

# Systemstabilität durch Leistungselektronik

## Einleitung

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien geht eine Transformation des Stromnetzes einher. Auf der Erzeugerseite werden dezentral Windenergie- und PV-Anlagen größtenteils im Verteilnetz angeschlossen. Die Lastseite wird durch den Ausbau der Elektromobilität, dem Zuwachs an Wärmepumpen und neuen Akteuren, wie Elektrolyseuren, elektrifiziert. All diese Akteure haben gemeinsam, dass sie über Leistungselektronik an das Stromnetz gekoppelt werden.

Da der Betrieb des heutigen Netzes aber auf dem physikalischen Verhalten von Synchrongeneratoren basiert, fallen durch das Ausscheiden konventioneller Kraftwerke und deren rotierender Massen inhärent stabilisierende Eigenschaften weg.

Die Folge ist, dass die Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemstabilität im Normalbetrieb als auch im Fehlerfall, wie beispielsweise dem System-Split, anderweitig übernommen werden müssen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Relevante Stabilitätsaspekte sind die Spannungs- und Frequenzhaltung, sowie die Resonanzstabilität und die Bereitstellung von Kurzschlussströmen zum Auslösen von Komponenten des Netzschutzes im Fehlerfall und zur thermischen Auslegung der elektrischen Betriebsmittel. Die Schwarzstartfähigkeit und die Betriebsführung des Netzes sind ebenfalls Kategorien der Systemstabilität.

Diese Eigenschaften müssen zukünftig durch die neuen Akteure übernommen werden, was zur Folge hat, dass das Aufgabenspektrum der erneuerbaren Energien, Speichersysteme und weiteren Anlagen sowie Netzbetriebsmittel weiterentwickelt werden müssen.

Im Folgenden wird innerhalb der technischen Grundlagen erläutert, welche Möglichkeiten die Leistungselektronik dabei bietet und was genau unter Frequenzhaltung und Resonanzstabilität innerhalb der Systemstabilität verstanden wird.

Anschließend werden einzelne Forschungsprojekte vorgestellt, welche mit ihren Ergebnissen einen Beitrag zur Zielsetzung, die Systemstabilität durch

Leistungselektronik bereitzustellen, leisten. Auch der weitere Forschungsbedarf innerhalb dieses Themenfeldes wird aufgezeigt.

## Technischer Hintergrund

Für den stabilen Betrieb des Stromnetzes muss jederzeit ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch herrschen. Gemäß dem physikalischen Verhalten von Synchrongeneratoren sinkt die Netzfrequenz bei fehlender Wirkleistung, während sie bei einem Überschuss an Wirkleistung steigt. Um Frequenzänderungen mit geeigneten Maßnahmen zu begegnen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Zeitbereich von Millisekunden bis wenigen Sekunden wird die Momentanreserve durch die anlageninhärente Trägheit der Synchrongeneratoren der konventionellen Kraftwerke bereitgestellt. Dabei wirken die drehenden Bestandteile aufgrund ihrer Rotationsenergie wie Puffer.

Derzeit werden erneuerbare Energieanlagen fast ausschließlich über netzfolgende Stromrichter an das Stromnetz angebunden. Diese Systeme folgen mit ihrer Wirkleistungseinspeisung dem Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt. Die Stromrichterregelung folgt dem Netz hinsichtlich der Spannung, Frequenz und Phasenlage. Ein Betrieb ohne bereits vorhandenes Stromnetz ist für diese Anlagen nicht möglich.

Anlagen mit netzbildenden Stromrichtern verhalten sich hingegen wie Spannungsquellen am Stromnetz und sind aktiv in der Lage die Netzspannung und -frequenz zu regeln [1, 2]. Das Ziel letzterer Regelungsstrategie ist es, virtuell die physikalischen Eigenschaften und Funktionen von Synchrongeneratoren nachzuahmen und das Netz zu stabilisieren. Netzbildende Stromrichter kommen derzeit in Micro-Grids und Off-Grid Anwendungen zum Einsatz [3].

Zwischen induktiv und kapazitiv wirkenden Netzelementen, wie Übertragungskabeln, Filtern oder Kompensationseinheiten und Anlagenreglern bilden sich in einem Stromnetz Schwingkreise aus, welche dazu führen, dass der Strom zwischen



*Fraunhofer IWES*

*Gesa Quistorf  
gesa.quistorf@iwes.fraunhofer.de*

*DLR*

*Nauman Beg  
nauman.beg@dlr.de*

*Frank Scholdt  
frank.scholdt@dlr.de*

*Fraunhofer ISE*

*Rebeka Denninger  
rebeka.denninger@ise.fraunhofer.de*

*Fraunhofer IEE*

*Dr. Philipp Strauß  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de*

*Fraunhofer IEG*

*Dr. Anton Plietzsch  
anton.plietzsch@ieg.fraunhofer.de*

*Christoph Nolden  
christoph.nolden@ieg.fraunhofer.de*

*Prof. Dr. Johannes Schiffer  
johannes.schiffer@ieg.fraunhofer.de*

den unterschiedlichen Netzkomponenten pendelt. Wird der pendelnde Strom bei einer bestimmten Frequenz angeregt, verstärkt sich die Schwingung, das System schwingt auf. Bei einer Verstärkung der Schwingungen des Stroms kann es zu Beschädigungen von Betriebsmitteln kommen. In einem stromrichterbasierten Netz nehmen aufgrund der schaltenden Betriebsweise von leistungselektronischen Komponenten die elektrischen Wechselwirkungen zwischen den stromrichterbasierten Anlagen zu. Spannungen und Ströme gegenüber diesen Verstärkungen stabil zu halten, ist eine Herausforderung innerhalb der Resonanzstabilität, welche genaue Kenntnisse des Oberschwingungsverhaltens der einzelnen Anlagen und Netzkomponenten voraussetzt und darauf abzielt, Schwingungen in bestimmten Frequenzbereichen zu dämpfen.

### Forschungsprojekte

Im Folgenden werden Forschungsprojekte vorgestellt, welche sich zum einem mit der Frage beschäftigen, ob ein resilientes Energiesystem bei einer vollständigen Durchdringung mit stromrichtergekoppelten Anlagen überhaupt möglich ist und welchen Beitrag beispielsweise die Elektromobilität leisten könnte.

Zum anderen werden Forschungsprojekte vorgestellt, welche Prüfinfrastruktur und Demonstratoren aufbauen, und Messverfahren entwickeln, um die elektrischen Eigenschaften während des

Entwicklungsprozesses der Anlagen zu validieren und genaue Modelle der Anlagen in diesem frühen Entwicklungsstadium bereitzustellen und damit die Markteinführung von netzbildenden Stromrichtersystemen zu unterstützen und zu beschleunigen.

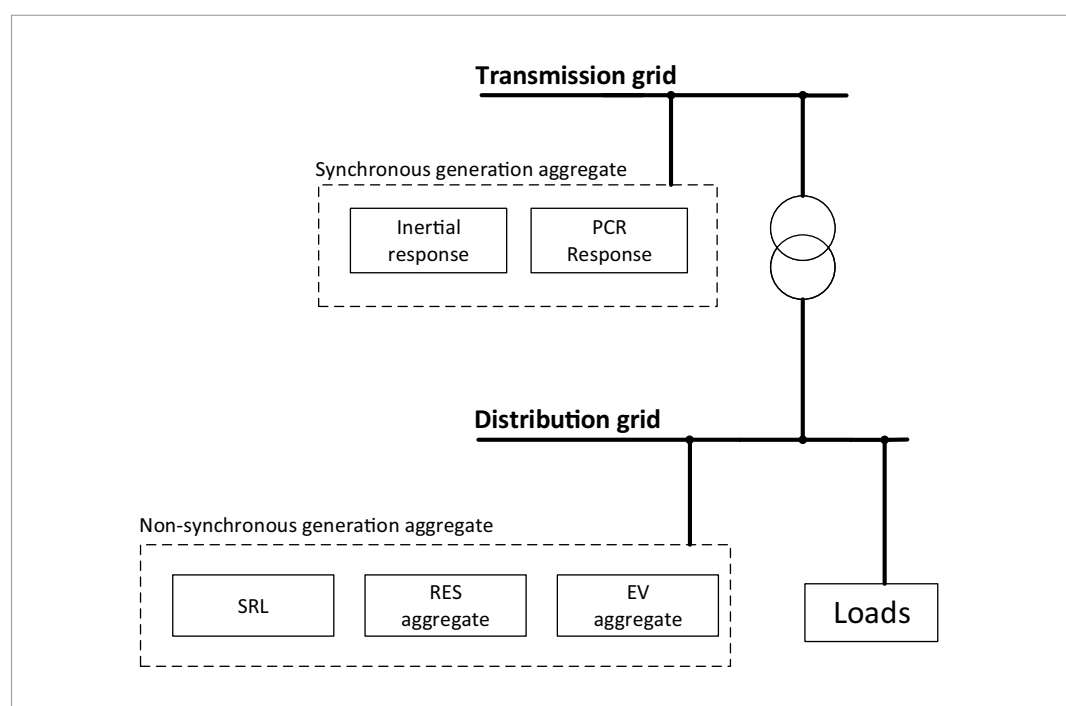
„**ROLLEN** – Rollende Ladestationen liefern Entlastung fürs Netz“ (09/2020 – 08/2023)  
Innerhalb des Projektes „ROLLEN“ werden vom DLR die Auswirkungen und Anforderungen des stromnetzgekoppelten Energietransportes durch Batteriefahrzeuge auf der Verteilnetzebene analysiert [4].

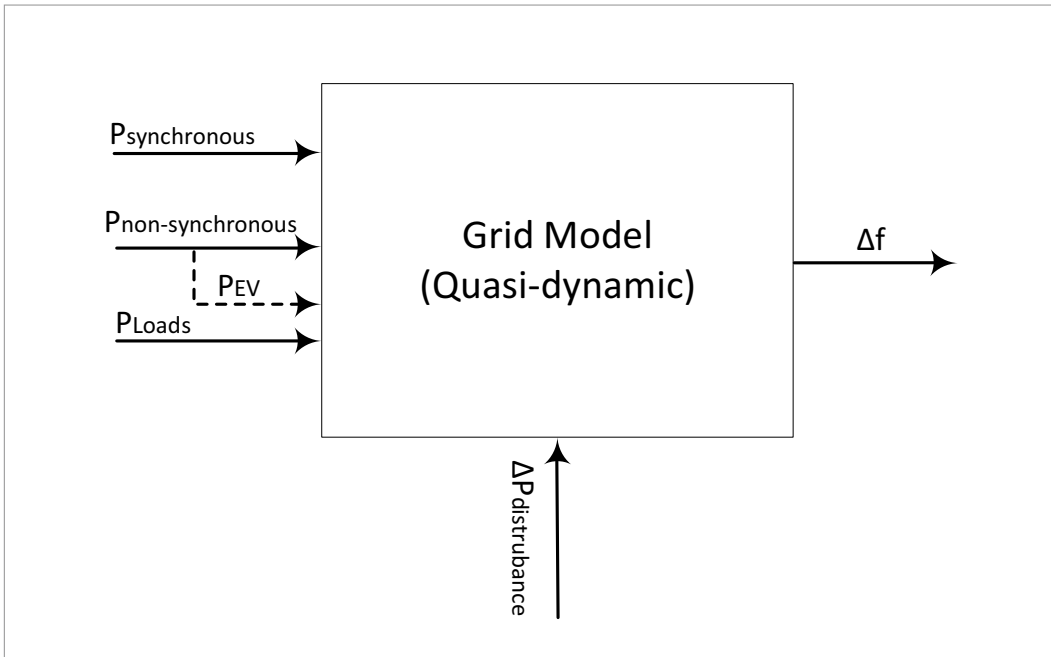
Ein Teilaspekt des Projektes fokussiert sich auf eine erste Abschätzung, ob die Elektromobilität neben den erneuerbaren Energien einen Beitrag zur Frequenzhaltung leisten kann. Dazu wird auf Grundlage der in NEP2035 beschriebenen Szenarien zur installierten synchronen und erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland ein aggregiertes Netzmodell vorgestellt, das die individuellen Leistungsänderungen gemäß den RfG-Richtlinien in jedem Aggregat (► Abbildung 1 und ► Abbildung 2) zur Frequenzstörung integriert. Das gekoppelte Batteriefahrzeuge-Aggregat (EV aggregat) kann als Netz-Einspeisung oder als aggregierte Last im Netzmodell konfiguriert werden. Die Last wurde in Abhängigkeit von zuvor definierten use cases für unterschiedliche Simulationsszenarien parametrisiert. Innerhalb der unterschiedlichen Simulationsfälle wurde der beschränkt frequenzabhängige Modus bei Über- und Unterfrequenz (limited frequency

► Abbildung 1

Übersicht des Netzmodells mit aggregiertem Übertragungs- (Transmission grid) und Verteilnetz (Distribution grid)

(Quelle: DLR)





► Abbildung 2

**Implementierung des Netzmodells**

(Quelle: DLR)

sensitive mode, LFSM) bei den erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen und der E-Fahrzeuge zu- oder abgeschaltet.

Die Simulationsstudie zeigt, dass neben den erneuerbaren Energien prinzipiell die Elektromobilität einen Beitrag zu Reduzierung der Frequenzabweichung liefern kann. Als nächstes muss die Frequenzunterstützung vom Verbundnetz in das Modell aufgenommen werden, um eine realistische Schätzung der Auswirkungen auf Frequenzstörungen zu ermöglichen.

**„VerbundnetzStabil – Stabiles Verbundsystemverhalten bei umrichterbasierter Erzeugung“ (08/2017 – 07/2021)**

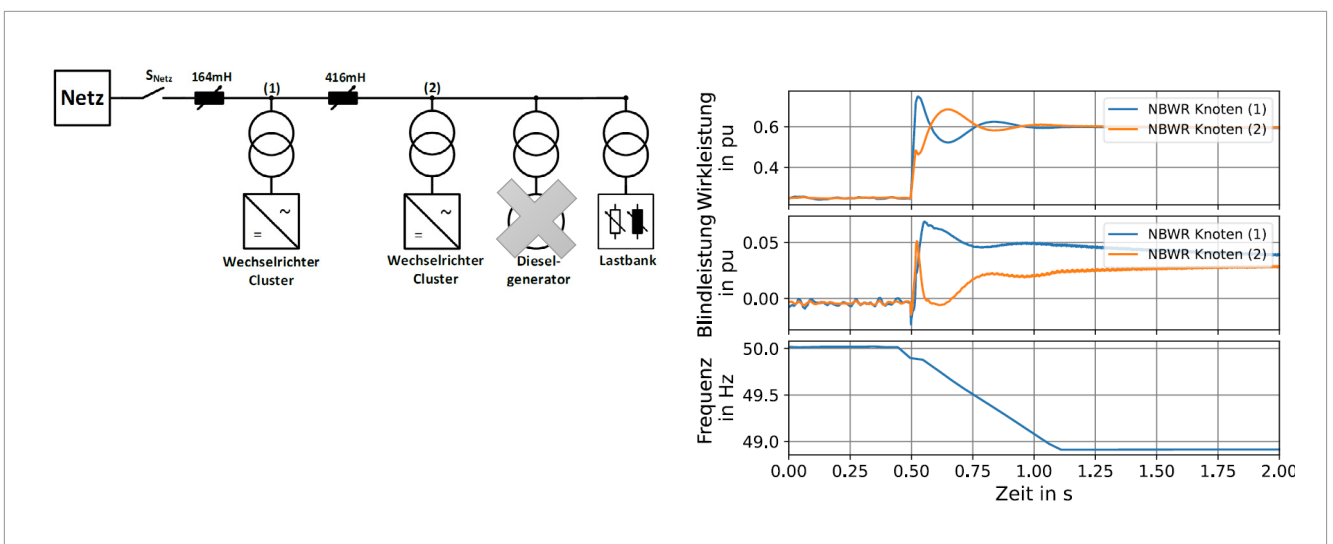
Das Konsortium des Projekts „VerbundnetzStabil“ befasst sich mit der Erhaltung eines stabilen Verbundsystems bei einer hohen Durchdringung mit Erzeugungsanlagen, welche über Leistungselektronik an das Stromnetz gekoppelt sind [3]. Das Fraunhofer ISE untersuchte u.a. das elektrische Verhalten von netzbildenden Wechselrichtern im Verbundsystem mit bis zu 100% erneuerbarer Energieerzeugung. Dazu wurde im Multi-MW Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg ein Testszenario bestehend aus zwei Wechselrichter-Clustern mit jeweils 5 Umrichtern mit netzbildender Regelung und einer Lastbank

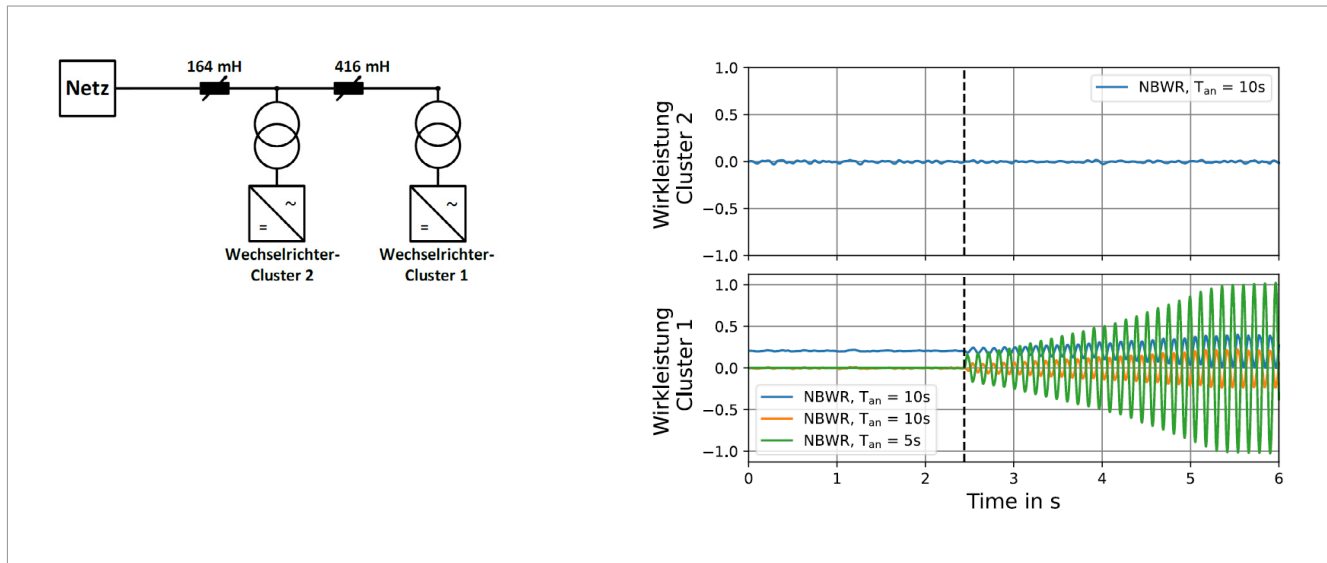
► Abbildung 3

**Testaufbau im MW-Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg (links).**

**Ergebnis der Testdurchführung eines System-Splits mit Erzeugern, welche zu 100% über netz-bildende Wechselrichter (NBWR) angeschlossen sind (rechts).**

(Quelle: Fraunhofer ISE)





► Abbildung 4

**Instabilitäten im Netzbetrieb – Testaufbau im MW-Labor des Fraunhofer ISE in Freiburg (links).**

**Testergebnis bei unterschiedlicher Parametrierung der Anlaufzeitkonstante innerhalb der Stromrichter (rechts).**

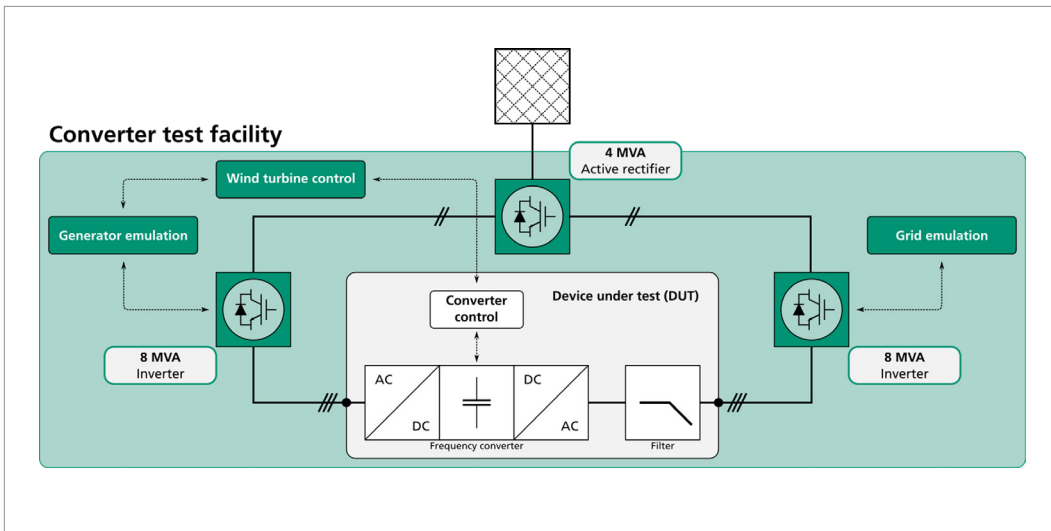
(Quelle: Fraunhofer ISE)

aufgebaut, wie in ► Abbildung 3 dargestellt. Innerhalb des Betriebs wurde ein System-Split durch Trennen des Labornetzes vom übergeordneten öffentlichen Netz erzeugt. Nach der impedanzbasierten instantanen Leistungsaufteilung erreicht die Wirkleistung innerhalb von rund 0,6s nach dem Event eine gleichmäßige Aufteilung der Wirkleistung, welche sich durch die identische Parametrierung der Umrichter ergibt. Durch das erzeugte Ereignis fällt die Frequenz auf 49 Hz ab und die Umrichter sind im Stande, das Netz bei 49 Hz stabil zu betreiben (► Abbildung 3).

In einem zweiten Versuch wurden die Stromrichter in den Umrichter-Clustern, bestehend aus insgesamt sieben Systemen, unterschiedlich parametrierung. Davon wurden sechs Stromrichter mit einer Anlaufzeitkonstante von 10s betrieben. Nach einer definierten Zeit wurde ein siebter Stromrichter mit einer Anlaufzeitkonstante von 5s dazugeschaltet. Bei der Zuschaltung kam es zu Instabilitäten im Labornetz, wie in ► Abbildung 4 zu erkennen ist. Dieser Versuch zeigt, dass für eine sichere Integration von netzbildenden Wechselrichtern die Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften elementar ist und diese in Regelwerken standardisiert sein muss. Hierzu werden Projekte, wie das GFM Benchmark Projekt des Fraunhofer ISE benötigt, um die Vermessung netzbildender Wechselrichter mit verschiedenen Herstellern zu entwickeln, zu testen und zu optimieren.

### „PQ4Wind – Power-Quality-Test und Impedanz-Modell-Validierung für Hauptumrichter von Windenergieanlagen“ (12/2019 – 12/2024)

Innerhalb des Projektes „PQ4Wind“ wird vom Fraunhofer IWES u.a. ein hochpräziser Umrichterprüfstand mit einer Leistung von 8 MVA für die Charakterisierung des Oberschwingungsverhaltens von Umrichtern und zur Validierung von entsprechenden Modellen gebaut, sowie Messverfahren zur Bestimmung des Oberschwingungsverhaltens bis zur 200. Ordnung entwickelt und erprobt [5]. Die späteren Vermessungsergebnisse, sowie die validen Modelle der Umrichtersysteme können zukünftig bei den Untersuchungen innerhalb der Resonanzstabilität eingesetzt werden. Wie in der ► Abbildung 5 dargestellt, werden auf dem Prüfstand beispielsweise der Generator einer Windenergieanlage und das Stromnetz durch leistungselektronische Emulatoren mit Einsatz des Hardware-in-the-loop Prinzips ersetzt. Durch die Fähigkeit Oberschwingungen bis zu 10 kHz durch die Emulatoren einprägen zu lassen, können detaillierte Modelle des Oberschwingungsspektrums der Prüflinge bei genauer Kenntnis über das elektrische Verhalten der Emulatoren generiert werden. Gerade im Windbereich befindet sich der Einsatz von netzbildenden Stromrichtern in der Entwicklungs- und Validierungsphase. Hier werden kurzfristig Projekte benötigt, um prüfstands-basierte Validierungsprozesse für die elektrischen Eigenschaften auf Komponentenebene aber auch für das Turbinendesign zu entwickeln und zu testen.



► Abbildung 5

**Übersicht des Umrichterprüfstands PQ4Wind.**

Der Umrichter (DUT) wird an die 8 MVA Umrichtersysteme (Inverter) gekoppelt, welche das Generatorverhalten (Generator emulation) und das Stromnetzverhalten (Grid emulation) emulieren.

(Quelle: IWES)

**„Netzregelung 2.0 – Regelung und Stabilität im stromrichterdominierten Verbundnetz“ (12/2017 – 08/2022)**

Im Projekt „Netzregelung 2.0“ [6] hat das Fraunhofer IEE u.a. auf Systemebene einen Nachweis erbracht, dass das elektrische Verbundnetz mit sehr hohen Stromrichteranteilen durch geeignete netzbildende Regelungsverfahren nicht nur im Normalbetrieb des Netzes, sondern auch in worst-case Szenarien, wie dem System-Split, stabil betrieben werden kann. Neben dem Fazit, dass Momentanreserve im Übertrags- und Verteilnetz von Batteriesystemen, Windenergieanlagen, PV, rotierenden Phasenschieber und Lasten sowie Statcoms bereitgestellt werden kann und eine räumliche Verteilung dieser Akteure dafür wichtig ist, wurde an Methoden zur Detektion von Teilnetzen sowie die darauffolgende

Koordination mit dem Netzschutz auf Verteilnetzebene gearbeitet. Diese ersten Schritte werden vom Fraunhofer IEE im Projekt Verteilnetz 2030+ weitergeführt. Die Ergebnisse des Projektes Netzregelung 2.0 sind auch in die „Roadmap Systemstabilität“ der Bundesregierung (siehe BMWi - Roadmap Systemstabilität) eingeflossen. Um Erfahrungen zu sammeln, ist ein wichtiger nächster Schritt die Einführung der netzbildenden Wechselrichter in die Verteilnetze beispielsweise durch Demonstratoren und Ausschreibungen.

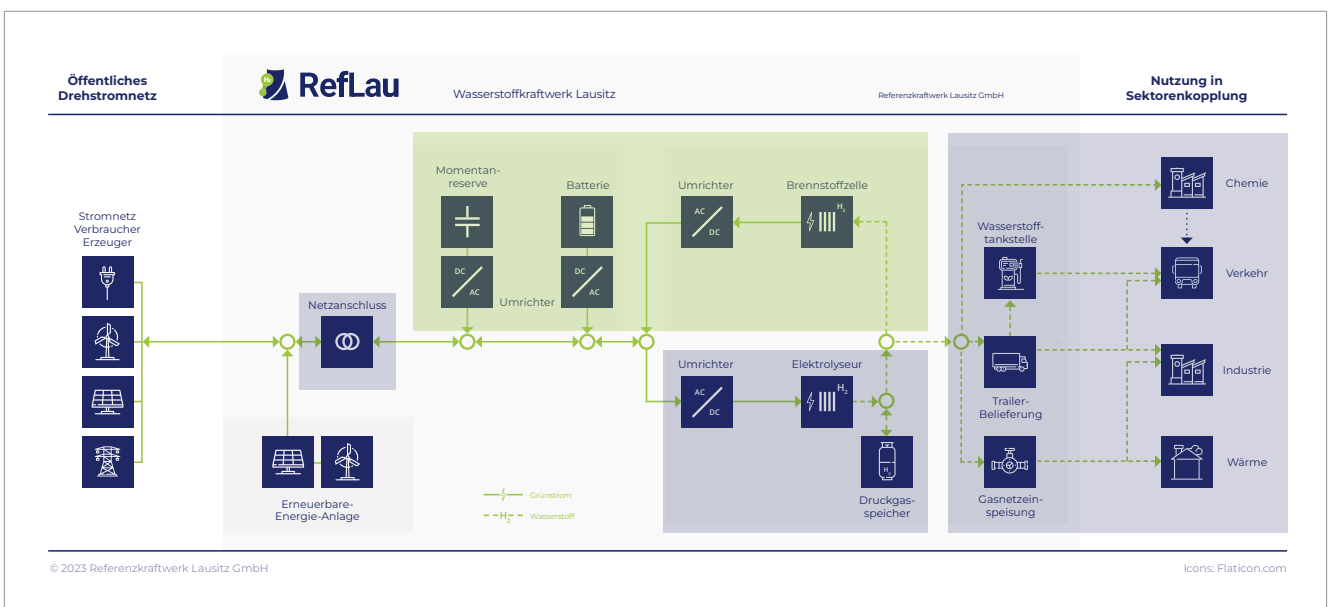
**„RefLau – Referenzkraftwerk Lausitz“ (01/2023 – 12/2027)**

Ein erster Schritt in die Richtung von Demonstratoren stellt beispielsweise das Projekt „RefLau“ des Fraunhofer IEG dar. In diesem Projekt wird ein

► Abbildung 6

**Übersicht des Referenzkraftwerks Lausitz.**

(Quelle: IEG)



hybrides Speicherkraftwerk im Industriepark Schwarze Pumpe in Spremberg aufgebaut [7]. Der Aufbau des Kraftwerks ist in ► Abbildung 6 dargestellt.

Das hybride Speicherkraftwerk ist an das öffentliche Stromnetz gekoppelt und wird aus PV- und Windenergieanlagen gespeist. Die überschüssige Energie wird durch Elektrolyse in Wasserstoff gespeichert und über Wasserstofftanks zum einen dem Mobilitätssektor und der Industrie zur Verfügung gestellt und zum anderen in Zeiten geringer PV- und Windenergieerzeugung mithilfe einer Brennstoffzelle rückverstromt. Um auch Regenergie und Momentanreserve zur Verfügung stellen zu können, wird die Brennstoffzelle zusätzlich durch einen Momentanreservespeicher (z.B. Superkondensator) und eine Batterie ergänzt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen geeignete netzbildende Regelungsstrategien für die Stromrichter und die Gesamtanlage entwickelt und getestet werden, mit denen am Netzkopplungspunkt alle relevanten Systemdienstleistungen eines konventionellen Kraftwerkes nachgebildet werden können. Das Kraftwerk befindet sich derzeit in Planung und soll voraussichtlich 2026 in den Forschungsbetrieb gehen.

## Referenzen

1. Ph. Strauss and A. Engler, "AC coupled PV hybrid systems and microgrids-state of the art and future trends," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, Osaka, Japan, 2003, pp. 2129-2134 Vol.3. [www.academia.edu/18412776]
2. Unruh, Peter; Nuschke, Maria; Strauß, Philipp; Welck, Friedrich (2020): Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods. In: Energies 13 (10), S. 2589. DOI: 10.3390/en13102589.
3. Ph. Ernst et al., „VERBUNDNETZSTABIL – Stabiles Verbundsystemverhalten bei umrichterbasierter Erzeugung“ öffentlicher Schlussbericht, TIB Hannover, Förderkennzeichnung 0350015A-D
4. Forschungsprojekt ROLLEN, DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme, FKZ 03ETE029D
5. Ph. Borowski et al. „PQ4Wind – Novel test bench for component level wind turbine converter testing“, 21st Wind & Solar Integration Workshop, 2022, Niederlande.
6. Ph. Strauss et. al., „Netzregelung 2.0 – Regelung und Stabilität im stromrichterdominierten Verbundnetz öffentlicher Schlussbericht, TIB Hannover, Förderkennzeichen: 0350023A-F
7. Referenzkraftwerk Lausitz GmbH, RefLau, 2022, FKZ 03EWR018A, <https://www.reflau.com/projekt>