

# Konzept für den stabilen Inselnetzbetrieb eines Umrichter- dominierten Mittelspannungsnetzes

von Tobias Weinmann

Technische Hochschule Augsburg

innerhalb des Forschungsprojekts „Fuchstal leuchtet“

Motivation

Forschungsprojekt & Ziel

Testnetz

Allgemeines Konzept

Grundlagen

Wirkleistungsregelungskonzept

Blindleistungsregelungskonzept

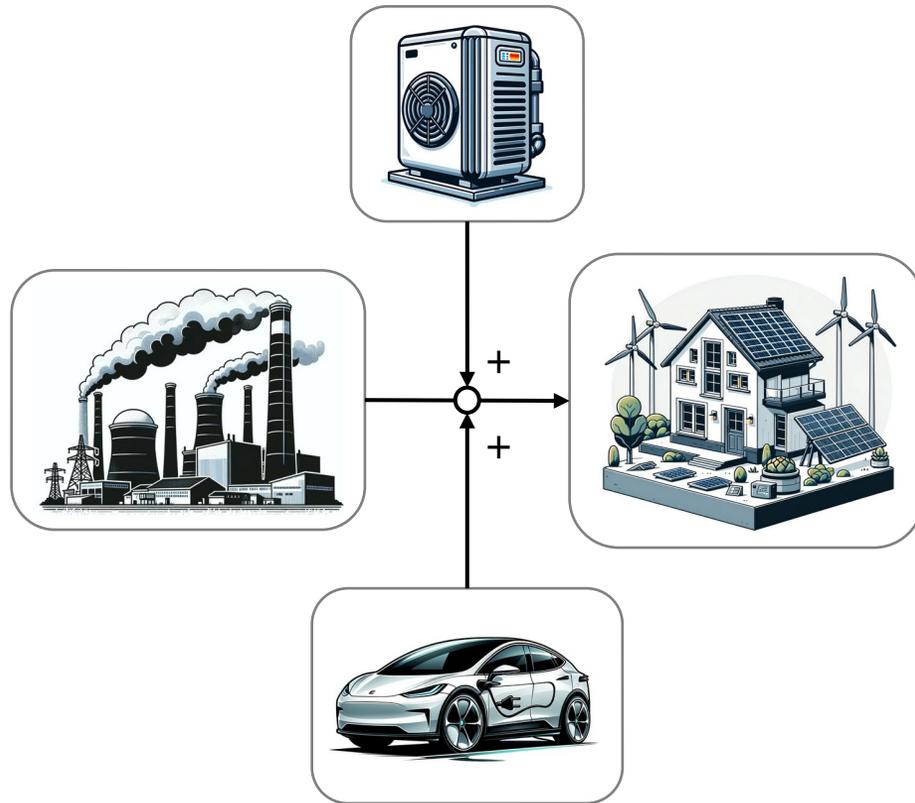
Feldversuche & Simulationen

Aufbau & Betrieb des Inselnetzes

Zusammenfassung

Forschungsprojekt:



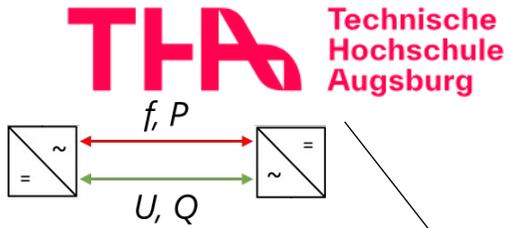


## Energiewende:

- wachsende Abhängigkeit von elektrischer Energie durch Sektoren Transport und Wärme
- 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 Regelleistung und Spannungshaltung durch stromrichterbasierte Erzeuger



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

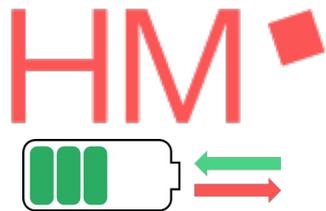


Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

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



Industriebeirat

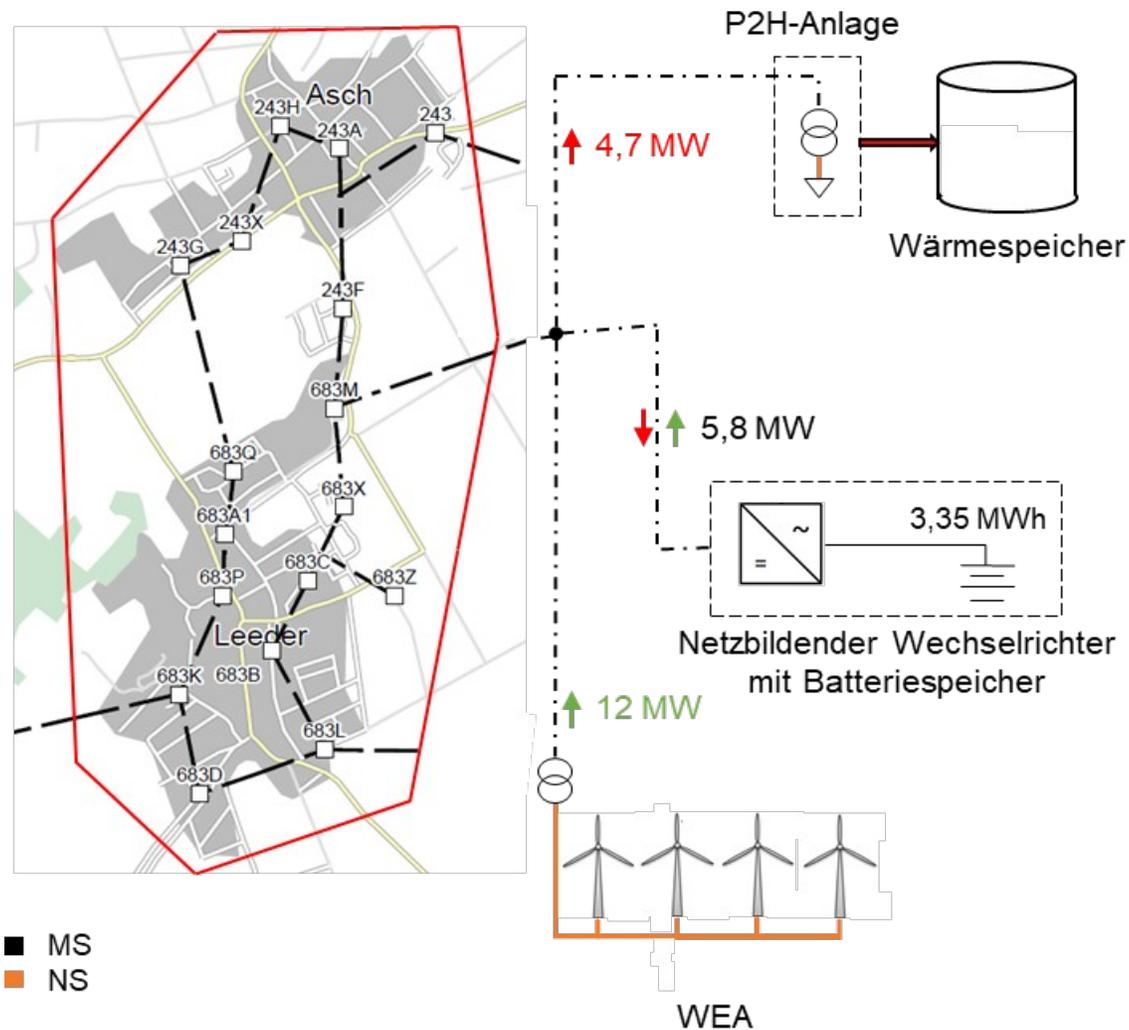




- Untersuchungen zu unerwünschten Wechselwirkungen in Stromrichterregelungen und Analyse des Zusammenspiels mit netzfolgenden Erzeugungsanlagen
- Bewertung des Beitrags zur Bereitstellung von Momentanreserve und Kurzschlussströmen
- Betrachtung der Systemstabilität bei Laständerungen
- Ermöglichung des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



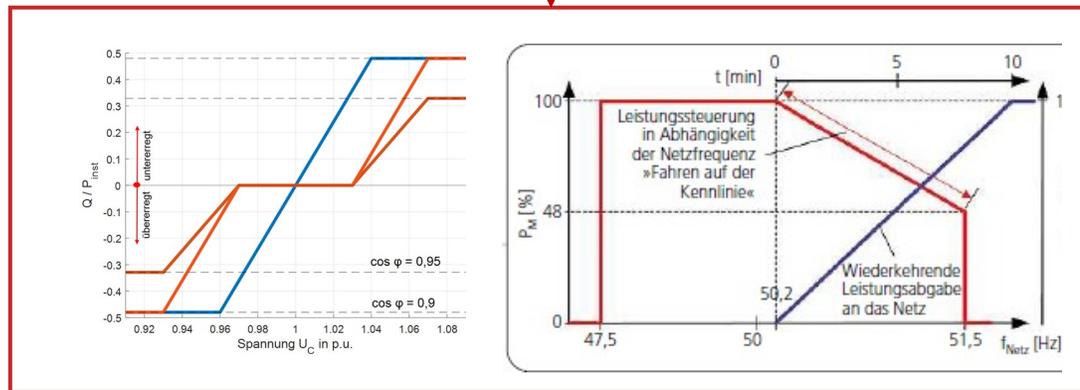
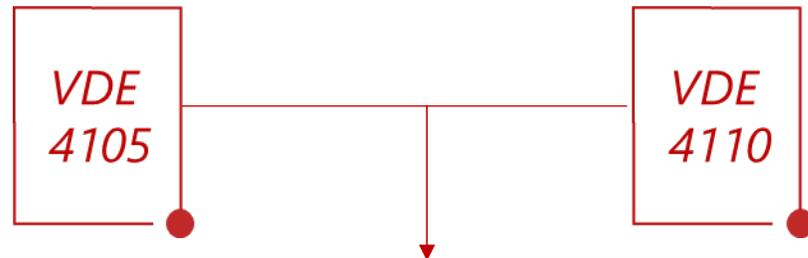
Evaluierung eines Regelungskonzepts für stromrichterbasierte Verbundnetze basierend auf Erkenntnissen aus dem untersuchten Mittelspannungsnetz



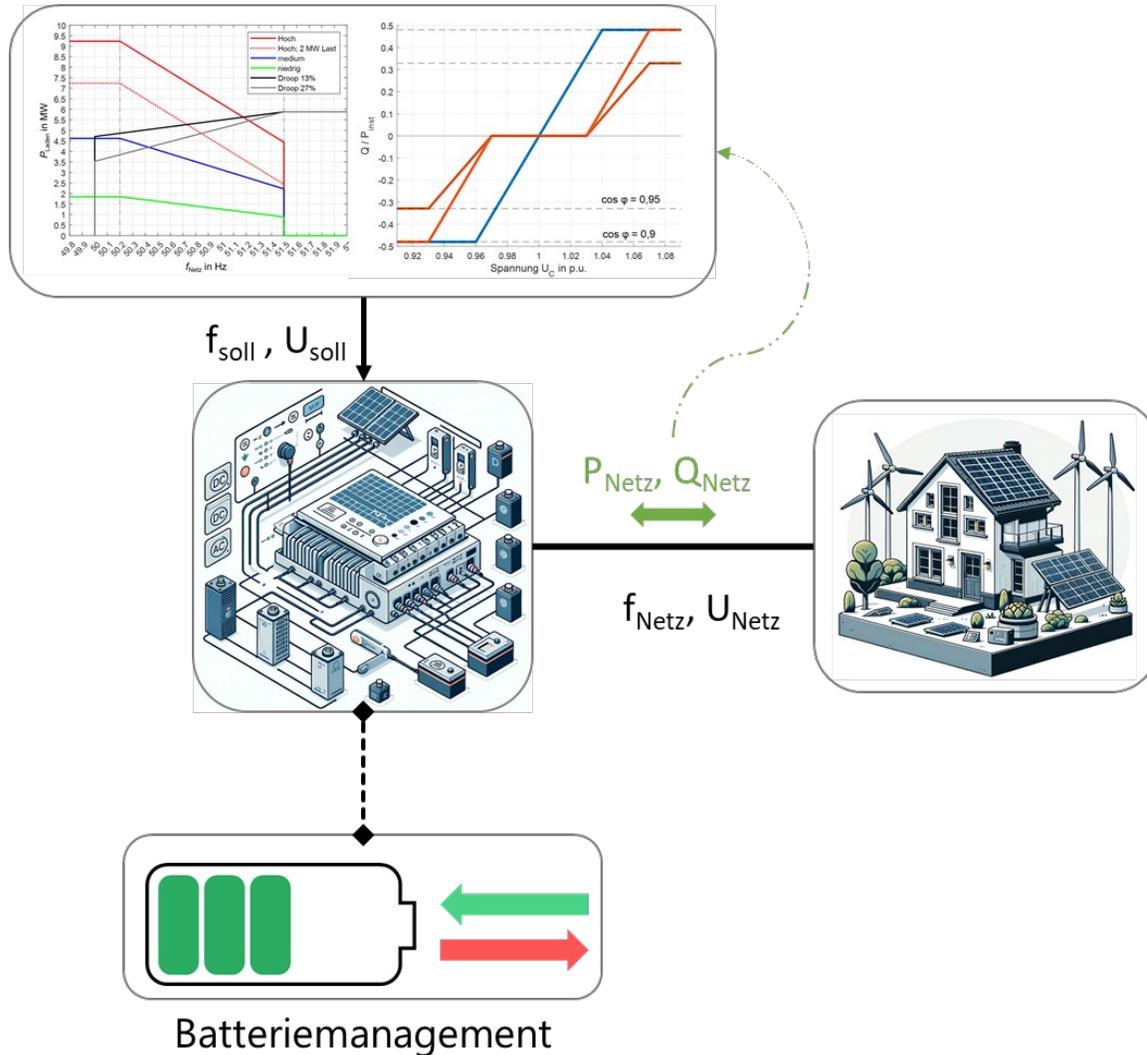
- **Netzbildender Wechselrichter:** Erweiterung des bestehenden Batteriewechselrichters für Schwarzstartfähigkeit und Funktion als netzbildender Wechselrichter
- **Integration von Windenergie:** 4 Windkraftanlagen mit Maximalleistung von bis zu 12 MW, ausgestattet mit moderner Windparkregelung
- **Power-to-Heat (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 Ortsnetz von Fuchstal (Asch & Leeder)

Niederspannung

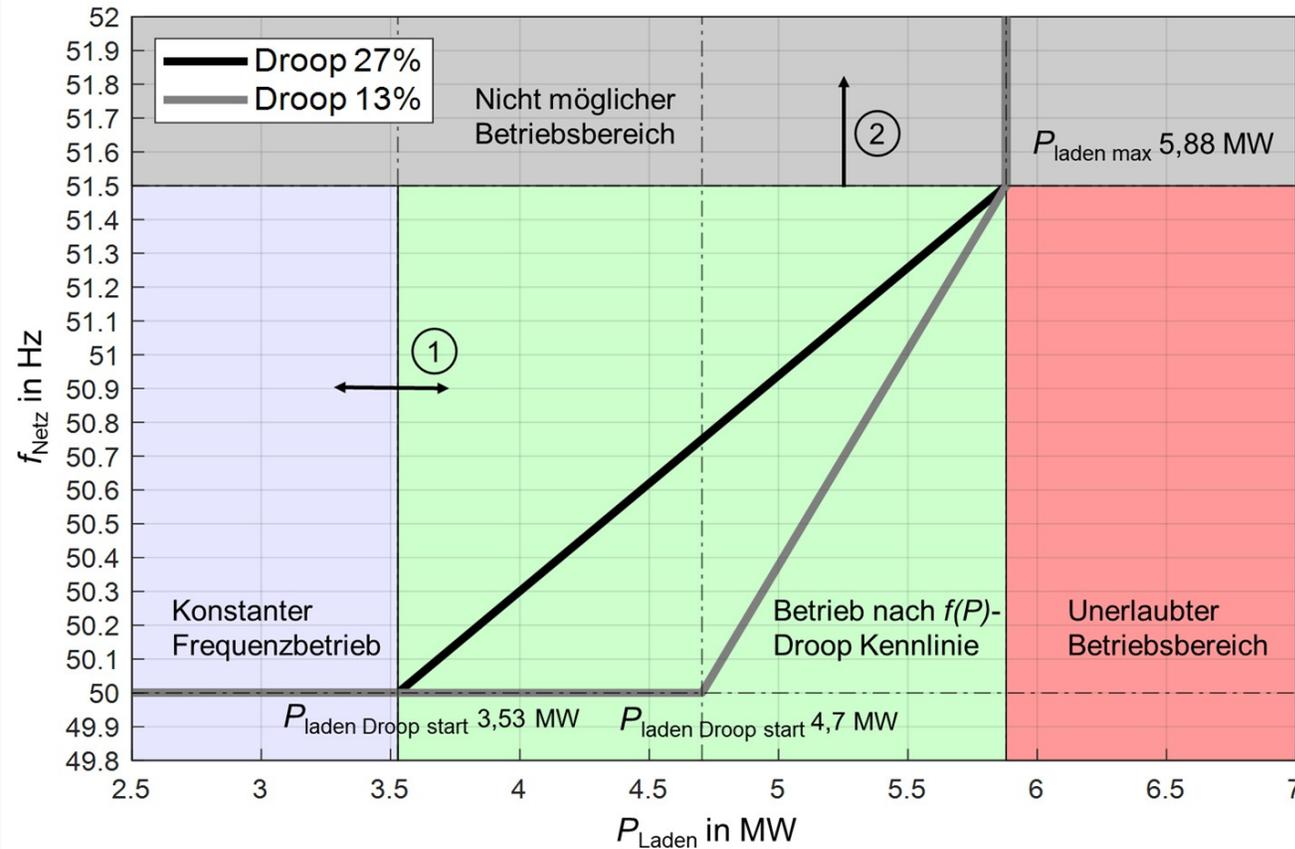
Mittelspannung



- Zusammenspiel zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern gemäß Anschlussregeln
- Erfüllung der Anforderungen an Wirkleistungsreduktion bei Überfrequenz durch netzfolgenden Wechselrichter
- Berücksichtigung der statischen Spannungshaltung sind bei dezentralen erneuerbaren
- Steuerung netzfolgender Stromrichter primär durch übliche Netzgrößen Frequenz



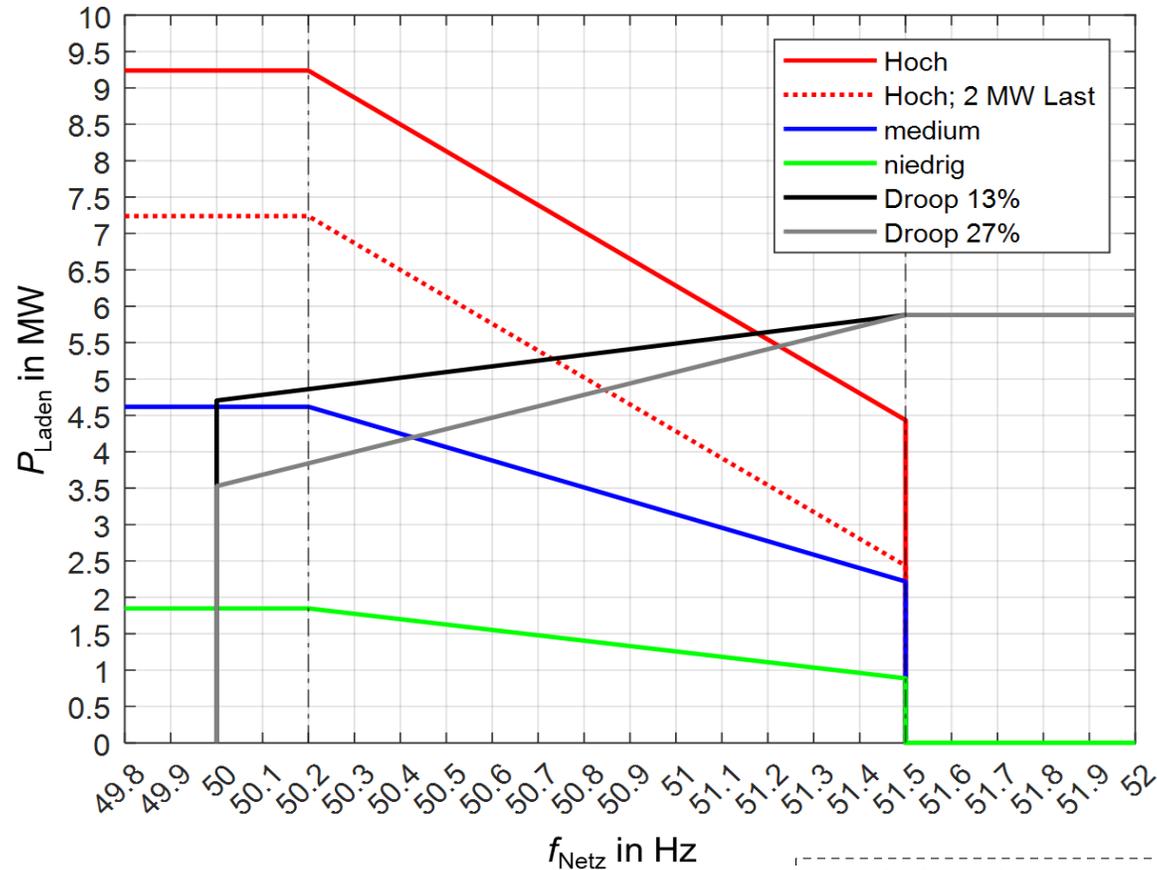
- Gewährleistung von Frequenzstabilität und Regulierung des Blindleistungshaushalts durch netzbildenden Wechselrichter
- Bereitstellung von Momentanreserve und Kurzschlussströmen im Fall von Netzfehlern
- Wind- und Photovoltaikanlagen im Nieder- und Mittelspannungsnetz agieren als netzfolgende Erzeugungsanlagen
- Implementierung eines Energie- und Leistungsmanagements zur Steuerung des Batterieladezustands auf Basis von Wetterprognosen, Lastprofilen und Wärmebedarf



① Variable Einstellung des Startpunkts  $P_{\text{Laden Droop start}}$

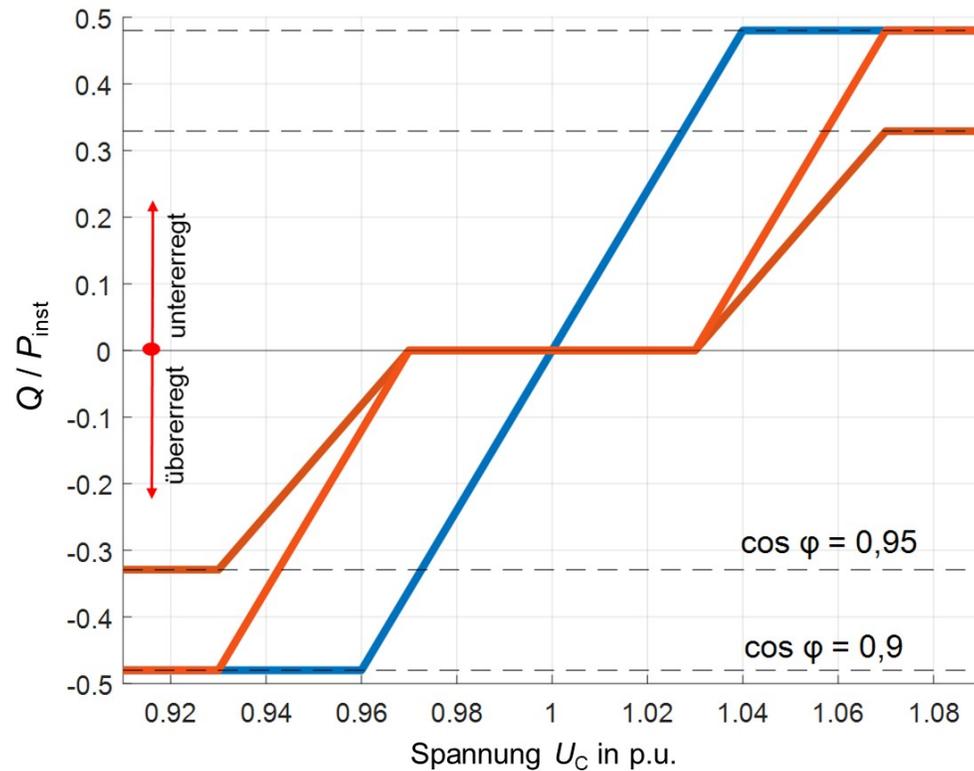
② Variable Einstellung der oberen Grenzfrequenz

- Fester Frequenzbetrieb bei bestimmten Ladeleistungen; Anpassung des Bereichs durch Startpunkt und Droop-Wert der  $f(P)$ -Kennlinie
- Regelung der Frequenz entlang der  $f(P)$ -Droop-Kennlinie zwischen Startpunkt und maximaler Ladeleistung mit höherem Droop bei niedrigerem Startpunkt
- Begrenzung des nicht möglichen Betriebsbereichs durch obere Grenzfrequenz zwischen 51,5 und 52,5 Hz für Anlagen im Mittelspannungsnetz
- Definition des unerlaubten Betriebsbereichs durch maximale Ladeleistung der Batterie (5,88 MW)



- 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 Einspeiseleistung, 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



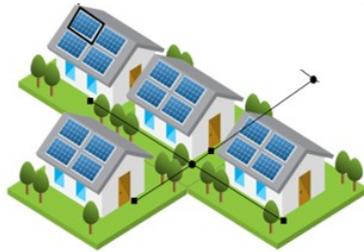
- Anlagen nach VDE-AR-N 4110 ohne Totband
- Anlagen nach VDE-AR-N 4105 mit  $S_{WR} < 13,8$  kVA
- Anlagen nach VDE-AR-N 4105 mit  $S_{WR} > 13,8$  kVA

- Dezentrale Erzeugungsanlagen tragen zur Spannungsstabilität durch Bereitstellung von Blindleistung (Q(U)- und  $\cos \varphi$ (P))
- Zulässiger Spannungsbereich von  $\pm 10$  % und mögliche Aufteilung zwischen Mittel- und Niederspannungsnetz auf  $\pm 5$  % pro Netzteil
- Aufgrund hoher Distanz zum netzbildenden Wechselrichter speziell Windkraftanlagen von Interesse (überhöhte Spannung und Sensitivität gegenüber Wirkleistung)

Bewertung und Evaluierung der Bereitstellung von Blindleistung des netzbildenden Wechselrichters und dessen Beitrag zur Spannungsstabilität



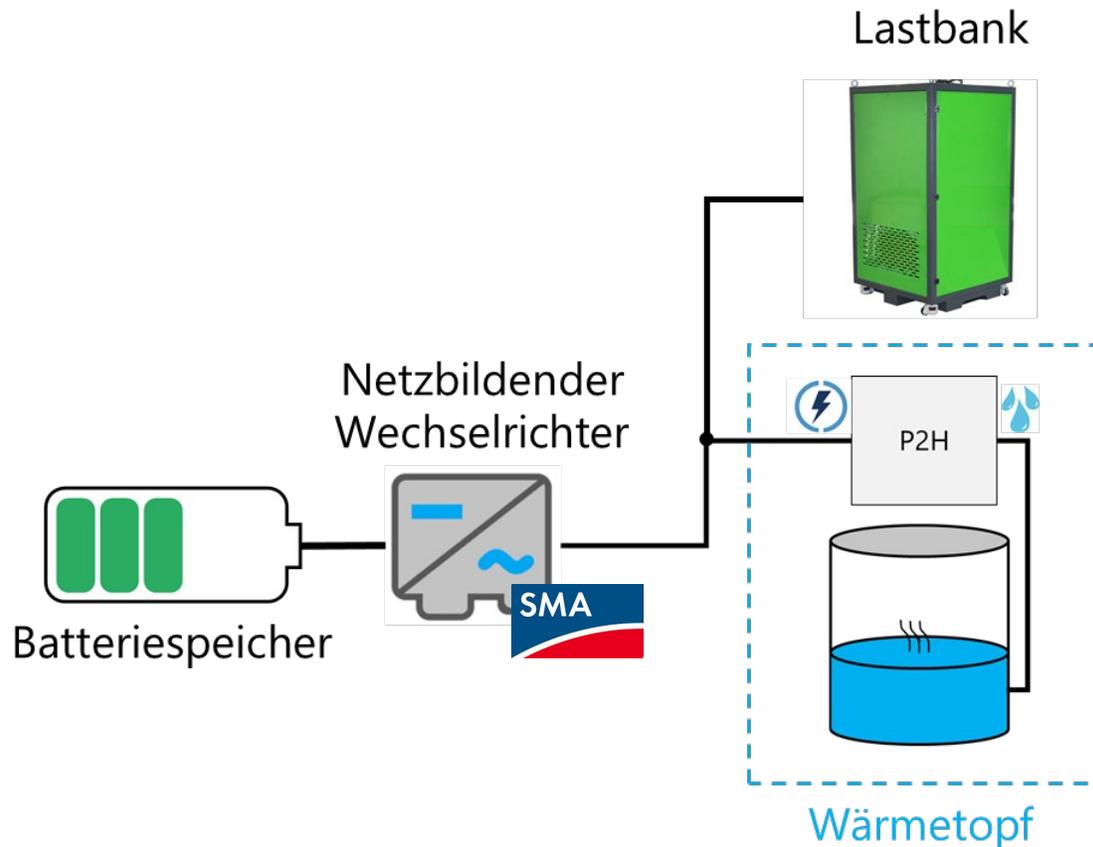
Simulation



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

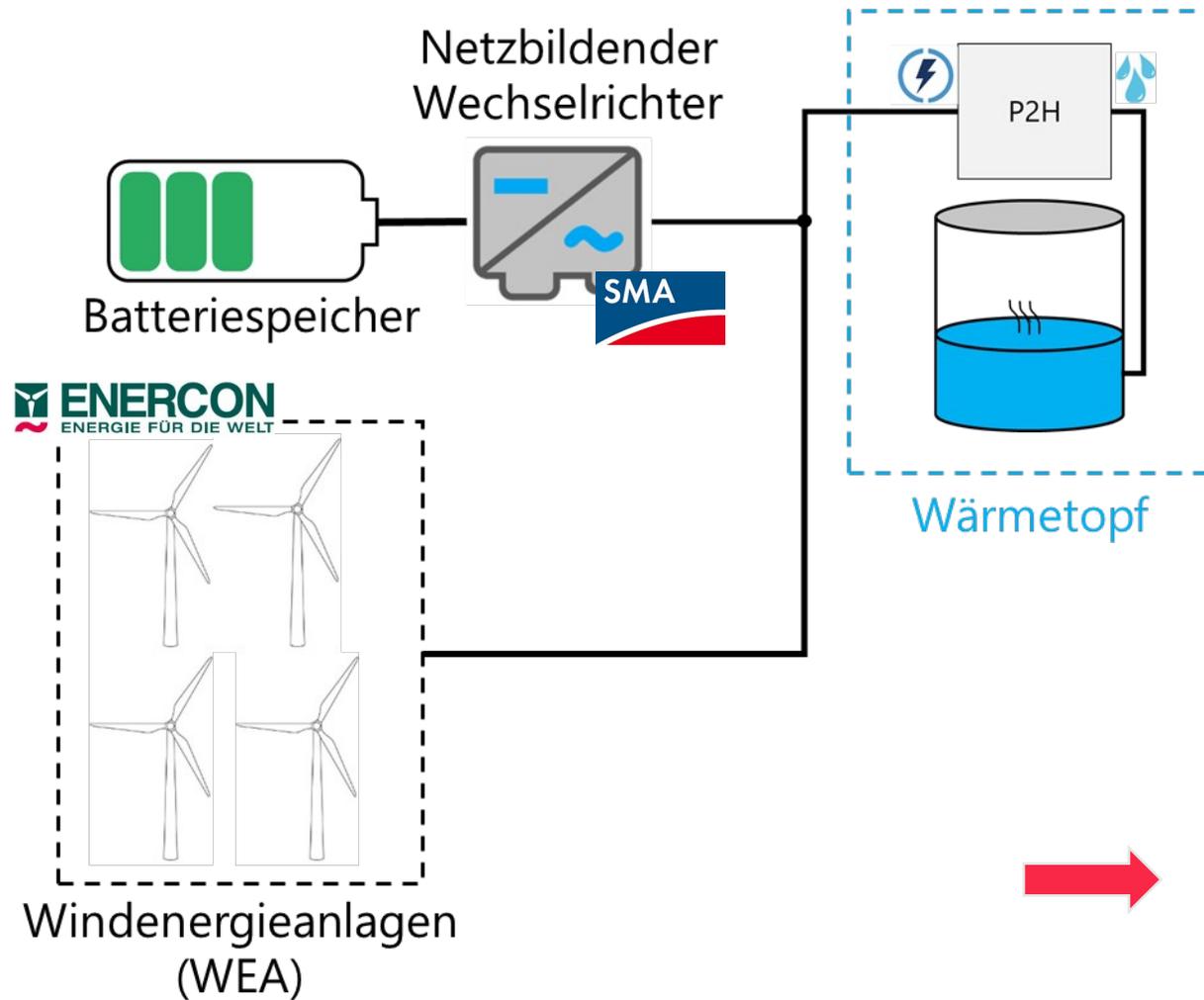
## 1. Feldversuch



- 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

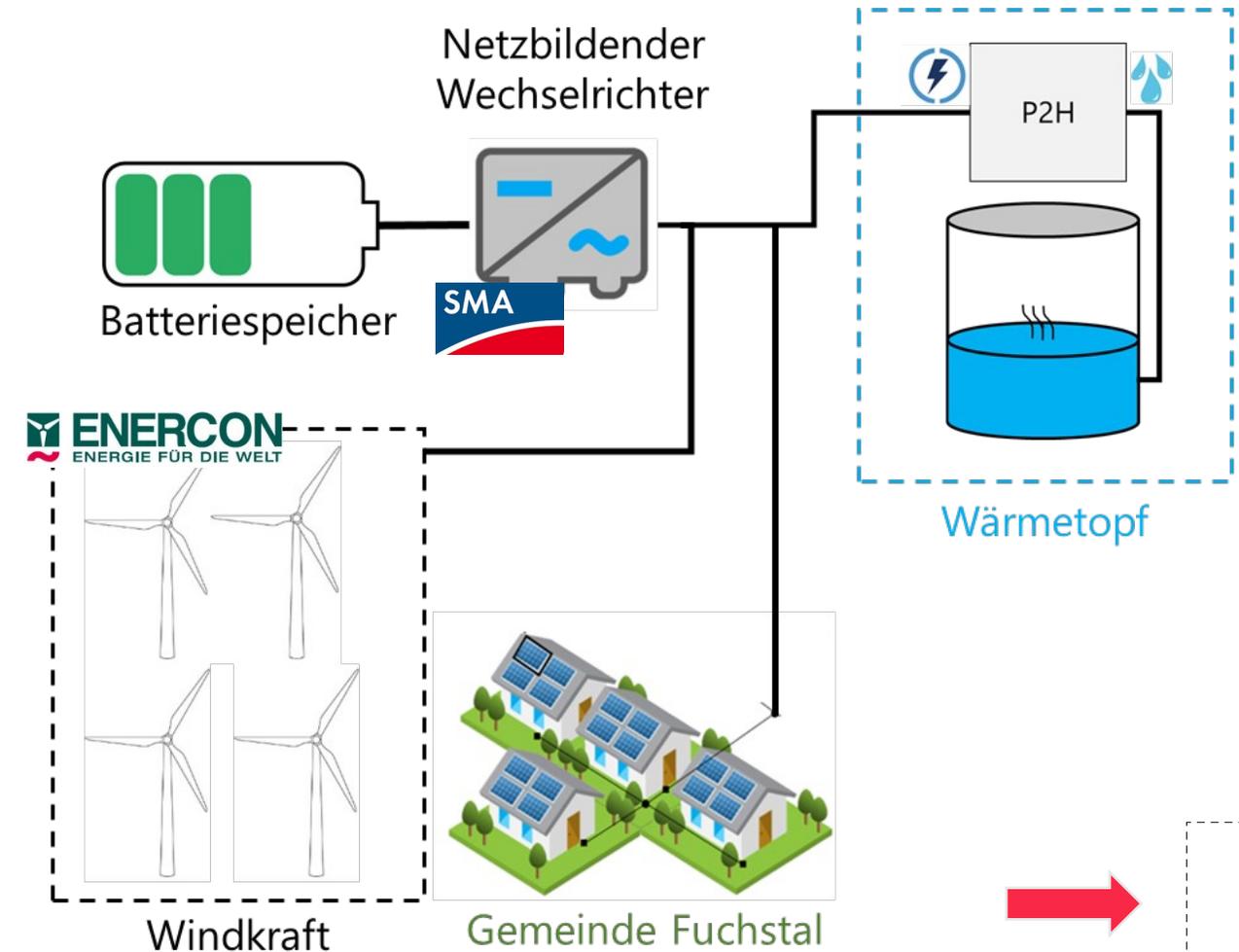
Bestimmung der dynamischen Grenzen und der Parametrierung des netzbildenden Wechselrichters in Bezug auf Lastschwankungen

## 2. Feldversuch



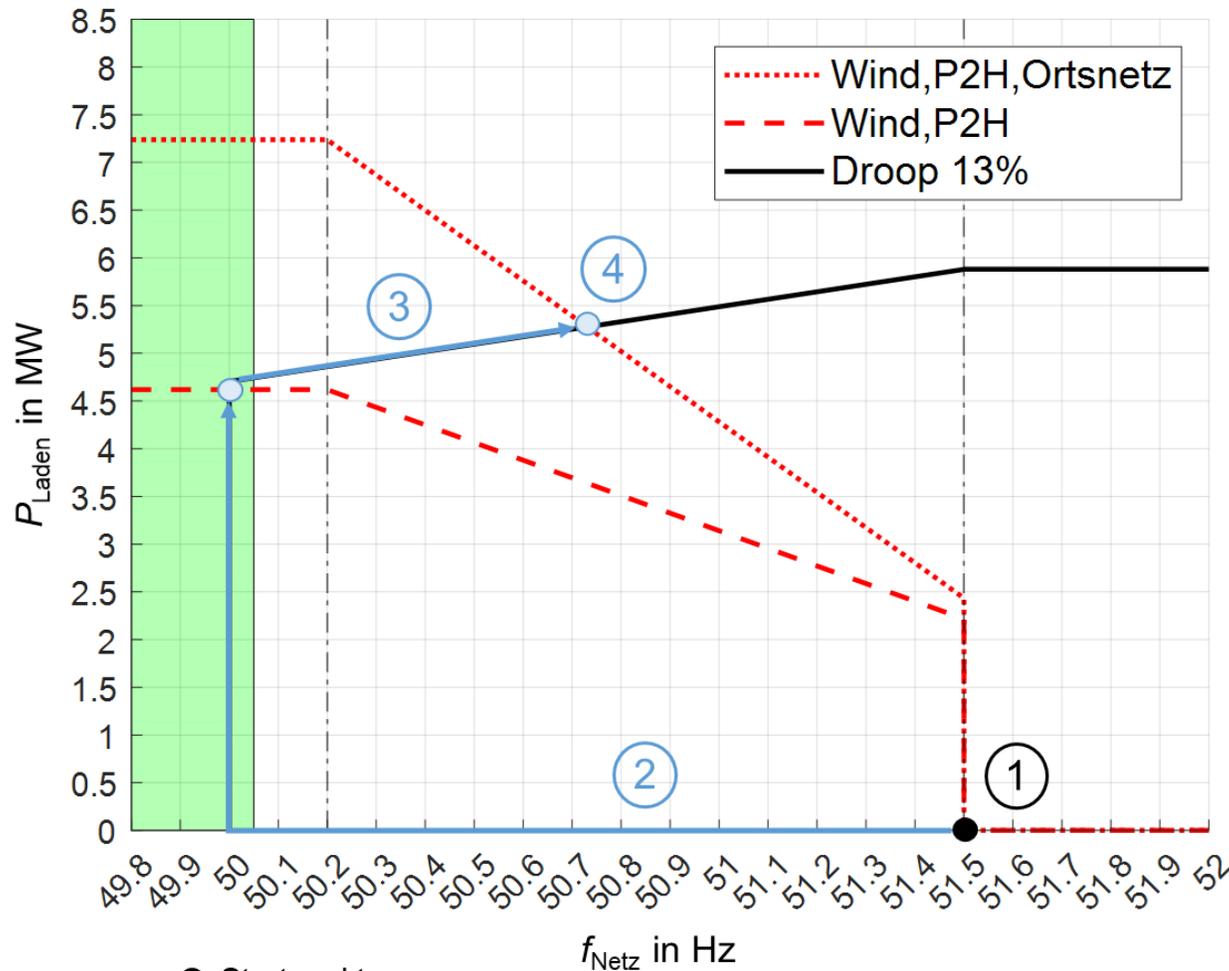
- Einbindung von  $Q(U)$ - und  $P(f)$ -Statiken und deren Zusammenspiel mit TAR-Parametrierung
- Wechselwirkungen zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern
- Störgrößenmodellierung der Spannung durch Zuschalten von Kabelstrecken
- Evaluierung der zulässigen Einspeiseleistung der WEAs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

## 3. Feldversuch



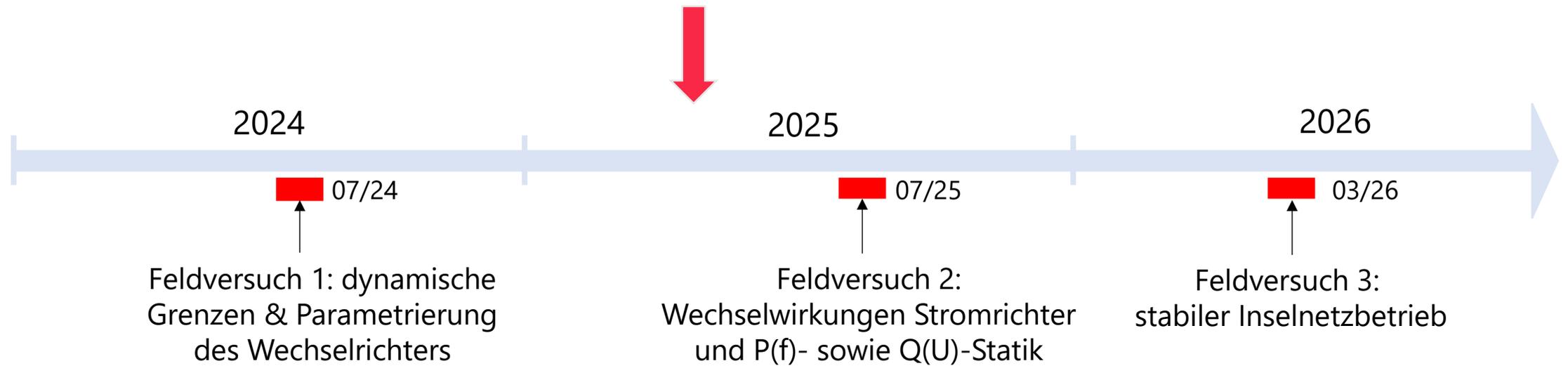
- Planung und Bau einer *Übergabestation*
- Untersuchung des Übergangs vom Verbund- in Inselnetzbetrieb
- Betrachtung der Spannungstoleranzen in Mittel- und Niederspannungsnetz (NS)
- Erweiterung der  $f(P)$ - und  $Q(U)$ -Statik durch PV-Anlagen im NS
- Untersuchung des Spannungs- und frequenzabhängigen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

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



- 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

- 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



- [1] ENTSO-E. PROJECT INERTIA – PHASE II: UPDATED FREQUENCY STABILITY ANALYSIS IN LONG TERM SCENARIOS, RELEVANT SOLUTIONS AND MITIGATION MEASURES: ENTSO-E; 2023.
- [2] Oyekale J, Petrollese M, Tola V, Cau G. Impacts of Renewable Energy Resources on Effectiveness of Grid-Integrated Systems: Succinct Review of Current Challenges and Potential Solution Strategies. *Energies* 2020; 13(18): 4856  
[<https://doi.org/10.3390/en13184856>]
- [3] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH. Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023; 2023.
- [4] Ramesh, A., Sekhar OC, Kumar MS. A Novel Three Phase Multilevel Inverter with Single Dc Link For Induction Motor Drive Applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 2018; 8(2): 763–70.
- [5] Rachev S, Dimitrov L, Ivanov ID, Cornelia-Victoria Anghel D, Konstantinos K. Electric Power Losses of Frequency Controlled Electric Drive with High-Voltage Induction Motor. *IEEE: International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) 2018*: 1–6.
- [6] Denholm P, Arent DJ, Baldwin SF, *et al.* The challenges of achieving a 100% renewable electricity system in the United States. *Joule* 2021; 5(6): 1331–52  
[<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.028>]
- [7] Salman A, Dallmer-Zerbe K, Singer R, Strasser K, Rogalla S. Large-disturbance voltage stability of SG applying FGW TR4-models in distribution grids. *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) 2016*: 1–7.
- [8] Alves FAL, Costa TFS, Laurindo BM, Costa, João A. V. C., Oliveira DS de, Aredes M. Comparative Study of Different Values of Inertia for Islanded Systems with Energy Storage Systems. *J Control Autom Electr Syst* 2022; 33(1): 241–54  
[<https://doi.org/10.1007/s40313-021-00836-4>]
- [9] Alexander W, Dominik Willenberg, Philipp L, Sandor S. IMPACT OF THE SELECTION OF GRID-FORMING CONVERTERS ON THE STABLE OPERATION OF MEDIUM VOLTAGE TEMPORARY ISLANDED MICROGRIDS. *CIREN Conference 2021*: 1–5.
- [10] Haobo Z, Wang X, Weixing L, Jinyu W. Grid Forming Converters in Renewable Energy Sources Dominated Power Grid: Control Strategy, Stability, Application, and Challenges. *JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY* 2021; 6(6): 1239–56.
- [11] Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz: VDE-AR-N 4105:2018-11 2018 -11.
- [12] Technische Anschlussregel Mittelspannung: VDE-AR-N 4110:2023-09 2023 - 09.
- [13] Verordnung zur Gewährleistung der technischen Sicherheit und Systemstabilität des Elektrizitätsversorgungsnetzes: SysStabV 2023 - 12.
- [14] Lechner T. Frequency droop characteristic for grid forming battery inverters - operation in islanded grids with the infeed of distributed generation systems. In: *CIREN 27th International Conference on Electricity Distribution*; 1–5.
- [15] Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen: DIN EN 50160:2020-11 11 - 2020.
- [16] Bletterie B, Goršek A, Fawzy T, *et al.* Development of innovative voltage control for distribution networks with high photovoltaic penetration. *Progress in Photovoltaics* 2012; 20(6): 747–59  
[<https://doi.org/10.1002/pip.1222>]
- [17] Priye KA, Komla F. Voltage Rise Issue with High Penetration of Grid Connected PV. *19th IFAC World Congress 2014*: 4959–66.
- [Images] Bilder wurden mit ChatGPT DALL-E oder selbst erzeugt bzw. erstellt

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

*Kontaktdaten:*

Tobias Weinmann

[tobias.weinmann@hs-augsburg.de](mailto:tobias.weinmann@hs-augsburg.de)

0821 5586-1015

Technische Hochschule Augsburg

Fakultät Elektrotechnik

An der Hochschule 1