

Untersuchung des Einflusses regionalspezifischer Verteilnetze auf zeitweilige Überspannungseignisse

M.Sc. Christoph Wirtz

17. Symposium Energieinnovation

Graz



Hintergrund und Motivation

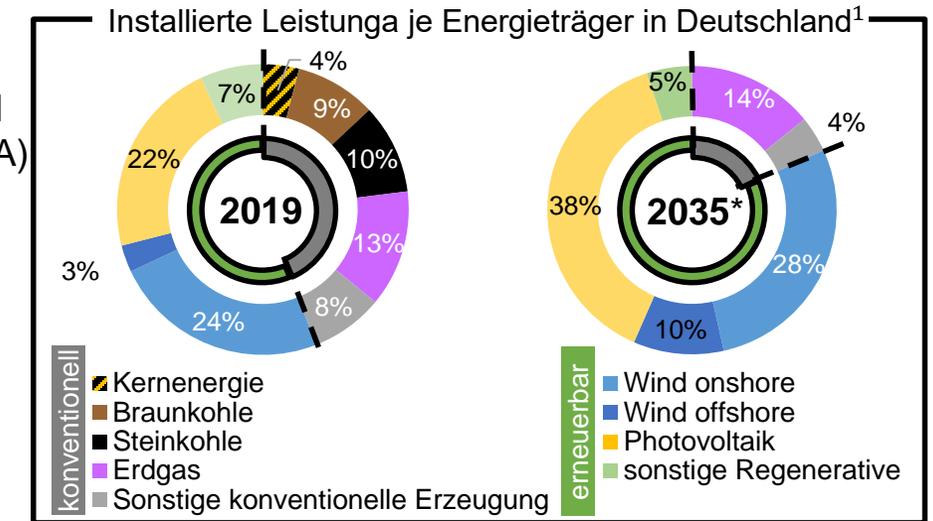
Veränderungen im Energieversorgungssystem

EZA = Erzeugungsanlage

*Szenario B 2035, NEP2021
a: 2019: 224,3 GW – 2035: 306,7 GW

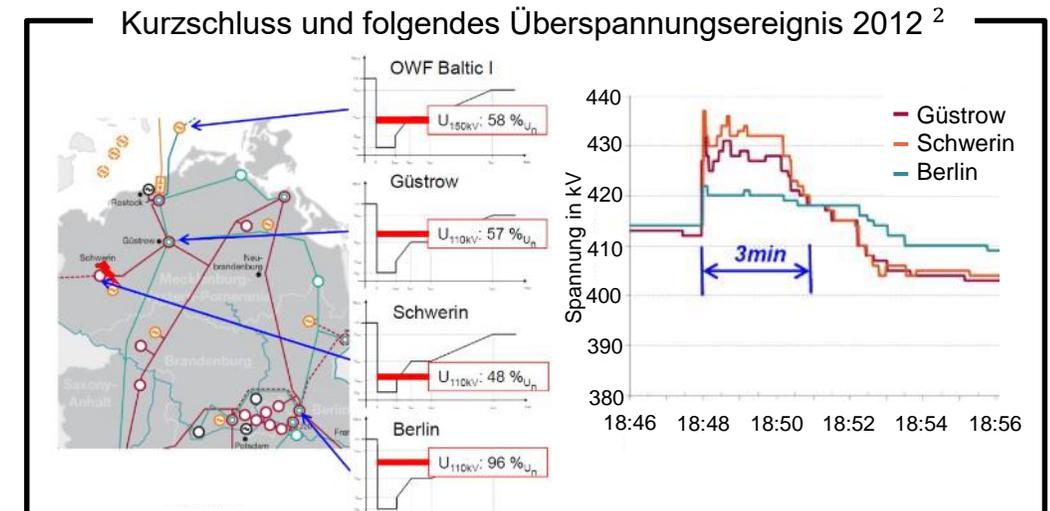
Auswirkungen von Klimapolitik und Energiewende auf dynamische Systemstabilität

- Rückbau von Großkraftwerken durch Kohleausstieg, Kernenergieausstieg und Verdrängung durch Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien (EZA)
 - Sinkender Anteil synchron angeschlossener Erzeuger
 - Abnahme der Kurzschlussleistung und dynamischen Blindleistungsbereitstellung im Netz
- Verlagerung der Erzeugungsleistung in die Verteilnetze
- Leistungseinspeisung zunehmend umrichterbasiert (Leistungselektronik)
 - Kein intrinsischer Beitrag zur Spannungsstützung oder –begrenzung



Veränderungen in Netznutzung und dynamischem Systemverhalten

- Erzeugungsanlagen dargebotsabhängig
- Stunden starker Einspeisung aus EZA → Abschalten synchroner Erzeugung
- Ereignis Deutschland 2012
 - Kurzschluss (110kV) → Spannungseinbruch (EZA Ausfall) → Fehlerklärung → Überspannung (EZA Ausfall)
- Weiträumige Überspannungen können Ausfall großer EZA Leistung bedeuten
 - Zeitweilige Überspannungen im Zuge der Veränderungen des dynamischen Systemverhaltens untersuchungsrelevant



Hintergrund und Motivation

Zeitweilige Überspannungen

Klassifikation: DIN EN 60071-1: $0,03 \text{ s} < T < 3600 \text{ s}$, $10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$, „niederfrequente Überspannung“

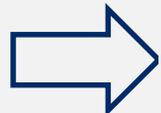
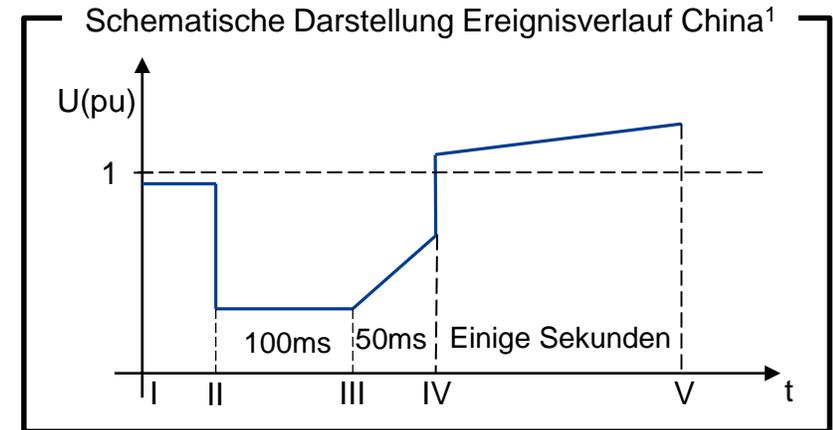
Ursachen: z.B. Lastabwurf, Fehlerklärung nach Kurzschluss

Reale HVRT Ereignisse (Rückkehr aus Spannungseinbruch)

- 205 kaskadierende Anlagenausfälle 2011-12 China¹ (Staatliche Statistik)
 - Überwiegender Verlauf:
 - I. Übertragungsleitungen stark belastet (Lange Leitungslängen → Hoher Blindleistungsbedarf) → Kondensatorbänke vollständig genutzt
 - II. Kurzschluss → Spannungseinbruch
Erzeugungsverlust nahe Fehlerort
LVRT → Wirkleistungseinspeisung sinkt stark → Blindleistungsbedarf sinkt
 - III. Netzstützung durch Static VAR Compensator (SVC)
 - IV. Fehlerklärung → Blindleistungsüberschuss
- Weiträumige Anlagenausfälle möglich – Gefährdung der Systemstabilität

Simulationen (Analyse und eigene Übertragungsnetzsimulationen)

- Ereigniskette Spannungseinbruch (LVRT) → Überspannung (HVRT) relevant für Systemgefährdung
- Anlagen reagieren auf Spannung bzw. Spannungsänderung am Netzanschlusspunkt
- Regionale Verteilnetzausprägungen bestimmen Überspannung an Erzeugungsanlagen



Untersuchung des Einflusses regionalspezifischer Verteilnetze auf zeitweilige Überspannungseignisse

Analyse und Modellbildung

Normen und Anschlussbedingungen

Systemstabilität

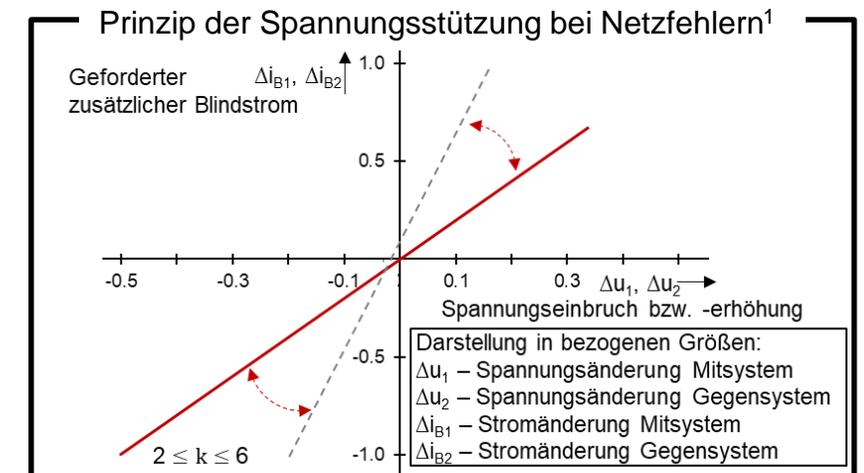
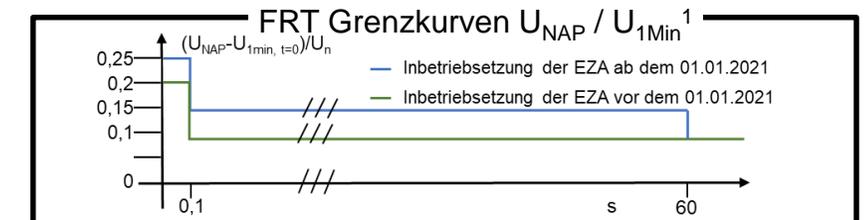
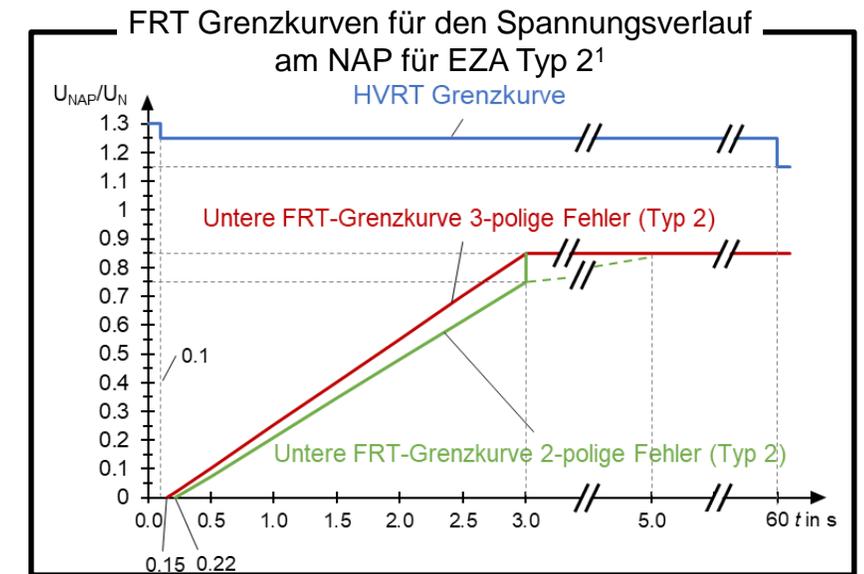
- **Systemstabilität** ist die Fähigkeit eines Elektroenergiesystems, ausgehend eines Anfangszustands **nach Auftreten einer Störung** wieder einen **stabilen Betriebszustand** (Gleichgewicht) zu erreichen.²
- Kriterien: kaskadierende Ausfälle, Ausfall Erzeugung / Last > 3000 MW³

Dynamisches Verhalten EZA im Fehlerfall

- Umrichterbasierte EZA ohne intrinsisches spannungsstützendes Verhalten
→ Normen und Anschlussregeln bestimmen maßgeblich Verhalten im Fehlerfall

Technische Anschlussregelungen:

- AR-N-4130 (HöS), AR-N-4120 (HS), AR-N-4110 (MS), AR-N-4105 (NS)
- EZA und Speicher (energieliefernd /-beziehend) müssen sich an dynamischer Netzstützung beteiligen
- Fähigkeit zum Durchfahren - symmetrischer und unsymmetrischer Fehler
 - vorgegebener Spannungskurven
 - mehrerer Netzfehler
- Einspeisen eines Blindstroms während des Fehlers (außer NS)
→ Alternative Erbringung durch FACTs möglich
- Blindstrom proportional zur Spannungsabweichung (k-Faktor)
 - I_b kann mindestens 100% I_{nenn} erreichen, dazu Reduktion von Wirkstrom



¹ VDE AR-N 4120

² P. Kundur et al.: Definition and Classification of Power System Stability

³ „System Operation Guideline“ (guideline on electricity transmission system operation)

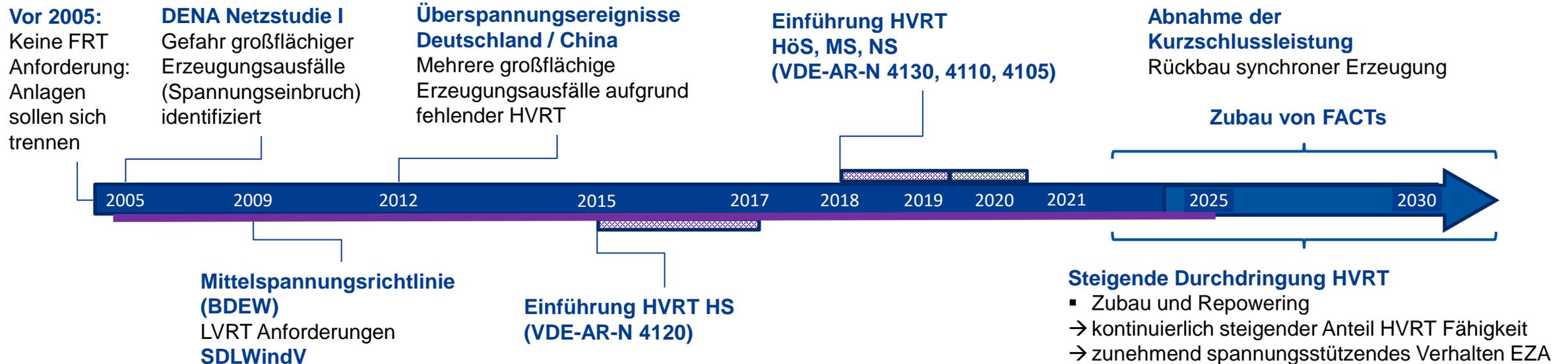
NAP: Netzanschlusspunkt

Analyse und Modellbildung

FRT-Durchdringung der Netze

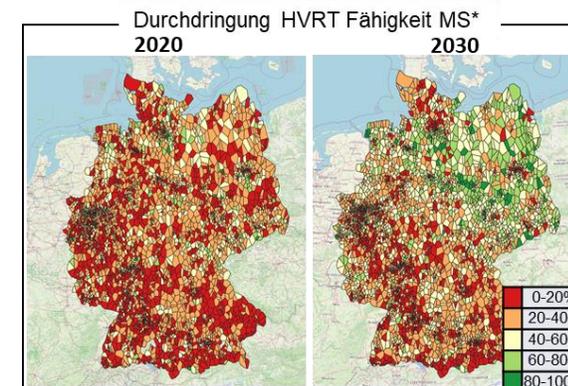
-  Übergangsphase (wahlfrei)
-  Übergangsphase (geplant / im Bau)
-  ∅ Lebensdauer Anlage

■ Low Voltage Ride Through (LVRT) – Spannungseinbruch  High Voltage Ride Through (HVRT) – Überspannung



→ Signifikanter Anteil der EZA ohne HVRT Fähigkeit in nächster Dekade

- Ausbau erfolgt ungleichmäßig
 - Räumlich: z.B. regulative Vorgaben (Abstandsregeln), Primärenergiedargebot
 - Zeitlich: kein konstanter Zubau



*Ableitung über MaStR, Annahmen basierend auf Inbetriebnahmedatum, ∅ 20 Jahre Lebensdauer, Ausbau (2030) nach Szenario B NEP 2019

HöS = Höchstspannung
HS = Hochspannung
MS = Mittelspannung
NS = Niederspannung

FRT = Fault Ride Through
LVRT / HVRT = Low / High Voltage Ride Through
SDLWindV = Systemdienstleistungsverordnung Wind

Analyse und Modellbildung

Verteilnetzmodellierung

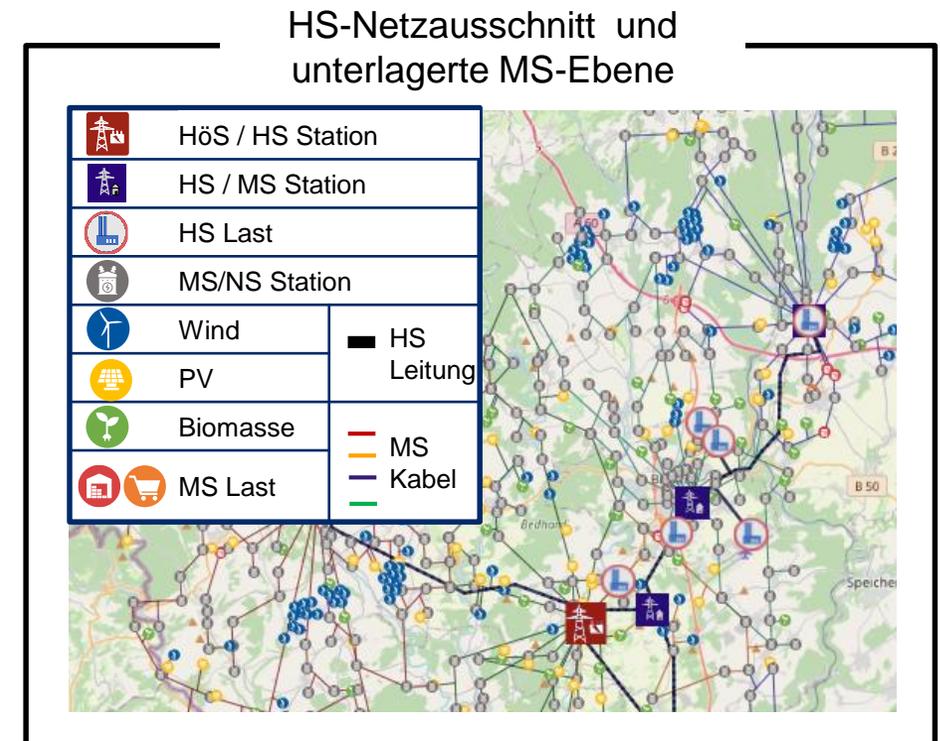
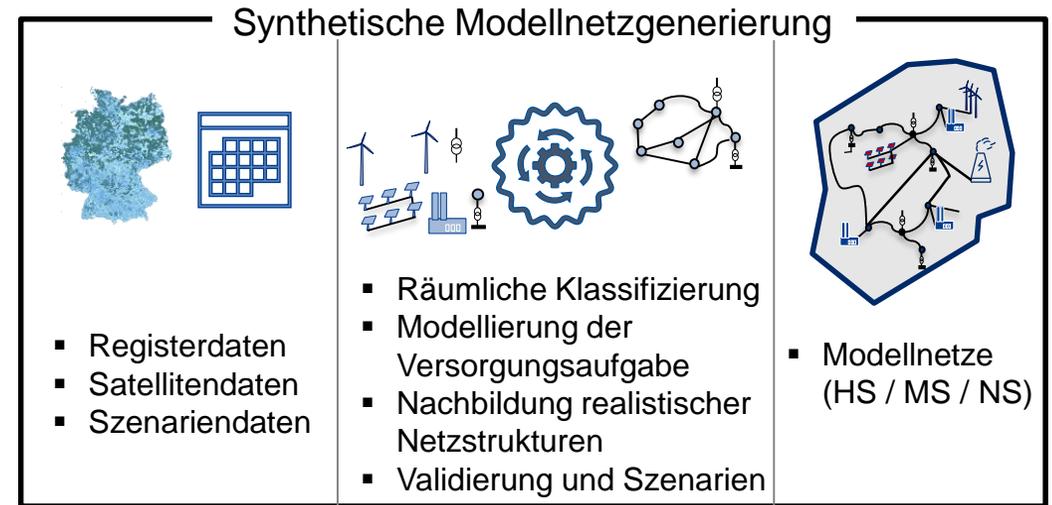
Modellierungsansatz Energieversorgungsnetz

- Realistische Netz und Kundenstrukturen
- Modellierung unterschiedlicher Regionen in Deutschland
- Abbildung von EZA & HVRT Fähigkeit in hoher Auflösung
- Abbildung zukünftiger Szenarien im Untersuchungszeitraum
- Modellierung über synthetisch generierte Verteilnetze

- Vielzahl an Netzen: 8 Referenznetze über Clusteralgorithmus (k-medoids)

Netznutzungsfälle zur Abbildung unterschiedlicher Netzzustände

ID	Netznutzungsfall:	Beschreibung:
0	Grundlastfall	Ausgeglichene Netzsituation
1	Hohe Einspeisung	Hohe Einspeisung durch EE, geringe Last
2	Hohe Last	Hohe Last, geringe Einspeisung durch EE
3	Geringe Netzauslastung	Einspeisung und Last gering (Nacht, geringer Wind)



Analyse und Modellbildung

Untersuchungsmethodik

Untersuchte Ereignisse

- Reale Ereignisverläufe
- Simulierte Ereignisverläufe aus Übertragungsnetzsimulationen
- Fehlerfälle im Modellnetz (Kurzschlüsse, Trennung Last-/ Erzeugung)
- 14 unterschiedliche Ereignisse

Zweiteilung der Simulationen

1. Testnetzuntersuchung

- Ziel: Identifikation möglicher Einflüsse auf zeitweilige Überspannungsereignisse
- Variation der Parameter (z.B. HVRT 0% - HVRT 100 %), Detailbetrachtung Anlagenverhalten

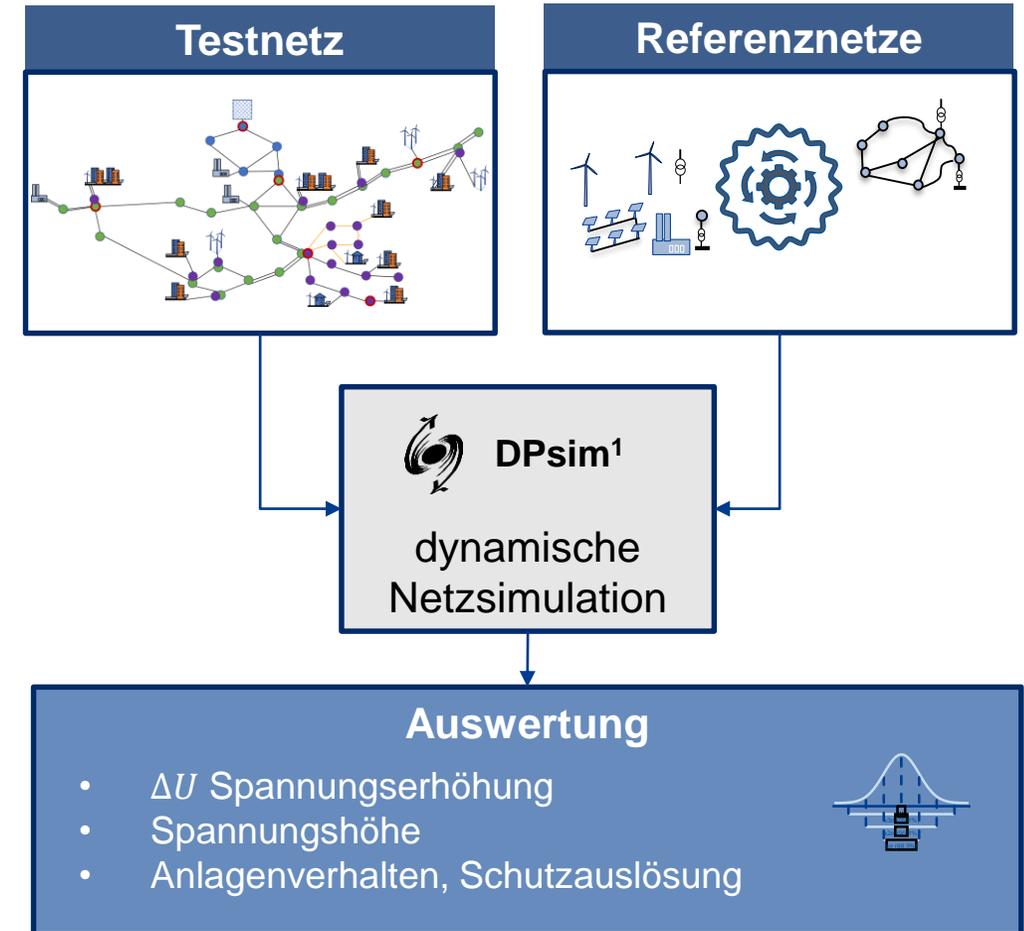
2. Referenznetzuntersuchungen:

- Ziel: Identifikation der Einflussausprägungen auf Basis realistischer Parameterausprägungen der regionalspezifischen Verteilnetze
- Parameterausprägung (HVRT, Kabelanteil, Netzstruktur) aus Eingangsdaten



Eingangsdaten:

- Lokalspezifische Eingangsdaten
- Ereignisse /Ereignisverläufe

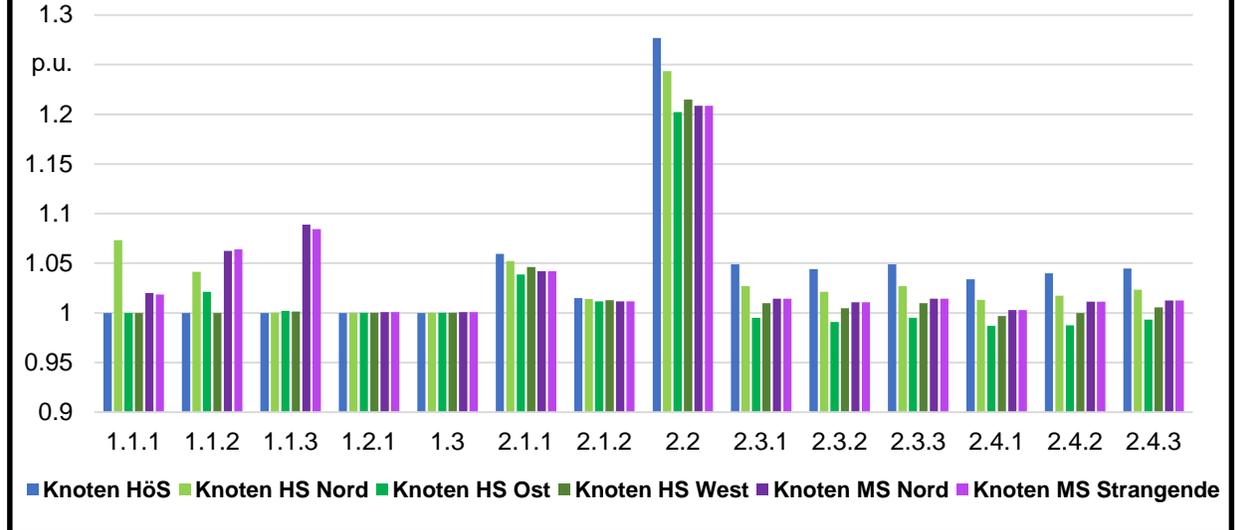


Ergebnisse

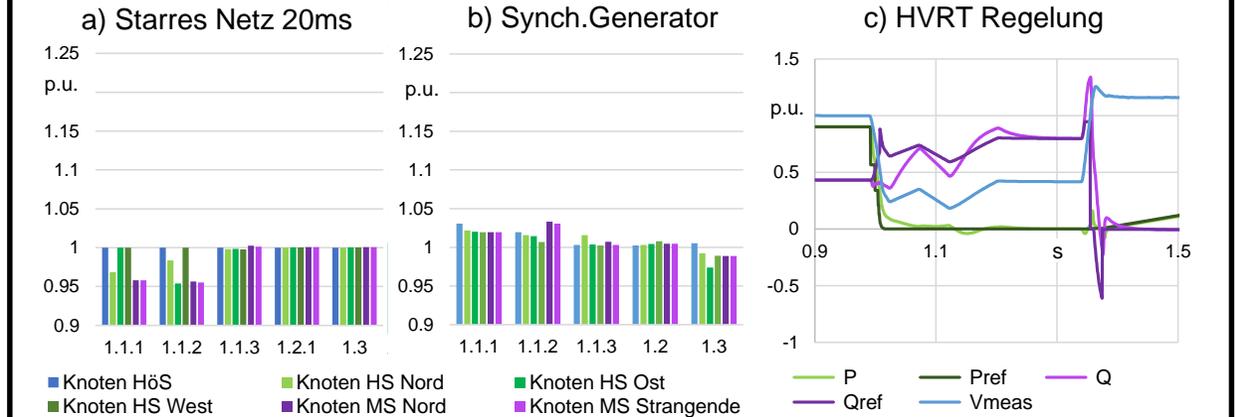
Testnetzuntersuchungen

- Überspannungen aus der überlagerten Netzebene werden grundsätzlich gedämpft (2.1.1- 2.4.3)
- ➔ Abnehmende Höhe der HVRT Anforderungen (HöS-NS) sinnvoll
- Fehlerfälle Last- bzw. Erzeugungsausfall im Verteilnetz: keine kritischen Überspannungen in Simulationen
- Situationen der Fehlerklärung eines Spannungseinbruchs:
 - Kurzzeitig (< 40 ms) Spannungserhöhungen im Verteilnetz
 - Ursache: von EZA eingespeister Blindstrom nicht instantan auf seinen Vorfehlerwert zurückgeführt
 - Nach Rückführung des Stroms behoben
 - ➔ Kurzzeitig höhere Spannungsanforderung - wie in aktueller Norm ausgestaltet - sinnvoll
- Simulationen auf Synchrongeneratorbasis: Netzreaktion geprägt durch Generatordynamik
 - ➔ Effekt tritt nicht auf
- Überschreiten des statisch zulässigen Spannungsbandes:
 - HVRT Regelung wirkt Überspannung entgegen

Höchste Spannungserhöhung ΔU - Simulation aller Ereignisse



- a) Spannung bei starrem Netz, 20s nach Fehlerklärung
- b) Spannung nach Fehlerklärung (Synchrongeneratorbasis)
- c) Reaktion HVRT Regelung bei Spannungsverlauf „China“



Ergebnisse

Testnetzuntersuchungen – Analyse der Parameter

Anzahl EZA und Höhe HVRT-Durchdringung

- Hohe EZA-Durchdringung der Netze verstärkt Einfluss der EZA
- Einfluss der HVRT Fähigkeit:
 - ohne ausreichende HVRT Fähigkeit Ausfall in Überspannungssituation
 - HVRT-fähige Anlagen:
Verhalten nach Anschlussbedingung (keine Trennung, Netzstützung)
 - reduziert die Überspannung im Verteilnetz
→ trägt zur Netzstabilität und Eigensicherung der EZA bei
- Betrachtung Spannungseinbruch und Überspannung als geschlossenes Fehlerereignis: im Zeitverlauf niedrigere Grenzwerte → erhöht Ausfallrisiko

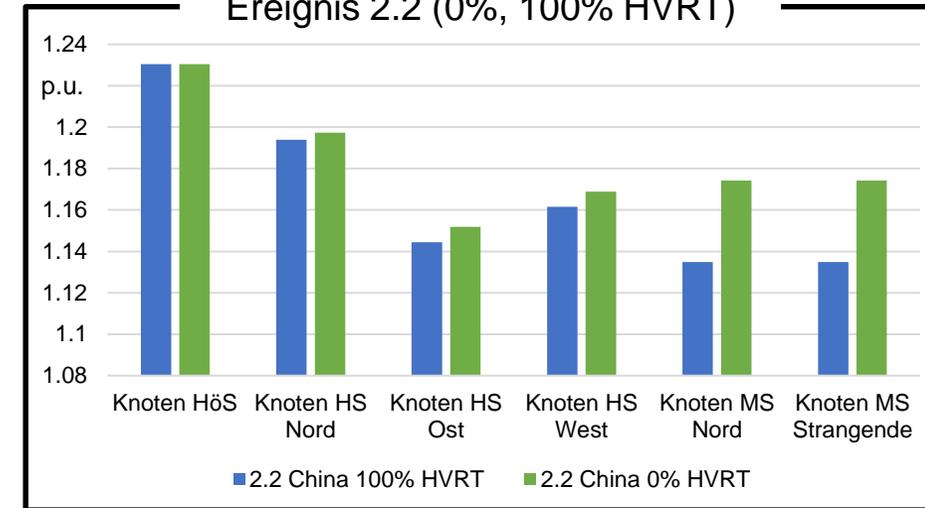
Leitungen, Kabel und Ausdehnung des Netzes

- Höhere Netzimpedanz dämpft relativen Spannungserhöhung im Verteilnetz
- Weite Ausdehnung des Netzes verringert ΔU mit zunehmender Entfernung leicht - Analog zum Spannungstrichter bei Spannungseinbruch

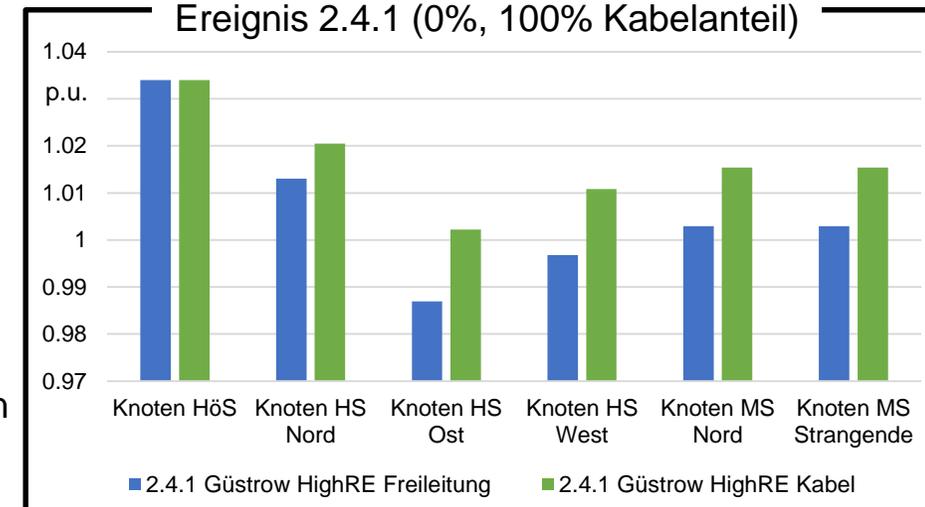
Weitere Parameter

- OLTC, langsame Kompensationsanlagen: positiver Einfluss, deutlich verzögert
- Schnellregelnde Kompensationsanlagen verringern Spannungsabweichungen vom Referenzwert
- Vorfederwert mit signifikantem Einfluss auf Überspannungen und EZA-Verhalten
- Verwendete Lastmodelle zeigen geringen Einfluss auf ΔU

Höchste Spannungserhöhung ΔU
Ereignis 2.2 (0%, 100% HVRT)



Höchste Spannungserhöhung ΔU
Ereignis 2.4.1 (0%, 100% Kabelanteil)



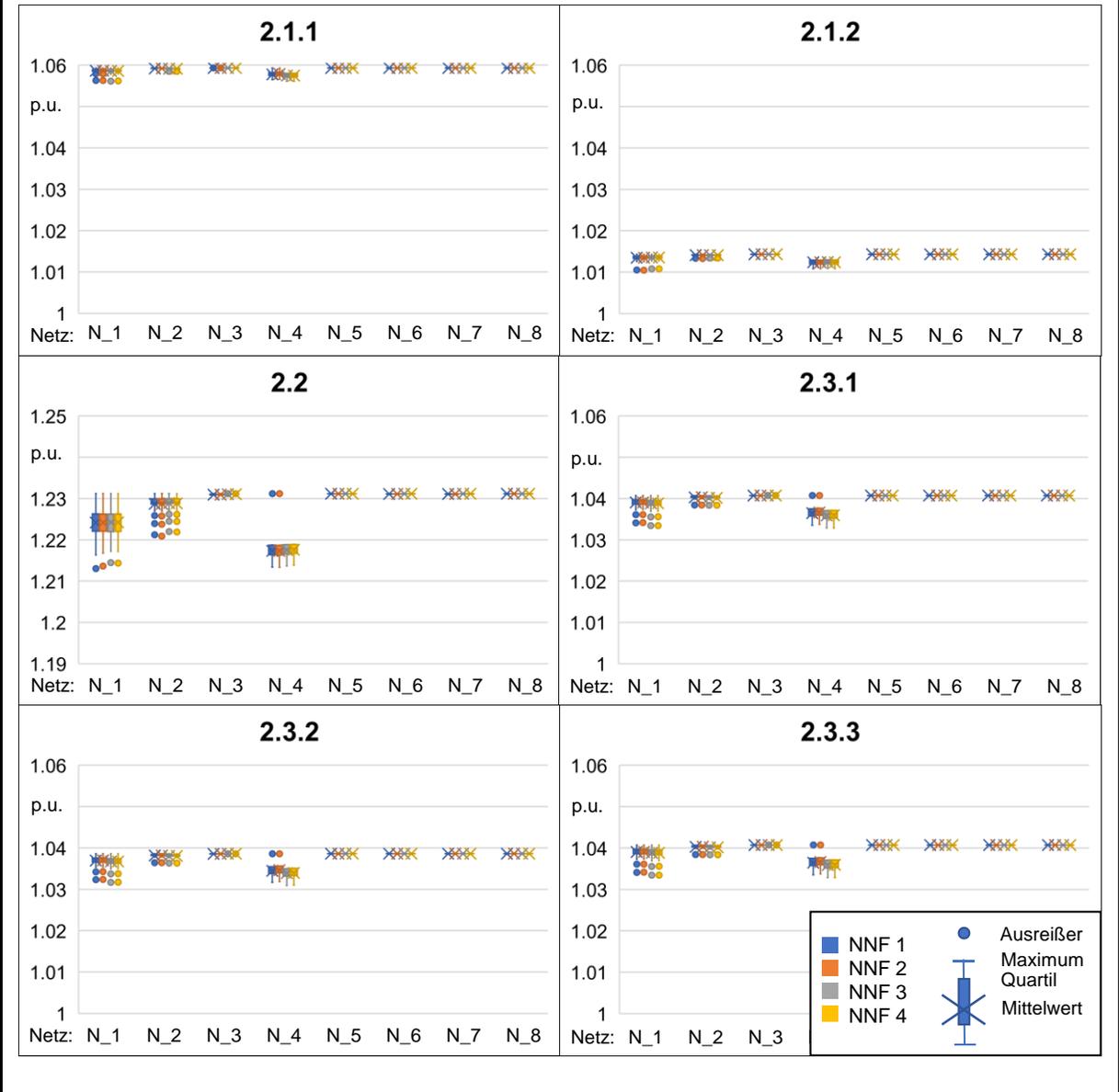
Ergebnisse

Referenznetzuntersuchungen

Untersuchung des Einflusses realistischer Parameterausprägungen

- Leicht unterschiedliche resultierende Überspannungshöhen
- Ursache: unterschiedliche Parameterausprägungen (Testnetz)
- Einfluss des Kabelanteils relativ niedrig (eventuell Unterschätzung des Kabelanteils aufgrund Modellnetzerstellung)
- Durchdringung mit EZA und HVRT-Fähigkeit wichtigster Einflussparameter
- Korrelation Mittelwert der höchsten Spannungserhöhung je Netz und installierte EZA Leistung ($\rho_{(x,y)} = -0.914$) sowie Anteil der HVRT Fähigkeit ($\rho_{(x,y)} = -0.794$)
- HVRT-Fähigkeit trägt zur Stabilität der Netze und Eigensicherung bei
- Positiver Einfluss auf mögliche großflächige Ausfälle von EZA bei weiträumigen Überspannungen
- In den Netzen verbleibende rotierende Massen mit großen Einfluss
- Vorfehlerzustand (Betriebsspannung, Netznutzungsfall)

Maximale Spannungserhöhung (ΔU) nach Netz und Ereignis



Zusammenfassung

Motivation

- Energiewende verändert dynamisches Systemverhalten – Neubewertung der Gefährdung zeitweiliger Überspannungen
- Anschluss großer Teile der EZA in der Verteilnetzebene
- Untersuchung des Einflusses regionalspezifischer Verteilnetze auf zeitweilige Überspannungen

Analyse

- Kombiniertes Ereignis (Spannungseinbruch mit folgender Überspannung) relevant
- Anlagenzahl, Leistung und HVRT-Fähigkeit aus öffentlichen Datenquellen geeignet abbildbar

Ergebnisse

- Aufgrund Ereignisrelevanz: Klare Definition des Fehlerübergangs LVRT-HVRT, Test entsprechender FRT-Fähigkeiten
- Kollektive Betrachtung von Übertragungs – und Verteilnetz immer wichtiger
- Signifikante Einflussparameter auf Überspannungen sollten in Stabilitätsuntersuchungen abgebildet werden:
 - Installierte Leistung und HVRT-Fähigkeit der Anlagen im Netzgebiet
 - Umrichterregelung, Netzimpedanz, vorhandene Kompensationsanlagen

Fragen und Diskussion

Kontaktdaten:

Christoph Wirtz

FGH e. V.

Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V.

Tel.: +49 241 997857-197

Mail: christoph.wirtz@fgh-ma.de

Web: www.fgh-ma.de

