

Smarte Wechselrichter als Schlüsselkomponente des zukünftigen elektrischen Energiesystems



Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Christof Wittwer
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

KIT
Prof. Dr. Marc Hiller
marc.hiller@kit.edu

Fraunhofer IEE
Dr. Marco Jung
marco.jung@iee.fraunhofer.de

Die Integration von PV- und Windkraftanlagen führt zunehmend zu hoher Dynamik im Stromnetz. Dabei werden erhebliche Leistungsgradienten wirksam, die sowohl im Verteilnetz, wie auch im Übertragungsnetz bei der Betriebsführung berücksichtigt werden müssen. Die Systemstabilität spielt eine zentrale Rolle, wenn es um die Fortentwicklung von Netzanschlussrichtlinien geht, die von Erzeugern zu beachten sind.

Die EnergyCharts [1] illustrieren die Dynamik der Erzeugung, man erkennt in ► **Abbildung 1** die täglichen Spitzen der PV-Einspeisung mit ca. 30 GW Leistung im Netz, ebenso werden hohe Leistungsgradienten durch die fluktuierende Windenergie wirksam. In der Folge werden Kraftwerke flexibel eingesetzt und ein Ausgleich in die benachbarten Länder tritt auf. Der Ausstieg aus der Kohle und Kernenergie erfordert den Zubau von flexiblen Kraftwerken, Speichern und P2X-Technologien. Heute werden Windenergieanlagen und PV-Anlagen fast ausschließlich mittels leistungselektronischer Stromrichter in die Nieder- und Mittelspannungsebene des Stromnetzes integriert. Sie speisen Strom ein und tragen zur Spannungs- und Frequenzbildung des Netzes bei.

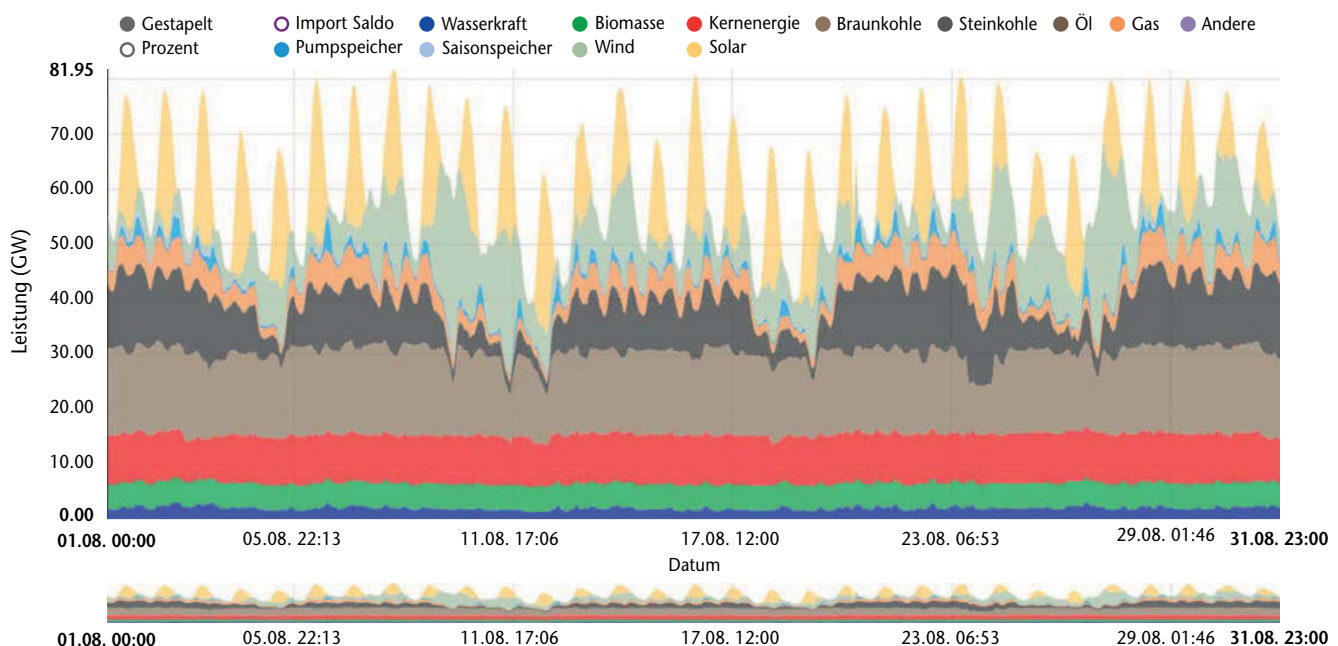
Die Systeme erfassen den Netzzustand und können sehr schnell auf Änderungen reagieren, ebenso lassen sie sich durch die Vernetzung bzgl. ihrer Charakteris-

tik und der Leistungsvorgabe für Blind- und Wirkleistung extern steuern. Die Stromrichter tragen neben den Kraftwerken zunehmend auch zur Netzstabilität bei, die Dominanz wird mit der Verbreitung von Batteriespeichern und Power-to-X-Anlagen noch in erheblichem Maße zunehmen können. Die Transformation des Energiesystems führt zu mehr Dezentralisierung in der Stromerzeugung und erfordert damit auch einen Beitrag der neuen Betriebsmittel zur Erbringung von Systemdienstleistungen. Die zunehmende Digitalisierung mit schnellen Signalprozessoren ermöglicht einerseits die netzverträgliche Integration in das Stromnetz vor Ort, andererseits wird durch die Vernetzung der Stromrichter auch eine Einbindung in die Betriebsführung der Netze möglich.

► **Abbildung 2a** zeigt ein Schema eines Verteilnetzes, das mit verteilten PV-Anlagen und Ladesystemen einen netzdienlichen Betrieb realisiert. Hierbei liefern die PV-Wechselrichter einen Beitrag, den Spannungsanstieg in Folge der solaren Einspeisung zu vermindern und somit auch erst den maximalen Zubau von Solaranlagen zu erlauben.

Die Leistungshalbleiter werden immer leistungsfähiger hinsichtlich ihrer Schaltverluste und der Spannungsverträglichkeit, so dass künftig Wechselrichter direkt ohne Nutzung eines Transformators in das Mittelspannungsnetz integriert werden können.

Abbildung 1
Visualisierung der Erzeugung in Deutschland
(www.energy-charts.de)
Fraunhofer ISE [1]



► **Abbildung 2b** zeigt ein Arbeitsmuster eines Mittelspannungswechselrichters, der mit Hochvolt-SiC MOSFET-Halbleiter (Siliziumkarbid) direkt in das 10 kV-Netz Strom einspeist. Neben Wechselrichtern für hohe Ausgangsspannungen ist ein weiterer Batteriewechselrichter dargestellt (► **Abbildung 2c**), der auf Basis von SiC MOSFET Halbleitern arbeitet: Die Systeme erreichen höchste Wirkungsgrade bei extrem kompakter Bauweise: Hier dargestellt ist ein 1 MW Wechselrichter, der im EU-Projekt NetEfficient [3] entwickelt wurde, der mit einer Wasserkühlung arbeitet. Die Einzelwechselrichter sind mit einem echtzeitfähigen (100 ms) Kommunikationsbus untereinander

vernetzt, ebenso erfolgt die Kommunikation mit den Batteriesystemen über die Feldbuskommunikation. Nach außen erfolgt die Vernetzung mit Ethernet-TCP/IP-Technologie, die auch die Einbindung in die Netzleitwarte bewerkstelligt. Dabei kann sowohl eine Parametrierung, wie auch die Leistungsvorgabe des Wechselrichters über das Netzwerk erfolgen.

Die Systemdienstleistung (SDL) von stromeinspeisenden Wechselrichtern erlaubt u. a. die Bereitstellung von Blindleistung, die früher ausschließlich von konventionellen Kraftwerken erbracht wurde. Dabei sorgt einerseits die „statische Spannungshaltung“

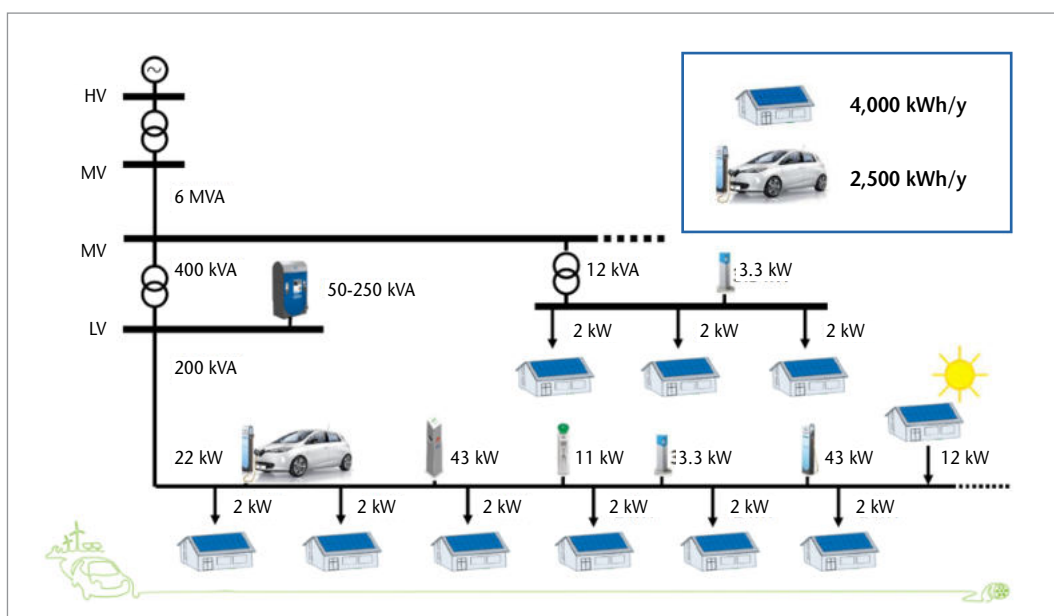


Abbildung 2a
Niederspannungsnetze mit verteilten PV-Anlagen und netzdienlich betriebenen Ladesystemen.
 Systemdienstleistungen (SDL) werden von den dezentralen Stromrichtern gestellt, um z. B. den Spannungsanstieg zu reduzieren.



links: Abbildung 2b
Hochvolt-Siliziumkarbid-Wechselrichter:
 HV-SiC 15 kV Wechselrichter für die transformatorlose Mittelspannung (Fraunhofer ISE) [2]

rechts: Abbildung 2c
hocheffizienter kompakter SIC-MOSFET Batterie-wechselrichter mit einer Leistung von 1 MW für die Niederspannung
 (Fraunhofer ISE) [2]

Abbildung 3a

Scheinleistungshalbkreis: Dargestellt ist die normierte Scheinleistung S mit dem einhüllenden Halbkreis. Sie setzt sich aus der Blindleistung Q und der Wirkleistung zusammen. Die technischen Anschlussrichtlinien TAR definieren den blau markierten Bereich mit einem positiven und negativen Anteil an Blindleistung Q

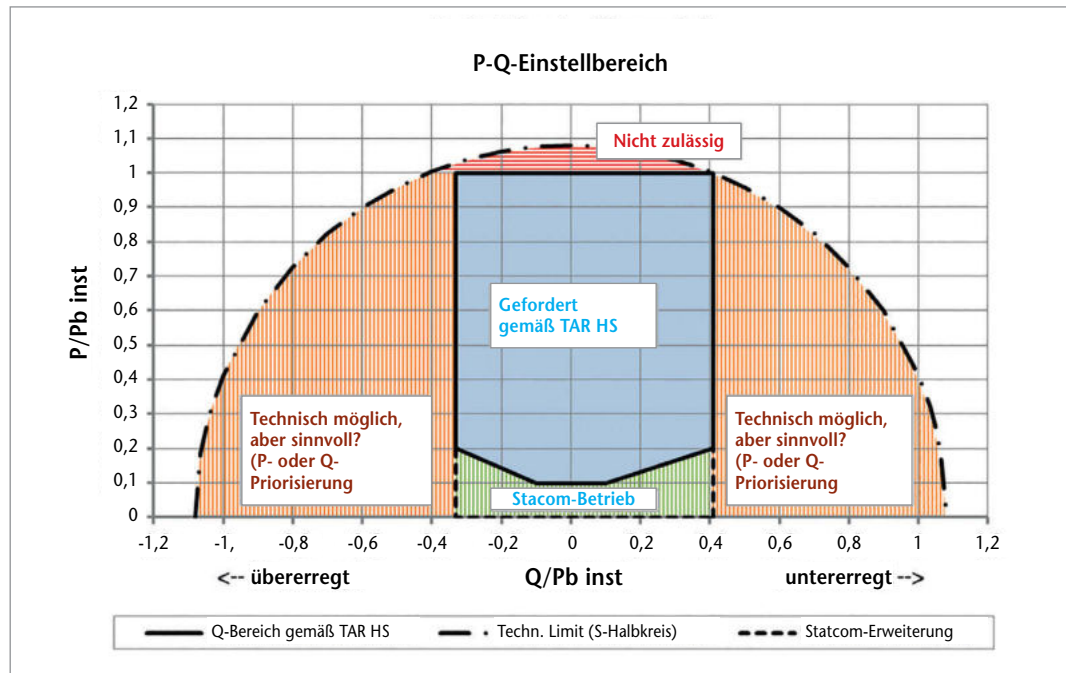


Abbildung 3b

Testlab mit Netzsimulatoren zur Entwicklung und elektrischen Prüfung von Wechselrichtern und Systemdienstleistungen (Fraunhofer IEE)

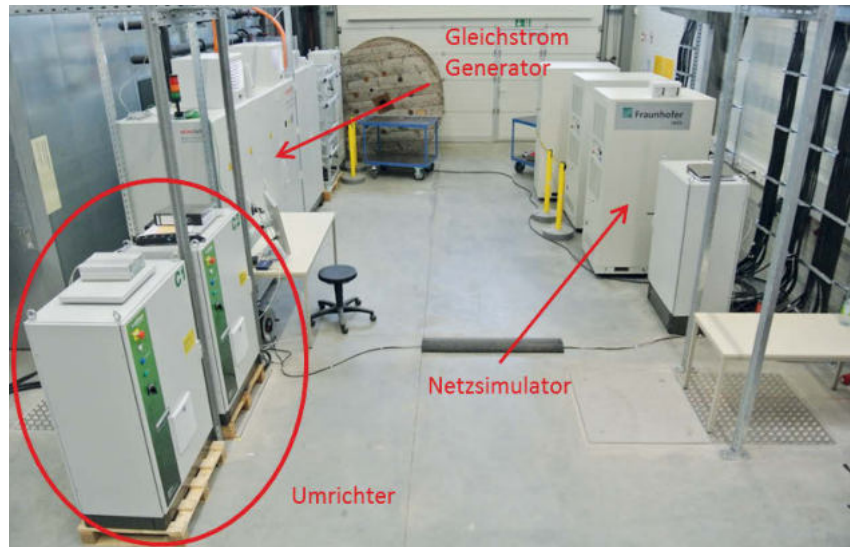
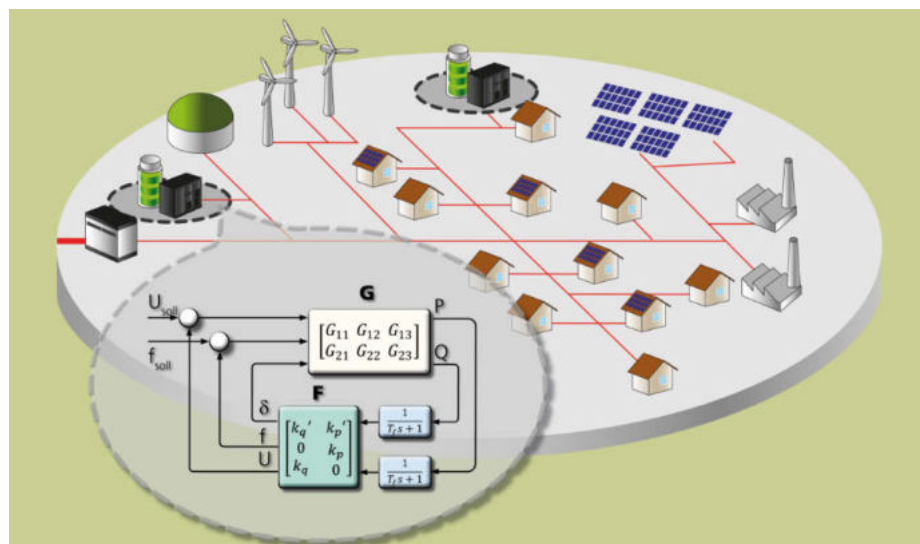


Abbildung 4

SelfSync: konventionelle Statik und Netzbildung $f(P)$ und $U(Q)$ (Fraunhofer IEE)



für die Regelung der Spannung lokal am Netzanschlusspunkt, wodurch u. a. der Zubau von EE-Anlagen im existierenden Niederspannungsnetz deutlich erhöht werden kann. Der Scheinleistungshalbkreis beschreibt die Betriebspunkte des Wechselrichters: Während die Einhüllende die Scheinleistung S darstellt, beschreibt der Phasenwinkel PHI den Winkel zwischen Blind- und Wirkleistung, ► *Abbildung 3a*. Die Statik kann in weiteren Bereichen variiert werden, für den Betreiber der Anlage ist in der Regel ein geringer Blindleistungsanteil von Vorteil. Der Statcom-Betrieb erlaubt die direkte Anforderung von Wirk- und Blindleistung zur Kompensation im Netz durch den Netzbetreiber. Blindleistung wird meist in Abhängigkeit der lokalen Spannung $Q(U)$ oder von der produzierten Wirkleistung $Q(P)$ erbracht. Ein Blindleistungsmanagement kann auch erfolgen, indem die Netzleitwarte Sollwerte für die Blindleistung oder den Phasenwinkel „ $\cos(\phi)$ “ vorgibt.

Die Systemstabilität im Stromnetz erfordert einen Beitrag der Stromrichter zur Regelung von Frequenz und Spannung. Netzwechselrichter reagieren nach VDE-FNN-AR4110 Richtlinien auf die Netzfrequenz und regeln dem entsprechend die Wirkleistung, so darf bei zu hoher Netzfrequenz nur noch eine

reduzierte Einspeisung von Wirkleistung erfolgen. Schließlich sorgen Wechselrichter u. a. auch für eine „dynamische Netzstützung“ mit dem sog. LVRT-Verfahren (Low Voltage Ride Through), das bei einem Spannungseinbruch im Netz wirksam wird: Hierbei unterstützt der Wechselrichter das Netz mit Blindleistung, und deaktiviert nicht etwa den Betrieb. Durch die weitere Netzintegration von stromrichtergekoppelten Erzeugungs- und Speichereinrichtungen ist zukünftig von einem vermehrten Auftreten von Störeffekten bzw. Wechselwirkungen zwischen den Systemen auszugehen. Um die Stabilität und das transiente Verhalten von Netzen im Normalbetrieb und im Fehlerfall bereits vor der Realisierung und der Netzintegration von neuartigen Betriebsmitteln untersuchen zu können, ist die Erprobung realitätsnah vorzeitig sinnvoll. Dies kann durch die Nachbildung (Emulation) eines Netzanschlusspunktes in einer P-HIL-Umgebung (Power Hardware-in-the-Loop) z. B. für das Netzverhalten eines Stromrichters und dessen Netzurückwirkung in einem realitätsnahen Umfeld erfolgen (► *Abbildung 3b*).

Durch den Rückgang der konventionellen Stromerzeugung hin zu immer mehr erneuerbaren Energien, müssen zukünftig ein Teil der Stromrichter nicht nur

Abbildung 5
Multikriterieller Betrieb von Batterieanlagen mit kommunikationsfähigen Wechselrichtern, die einerseits Eigenstromoptimierung realisieren, andererseits am Primärenergiemarkt (PCR) teilnehmen, der durch die Frequenzabweichung vom Nennarbeitspunkt intensiviert wird. [4]

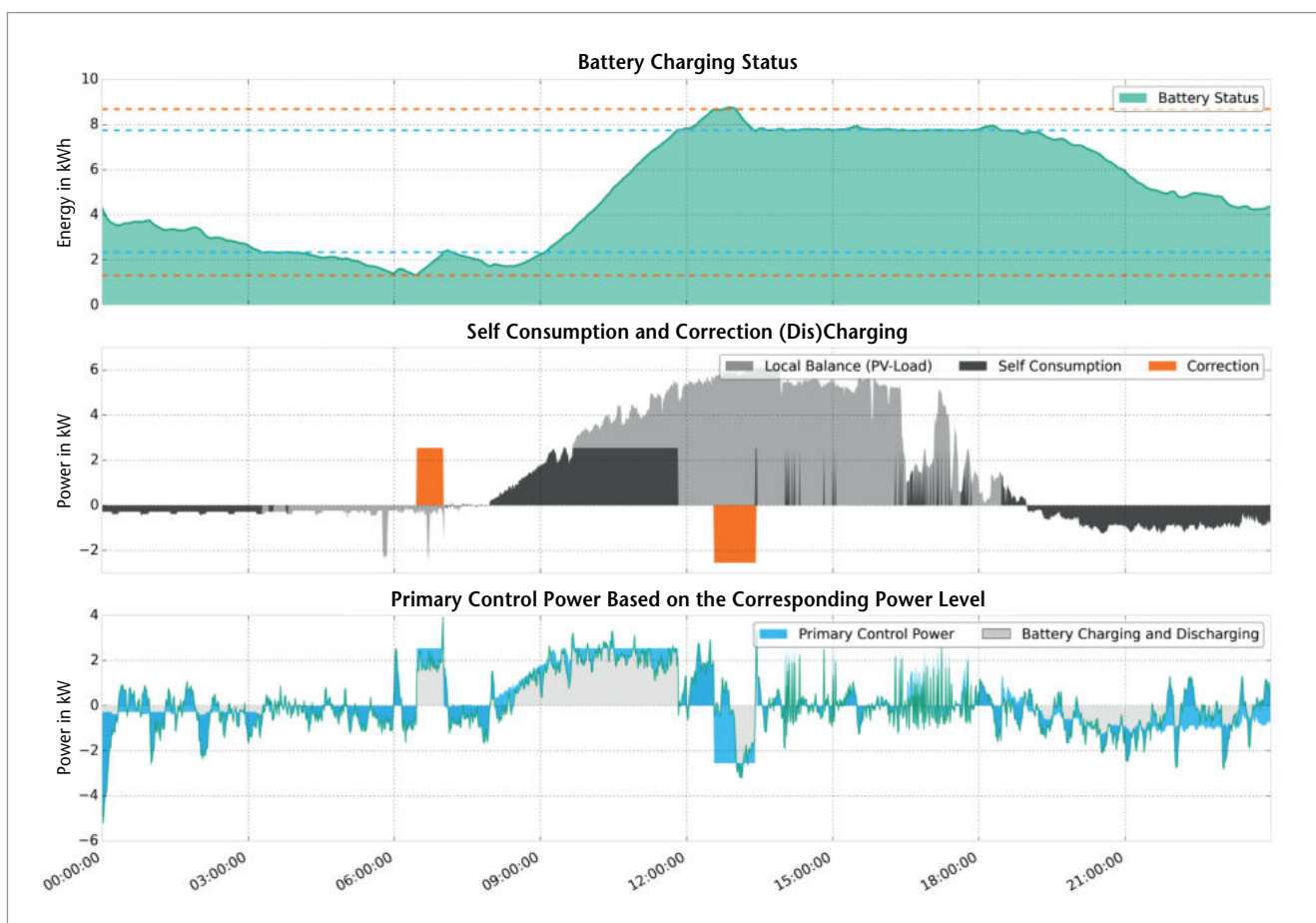
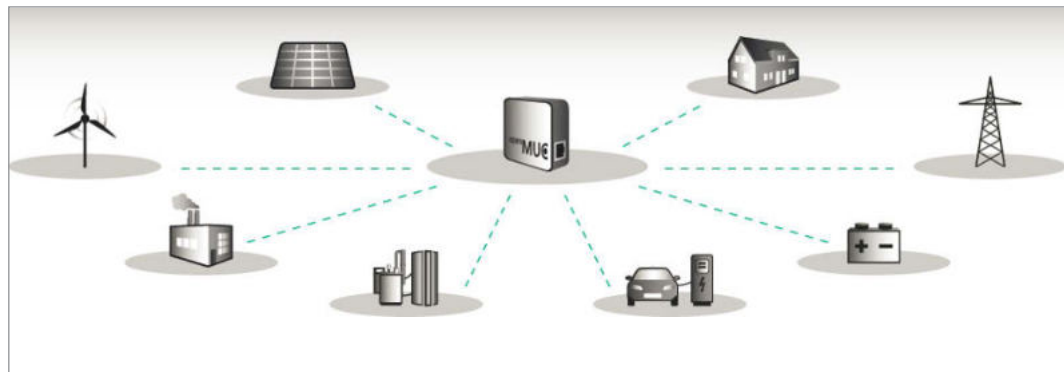


Abbildung 6
**Smart Gateway
 OpenMuc**
 (www.openmuc.org) [5]
 zur Integration
 von dezentralen
 Energiesystemen
 (Fraunhofer ISE)



Systemdienstleistungen erbringen, sondern vielmehr auch die netzbildenden Eigenschaften der Kraftwerke. Heutzutage werden Stromrichter mit diesen Eigenschaften schon zur Bildung von Inselnetzen eingesetzt. Der Betrieb im Verbundnetz ist aktuell Gegenstand in Forschung und Entwicklung (vgl. mit ► *Abbildung 4*).

Schließlich gilt es, mit „smarten Batteriewechselrichtern“ auch den Netzbetrieb durch flexible Bereitstellung von Energie zu unterstützen. Während PV-Batteriesysteme in der Regel den Eigenverbrauch optimieren, lassen sich viele Anforderungen gleichzeitig erfüllen, in dem die Systeme in den Energiemarkt integriert werden. ► *Abbildung 5* zeigt eine solche „multikriterielle Optimierung“ [4] des Speicherbetriebs: Der Bereich des Ladezustands SOC wird für die Bereitstellung im Primärenergiemarkt limitiert, so dass eine garantierte Lieferung erfolgen kann. Die lokale Frequenzmessung erlaubt den stetigen Beitrag für das Netz, entsprechend gibt der Speicher Energie ab, wenn die Netzfrequenz absinkt. Eine prädiktive Regelung des Speichers erlaubt gleichzeitig die Optimierung der Eigenstromnutzung aus der PV-Anlage und des Ladeausgleichs. Die Systemregelung braucht entsprechend Vorhersagen für Wetter und Energiepreise aus dem Netzwerk, derartige Systeme gibt es schon am Markt.

Die Vision des „Smart Grids“ umfasst die Integration und Interaktion aller Betriebsmittel im Stromnetz: Dabei gilt es Flexibilitäten zu erschließen, die zunehmend durch Integration der erneuerbaren Energien benötigt werden. Smart Gateways können die Integration durch die kommunikative Vernetzung der Anlagen unterstützen (vgl. mit ► *Abbildung 6*).

Fazit und Ausblick

Wechselrichter und leitungselektronische Umrichter beeinflussen zunehmend den Netzbetrieb. Der Netzstatus wird dezentral erfasst (f, P, Q, Harmonische) und lässt sich zur Netzbetriebsführung nutzen. Die

Ausnutzung der Netze wird durch gezieltes Wirk- und Blindleistungsmanagement erhöht, smarte Wechselrichter unterstützen dabei sowohl statisch als auch dynamisch das Netz. Die Rollenteilung von dezentralen transienten Regelungsprozessen und der Vernetzung der Komponenten ist Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Dabei spielt die standardisierte, sichere und hochverfügbare Kommunikation für das „Smart Grid“ und den modernen Marktbetrieb eine bedeutende Rolle.

Datenmodelle helfen, die komplexe Struktur zu automatisieren. Der Netzbetrieb erfordert die Beobachtung und Schätzung des Netzzustands und verlässliche Prognosen. Das Marktdesign verändert sich durch die Möglichkeiten der Digitalisierung ebenfalls, z. B. erfordert der „P2P-Handel“ eine präzise Abstimmung im Netzbetrieb (BDEW-Ampel). Leistungselektronische Komponenten ermöglichen die Integration von elektrischem Netz und Kommunikationsnetz, somit schreitet die Digitalisierung auch im Energiesystem zunehmend voran.

Quellen

- [1] B. Burger; Onlinedarstellung der deutschen Stromerzeugung: <https://www.energy-charts.de>
- [2] Presseinformation Fraunhofer ISE: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/neuer-hochvolt-siliciumkarbid-wechselrichter-stabilisiert-mittelspannungsverteilnetze.html>;
- [3] EU-Forschungsprojekt „Netfficient“ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/netfficient.html>
- [4] R.Hollinger; Dissertation TU Braunschweig „Gepoolte PV-Heimspeicher zur Bereitstellung von Primärregelleistung“
- [5] Website Java-basiertes Energiemanagement Framework; <https://www.openmuc.org>