

Inselnetzbetrieb & Schwarzstartfähigkeit von Windkraftanlagen

Das Projekt Fuchstal Leuchtet



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Partner:

Hochschule München Prof. Georg Kerber

Technische Hochschule Augsburg Prof. Michael Finkel MBA

TU-Braunschweig – Prof. Bernd Engel

Gemeinde Fuchstal

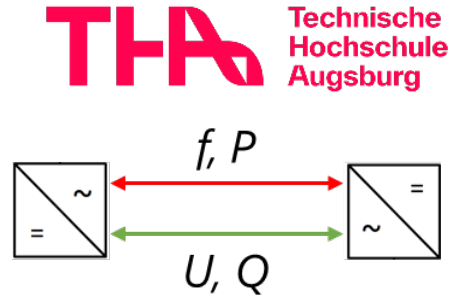
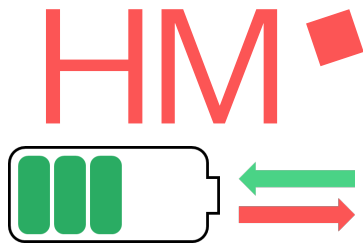
Motivation

Energiewende:

- Zunehmende Kopplung der Sektoren Transport, Wärme und Strom
- Ersatz von großen Synchrongenerator-Anlagen durch kleinere, stromrichterbasierte Erzeuger
- Zunahme von Stromrichterantrieben bei Verbrauchern aufgrund von Effizienz, Qualität und Kosten
- Übernahme von essenziellen Netzdienstleistungen wie Regel-energie und Spannungshaltung durch stromrichterbasierte Erzeuger

Notwendigkeit weiterer Forschung zur Sicherung eines stabilen Netzbetriebs und Anpassung der technischen Standards für Bestands- und Neuanlagen

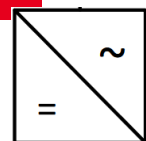
Projektpartner & Zielsetzung



Wie ist in der Praxis ein stabiler Netzbetrieb in einem Netz ohne zentrale Regelungsstruktur möglich, das ausschließlich von Stromrichtern gespeist und belastet wird?



Industriebeirat



25.09.2025

Prof. Dr.-Ing. Georg Kerber

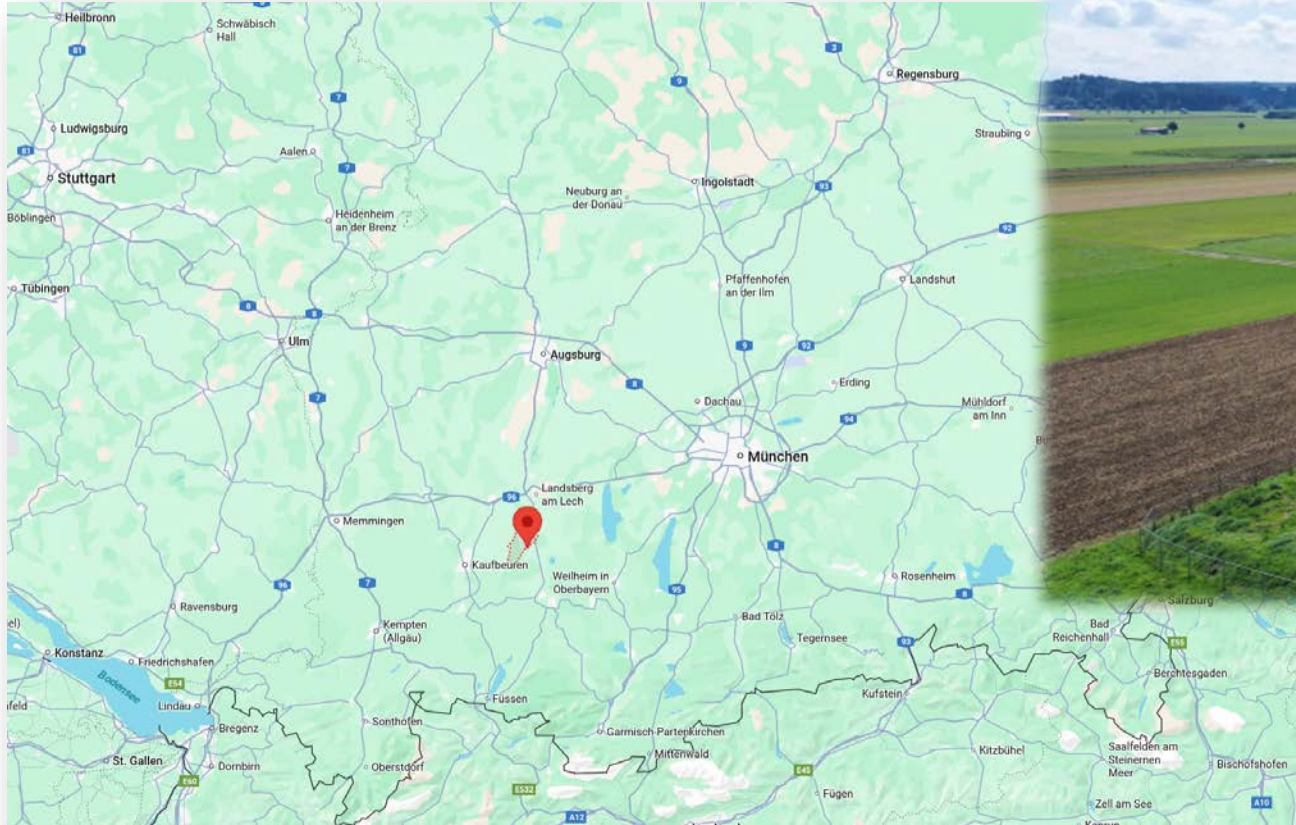
Zielsetzung



- Untersuchungen zu unerwünschten Wechselwirkungen in Stromrichter-regelungen und Analyse des Zusammenspiels mit netzfolgenden Erzeugungsanlagen
- Bewertung des Beitrags zur Bereitstellung von Momentanreserve und Kurzschlussströmen
- Betrachtung der Systemstabilität bei Laständerungen
- Ermöglichung des reibungslosen Übergangs zwischen Verbund- und Inselnetzbetrieb
- Kritische Überprüfung und Bewertung der bestehenden Netzparallelbetriebsparameter im Hinblick auf zukünftige Netzstabilität

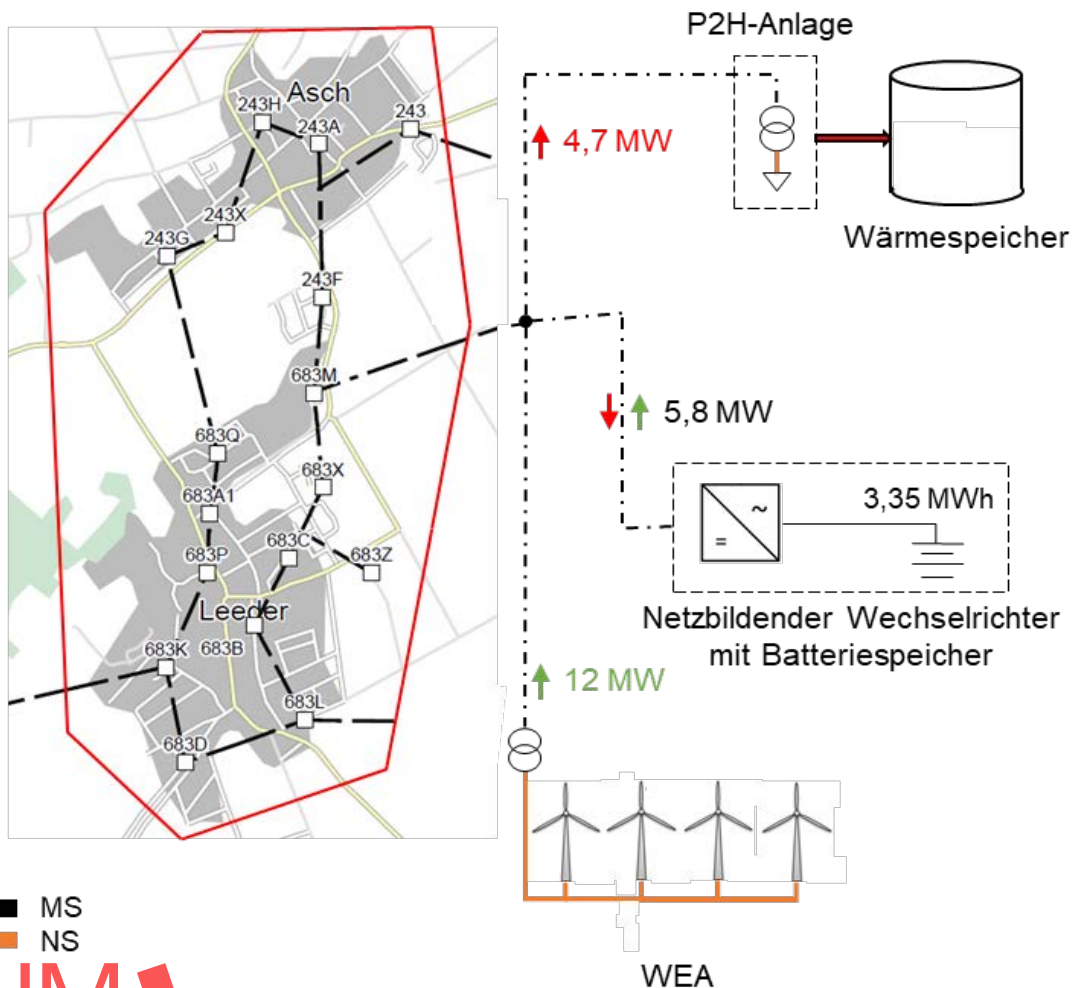
Evaluierung eines Regelungskonzepts für stromrichterbasierte Verbundnetze basierend auf Erkenntnissen aus dem untersuchten Mittelspannungsnetz

Was ist dieses Fuchstal?



Bildquellen: Google Maps
<https://www.klimaschutz.de/de/foerderung-der-nki/projekte/energiezukunft-fuchstal>

Testnetz



- **Netzbildender Wechselrichter:**

Erweiterung des bestehenden Batteriewechselrichters für Schwarzstartfähigkeit und Funktion als netzbildender Wechselrichter

- **Integration von Windenergie:**

4 Windkraftanlagen mit Maximalleistung von bis zu 12 MW, ausgestattet mit moderner Windpark-regelung

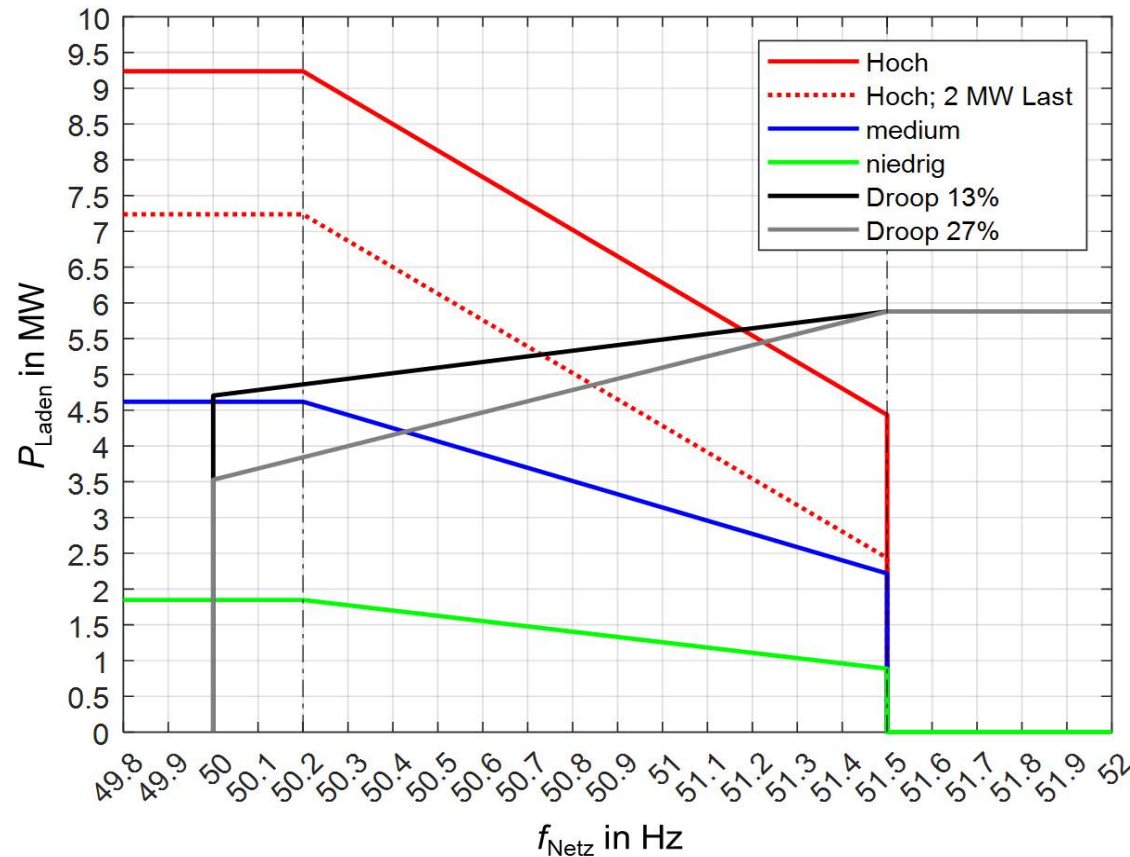
- **Power-to-Heat (P2H) als Wärmespeicher:**

Einbindung einer P2H-Anlage im lokalen Nahwärmenetz zur Umwandlung überschüssigen Stroms in Wärme

- **Photovoltaik-Anlagen (PV):**

PV-Anlagen auf öffentlichen und privaten Gebäuden im Netz von Fuchstal (Asch & Leeder)

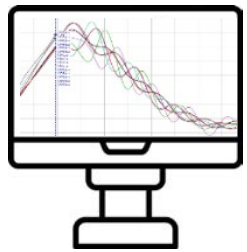
Wirkleistungsregelungskonzept



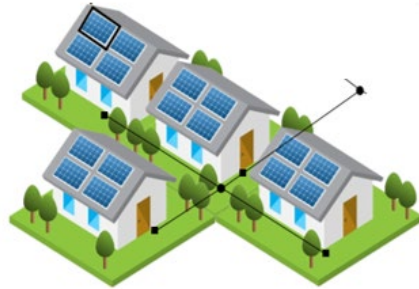
- Bildung der quasi-stationären Frequenzbetriebspunkte durch Interaktion der Netzverhaltenskurven und Droop-Kennlinien
- Verschiebung des Betriebspunktes entlang der Droop-Kennlinie des Wechselrichters durch Laständerungen
- Niedrigere Droop-Einstellung senkt Netzfrequenz und verbessert Einspeise-leistung, erhöht aber Sensitivität für Leistungsschwankungen

Feinjustierung der $f(P)$ -Droop-Parameter für die Systemstabilität kritisch, um abrupte Trennungen vom Netz und signifikante Frequenzabfälle zu vermeiden

Feldversuche & Simulationen



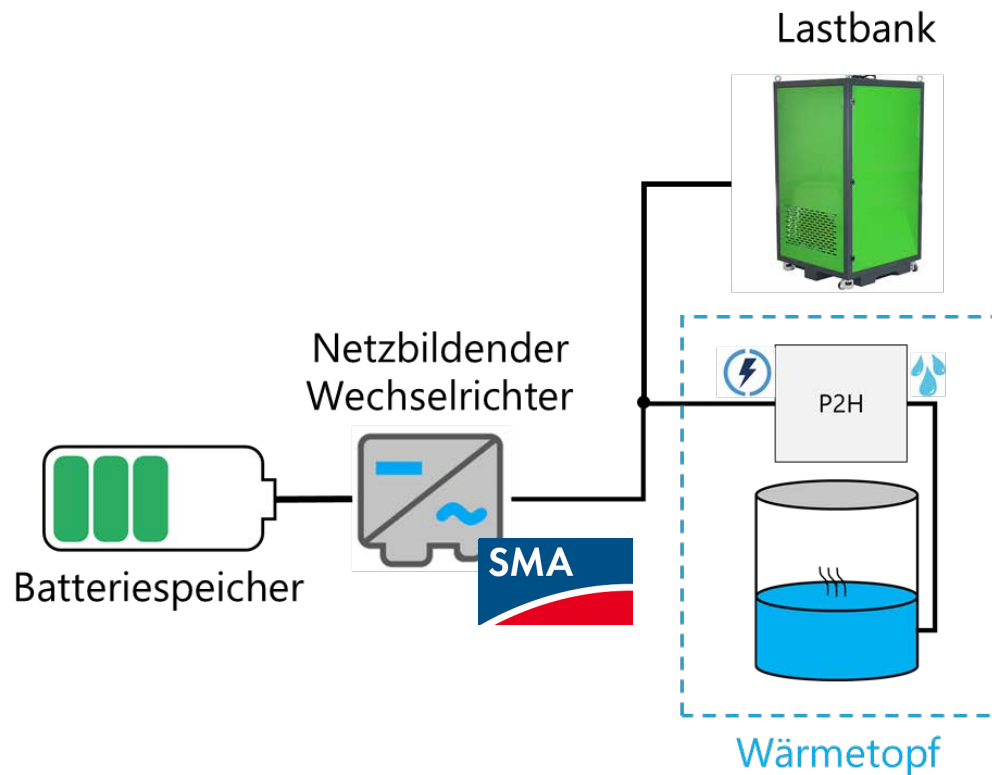
Simulation



Praxistests

- Entwicklung und Optimierung des Regelungskonzepts auf Basis von transienten Simulationsmodellen des Gesamtnetzes
- Verifizierung des Regelungskonzepts durch Abfolge von gestaffelten Feldversuchen
- Fokus des Forschungsprojekts auf Überprüfung der Systemstabilität im realen Netzwerk
- Feldversuche im Projekt „Fuchstal leuchtet“ zur Erkennung neuer Effekte wie der Interaktion zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern

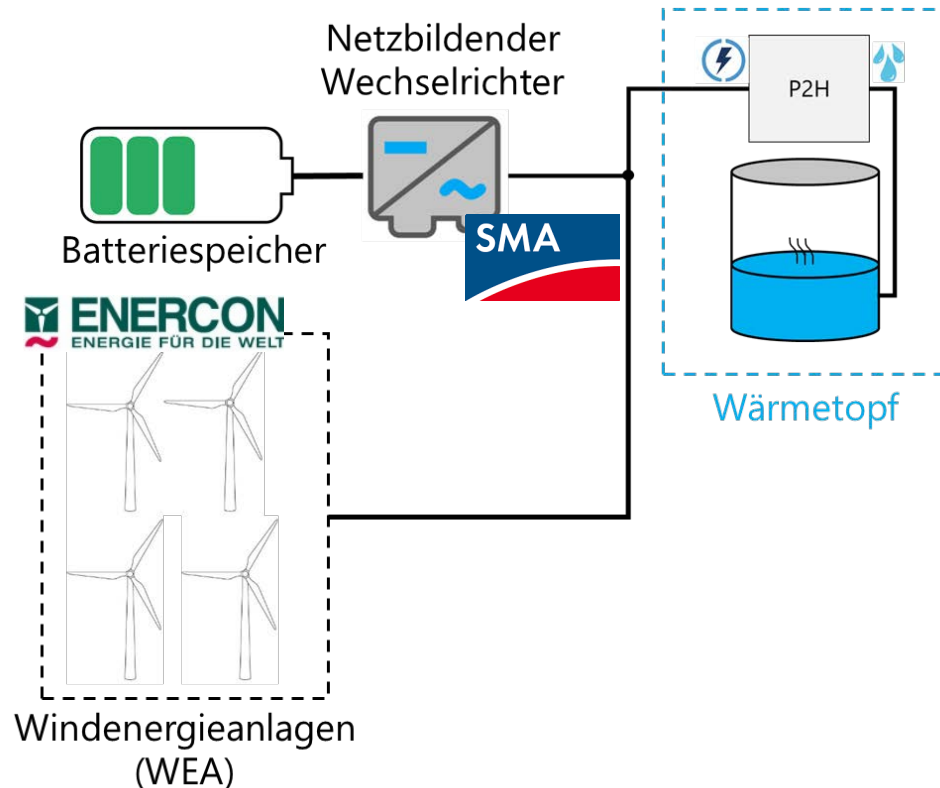
Feldversuche & Simulationen



- Test des „Umrichter-Upgrades“ im Inselnetz mit allen Zusatz- und Hilfsaggregaten
- Verhalten des netzbildenden Wechselrichters bei Laständerungen
- Erbringung von Momentanreserve
- Abgleich des Simulationsmodells und Einbinden neuer Erkenntnisse

Bestimmung der dynamischen Grenzen und der Parametrierung des netzbildenden Wechselrichters in Bezug auf Lastschwankungen

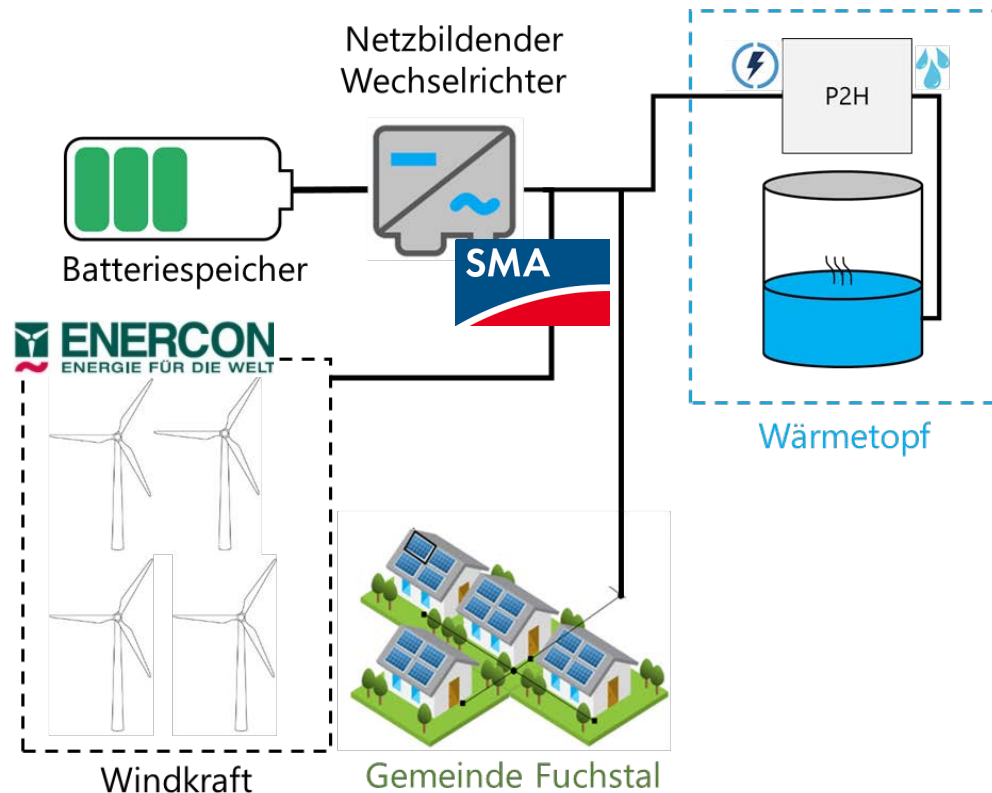
Feldversuche & Simulationen



- Einbindung von $Q(U)$ - und $P(f)$ -Statiken und deren Zusammenspiel mit TAR-Parametrierung
- Wechselwirkungen zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern
- Störgrößenmodellierung der Spannung durch Zuschalten von Kabelstrecken
- Evaluierung der zulässigen Einspeiseleistung der WEAs hinsichtlich Leistungsgrenzen

Überprüfung und Validierung des überlagerten Wirk- und Blindleistungsregelungskonzepts des netzbildenden Wechselrichters

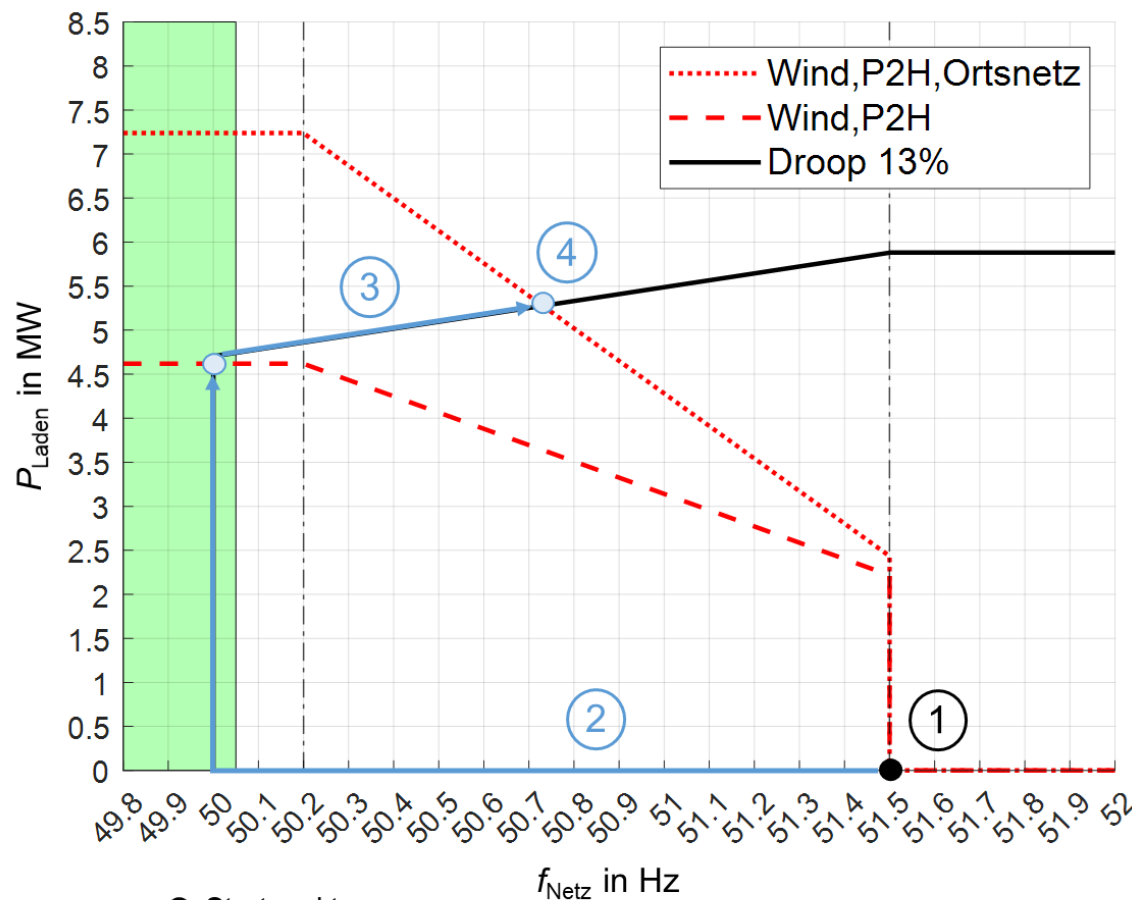
Feldversuche & Simulationen



- Planung und Bau einer Übergabestation
- Untersuchung des Übergangs vom Verbund- in den Inselnetzbetrieb
- Betrachtung der Spannungstoleranzen in Mittel- und Niederspannungsnetz (NS)
- Erweiterung der $f(P)$ - und $Q(U)$ -Statik durch PV-Anlagen im NS
- Untersuchung des spannungs- und frequenzabhängigen Lastverhaltens

Praxisnachweis, dass der Inselnetzbetrieb in einem stromrichterdominierten Netz ohne zentrale Regelungsstruktur möglich ist

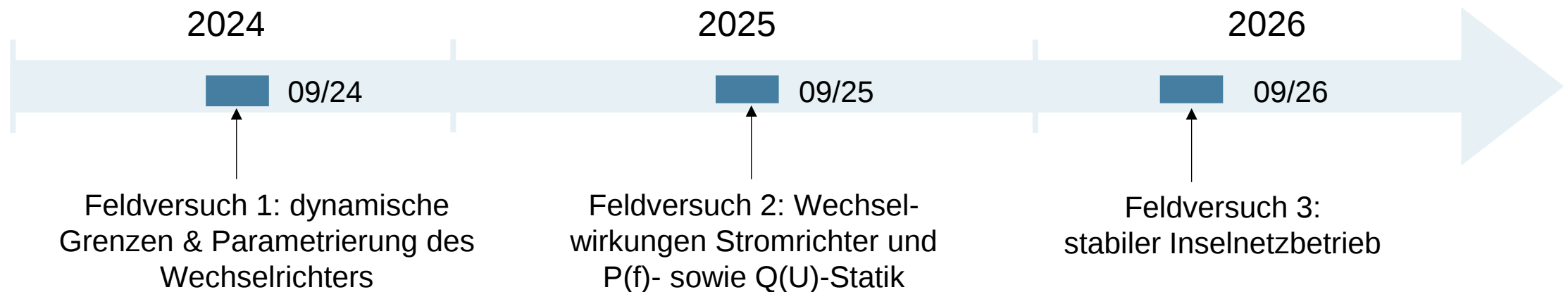
Aufbau & Betrieb des Inselnetzes



- 1 Start des Batterieumrichters mit 51,5 Hz zur Verhinderung der unbeabsichtigten Zuschaltung netzfolgender Erzeuger
- 2 Frequenzanpassung auf 50 Hz zur Rücksynchronisierung der Windkraftanlagen und Einspeisung ins Netz
- 3 Zuschaltung des Ortsnetzes mit PV-Anlagen und Erhöhung der Frequenz in Abhängigkeit der Ladeleistung der Batterie
- 4 Reduktion der Einspeiseleistung netzfolgender Erzeuger und quasi-stationärer Betriebszustand

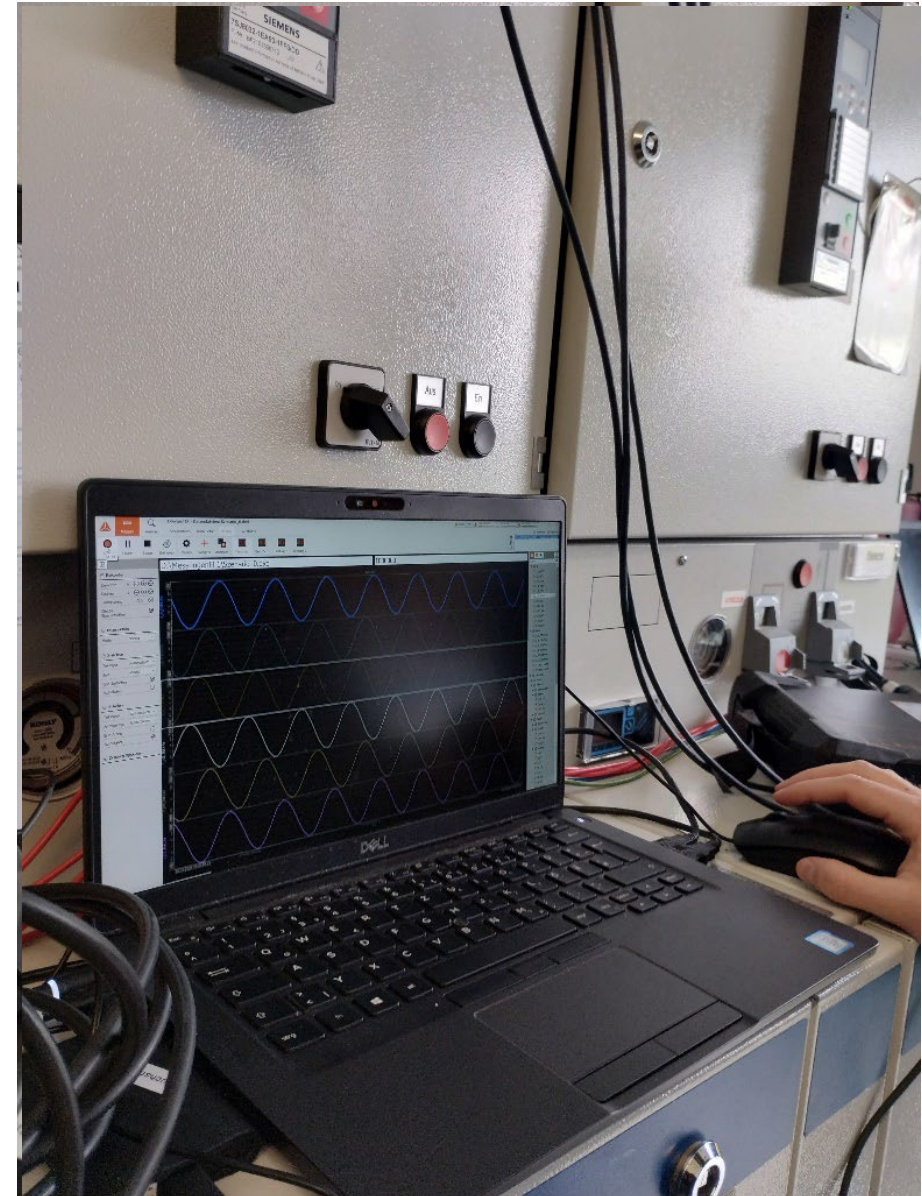
Zusammenfassung & Ausblick

- Integration erneuerbarer Energien und Entwicklung eines Regelungskonzepts für ein stromrichterdominiertes Mittelspannungsnetz
- Zusammenspiel zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern zur Sicherstellung von Netzstabilität
- Feldversuche und Simulationen zur Verifizierung des Regelungskonzepts und Überprüfung der Systemstabilität
- Aufbau und Betrieb eines Inselnetzes als Notkonzept unter Nutzung rein erneuerbarer Energien



Field test 1 (2.10.2024)



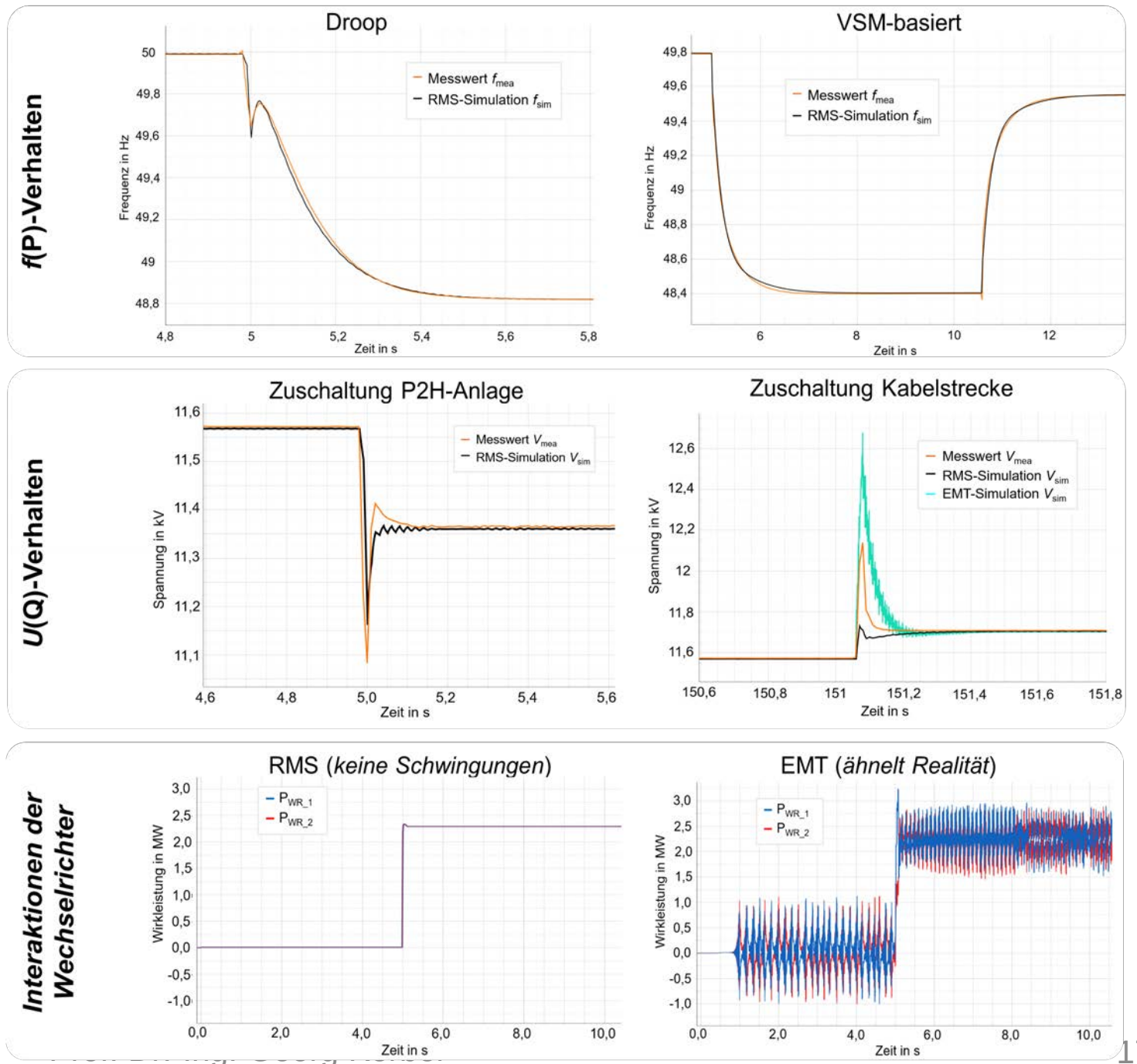


Ergebnisse

Erste Umrichter liefen „Netzbildend“
Erwartungsgemäß gut.

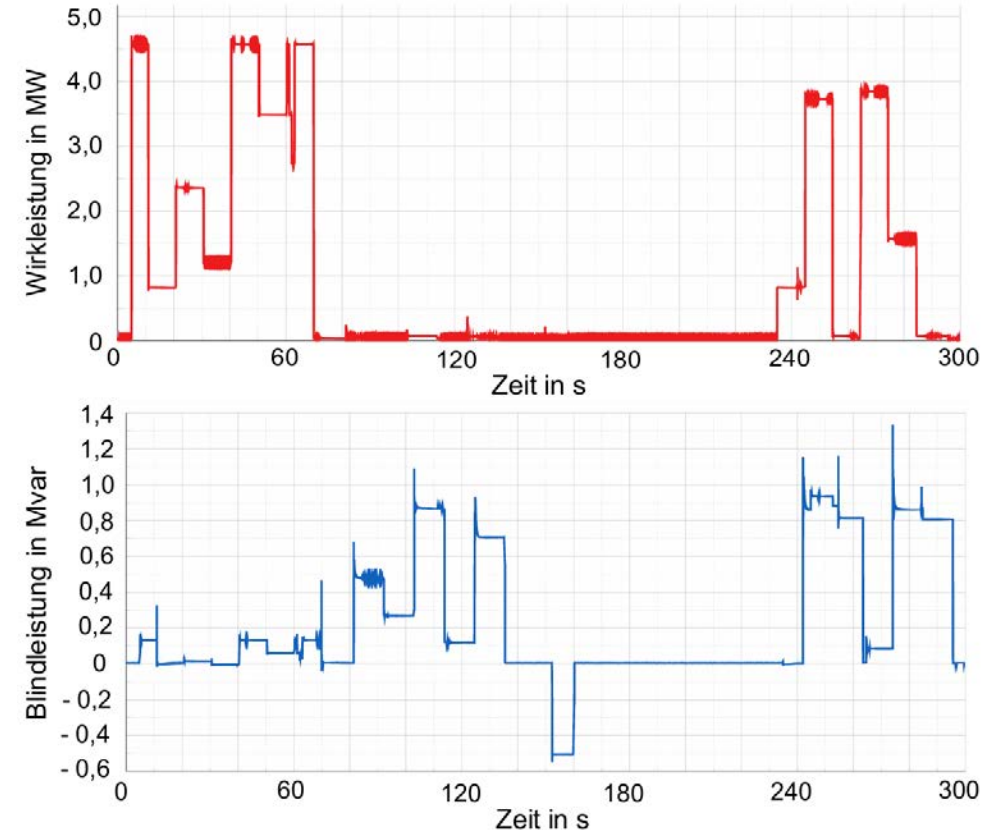
Mit „etwas falscher“
Prametrierung
arbeiten die Wechselrichter aber
auch gegeneinander.

Nur im Hersteller-EMT Modell
Nachvollziehbar.



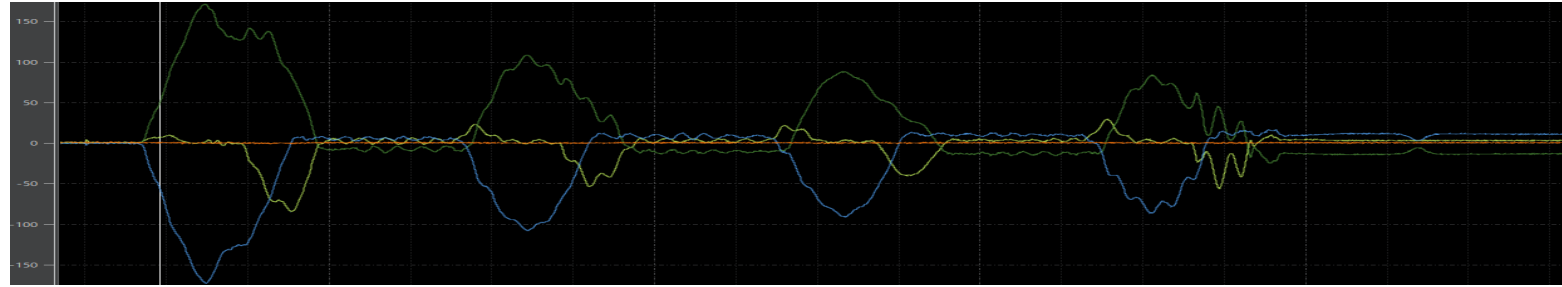
Inselnetzbetrieb

- Versuchsablauf mit unterschiedlichen Parametrierungen der Wechselrichter
- Untersuchung des $f(P)$ - und $U(Q)$ - Verhaltens bei Lastsprüngen
- Unterschiedliche Wirklastsprünge durch P2H-Anlage sowie Blindlastsprünge durch induktive Lastbank und kapazitive Kabelstrecke während eines Versuchsdurchlauf

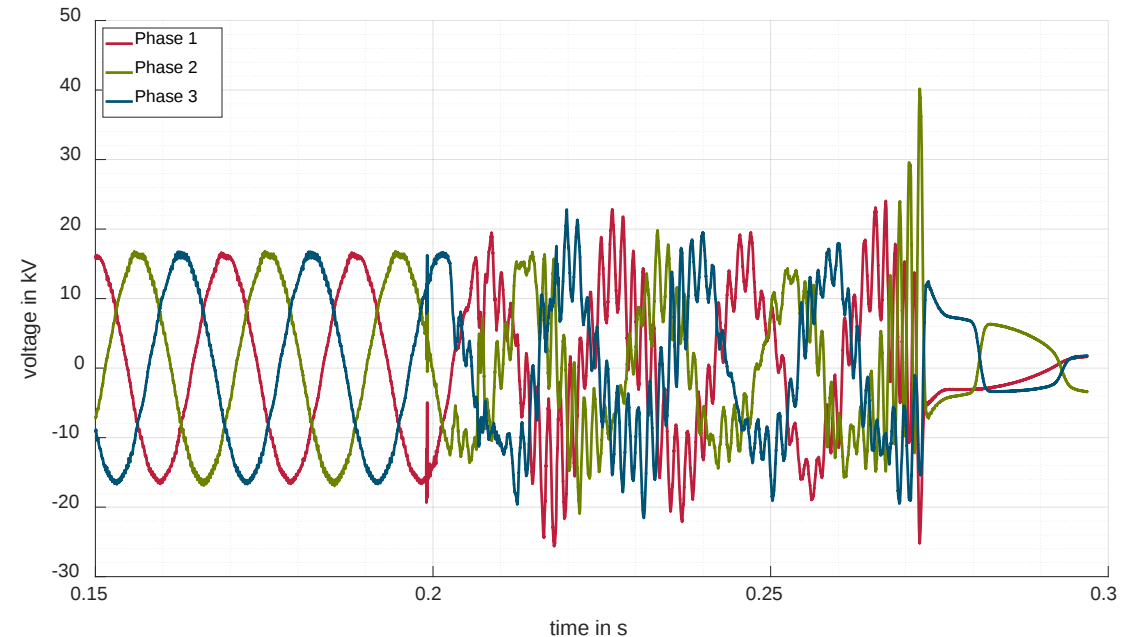


Netzaufbau / Inrush ist Problematisch

Szenario 1: Zuschaltung 2 MVA Transformator



- 1x 2,5 MVA Wechselrichter aktiv
- 1x 0,4 MVA und 1x 1 MVA Transformator aktiv im Netz
- Überspannung beim Zuschalten des Transformators
- 70 ms zwischen Zuschaltung und Spannungszusammenbruch
- Zuschaltung kleinerer Transformatoren zuvor war erfolgreich



Vorhaben für zweiten Feldversuch

- Verbesserung des „Schwarzstartes“
 - Ramp-Up: Hochfahren der Spannung beim Schwarzstart des GFM mit variierenden Steigungen
 - Parametrierung: Test eines steileren $U(Q)$ -Droops k_q , da hiermit die beiden Wechselrichter trotz hoher Inrush-Ströme simulativ stabil geblieben sind
- Verbesserung der Modelle
 - Live-Test mit den Enercon-WEA (hoffentlich mit Wind)
- Stufenschalter: Untersuchung des Einflusses der Stufenschalter der Transformatoren, die zugeschalten werden
- Sympathetic Inrush: Test des Einflusses von Sympathetic Inrush, dazu werden Transformatoren unterschiedlicher Leistungsklassen in variierenden Reihenfolgen geschaltet
- DC-Strommessung: Messung des Stroms der Batterie auf der DC-Seite während der Inrush-Versuche, um die EMT-Modelle der Batterie zu validieren

Inselnetz mit Batterie und EE ?

- Erneuerbare und Batterie für Notstrom?
 - Problem Verfügbarkeit!
 - Auch Batteriereserve kostet
 - Vorteil: Dauerbetrieb hilft bei Finanzierung und Zuverlässigkeit
 - Gute Ergänzung zu Vorh. Notstromaggregaten
- Ideal:
 - Wasserkraft & Synchrongenerator
 - Massenträgheit, Überlastbarkeit, Verfügbarkeit, ...
- Unterbrechungsfreies Fangen in der Insel?
 - Dynamiken beim „Netzzusammenbruch“ schwer kalkulierbar.
 - Dynamit nicht wirklich live Testbar.
 - Nicht zu empfehlen

Notstromlösungen werden nur funktionieren wenn sie Regelmäßig
„in Echt“ getestet werden.
Was nicht hart getestet wird, wird in der Praxis versagen.

Netzwiederaufbau von Unten?

- „Sollte das Hochspannungsnetz ausfallen, kann der Speicher das örtliche 20-Kilovolt-Mittelspannungs-Netz wiederherstellen und bis zu zwölf Stunden lang autark betreiben.“
- pv magazine highlight top innovation für Schoenergie und SMA: Herzensprojekt gegen Blackouts – pv magazine Deutschland
- Netzunabhängiger Wiederaufbau: Batteriespeicher können ein Inselnetz mit stabiler Frequenz aufbauen und sukzessive um weitere Erzeuger und Verbraucher erweitern. Integration erneuerbarer Energien: Sie ermöglichen eine direkte Kopplung mit PV-Anlagen und nutzen gespeicherte grüne Energie für den Wiederanlauf.“
- Schwarzstart durch Batteriespeicher | CUBE CONCEPTS

-> Roadmap Systemstabilität (Bundesregierung)

Es soll das Potential für den Netzwiederaufbau durch Erneuerbare im Verteilnetz untersucht werden. Das ist Anzustreben!

<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/20231204-roadmap-systemstabilitaet.html>

<https://www.vde.com/de/fnn/aktuelles/potenzialstudie-zu-inselnetzen-im-netz--und-versorgungswiederaufbau--pinwa-studie->

Netzwideraufbau von Unten?

- Organisatorischer Aufwand + vorzuhaltendes Know-how stehen in keinem Verhältnis zum technischen Risiko.

→ **Inselnetze im Normalbetrieb ineffizient und keine flächendeckende Lösung.**

Ohne Dauer-Tests scheitert alles; Jede Insel erfordert regelmäßige reale Übungen – sonst versagt das Personal bei Frequenz/Spannung, Synchronisation oder Fehlbedienung. Kosten explodieren, Nutzen bleibt gering.

- Komplexität explodiert bei Kopplung

Wer führt nach der Insel-Verbindung? - Wer ist für Frequenz/Spannung verantwortlich?

Dynamische Schutzkonzepte, Haftung, Diskriminierungsfreiheit – Chaos statt „selbstorganisierend“.

- Besser wenige Große als tausend Kleine

Übertragungsnetzbetreiber greifen lieber auf wenige große Windparks oder Batteriespeicher zurück.

Viele dezentrale PV-/Wind-Anlagen sind nur indirekt steuerbar → höherer Aufwand, geringerer Nutzen.

- Lokale Notinseln sinnvoll!

Für kritische Infrastruktur ja – aber nicht Aufgabe der öffentlichen Stromversorgung.

Der flächendeckende „zelluläre“ Netzwiederaufbau bringt keinen Resilienzgewinn, sondern nur mehr Fehleranfälligkeit.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Stromausfall braucht / initiiert Kreativität



**Nachahmung nicht empfohlen:
Es könnte sonst der letzte Besuch Ihrer Freunde sein.**

Folienquelle: Dr. Franz Hein, Esslingen. Langjähriger Leiter der Netzfürung in Wendlingen Bis auf weiteres Rentner im Unruhestand

Prof. Dr.-Ing. Georg Kerber

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung & Netze
Beauftragter für Praxissemester und Duales Studium
Hochschule München

Tel.: +49 89 1265 3514

Lothstrasse 64, 80335 München