

# 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

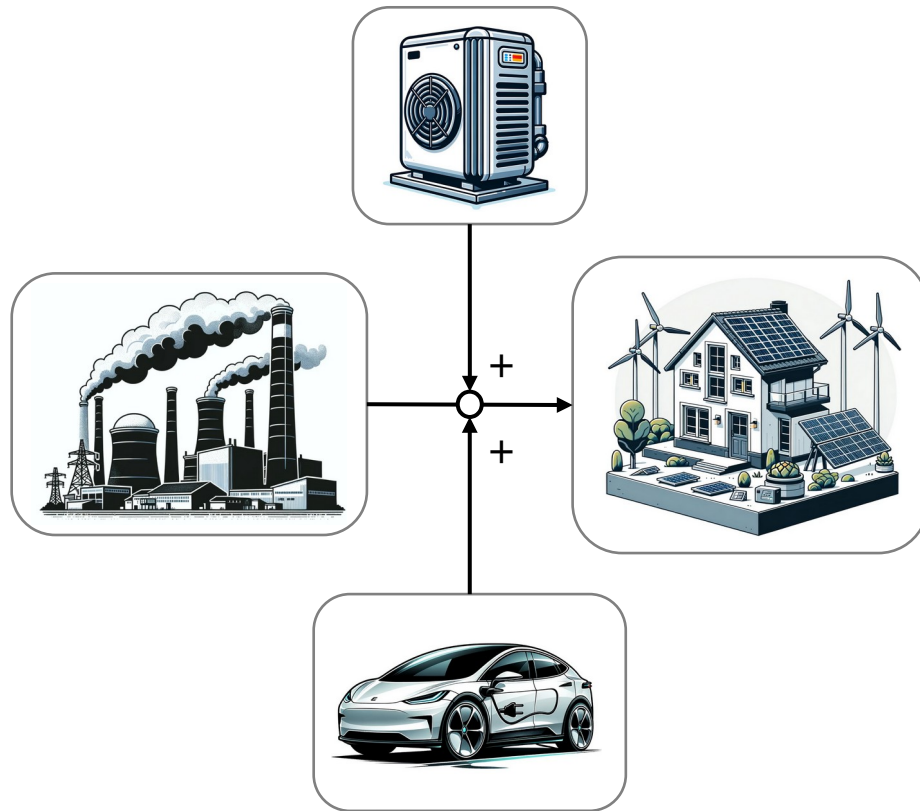
Feldversuche & Simulationen

Aufbau & Betrieb des Inselnetzes

Zusammenfassung

Forschungsprojekt:



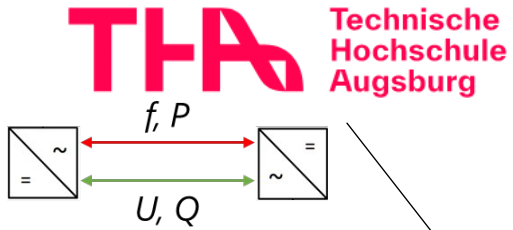


## Energiewende:

- 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

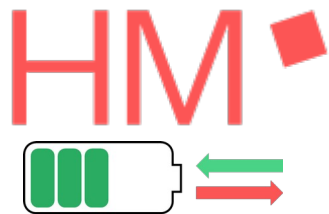


Gefördert durch:



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?



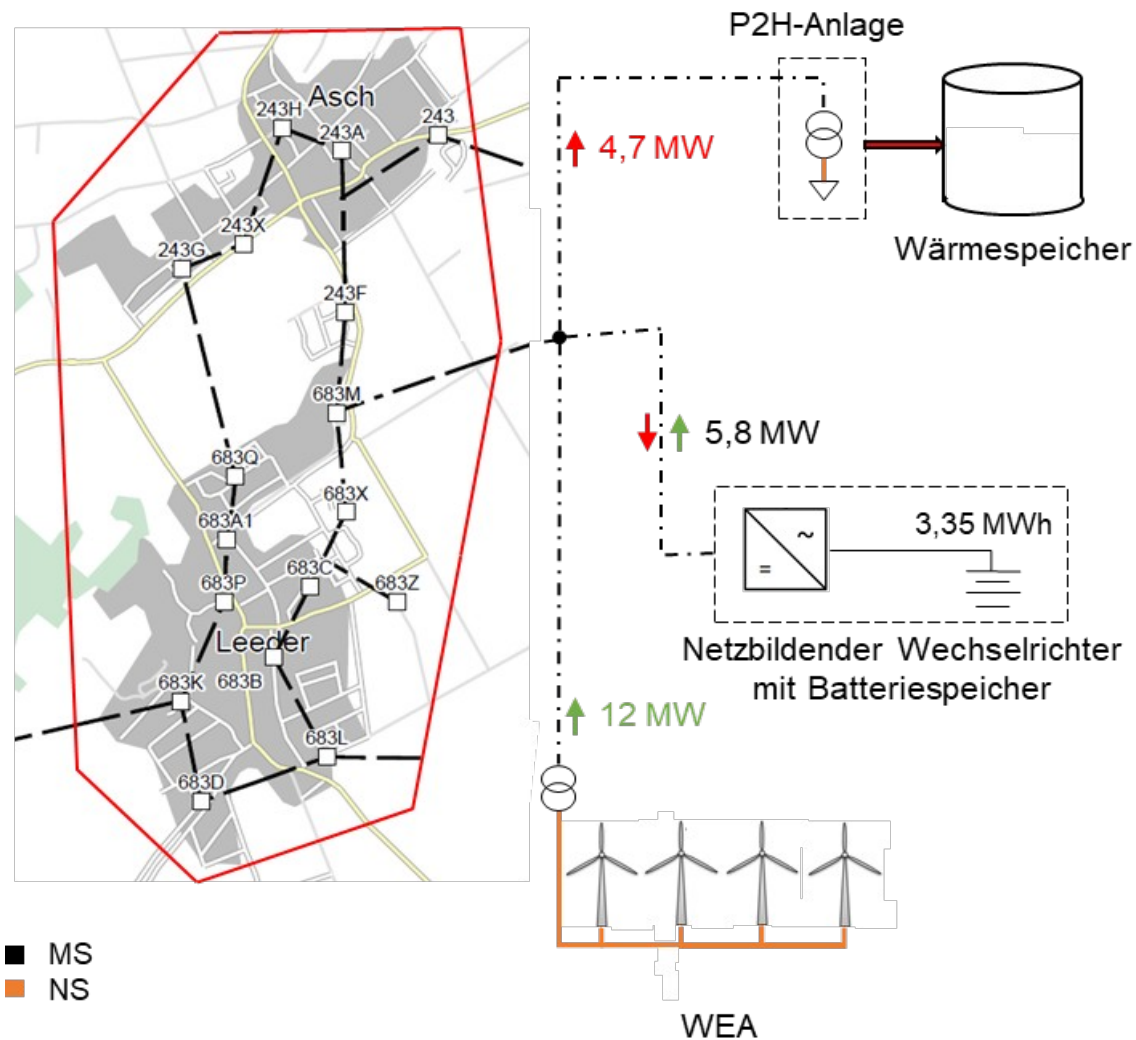
Industriebeirat



- 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



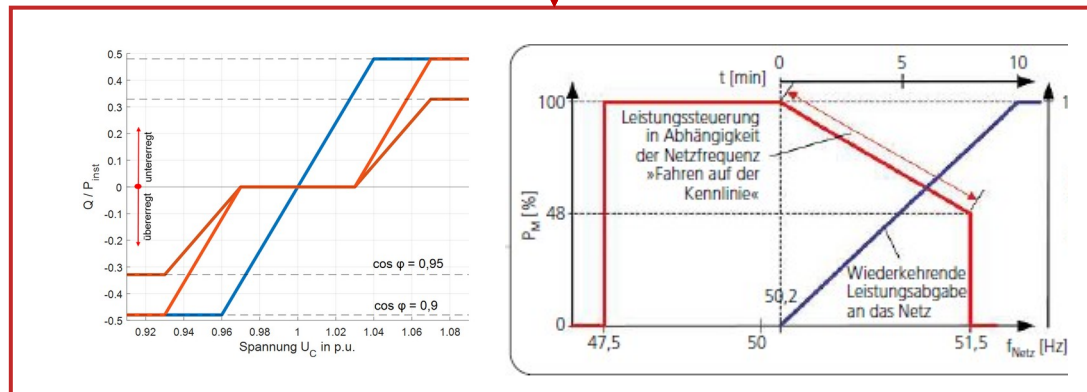
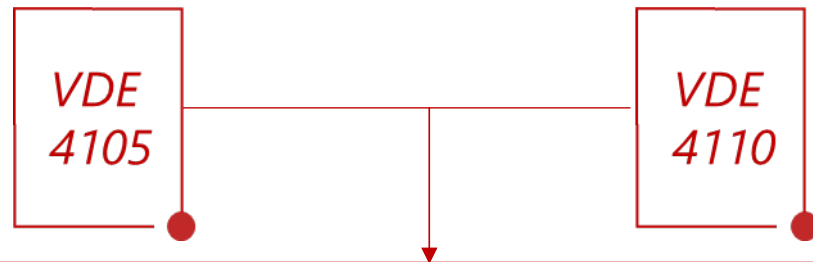
Evaluierung eines Regelungskonzepts für stromrichterbasierte Verbundnetze basierend auf Erkenntnissen aus dem untersuchten Mittelspannungsnetz



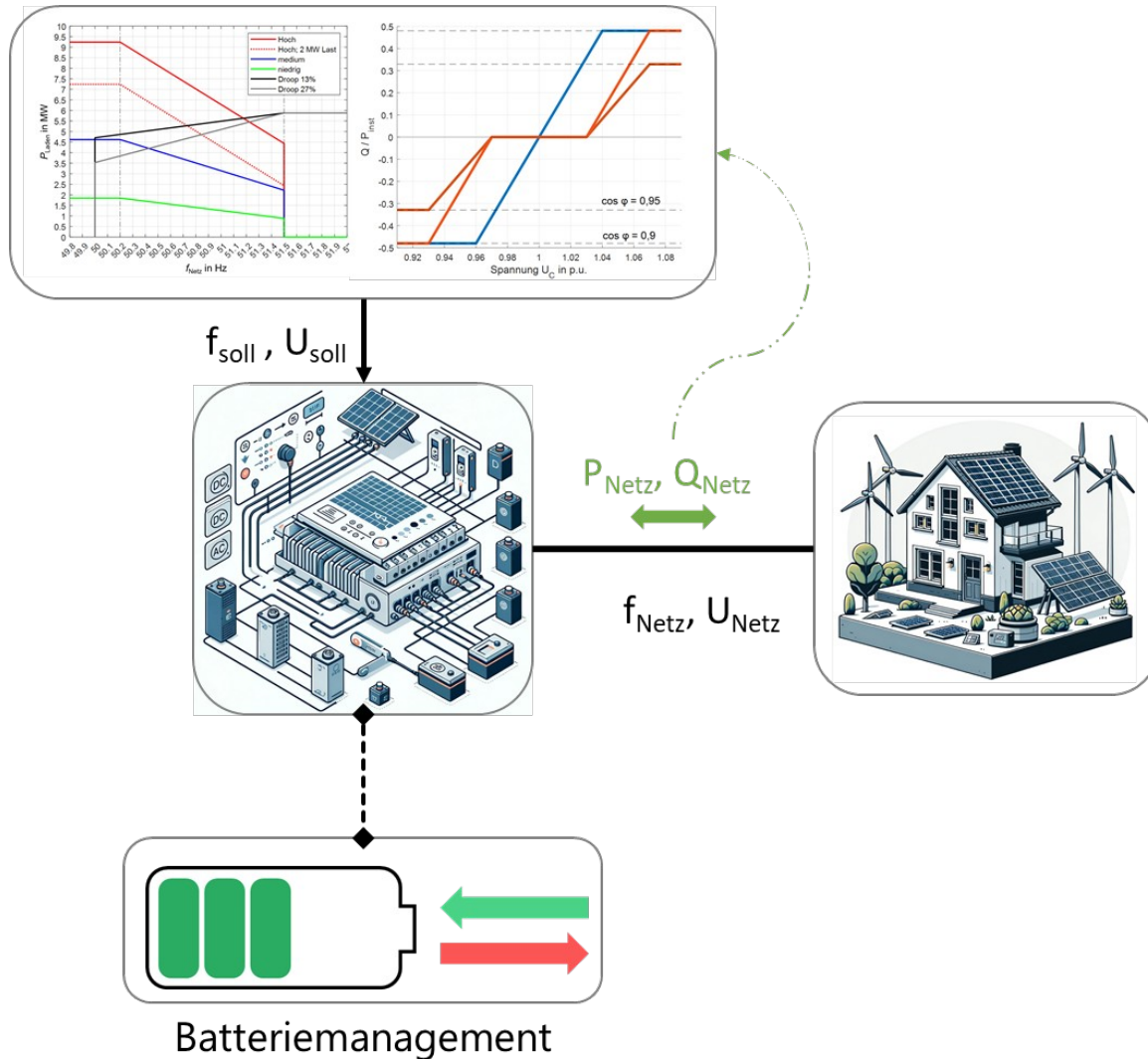
- **Netzbildender Wechselrichter:** Erweiterung des bestehenden Batteriewechselrichters für Schwarzstartfähigkeit und Funktion als netzbildender Wechselrichter
- **Integration von Windenergie:** 4 Windkraftanlagen mit Maximalleistung von bis zu 12 MW, ausgestattet mit moderner Windparkregelung
- **Power-to-Heat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

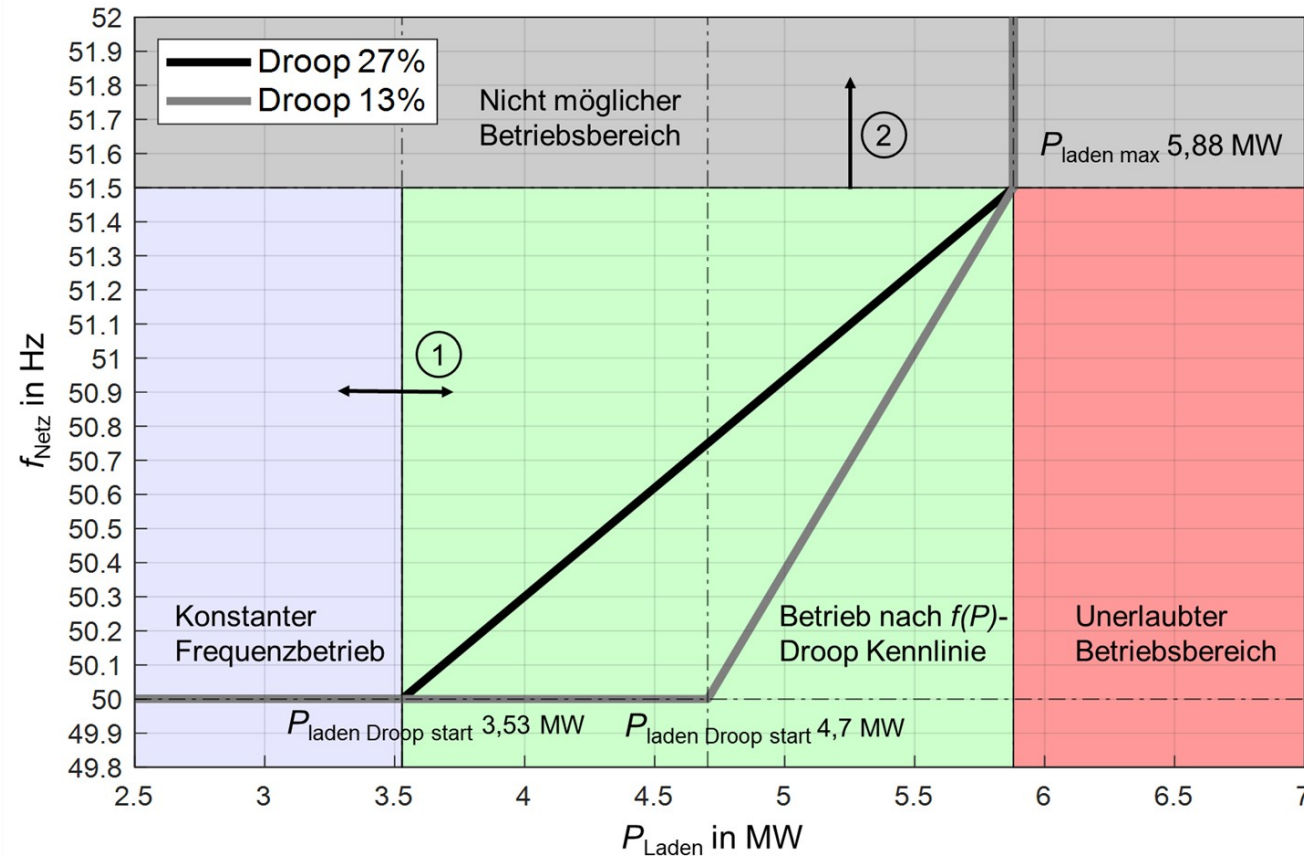


- Zusammenspiel zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern gemäß Anschlussregeln
- Erfüllung der Anforderungen an Wirkleistungsreduktion bei Überfrequenz durch netzfolgenden Wechselrichter
- Berücksichtigung der statischen Spannungshaltung sind bei dezentralen erneuerbaren
- Steuerung netzfolgender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

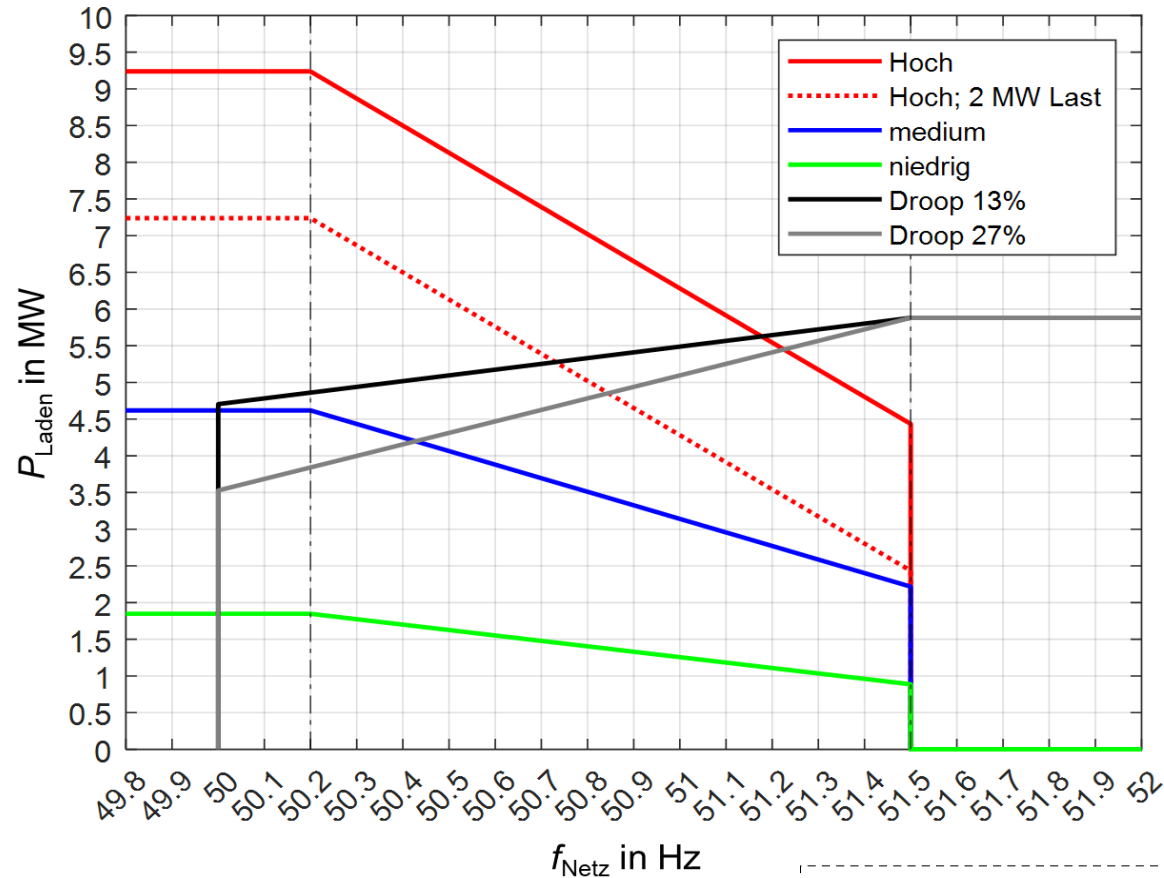




① Variable Einstellung des Startpunkts  $P_{\text{Laden Droop start}}$

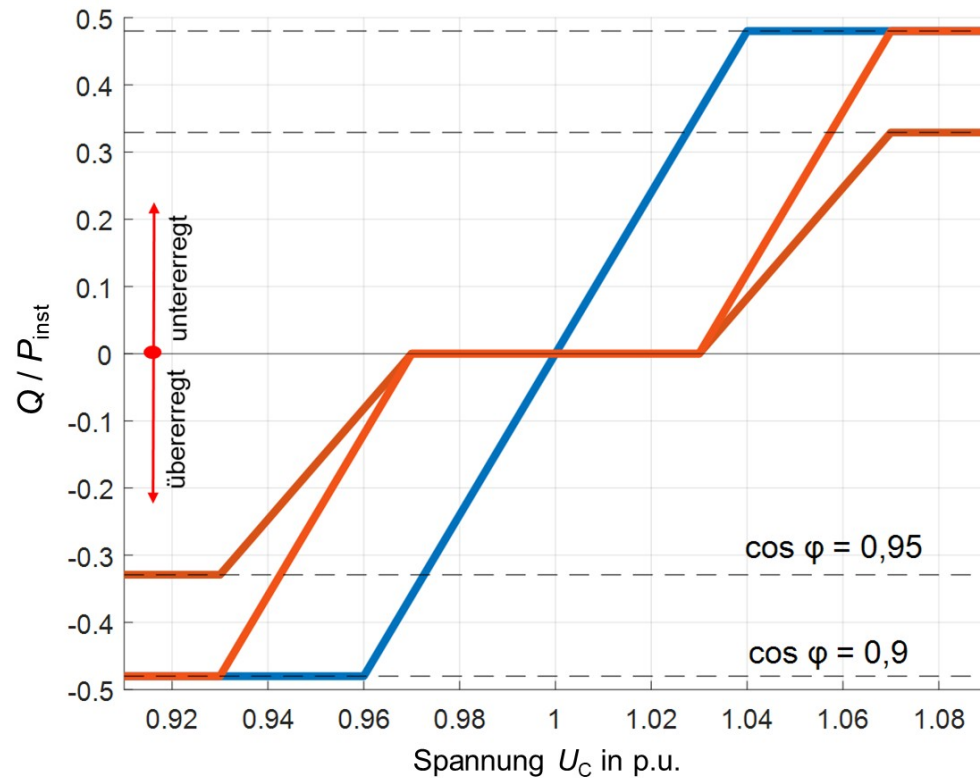
② Variable Einstellung der oberen Grenzfrequenz

- 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

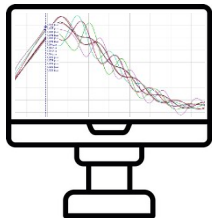


- Anlagen nach VDE-AR-N 4110 ohne Totband
- Anlagen nach VDE-AR-N 4105 mit  $S_{WR} < 13,8$  kVA
- Anlagen nach VDE-AR-N 4105 mit  $S_{WR} > 13,8$  kVA

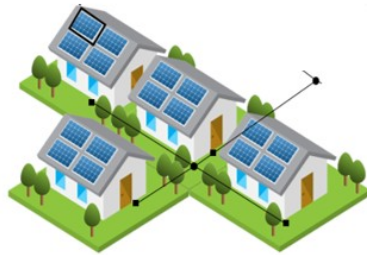


Bewertung und Evaluierung der Bereitstellung von Blindleistung des netzbildenden Wechselrichters und dessen Beitrag zur Spannungsstabilität

- 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)



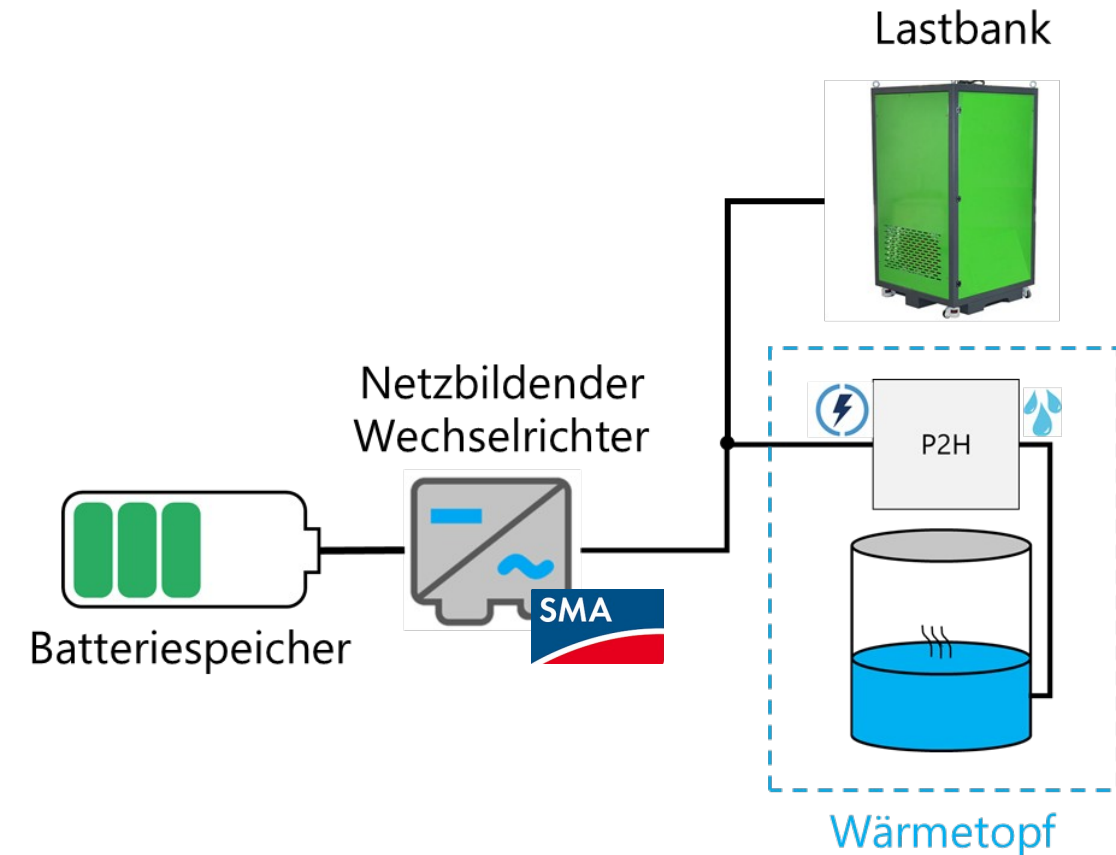
Simulation



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

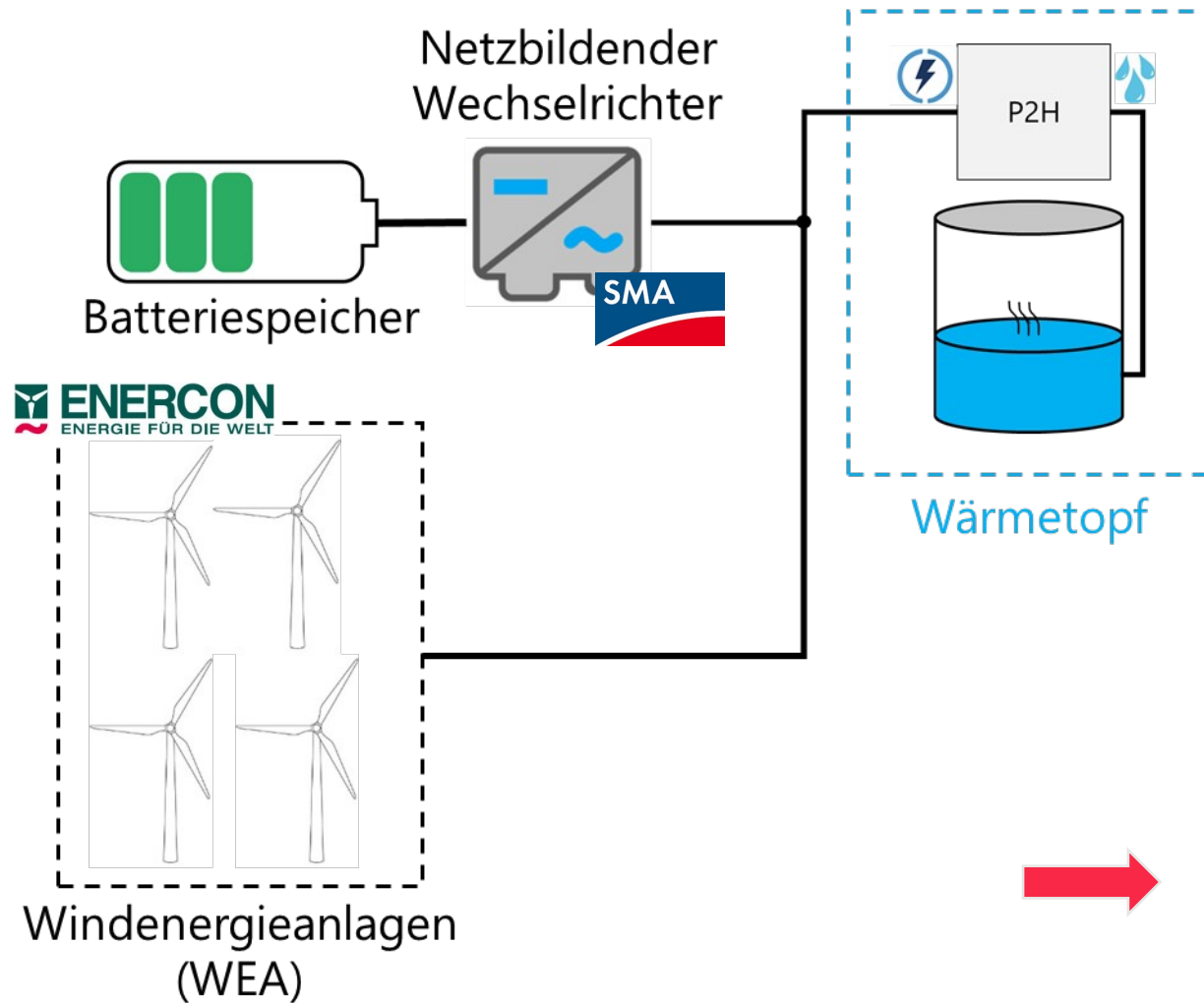
## 1. Feldversuch



- 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

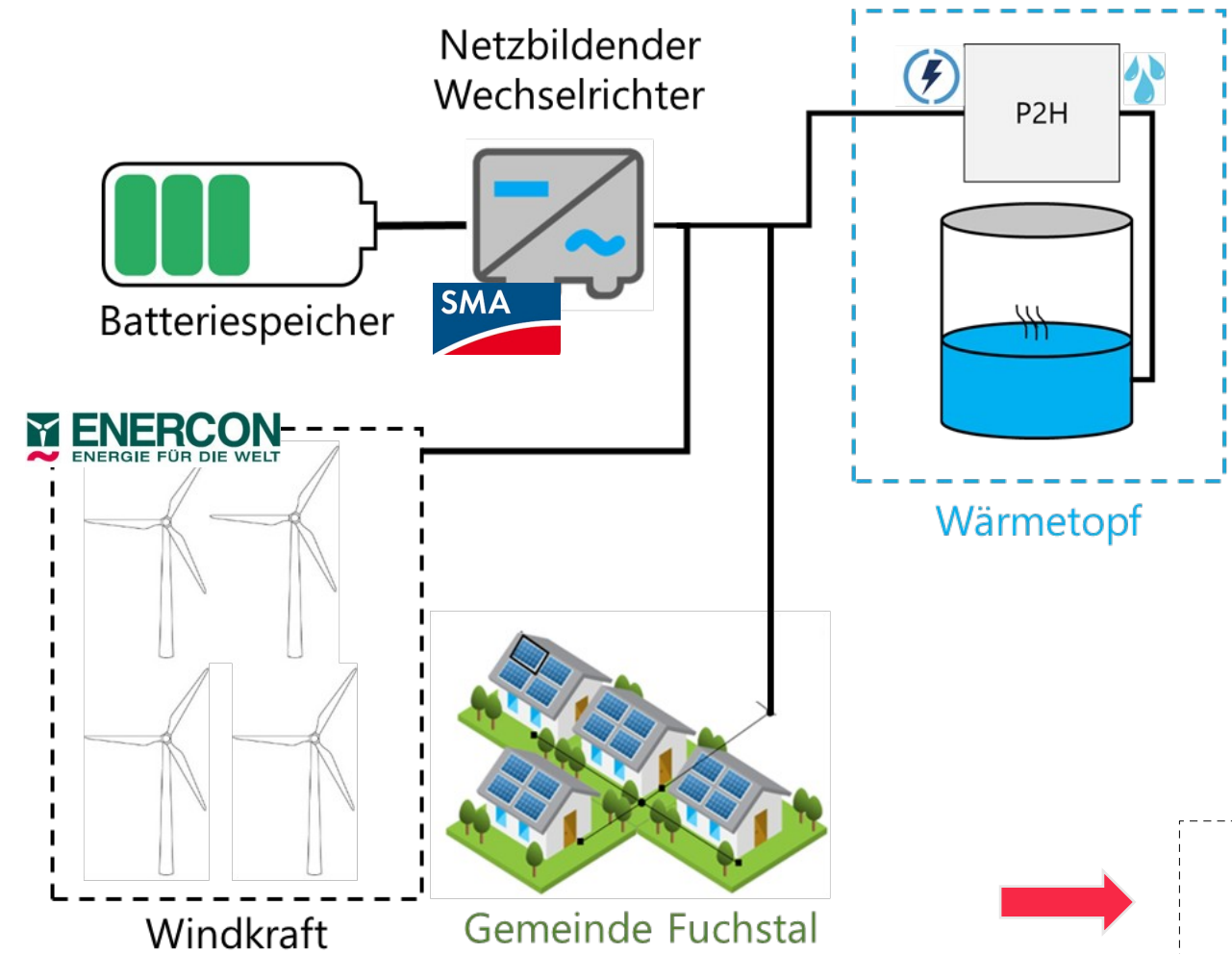
Bestimmung der dynamischen Grenzen und der Parametrierung des netzbildenden Wechselrichters in Bezug auf Lastschwankungen

## 2. Feldversuch



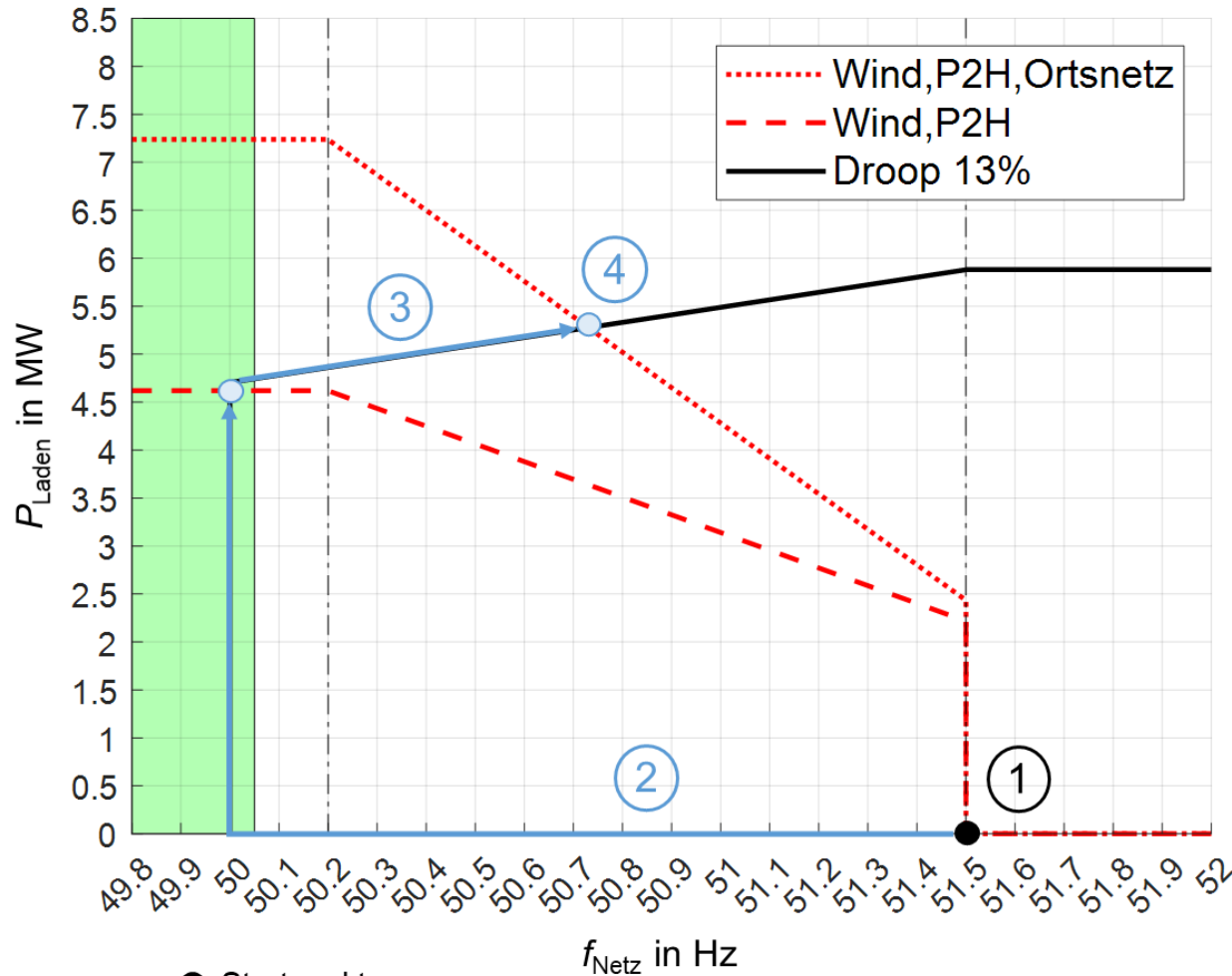
- Einbindung von  $Q(U)$ - und  $P(f)$ -Statiken und deren Zusammenspiel mit TAR-Parametrierung
- Wechselwirkungen zwischen netzbildenden und netzfolgenden Wechselrichtern
- Störgrößenmodellierung der Spannung durch Zuschalten von Kabelstrecken
- Evaluierung der zulässigen Einspeiseleistung der WEAs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

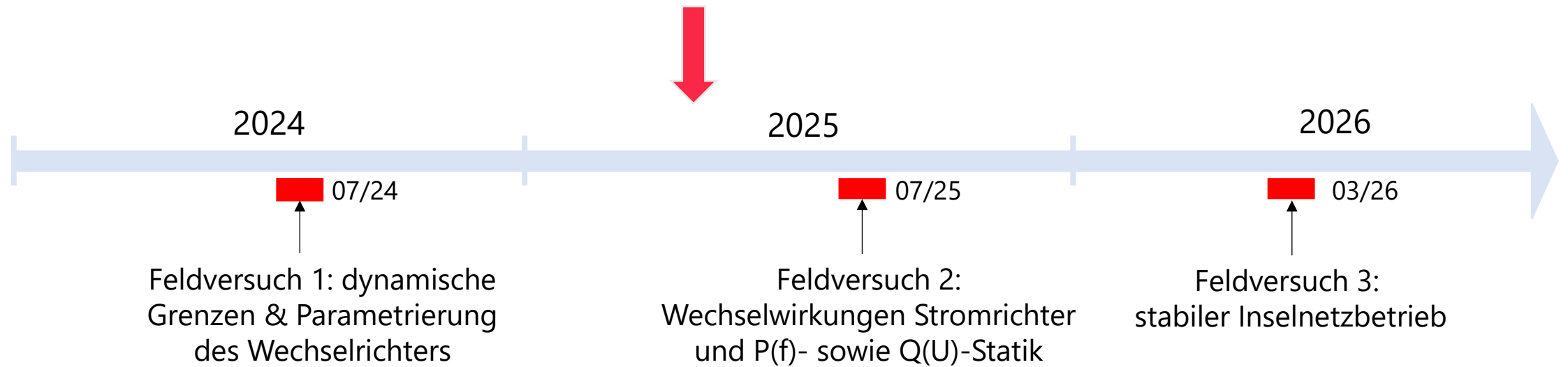


- ① Start des Batterieumrichters mit 51,5 Hz zur Verhinderung der unbeabsichtigten Zuschaltung netzfolgender Erzeuger
- ② Frequenzanpassung auf 50 Hz zur Rücksynchronisierung der Windkraftanlagen und Einspeisung ins Netz
- ③ Zuschaltung des Ortsnetzes mit PV-Anlagen und Erhöhung der Frequenz in Abhängigkeit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