

# Einfluss der Modellierungsgenauigkeit des Höchstspannungsnetzes auf die Simulation von Hochspannungsnetzen

Annika Klettke, IAEW, RWTH Aachen University

---

# Einleitung

## Projekt SimBench

- Energiewende führt zu veränderter Netznutzung und somit zu Herausforderungen in Übertragungs- und Verteilnetzen
- Zukünftig neue Berechnungsmethoden für die Simulation von Netzbetrieb und Netzplanung in allen Spannungsebenen erforderlich
- Ziel: Entwicklung eines Benchmarkdatensatzes in Form von Netzmodellen und zugehörigen Zeitreihen, der einen Vergleich neu entwickelter Methoden ermöglicht

## Benchmarkdatensätze für die Hochspannungsebene

- Ausbau dezentraler Erzeugungsanlagen führt zu verstärkt aktivem Netzbetrieb der Verteilnetze sowie zunehmendem Betrieb der Übertragungs- und Verteilnetze an ihren betrieblichen Grenzen
- Zunahme der Wechselwirkungen insbesondere zwischen Hoch- und Höchstspannungsnetzen zu erwarten
- Inwieweit können diese Wechselwirkungen für Benchmarkdatensätze für die Hochspannungsebene über vereinfachte Modelle der Höchstspannungsebene abgebildet werden?



# Wechselwirkungen zwischen Hoch- und Höchstspannungsnetzen

Üblicherweise hoher Vermaschungsgrad zwischen Hoch- und Höchstspannungsnetzen

## Transitflüsse

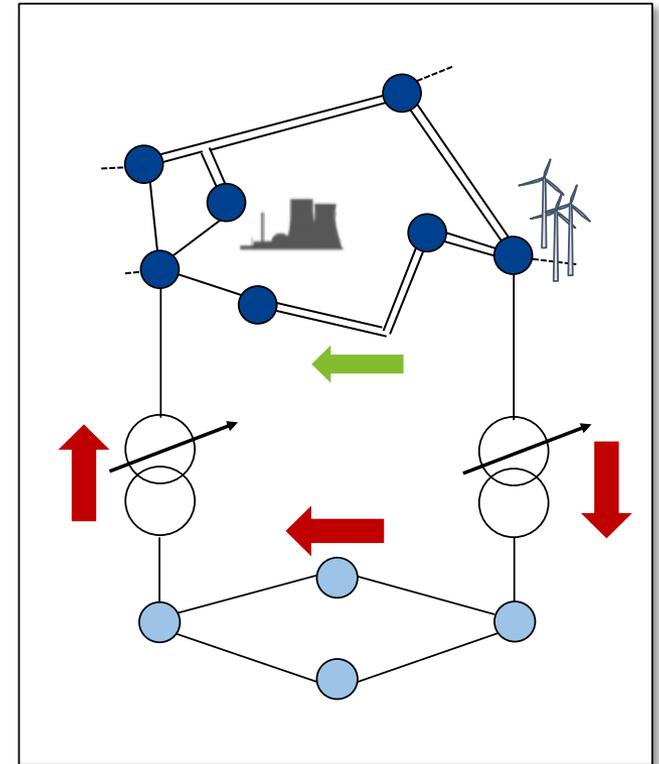
Verstärkte Leistungstransporte im Höchstspannungsnetz führen zu Transitflüssen

## Ausfallsituationen

Ausfallsituationen im Höchstspannungsnetz können Leitungsauslastungen im Hochspannungsnetz kritisch beeinflussen

## Betriebsmitteleinsatz

Betrieblicher Einsatz im HÖS-Netz wie Redispatch  
Einspeisemanagement, Einsatz Kompensationsanlagen

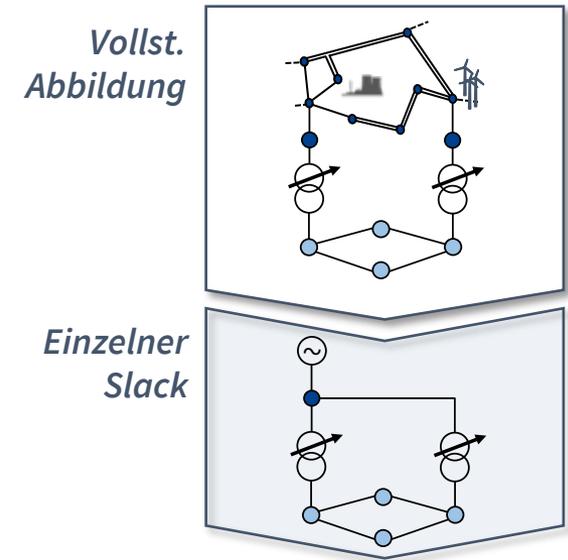


# Modellierung der HöS-Ebene

- Ausgehend von vollständiger Modellierung des HöS-Netzes, Ableitung vereinfachter Netzabbildungen
- Zentrale Anforderungen an Benchmarkdatensatz der HS-Ebene
  - Geringe Komplexität der HöS-Modellierung
  - Möglichst genaue Abbildung der Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene

## “Einzelner Slack”

- Verbindung der überspannungsseitigen Sammelschienen der HöS/HS-Transformatoren über impedanzlose Leitungen
- Einführung eines einzelnen Slack-Knotens, der die Wirkleistungsbilanzierung übernimmt
- Modellierung erfordert keine Kenntnis der Topologie und der Netznutzungssituationen des HöS-Netzes

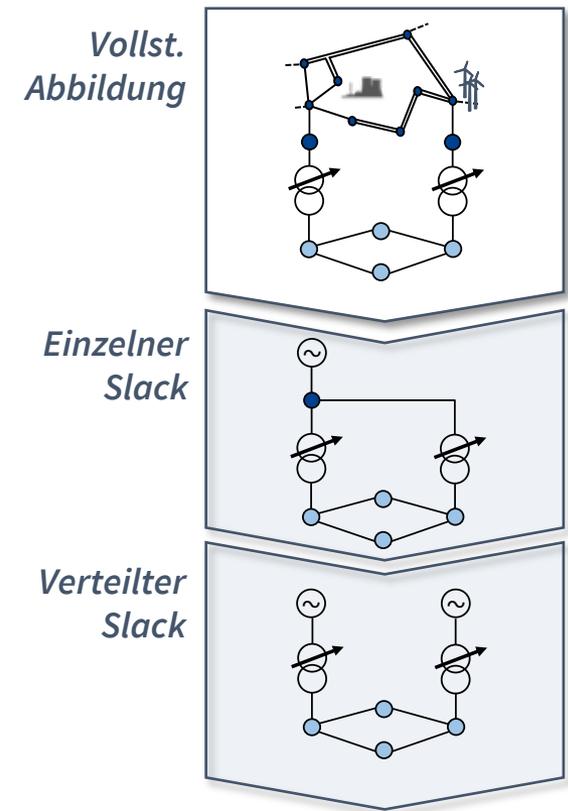


# Modellierung der HöS-Ebene

- Ausgehend von vollständiger Modellierung des HöS-Netzes, Ableitung vereinfachter Netzabbildungen
- Zentrale Anforderungen an Benchmarkdatensatz der HS-Ebene
  - Geringe Komplexität der HöS-Modellierung
  - Möglichst genaue Abbildung der Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene

## “Verteilter Slack”

- Keine Verbindung der überspannungsseitigen Sammelschienen der HöS/HS-Transformatoren
- Einführung von Ersatzgeneratoren an jeder überspannungsseitigen Sammelschiene der HöS/HS-Transformatoren
- Wirkleistungsbilanzierung des HS-Netzes über alle Ersatzgeneratoren
- Modellierung erfordert keine Kenntnis der Topologie und der Netznutzungssituationen des HöS-Netzes

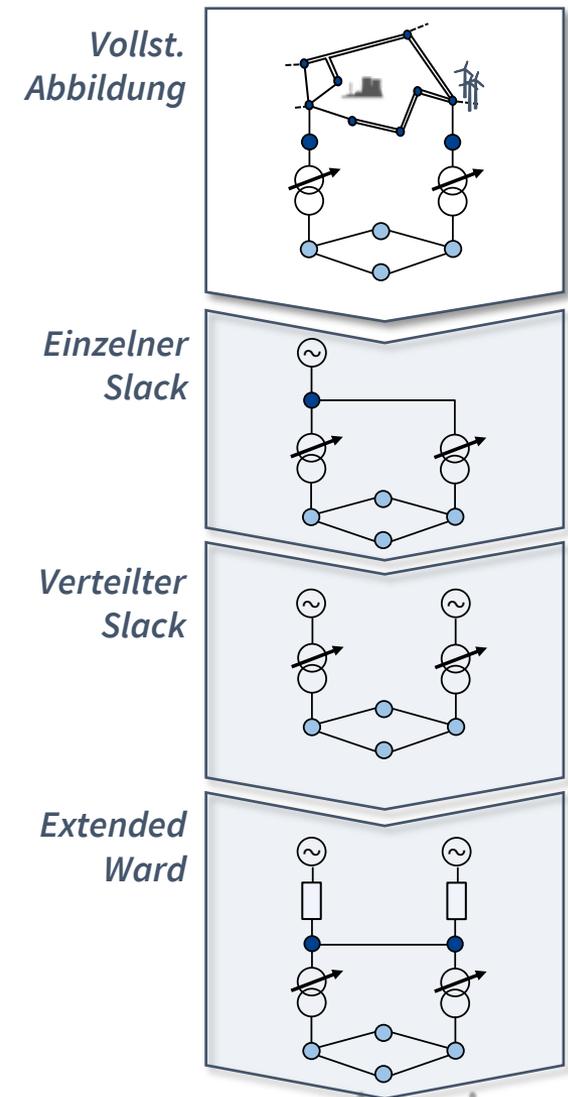


# Modellierung der HöS-Ebene

- Ausgehend von vollständiger Modellierung des HöS-Netzes, Ableitung vereinfachter Netzabbildungen
- Zentrale Anforderungen an Benchmarkdatensatz der HS-Ebene
  - Geringe Komplexität der HöS-Modellierung
  - Möglichst genaue Abbildung der Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene

## “Extended Ward”

- Etabliertes Netzwerkreduktionsverfahren mit exakter Abbildung des stationären Arbeitspunktes
- Modellierung des HöS-Netzes über Ersatzknoten und Leitungen an Netzverknüpfungspunkten
- Modellierung erfordert Ergebnisse einer Lastflussberechnung des vollständigen Netzmodells sowie konstante Topologie
- Detaillierte Kenntnis der Topologie und der Netznutzungssituationen des HöS-Netzes erforderlich



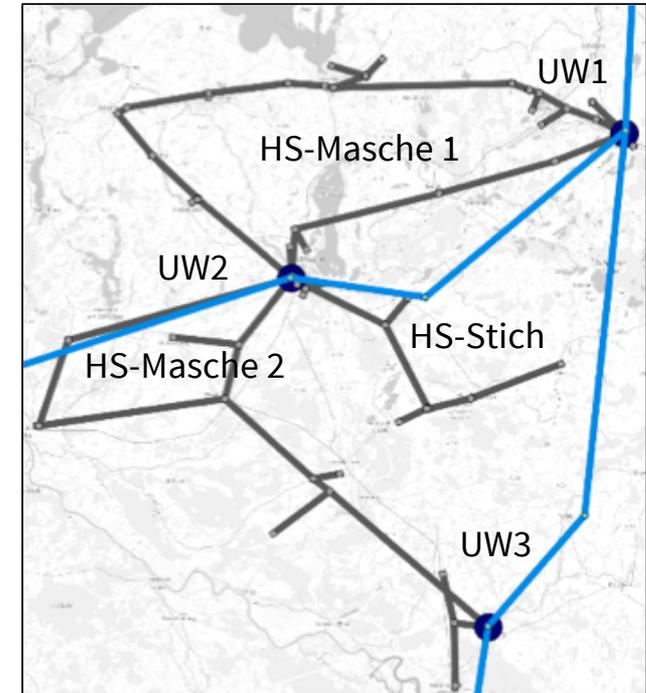
# Untersuchungsszenario

## Netzgenerierung

- Generierung des HS-Netzes im Rahmen des Projektes *SimBench*
- Netzmodell basierend auf georeferenzierten Daten von OpenStreetMap
- Anwendung verschiedener Algorithmen zur Überführung in rechenfähiges Knoten-Zweig-Modell

## Netzmodell

- HS-Netzmodell
  - 74 Standorte, 77 Sammelschienen
  - Installierte EE-Leistung: 1.562 MW
- HöS-Netzmodell
  - Parametrierung auf Basis von Szenario B, NEP 2023
  - Drei Verküpfungspunkte zwischen HöS- und HS-Netz
  - Regelung der HöS/HS-Transformatoren auf eine unterspannungsseitige Sollspannung



- 380 kV Leitungen
- 110 kV Leitungen
- Umspannwerk (UW)
  - 380 kV Knoten
  - 110 kV Knoten



# (n-1)-Leitungsauslastungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

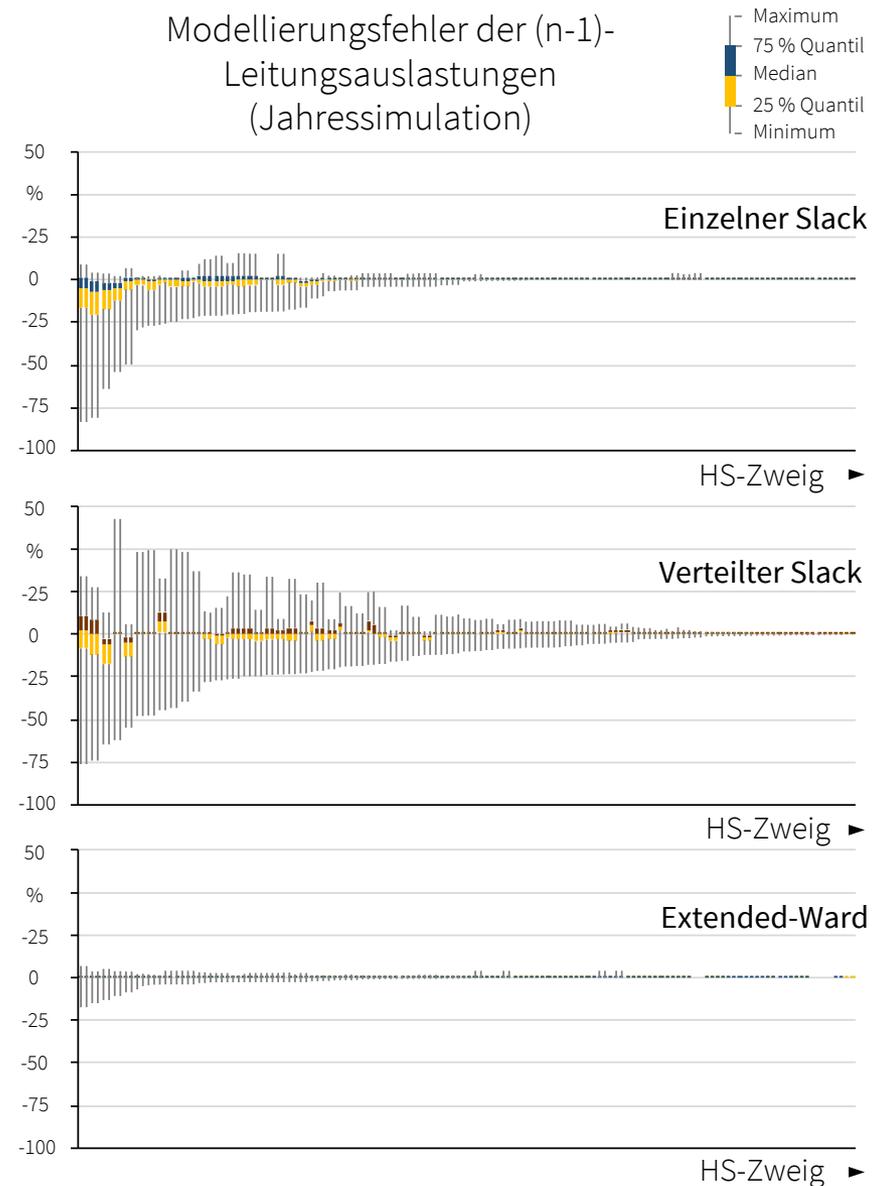
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- In einer Vielzahl der Stunden und für viele HS-Leitungen Fehler im Bereich weniger Prozentpunkte
- In einzelnen Situationen (hoher HöS-Leistungstransport) Modellierungsfehler von bis zu 75 Prozentpunkten

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Leitungsauslastungen

Modellierungsfehler der (n-1)-  
Leitungsauslastungen  
(Jahressimulation)



# (n-1)-Leitungsauslastungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

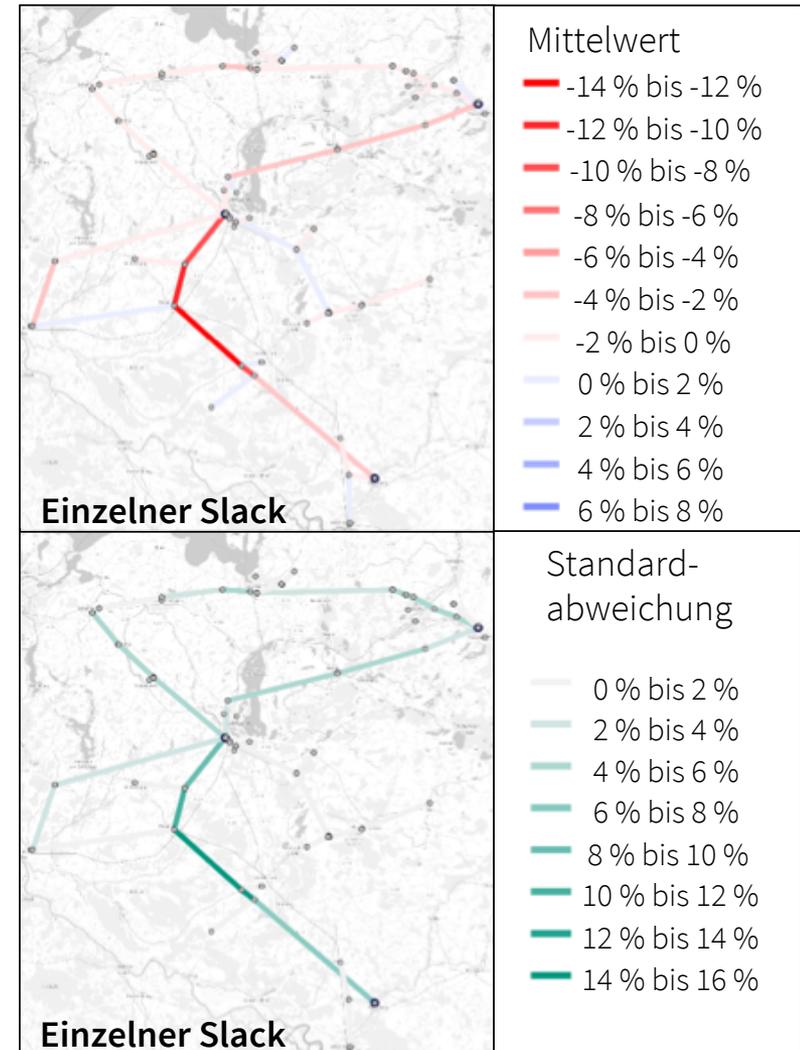
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- In einer Vielzahl der Stunden und für viele HS-Leitungen Fehler im Bereich weniger Prozentpunkte
- In einzelnen Situationen (hoher HöS-Leistungstransport) Modellierungsfehler von bis zu 75 Prozentpunkten

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Leitungsauslastungen

Geographische Verteilung der Modellierungsfehler der (n-1)-Leitungsauslastungen



# (n-1)-Leitungsauslastungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

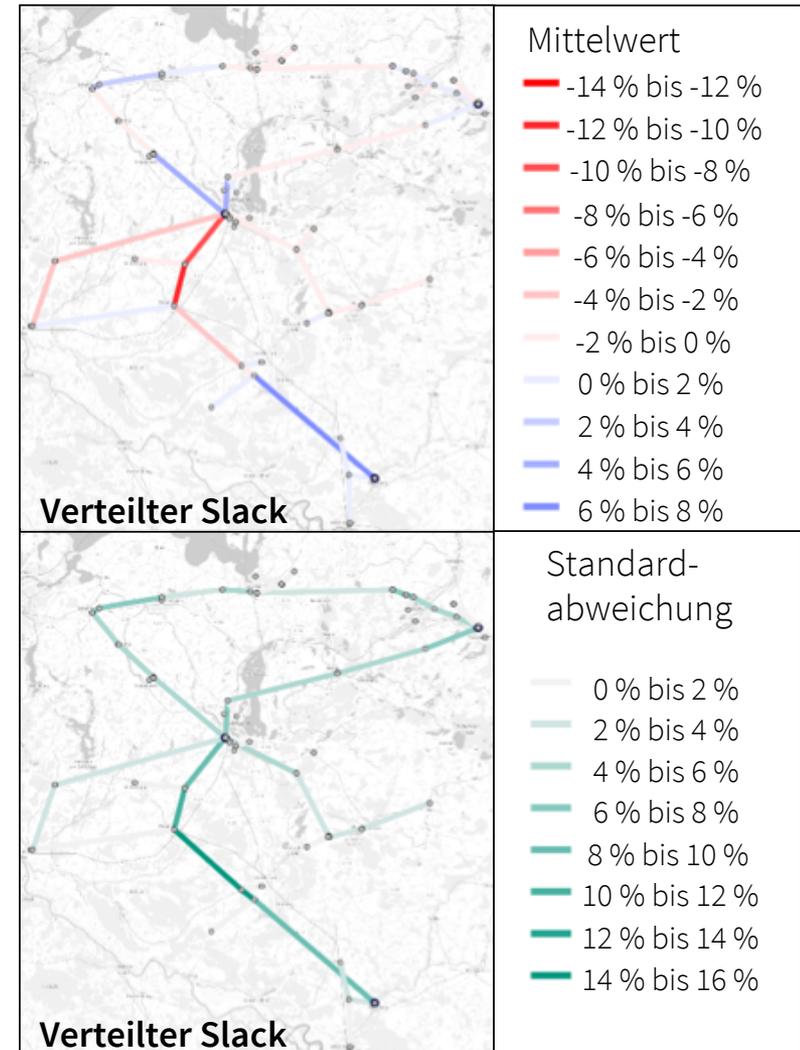
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- In einer Vielzahl der Stunden und für viele HS-Leitungen Fehler im Bereich weniger Prozentpunkte
- In einzelnen Situationen (hoher HöS-Leistungstransport) Modellierungsfehler von bis zu 75 Prozentpunkten

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Leitungsauslastungen

Geographische Verteilung der Modellierungsfehler der (n-1)-Leitungsauslastungen



# (n-1)-Knotenspannungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

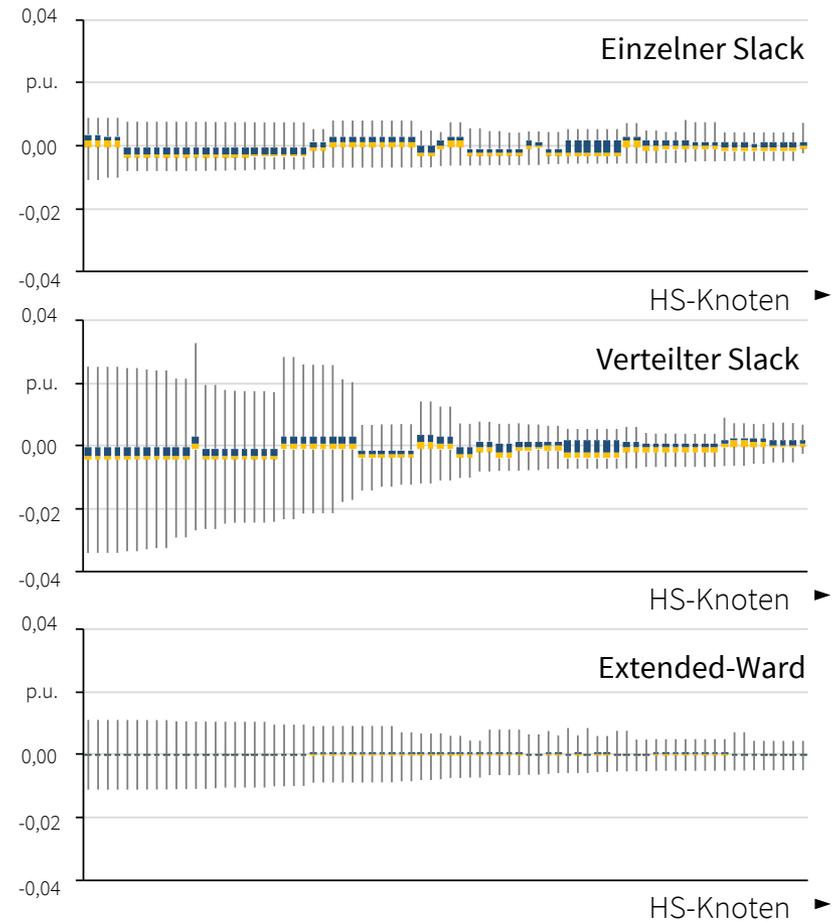
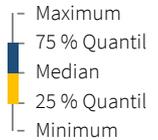
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslastungen geringe Fehler der (n-1)-Knotenspannungen aufgrund der Spannungsregelung der HöS/HS-Transformatoren
- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslasten gleichmäßigere Verteilung der Fehler der (n-1)-Knotenspannungen innerhalb des HS-Netzes

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Knotenspannungen

Modellierungsfehler der (n-1)-Knotenspannungen (Jahressimulation)



# (n-1)-Knotenspannungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

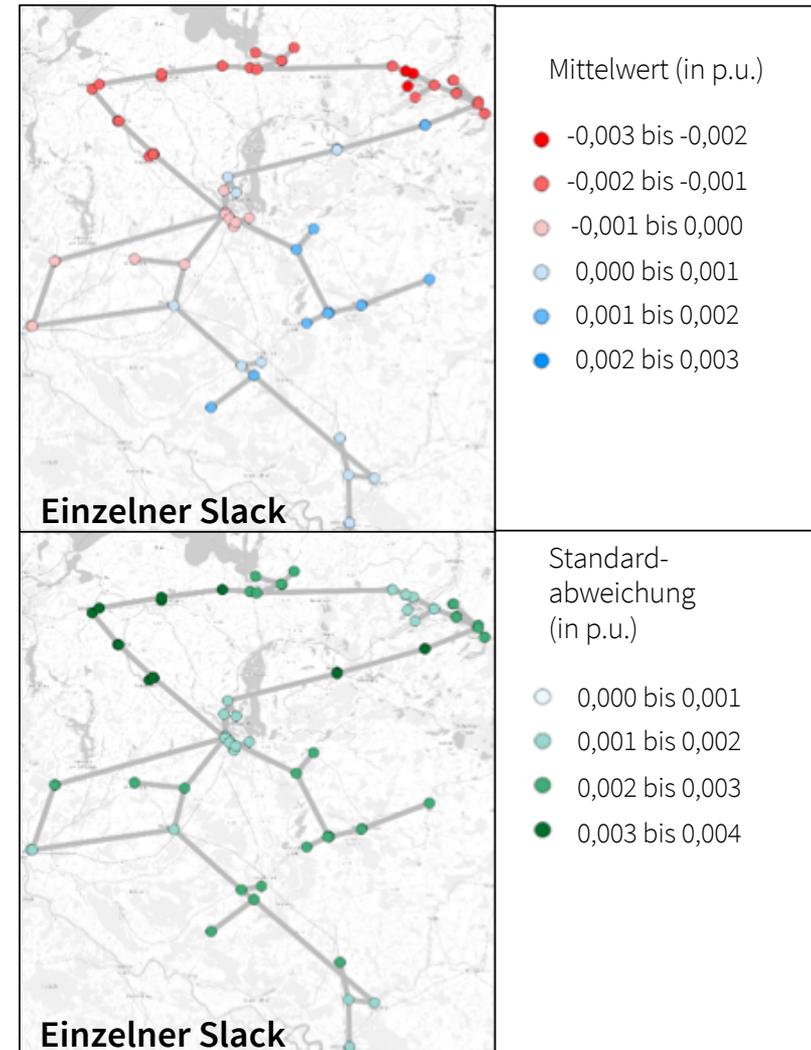
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslastungen geringe Fehler der (n-1)-Knotenspannungen aufgrund der Spannungsregelung der HöS/HS-Transformatoren
- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslasten gleichmäßigere Verteilung der Fehler der (n-1)-Knotenspannungen innerhalb des HS-Netzes

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Knotenspannungen

Geographische Verteilung der Modellierungsfehler der (n-1)-Knotenspannungen



# (n-1)-Knotenspannungen

- Zentrale Wechselwirkungen zwischen HöS- und HS-Ebene durch Betriebsmittelausfälle
- Jahressimulation von Betriebsmittelausfällen
- Vergleich mit vollständiger HöS-Netzmodellierung

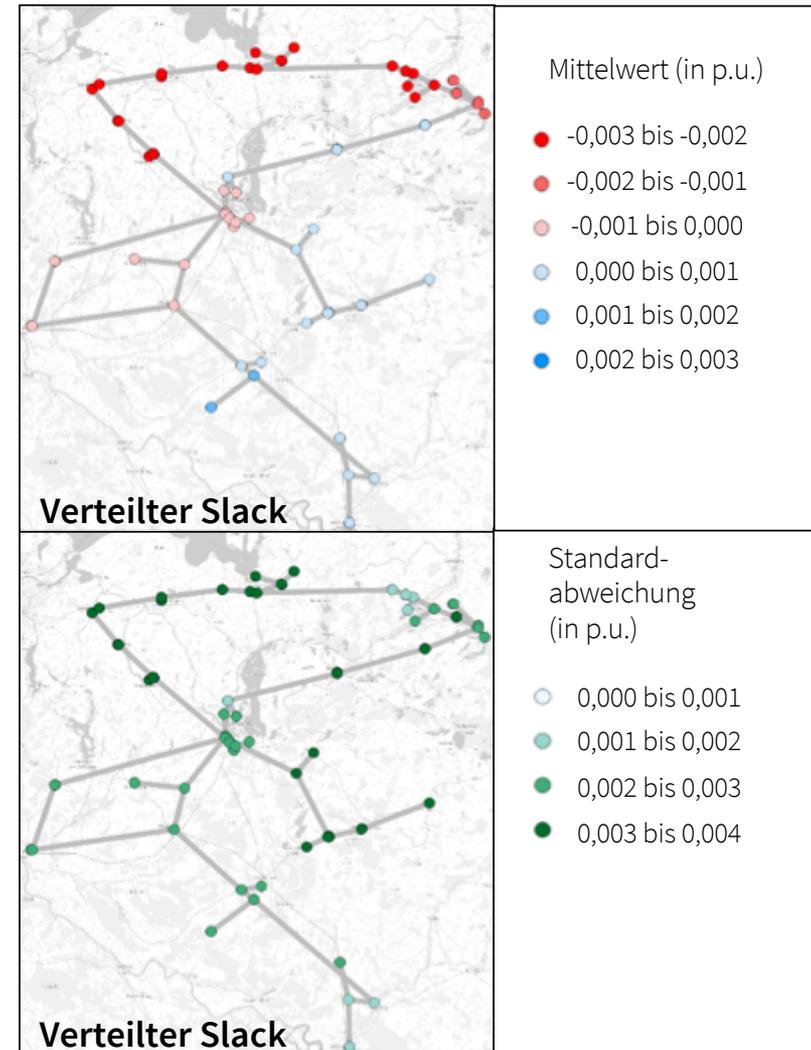
## “Einzelner Slack” und “Verteilter Slack”

- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslastungen geringe Fehler der (n-1)-Knotenspannungen aufgrund der Spannungsregelung der HöS/HS-Transformatoren
- Im Vergleich zu (n-1)-Leitungsauslasten gleichmäßigere Verteilung der Fehler der (n-1)-Knotenspannungen innerhalb des HS-Netzes

## “Extended Ward”

- Signifikante Reduktion der Abbildungsfehler der maximal auftretenden (n-1)-Knotenspannungen

Geographische Verteilung der Modellierungsfehler der (n-1)-Knotenspannungen



# Zusammenfassung

## Projekt SimBench

- Ziel: Entwicklung eines Benchmarkdatensatzes in Form von Netzmodellen und zugehörigen Zeitreihen, der einen Vergleich dieser Methoden ermöglicht
- Inwieweit können Wechselwirkungen zwischen Hoch- und Höchstspannungsnetzen vereinfacht im Rahmen von Benchmarkdatensätzen abgebildet werden?

## Exemplarische Untersuchungen

- Vereinfachte Modellierungsansätze ohne detaillierte Kenntnis des HöS-Netzes zeigen signifikante Fehler insbesondere in auslegungsrelevanten Netznutzungssituationen
- Modellierungsansätze ohne Kenntnis des HöS-Netzes können für einen ersten Vergleich neuer Lösungsansätze im Bereich der Netzanalyse von HS-Netzen angewendet werden
- Abbildung realitätsnaher Betriebsmittelbelastungen im Hochspannungsnetz erfordern jedoch detailliertere Modellierung der HöS-Ebene (z.B. über Extended-Ward-Modelle)



# Spannungswinkel

HS-Spannungswinkel vereinf. Modell

