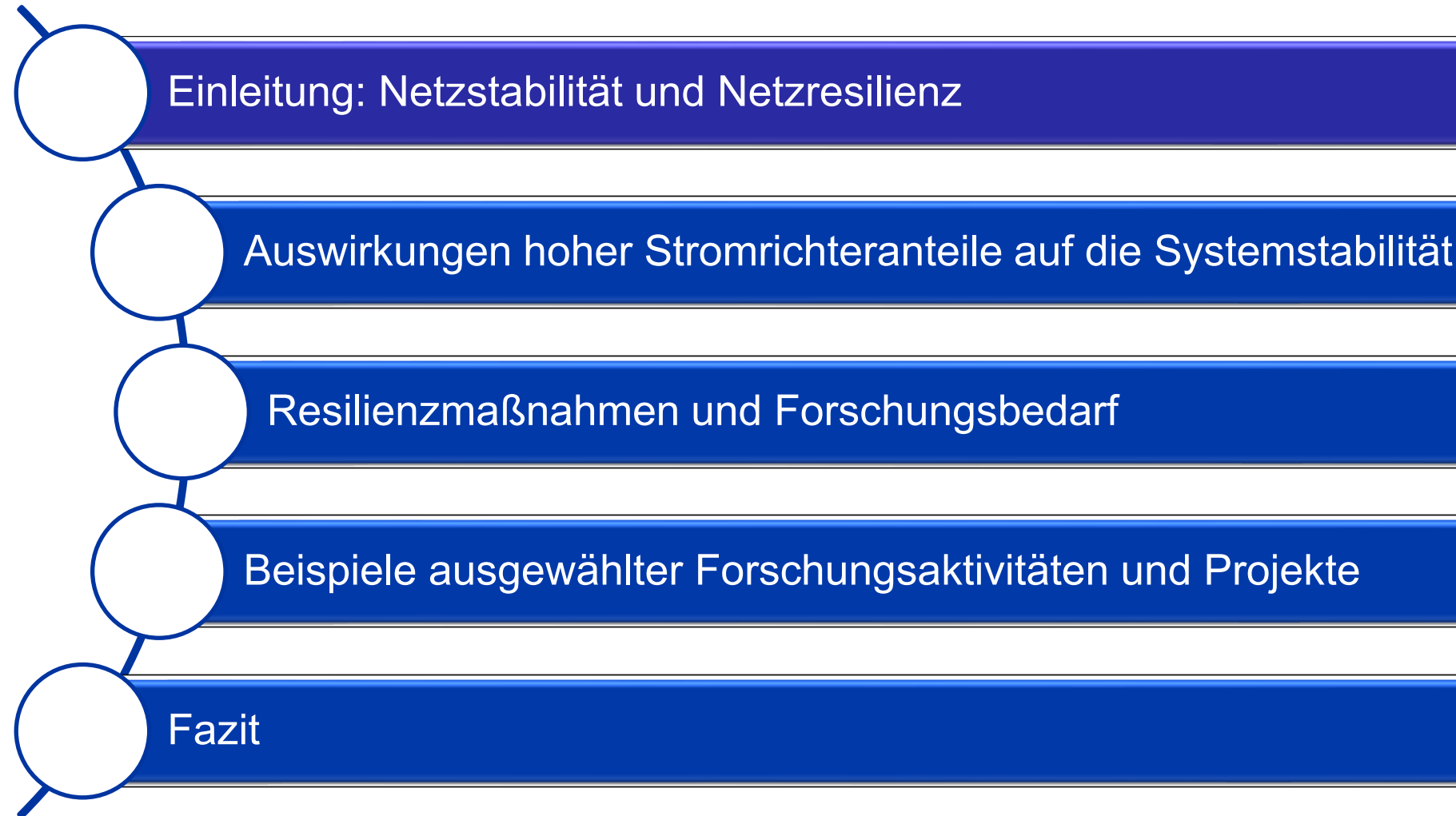


Stabilität und Resilienz in stromrichterdominierten elektrischen Energiesystemen

Fraunhofer IEE	Dr. Diana Strauß-Mincu , Dr. Philipp Strauß, Dr. Thomas Degner, Prof. Dr. Farhad Safargholi, Dipl.-Ing. Holger Becker
DLR	M.Sc. Holger Behrends
DBFZ	Dr. Peter Kornatz
Fraunhofer ISE	Dr. Rebekka Denninger

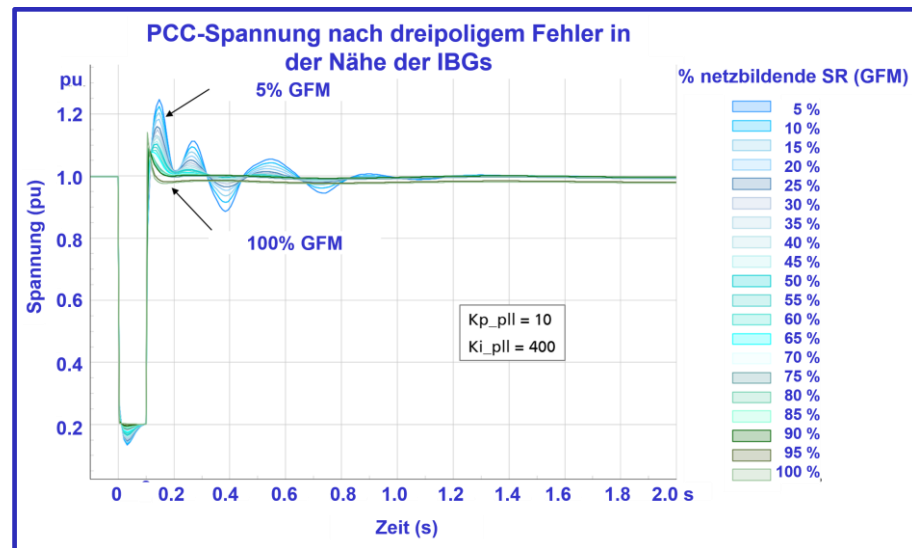
Agenda



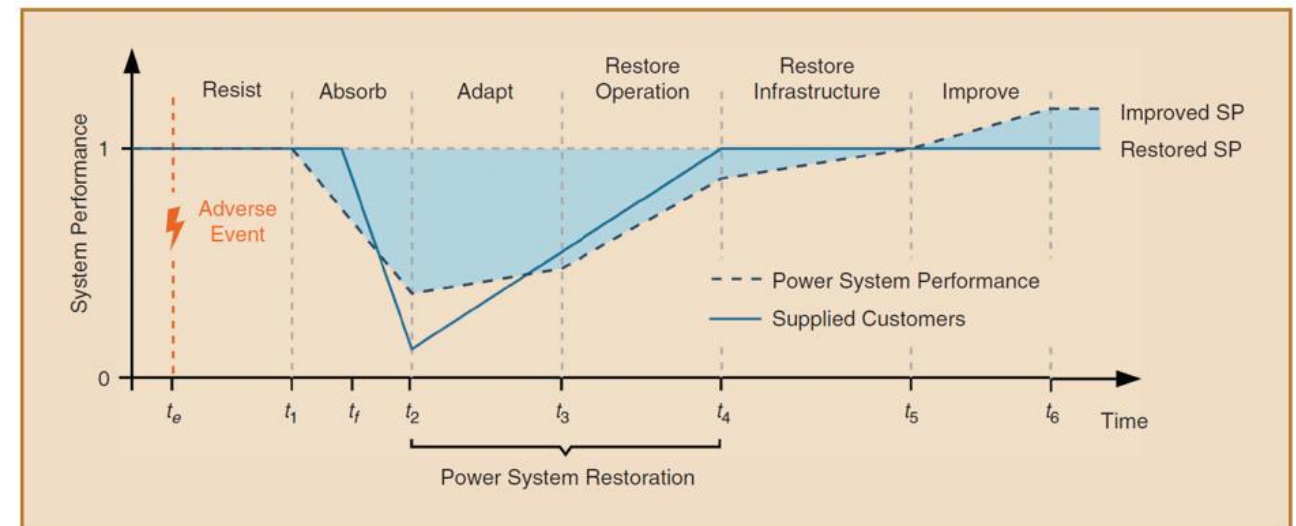
Netzstabilität ist Voraussetzung für Netzresilienz

Netzstabilität beantwortet die Frage: **Bleibt das System im Gleichgewicht?**

Netzresilienz beantwortet die Frage: **Wie gut kommt das System mit Störungen zurecht und wie schnell stellt es seine Funktion wieder her?**



Quelle: L. D. Pabón Ospina.



Quelle: Braun, Hachmann, Haack: Blackouts, Restoration, and Islanding, A system Resilience Perspective, IEEE Power & Energy Magazine, July/August 2020

Netzstabilität ist Voraussetzung für Netzresilienz

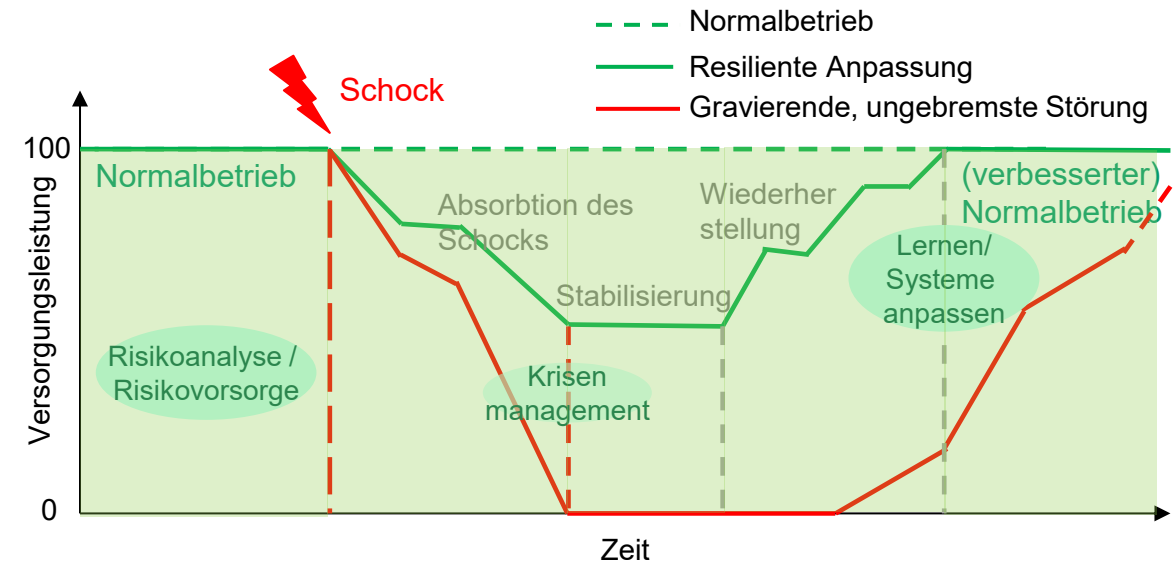
Netzstabilität beschreibt die physikalische Beherrschung von Störungen im elektrischen Netz

Netzresilienz beschreibt die Fähigkeit des gesamten Energiesystems

- außergewöhnliche Ereignisse vorauszusehen
- ihre Auswirkungen zu begrenzen, den Betrieb aufrechtzuerhalten
- nach einer Störung rasch zum Normalbetrieb zurückzukehren.

Phasen der Netzresilienz

- Antizipation: Extreme Ereignisse erkennen und überwachen.
- Vorbereitung: Maßnahmen und Notfallpläne entwickeln.
- Absorption: Verwundbarkeiten verringern und Auswirkungen begrenzen.
- Kritische Funktionen aufrechterhalten: Die Versorgung auch bei Störungen sichern.
- Wiederherstellung: Störungen beheben und den Betrieb rasch wiederherstellen.
- Anpassung: Aus Ereignissen lernen und das System langfristig verbessern.



Resilienzkurve – Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Energieversorgung nach einem Schock (nach <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2025/02/05-energieversorgungssicherheit.html>)

Netzstabilität ist Voraussetzung für Netzresilienz

Bedrohungen und kritische Abhängigkeiten

- Technische Fehler, Überlastungen und Kaskadenausfälle.
- Extremwetter und Klimafolgen.
- Cyberangriffe und physische Sabotage.
- Abhängigkeiten von Kommunikation, IT, Verkehr, Brennstoffversorgung und Personal.
- Kritische Kabeltrassen, Umspannwerke, Leitstellen und Netzknoten.

Beispiel Berlin und Nordrhein-Westfalen : Lehren für die Netzresilienz

- **Januar 2026** – Brand an einer Kabelbrücke nahe Lichterfelde: Der Schaden traf eine kritische lokale Verbindung im Verteilnetz. Rund 45.000 Haushalte und 2.200 Gewerbebetriebe waren betroffen. Ersatzwege standen kurzfristig nicht ausreichend zur Verfügung – dadurch kam es zu Versorgungsausfällen.
- **1. September 2026** – Angriffe auf Höchstspannungsleitungen: Leitfähige Drähte verursachten Kurzschlüsse in Brandenburg und NRW. Die Stromversorgung blieb durch Schutztechnik und Redundanzen im Übertragungsnetz erhalten.
- **9. September 2026** – Explosion in einem Umspannwerk im Berliner Zentrum. Über 2.000 Alarmmeldungen erschwerten die schnelle Lagebewertung und die Ableitung geeigneter Maßnahmen.

→ Netzresilienz erfordert Redundanz und ausreichende Ersatz- sowie Umschaltmöglichkeiten auf allen Netzebenen, ergänzt durch geeignete Schutztechnik und wirksame Alarm- und Entscheidungsunterstützungssysteme.



Quelle: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/tatortfotos-zeigen-brennende-kabel-linksextreme-vulkangruppe-bekannt-sich-zu-anschlag-auf-stromversorgung-in-berlin-15100260.html>



Quelle: <https://www.welt.de/politik/deutschland/article6a97a9e0518a586e18560370/umspannwerk-in-nrw-behoerden-sprechen-von-anschlag-ermittler-sehen-parallelen-zu-vorfall-in-jaenschwalde.html>

Warum hohe Stromrichteranteile die Stabilität verändern

Stromrichter ersetzen nicht einfach klassische Mechanismen, sondern **verändern** deren **Wirkungsweise grundlegend**

- weniger klassische Trägheit
- neue Dynamiken und Stabilitätsaspekte
- neue Stabilitätsanforderungen
- Stabilität wird zunehmend durch Software und Regelung bestimmt

Frequenzhaltung → klassische Trägheit aus Synchronmaschinen nimmt ab → Frequenzänderungen laufen schneller und steiler → Tiefere Frequenz-Nadire und ein größeres Risiko für den Verlust der Synchronität nach Störungen

Spannungshaltung → weniger klassische Kurzschlussleistung und verändertes Spannungsverhalten durch leistungselektronische Einspeiser → erschwert die Anwendung klassischer Schutz- und Regelungskonzepte

Neue Stabilitätsaspekte → stromrichtergetriebene Stabilitätsphänomene, Resonanz-, SSH- und Interaktionsphänomene sind relevant.

Systemadäquanz und Variabilität → Wetterabhängige Erzeugung und Netzintegration neuer Lasten (EV, Wärmepumpen, Elektrolyseure, Rechenzentren) erhöhen Variabilität und Unsicherheit → Herausforderung für die Betriebssicherheit und Regelreservedimensionierung.

→ Anpassung der Technischen Netzanschlussregeln, regulatorischer Rahmen, des Marktdesigns;

→ Neue Konzepte, Prozesse und Tools für den Netzbetrieb.

Stromrichter bieten aber aufgrund des Software-bestimmten Verhaltens größere Spielräume in ihrer Regelung.

Warum hohe Stromrichteranteile die Stabilität verändern

Stromrichter ersetzen nicht einfach klassische Mechanismen, sondern **verändern** deren **Wirkungsweise grundlegend**

- weniger klassische Trägheit
- neue Dynamiken und Stabilitätsaspekte
- neue Stabilitätsanforderungen
- Stabilität wird zunehmend durch Software und Regelung bestimmt

Stromrichter können sowohl Risiko als auch Lösung sein.

- Risiken:
 - Regelungsinteraktionen
 - Cyberrisiken
 - softwarebedingte Ausfälle
- Chancen und Forschungsbedarf:
 - schnelle Frequenz- und Spannungsstützung
 - Schwarzstartfähigkeit
 - Inselnetzbetrieb
 - adaptive Regelung
 - Netzbildende (Grid-Forming)-Funktionalitäten

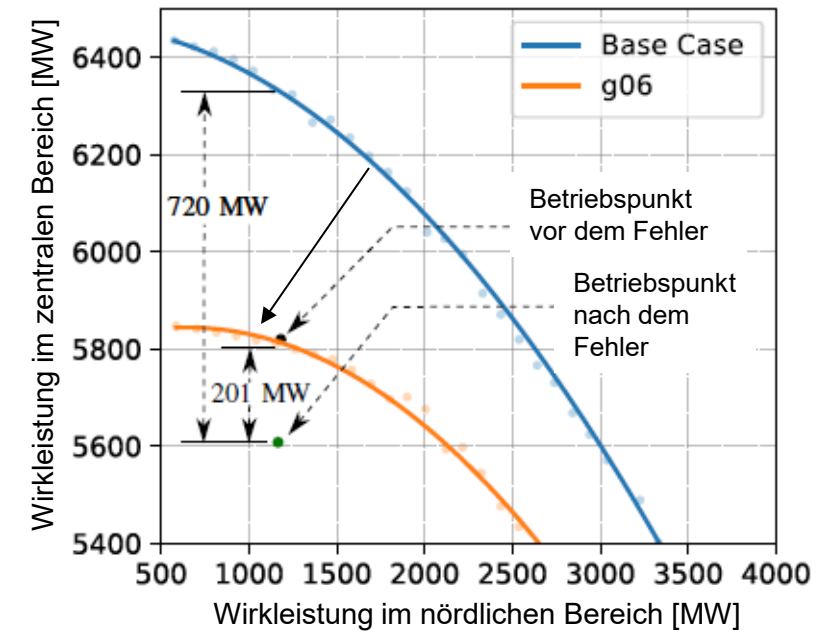
Resilienz erfordert dynamische Stabilität

Nach dem Ausfall von kritischen Betriebsmitteln verändern sich:

- Lastflüsse und Netzimpedanzen → Netzstärke
- Frequenzänderungsrate (ROCOF)
- Spannungsverläufe
- Stabilitätsmargen und -reserven

Sicherzustellen sind:

- Frequenzstabilität
- Spannungsstabilität
- Transiente Stabilität und Winkelstabilität
- Subsynchrone, supersynchrone und harmonische Stabilität
- Stabilität bei Netzauftrennung
- Stabilität von Inselnetzen/Mikronetzen
- Schwarzstart, Netzwiederaufbau, Re-Synchronisierung



Bifurcation Sets vor und nach Fehlerfall.

Quelle: L. D. Pabón Ospina, "Voltage Stability Assessment and the Need for Multi-Time Scale Dynamic Simulation," 2025 IEEE Kiel PowerTech, Kiel, Germany, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/PowerTech59965.2025.11180454

Netzresilienz erfordert neben struktureller Redundanz eine dynamische Bewertung des Systemverhaltens – von der Störung über die Systemreaktion bis zum Wiederaufbau, unter unterschiedlichen Szenarien.

Wirtschaftlichkeit und Nutzen von Resilienzmaßnahmen

Resilienzmaßnahmen sind nicht nur Kostenfaktoren, sondern Investitionen in Versorgungssicherheit, Systemflexibilität und Effizienz.

- Vermeidung bzw. Reduzierung der Kosten von Versorgungsunterbrechungen
- Schnellere Störungsbewältigung und Systemwiederherstellung
- Schutz kritischer Infrastrukturen
- Begrenzung von Kaskaden- und Folgewirkungen
- Bessere Integration erneuerbarer Energien
- Erhöhung von Netzkapazität und Systemflexibilität
- Erfüllung regulatorischer und sicherheitsrelevanter Anforderungen

Ein Speicher mit geeigneter Regelungstechnologie kann beispielsweise gleichzeitig Frequenzstützung, Spannungsstützung, Netzwiederaufbau, Engpassmanagement und Versorgungssicherheit unterstützen.

Wirtschaftlichkeit soll nicht isoliert für das Stromnetz, sondern im Zusammenspiel mit Sektorkopplung, Digitalisierung und marktlichen Beschaffungsmechanismen bewertet werden.

Neue Resilienzmaßnahmen und Forschungsbedarf

Stabilität und Netzstützung

- Netzbildende Stromrichter (EZA, Speicher, Kompensationsanlagen)

Automatisierung und Schutz:

- Dynamische Sicherheitsbewertung und echtzeitnahe Überwachung
- Adaptive Schutzkonzepte
- Anpassung des Kurzschlussmanagement / neue Verfahren zur Kurzschlussstromberechnung

Digitalisierung und Kommunikation:

- Redundante Kommunikations- und Leitsysteme
- KI-Verfahren (für die dynamische Sicherheitsbewertung)
- Performante digitale Zwillinge → EMT- und RMS-Simulationen für unterschiedliche Störungs- und Angriffsszenarien

Flexibilität und Sektorkopplung

- Speicher, regelbare, flexible Lasten, Power-to-X

Wiederherstellung und Krisenbetrieb

- Inselnetzbetrieb
- Notfallpläne
- vorbereitete Wiederaufbaustrategien

Marktliche Beschaffung stabilisierender Systemdienstleistungen: z.B. Trägheit, Blindleistung, Regelreserven.

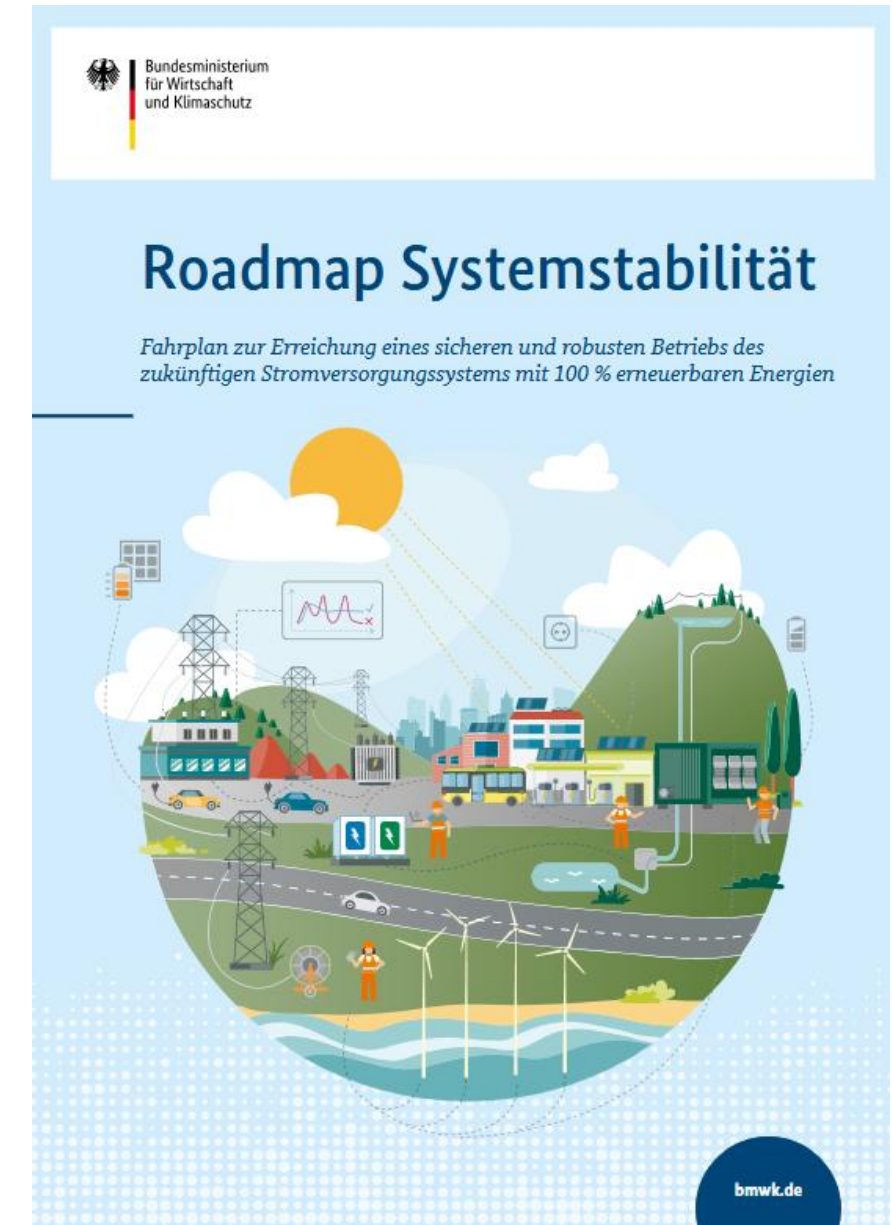
Roadmap Systemstabilität

Fahrplan zur Erreichung eines sicheren und robusten Betriebs des zukünftigen Stromversorgungssystems mit 100 % erneuerbaren Energien

Beschreibt Prozesse/Meilensteine für

- Frequenzstabilität
- Spannungsstabilität
- Resonanzstabilität
- Kurzschlussstromaspekte
- Winkelstabilität
- Betriebsführung
- Netz- und Versorgungswiederaufbau

<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/roadmap-systemstabilitaet.html>



Netzregelung 2.0 – Fraunhofer IEE

Nachweis: elektrisches Verbundsystem kann mit sehr hohen Stromrichteranteilen durch geeignete netzbildende Regelungsverfahren stabil betrieben werden

- Resilienz: Stabilitätsnachweis für Teilnetze während „System Split“
 - Untersuchungen zur Frequenz-, Spannungs- und Winkelstabilität
 - Bis 100 % Stromrichteranteile möglich – nahtloser Übergang realisierbar
 - Beantwortung von zentralen Forschungsfragen
 - Einführung der Technologie für netzbildende Stromrichter ist Konsens
 - Input zur „Roadmap Systemstabilität“ der Bundesregierung
-
- Weitere wesentlicher Fragen im Verteilungsnetz zur Teilnetz-Erkennung, Regler-Interaktionen, Koordination mit Netzschutz etc. vor breiter Einführung wichtig → neu: BMWK-Verbundprojekt: Verteilnetz 2030+
 - Schrittweise Einführung der Technologie im Verteilungsnetz: z.B. zunächst durch Demonstration und Ausschreibungen, um Erfahrung zu sammeln

Partner:
 Netzbetreiber: 4 ÜNB und mehrere VNB
 Stromrichter-Hersteller, VDE-FNN, Forschungsinstitute.
 Projektlaufzeit: 01.12.2017 - 31.08.2022
 Fördersumme: 10,5 Mio. €



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter den Förderkennzeichen 0350023A-G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums Netzregelung 2.0 wider.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LI-SA - Fraunhofer IEE

Assistenzsysteme für einen sicheren Betrieb von Verbundnetzen mit geringer Trägheit

Ziel:

Entwicklung eines modularen DSA-Systems für die Bewertung der Systemsicherheit für Verbundsysteme mit geringer Trägheit - Low Inertia Security Assessment System (LI-SA)

Hauptergebnis: LI-SA gemeinsamer Demonstrator

- **Modulares, interoperables DSA-System**
- **Skalierbare, containerisierte Architektur**
- Online- und Offline-Trägheitsreserve-Schätzung
- Integration von Plug-and-Play-Algorithmen
- Kafka Message Bus + Kubernetes Deployment
- **Leitwarten-Integration** (IEEE C37.118, IEC 61850)
- **Schlüsselmodule:** dynamische Simulationsmodelle, Zustandsschätzung, Trägheitsschätzung, Anomalieerkennung, Notfallscreening, Operatorvisualisierung

Projektlaufzeit: 01.01.2023-30.06.2026

Konsortium: Fraunhofer IEE, Fraunhofer IOSB-AST, PSI Software AG, Avasition GmbH, Tennet TSO GmbH, TransnetBW GmbH

Gefördert vom BMWF mit ca. 4 Mio. €

<https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/2023/li-sa.html>

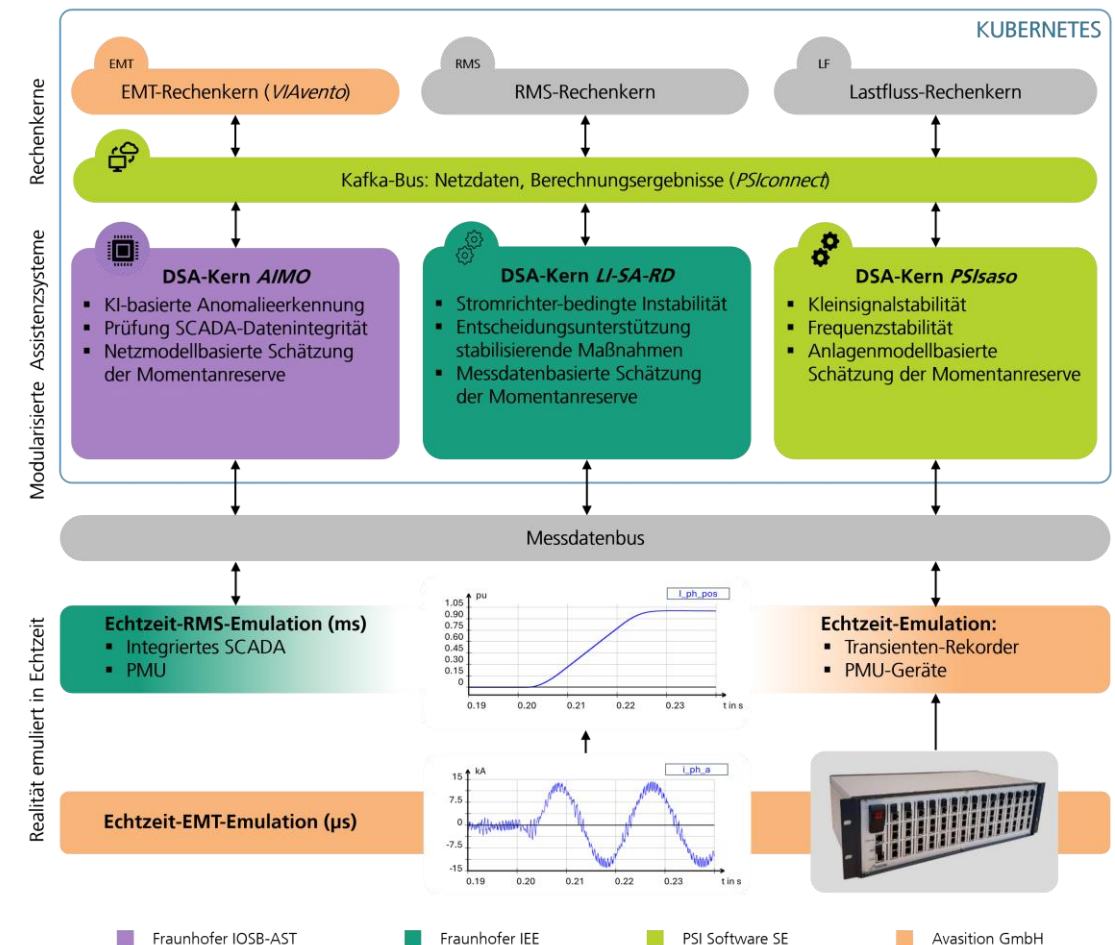
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Gesamtkonzept



LI-SA Demonstrator: Systemarchitektur



BeyondBattery - Fraunhofer IEE & ISE

Stabilität und Interoperabilität durch netzbildende Erzeuger und Lasten



Motivation

- *Großer Bedarf an Momentanreserve* zur Sicherstellung der Systemstabilität
- Stromrichter-gekoppelte Erzeugungsanlagen mit netzbildenden Eigenschaften können Momentanreserve bereitstellen
- Netzbildende Technologien bisher vor allem für HGÜ- Kopfstationen, STATCOMs und Batteriespeichersysteme verfügbar

Ziele des Projekts

- *Netzbildende Anlagen:* Entwicklung von Windenergie-, Photovoltaik- und regelbaren Lastanlagen.
- *Robuste Netzintegration:* Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für die massentaugliche Integration in Verteil- und Übertragungsnetze.

Angestrebte Ergebnisse

- *Prototypen:* Entwicklung und Erprobung netzbildender Prototypen.
- *Feldtests:* Nachweis der Momentanreserve in realen Anlagen.
- Betriebskonzepte: Entwicklung netzbildender Betriebsweisen.
- Windenergieanlagen: Optimierung von Design, Lebensdauer und Betrieb.
- Modelle: Entwicklung von Anlagenmodellen und Simulationsumgebungen.
- Stabilitätsanalyse: *Untersuchung von Interaktionen, Stabilität und Inselnetzerkennung.*
- Netzintegration: Ableitung von Leitfäden und Empfehlungen



Gefördert durch:



Laufzeit: 01.05.2026 – 30.04.2029
Förderer: BMW / FKZ 03EI6157
Fördersumme: ca. 4,6 Mio.€

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SUREVIVE – Fraunhofer ISE

StabilitätsVersuche zur MomentanREserVeErbringung aus VErteilnetzanlagen

Motivation

- Teilnahme am Momentanreserve-Markt von GFM-Anlagen im Verteilnetz
- Sammeln praktischer Erfahrungen und höheres Vertrauen in den stabilen Betrieb netzbildender Stromrichter im Verteilnetz

Ziele des Projekts

- *Feldtest* mit mehreren netzbildenden Wechselrichtern der Multi-MW-Klasse auf Batteriespeicherbasis (Inbetriebnahme, besondere Anregung, Dauerversuche)
- *Best Practice Guide zum Anschluss und Betrieb erarbeiten*
- Entwicklung von *Werkzeugen zur Stabilitätsbewertung*
- Robuste Business-Modelle entwickeln und evaluieren
- Branchendialog
- Generalisierung der Ergebnisse

Laufzeit: 01.07.2024 - 30.06.2028

Partner: Westnetz, Fraunhofer ISE & IFK, Schoenergie.

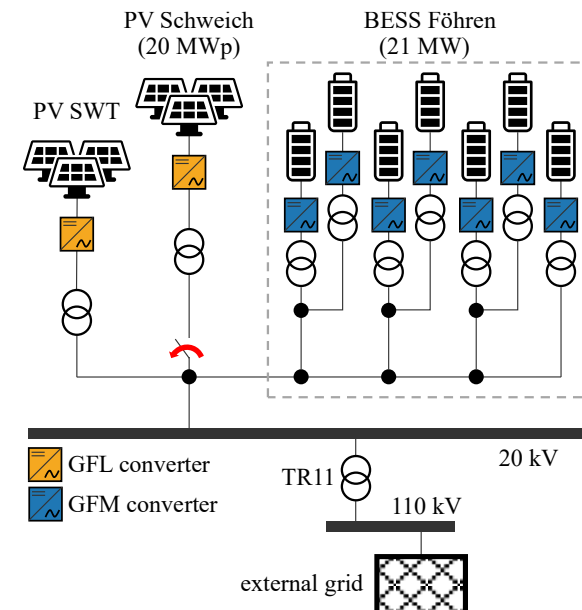
Förderer: BMWF / FKZ03EI6123, Fördersumme: ca. 2,5 Mio. €

<https://surevive.energy/>

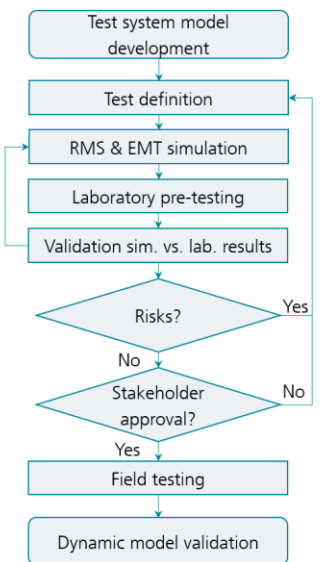
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Pilot Testing



Versorgungswiederaufbau - Fraunhofer IEE

Netz- und Versorgungswiederaufbau (NVWA)

Roadmap Systemstabilität ¹⁾ fordert die Vorplanung von **Verteilnetzinseln** als **Ergänzung** der NVWA-Pläne im ÜN (HV, ggf. MV)

Handlungsbedarfe

- Anlagenverfügbarkeit mit Spannungswiederkehr
- System- und netzdienliches Anlagenverhalten
- Integration in die Netzbetriebsführung
 - Information über verfügbare Leistung in NB-Leitstelle
 - Beiträge zur Frequenz- und Spannungshaltung
 ->Ansteuerbarkeit aus der NB-Leitstelle

Lösungsansätze

- Erweiterung der NB-Schnittstelle um relevante Funktionen ²⁾
- Definition Anlagenverhalten nach Spannungswiederkehr ²⁾
- Aggregationssysteme für MV und LV (z.B. Flächenkraftwerk zur Massenansteuerung von Anlagen) ^{2,3)}

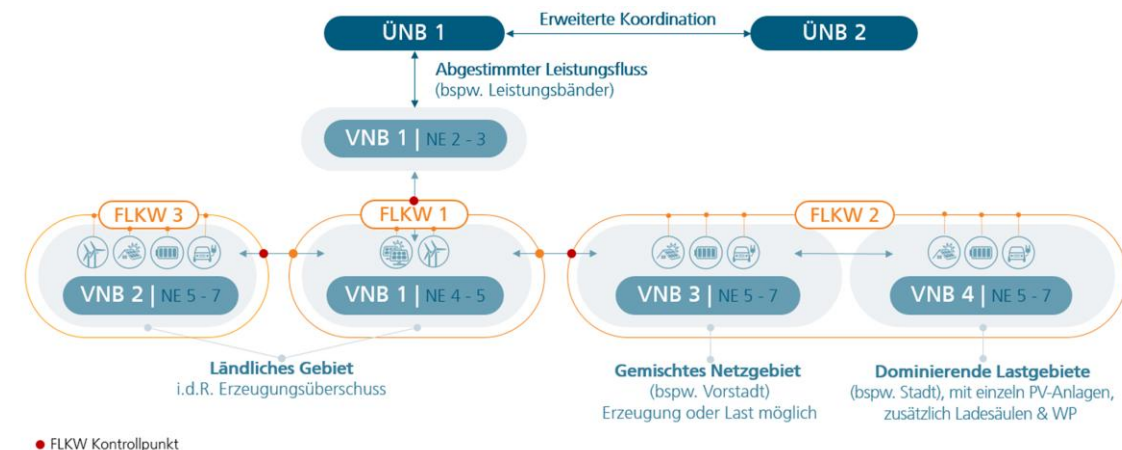
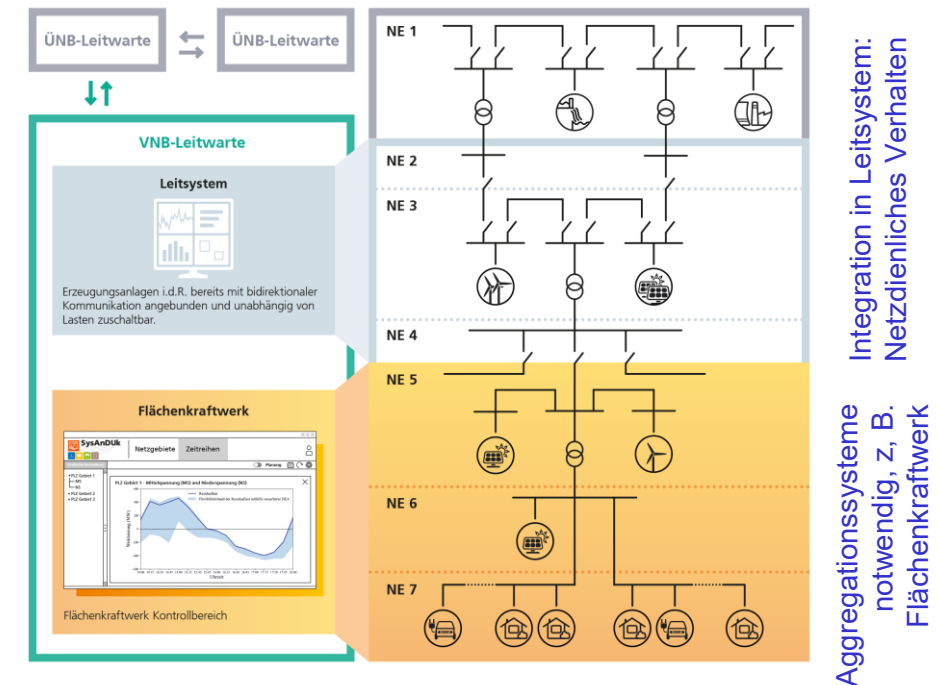
Offene Fragen

- Identifikation geeigneter Verteilnetzinseln -> low hanging fruits
- Vorplanung von Notstrom- und Verteilnetzinseln
- Abgleich mit übergeordneten NVWA-Plänen

Laufzeit: 01.09.2019 - 31.12.2022

Partner: Fraunhofer IEE, Alterric Deutschland, ENERCON, Westnetz, DUtrain.

Förderer: BMW / FKZ 03EI4004, Fördersumme: ca. 2,5 Mio. €



Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BesGASa – netzbildende Windparks

Beschleunigung der Energiewende durch Grid Forming mit Windparks und Strategien für kritische Netzzustände zur Ablösung von Synchronmaschinen

Motivation „Roadmap Systemstabilität“

Fahrplan zukünftiger Betrieb 100% EE

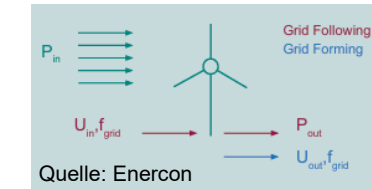
- Entwicklung Windenergieanlage mit netzbildendem Umrichter
- Entwicklung Selbstversorgung Windpark beim Blackout
- Erforschung Beiträge von Windparks zum Netzwiederaufbau

Herausforderungen bei netzbildendem Verhalten von WEA

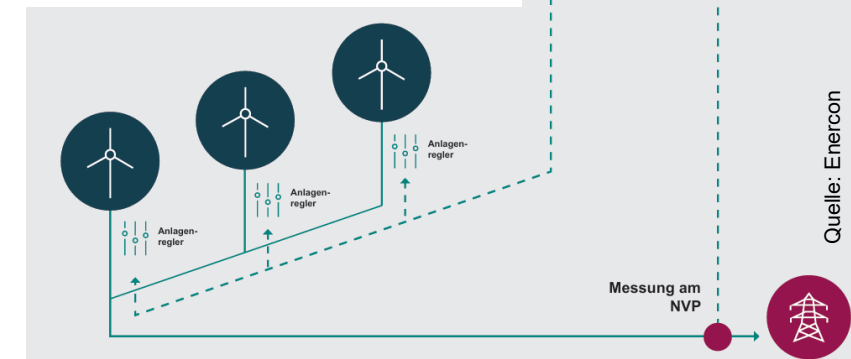
- Einspeiseleistung durch WEA nur mittelbar beeinflussbar
- Stärkere Wechselwirkung bzw. Kopplung zwischen Anlagen und Netz
 - Größere Anlagenbelastung bei Netzevents
 - Kopplung von Schwingungsmoden der Anlage und des Netzes
 - Resonanzen bei Kopplung mehrerer Umrichter

Arbeiten im Projekt

- *Konzeptumstellung von Grid-Following auf Grid-Forming Verhalten*
 - Neue Controller- und Steuerkonzepte auf Anlagen- und Parkebene
 - Einfluss auf Lasten und Komponentenauslegung
 - Betrachtung des Gesamtsystems Anlage - Netz
- Entwicklung kombinierter Modellierungsframeworks (mechanisch/elektrisch)
- Erweiterte aktive Beteiligung von Windparks an der Netzstabilität
- Stabilitätsuntersuchungen in kritischen Netzsituationen



Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
 aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Laufzeit: 01.01.2025 - 31.12.2027, Förderer: BMW / FKZ03EE071
 Fördersumme: ca. 4,9 Mio. €

Prüfung der Stabilität netzbildender Systeme im Verbundbetrieb nach FNN-Hinweis

Aktivitäten

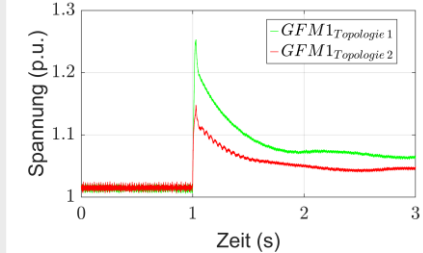
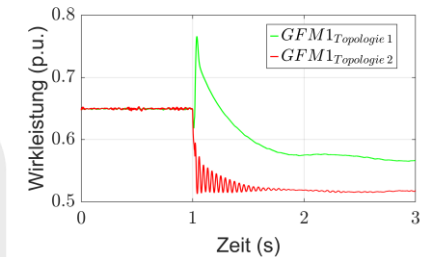
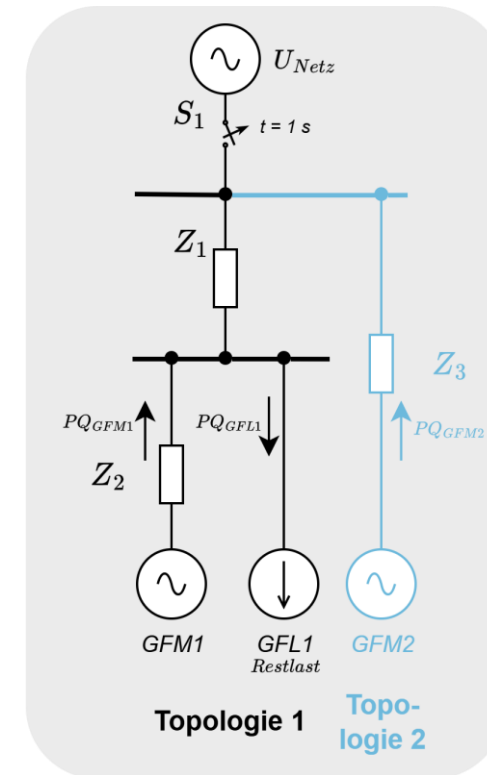
- Experimenteller Vergleich des Betriebsverhaltens zweier GFM mit unterschiedlicher dynamischer Spannungssteifigkeit in zwei Inselnetztopologien

Ergebnis

- Topologieabhängig kommt es zu unterschiedlichen Systemantworten auf ein Störereignis (→ Ausfall überlagerter Spannungsebene)
 - Oszillationen bei mehreren dominanten GFM im gleichen Netz

Fazit

- Aktuelle Prüfverfahren zur Zertifizierung von GFM-Anlagen sind vermutlich nicht ausreichend
- Spannungsverhalten weicht deutlich ab, wenn mehrere nichtdominante GFM-Anlagen mit geringer Spannungssteifigkeit parallel betrieben werden
- Herausforderung in der Anlagenparametrierung für einen stabilen Netzbetrieb mit mehreren netzbildenden Anlagen



Quelle: EWE Netz



EWEnetz



Institut für Vernetzte
Energiesysteme

Biogasanlagen als Baustein für Stabilität und Resilienz

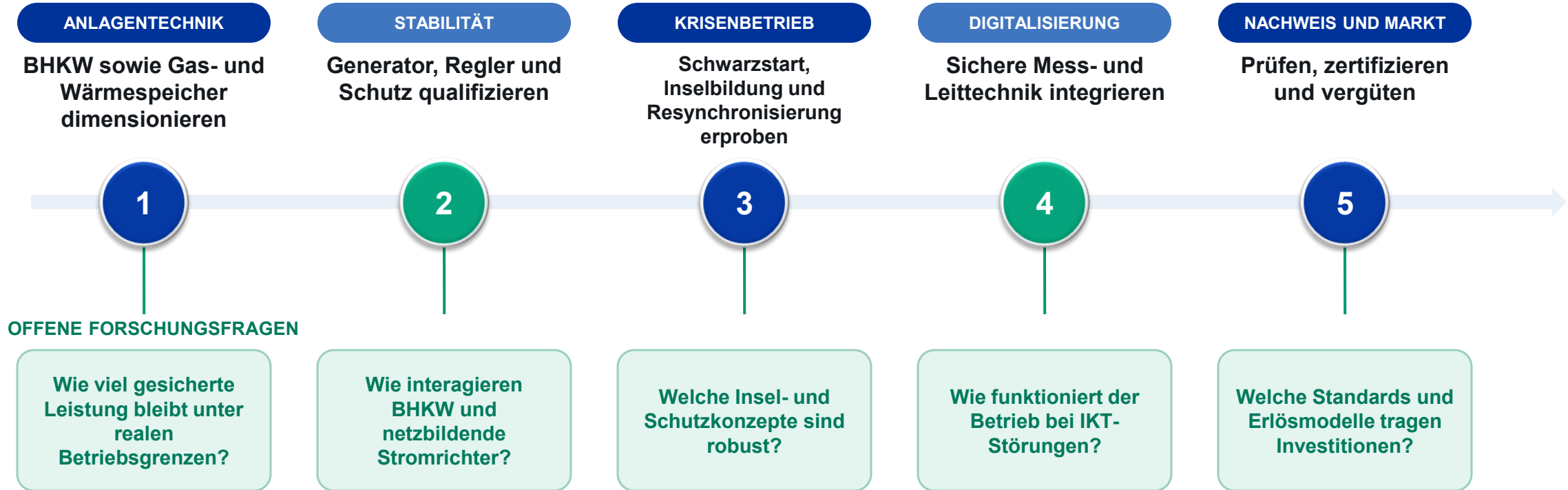
Regelbare Bioenergie wirkt vor, während und nach einer Störung



Technische Umsetzung und Forschungsbedarf

Fünf Entwicklungsfelder verbinden Anlagenpotenzial und Systemdienstleistung

TECHNISCHE MASSNAHMEN



Forschung übersetzt das technische Potenzial in robuste Nachweise, Standards und Geschäftsmodelle.

Fazit

1. Leistungselektronik verändert die Dynamik zukünftiger Energiesysteme und damit die Anforderungen an die Stabilität.
2. Neben Stabilität wird Resilienz zu einer gleichwertigen Zielgröße für Planung und Betrieb von Energiesystemen.
3. Resilienz bedeutet nicht Störungsfreiheit, sondern die Fähigkeit, Störungen zu beherrschen und sich schnell zu erholen.
4. Diversität und intelligent geregelte Stromrichter sind Schlüssel zur Erhöhung der Resilienz, können aber zugleich neue Risiken verursachen.
5. Es besteht erheblicher Forschungsbedarf, um resiliente Energiesysteme wirksamer, effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Diana Strauß-Mincu

Fraunhofer-Institut für
Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik IEE
+49 (0)561 7294-129
[diana.strauss-
mincu@iee.fraunhofer.de](mailto:diana.strauss-mincu@iee.fraunhofer.de)

Mitautoren FhG:
vorname.name@iee.fraunhofer.de
vorname.name@ise.fraunhofer.de

Holger Behrends

Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e. V. DLR
+49 (0)441 99906-416
holger.behrends@dlr.de

Peter Kornatz

Deutsches
Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH DBFZ
+49 (0)341 2434-716
peter.kornatz@dbfz.de