Systeme für den Endkunden zu erhöhen, ist die Weiterentwicklung und Einbringung solcher Verfahren in die Normung wünschenswert.

Sektorenkopplung Strom-Verkehr

Elektrofahrzeuge können als geeignetes Mittel dienen, den Eigenverbrauch zu erhöhen, wenn sie intelligent in ein Energiemanagementsystem eingebunden werden. Wird das Ladegerät des Elektrofahrzeugs so ausgelegt, dass es einen bidirektionalen Leistungsfluss ermöglicht, können mit ihrer Hilfe ein PV-Batteriespeichersystem zur Energieversorgung von Haushalten mit einer PV-Anlage realisiert und zusätzlich auch Netzdienstleistungen erbracht werden, wie z. B. die Blindleistungsbereitstellung zur Spannungshaltung [5].

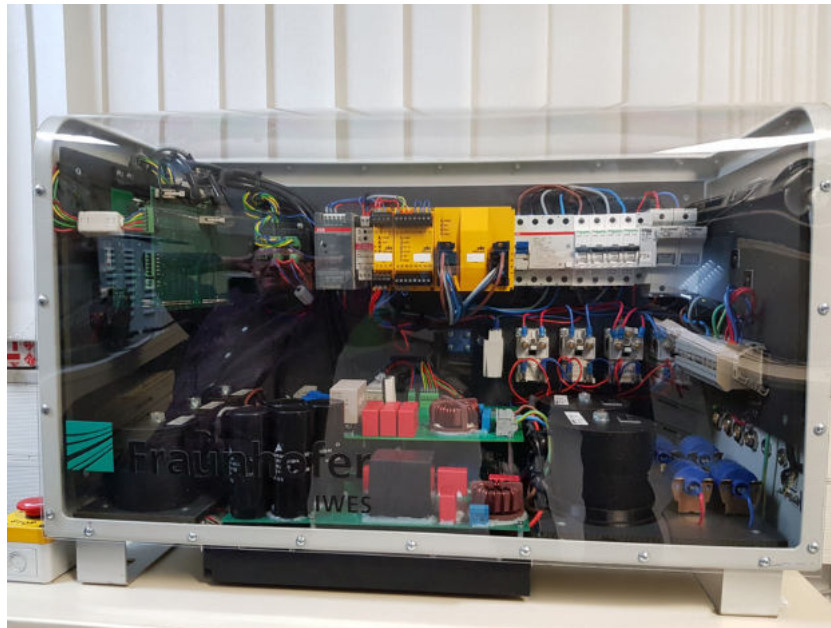
Die meisten konventionellen Elektrofahrzeuge können einphasig kabelgebunden laden. Neue Entwicklungen lassen zusätzlich eine dreiphasige sowie eine kontaktlose, induktive Ladung und nur teilweise den bidirektionalen Leistungsfluss zu.

Das multifunktionale bidirektionale Ladegerät des Fraunhofer IWES Kassel realisiert alle drei Ladevarianten und stellt ergänzend jeweils die Rückspeisefunktion zur Verfügung (Abbildung 4).

Durch eine Mehrfachnutzung der leistungselektronischen Komponenten für die Lade- und Entladevarianten, können die Kosten und das Volumen im Vergleich zu konventionellen Lösungen um jeweils rund 60% verringert werden [6] (Abbildung 5).

Neuartigen Energiekonzepte und eine zunehmenden Anzahl von Elektrofahrzeugen am Markt werden den Bedarf an Dienstleistungen für eine günstige, zuverlässige Eigenstromversorgung steigern und werden den bidirektionalen Leistungsfluss in Elektrofahrzeugen weiter verbreiten.

Abbildung 5
**Multifunktionales
 Ladegerät mit Sicher-
 heitstechnik**
 (Quelle: Fraunhofer IWES)



Fazit

Weiterentwicklungen in der PV-Systemtechnik ermöglichen den Wandel von PV-Anlagen, die bisher nur auf Netzeinspeisung ausgelegt sind, hin zu PV-Systemen, die in lokale oder übergeordnete Systemlösungen eingebunden werden können.

In diesem Beitrag wurden verschiedene Aspekte zur weiteren Verbesserung der PV-Systemtechnik vorgestellt. Diese ermöglichen beispielsweise:

- Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von zukünftigen PV-Anlagen an Fassaden
- Sicherstellung der Übernahme von mehr Systemverantwortung durch intelligente Wechselrichter
- Aufzeigen der Optimierungspotenziale von PV-Eigenverbrauchssystemen und der Sektorenkopplung

Quellen

- [1] A. Engler, „Regelung von Batteriestromrichtern in modularen und erweiterbaren Inselnetzen, Dissertation,“ 2002
- [2] M. Jostock, „Stabilität wechselrichtergeführter Inselnetze, Luxembourg“, 2013
- [3] P. Unruh und A. Seibel, „Vorrichtung und Verfahren zur Regelung eines Wechselrichters“, Deutschland Patent Eingereichte Patentanmeldung 102016203123.6, 26 02 2016
- [4] F. Niedermeyer et al., „Innovative Performancetests für PV-Speichersysteme zur Erhöhung der Autarkie und des Eigenverbrauchs,“ 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2015
- [5] Projekt SIEM/Systemintegration von Elektrofahrzeugen. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 0325602)
- [6] M. Jung, A. Seibel, J. Steffen, G. Lempidis, J. Kirchhof, R. Gaber und R. Marklein, „Multimode Charging of Electric Vehicles – A combined concept with multiple use of components and strategies for decreasing power losses, weight and volume,“ in PCIM Europe, Nürnberg, 2016