



Foto: Martin Braun

EnInnov2022 – 17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz/Austria
Koordinationskonzepte zur Hebung von Blindleistungspotentialen aus der Verteilnetzebene

Name: Christian Ziesemann, Jonas Mehlem, Albert Moser

Einleitung

Analyse und Modellbildung

Verfahrensansatz

Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

▶ Einleitung

Analyse und Modellbildung

Verfahrensansatz

Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung

Hintergrund und Motivation

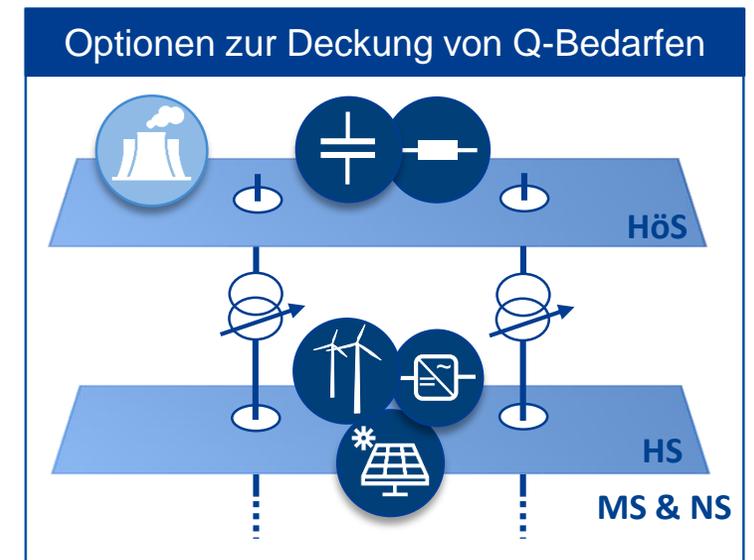
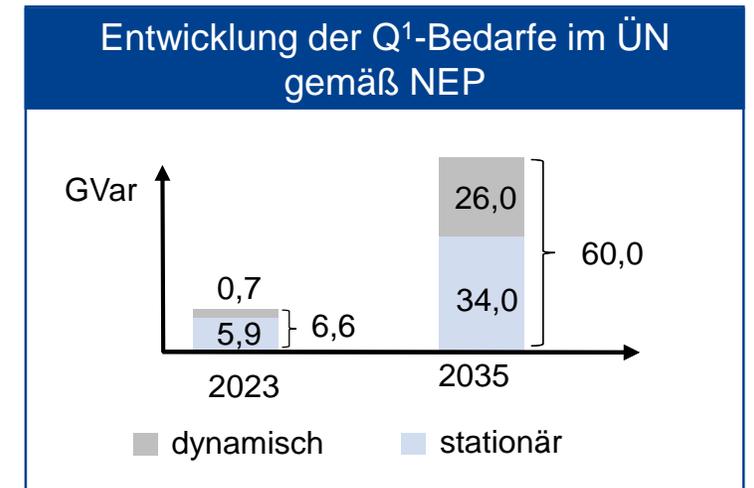
Entwicklungen im Elektrizitätsversorgungssystem (EVS)

- Signifikante Veränderungen im EVS zum Erreichen von klimapolitischen Zielsetzungen
 - Verdrängung konventioneller Kraftwerke im Übertragungsnetz (ÜN)
 - Zunehmender Ausbau von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) mit Anschluss in der Verteilnetzebene (VN)
- Zunehmende Transportentfernungen und eine steigende, zunehmend volatilere Netzbelastung führen zu steigenden Q-Bedarfen
- Wegfall von Q-Potentialen bei überproportional steigenden Q-Bedarfe im ÜN
- **Sicherung zukünftiger Q-Bedarfe im Zuge der stationären Spannungshaltung notwendig**

Deckung von stationären Blindleistungsbedarfen im Übertragungsnetz

1. Zubau von diskret zuschaltbaren Q-Kompensationsanlagen mit Anschluss im ÜN
 - Kostenintensiver Zubau von bis zu 250 Kompensationsanlagen (mit 300 MVA)
 2. Stützung des ÜN durch Q-Bereitstellung von DEA grds. mit Anschluss in der VN-Ebene
- **Potentielle Q-Bereitstellung aus DEA für das Übertragungsnetz?**

¹ Blindleistung Q

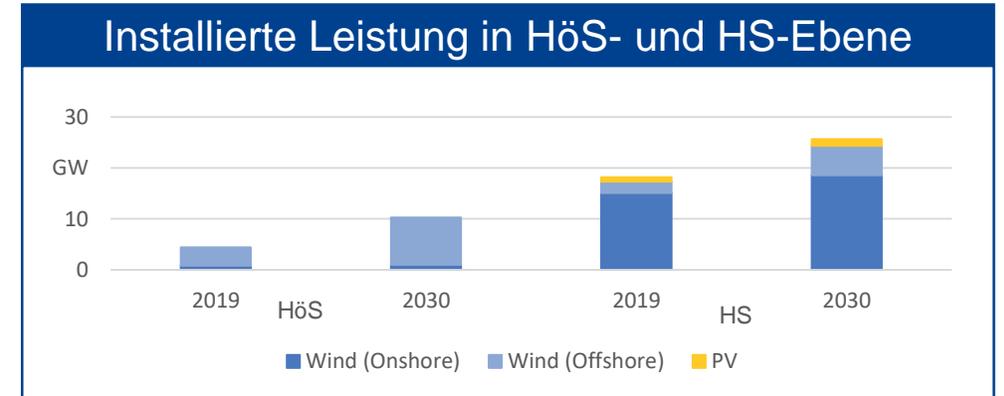


Einleitung

Hintergrund und Motivation

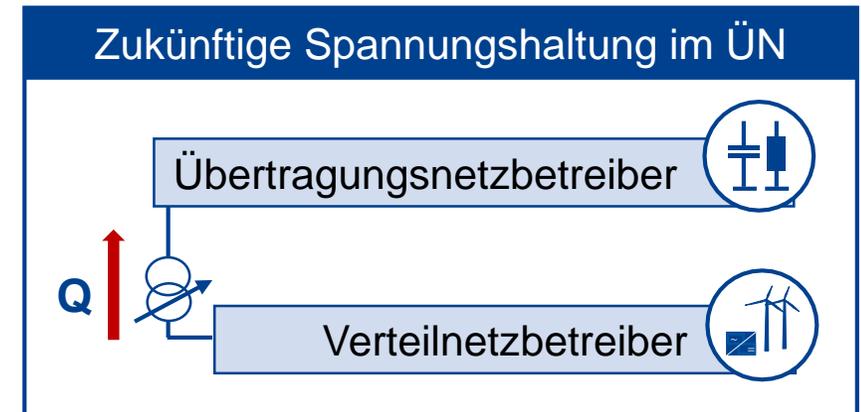
Spannungsebenen-übergreifende Spannungshaltung

- Zunehmende Anschlussleistung durch DEA auf VN-Ebene
- Q-Verhalten unterlagerter Netzebenen beeinflusst durch Q-Flüsse über Netzkupplentransformatoren das Q-Verhalten im überlagerten ÜN
- Spannungsebenen-übergreifende Nutzung von DEA mit Anschluss auf VN zur Spannungshaltung mit zunehmender Bedeutung



Forschungsfragen und Zielsetzung

- Können durch eine spannungsebenen-übergreifenden Spannungshaltung Blindleistungspotentiale aus der VN gehoben werden?
- Welchen Einfluss hat die Hebung von Q-Potentialen aus der VN-Ebene auf den Einsatz von Kompensationsanlagen im ÜN?



Einleitung

▶ **Analyse und Modellbildung**

Verfahrensansatz

Untersuchungen

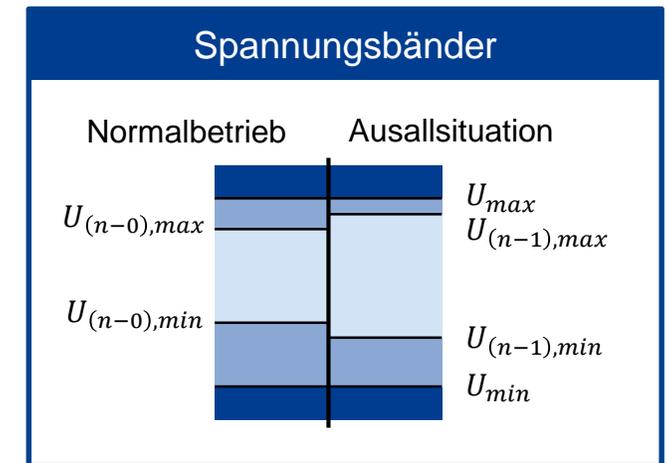
Zusammenfassung und Ausblick

Spannungshaltung im ÜN

- ÜNB haben gemäß EnWG die Pflicht einen sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlichen Übertragungsnetzbetrieb zu gewährleisten
- Systemdienstleistung „Spannungshaltung“ dient dazu die Spannung in den jeweiligen Netzen innerhalb des zulässigen Bereichs zu halten
- Im Normalbetrieb wird durch die statische Spannungshaltung das zulässige Spannungsband eingehalten

Grenzwertkonzept zur Spannungshaltung in HöS- und HS-Ebene

- Grenzwertkonzept gibt stationär zulässigen Betriebsbereich für den Normalbetrieb und für Ausfallsituationen vor
- Einhaltung eines Sicherheitsabstands zu unzulässigen Betriebsspannungen
- Innerhalb des stationär zulässigen Betriebsbereichs wird ein hohes und gleichmäßiges Spannungsniveau angestrebt
- Spannungsregelung in der HöS- und HS-Ebene durch Beeinflussung des Q-Verhaltens
 - Beeinflussung des Q-Verhaltens über netzplanerische und -betriebliche Maßnahmen
- ÜNB verantwortlich für Spannungshaltung im ÜN + zusätzlich Ausgleich von Blindleistungsbedarfen der unterlagerten Spannungsebenen
 - Zugriff aktuell nur auf betriebliche Maßnahmen im ÜN, zukünftig erweiterter Zugriff auf Betriebsmittel unterlagerter Spannungsebenen zur Nutzung weiterer Q-Potentiale denkbar



Spannungsregelnde Betriebsmittel mit Anschluss auf HöS- und HS-Ebene

- Beeinflussung des Q-Verhaltens im Rahmen der statischen Spannungshaltung über netzplanerische und -betriebliche Maßnahmen
- Blindleistung sollte zur Begrenzung der Verluste möglichst nah am Ort des jeweiligen Bedarfs bereitgestellt werden

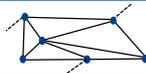
Q-Bereitstellung konventioneller Kraftwerke



Q-Bereitstellung durch DEA



Topologische Maßnahmen



Stufung von HöS/HS- oder HS-/MS-Transformatoren



Betrieb von Kompensationsanlagen/ HGÜ-Konvertern

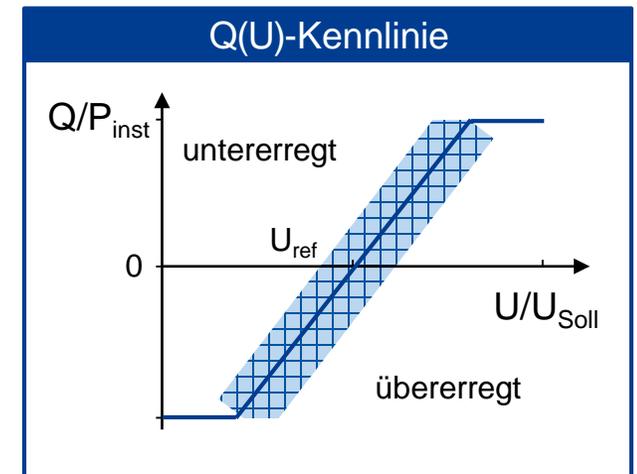
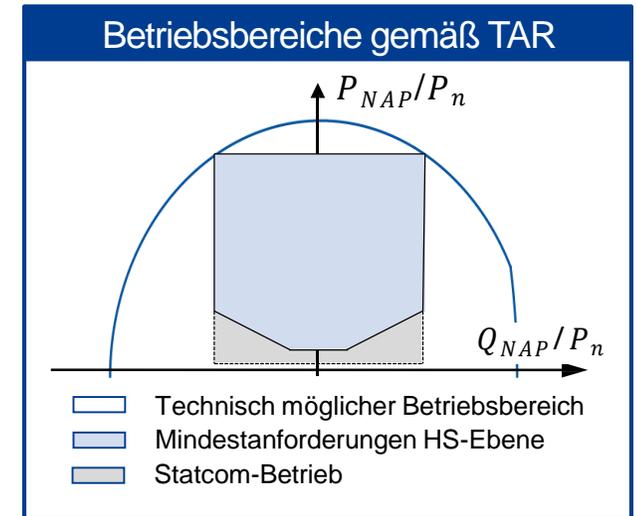


Q-Bereitstellung durch DEA

- Stationäre Betriebsgrenzen von DEA abhängig von Stromerzeugungsanlage und Netzanschluss
- Wechselrichteranschluss der DEA ermöglicht Q-Bereitstellung und Q-Regelung im Rahmen der Scheinleistungsgrenzen
- Q-Bereitstellungspotential arbeitspunkt- und spannungsabhängig und technisch begrenzt durch:
 - Maximale Stromtragfähigkeit, maximale Betriebsspannung, Stabilitätsgrenzen, minimal/maximal übertragbare mechanische Leistung

Einsatz von DEA zur Spannungshaltung und regulatorische Grenzen gemäß TAB

- Technische Anschlussregeln (TAR) bilden Gestaltungsspielraum innerhalb derer der NB seine Technischen Anschlussbedingungen (TAB) am Netzverknüpfungspunkt festlegen kann
- Ausgestaltung der TAR abhängig von der Spannungsebene
 1. Vorgabe eines Verfahrens zur Q-Bereitstellung: lokale Regelungskonzepte
 2. Vorgabe der Q-Kapazität: Vorgabe gemäß dem Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$
 - HS-Netzbetreiber können aus drei Verfahren der Erfüllung wählen
 - Einforderung der Q-Bereitstellung zwischen $\cos(\varphi) = 0,925$ (untererregt) und $\cos(\varphi) = 0,9$ (übererregt) möglich
- Q-Einsatz von DEA über lokale Spannungshaltung hinaus nutzbar
 - Reduzierung von Wirkleistungsverlusten durch Spannungsoptimierung
 - Technische wie auch informations- und kommunikationstechnische Voraussetzungen für koordinierte spannungsebenen übergreifende Spannungshaltung gegeben



Einleitung

Analyse und Modellbildung

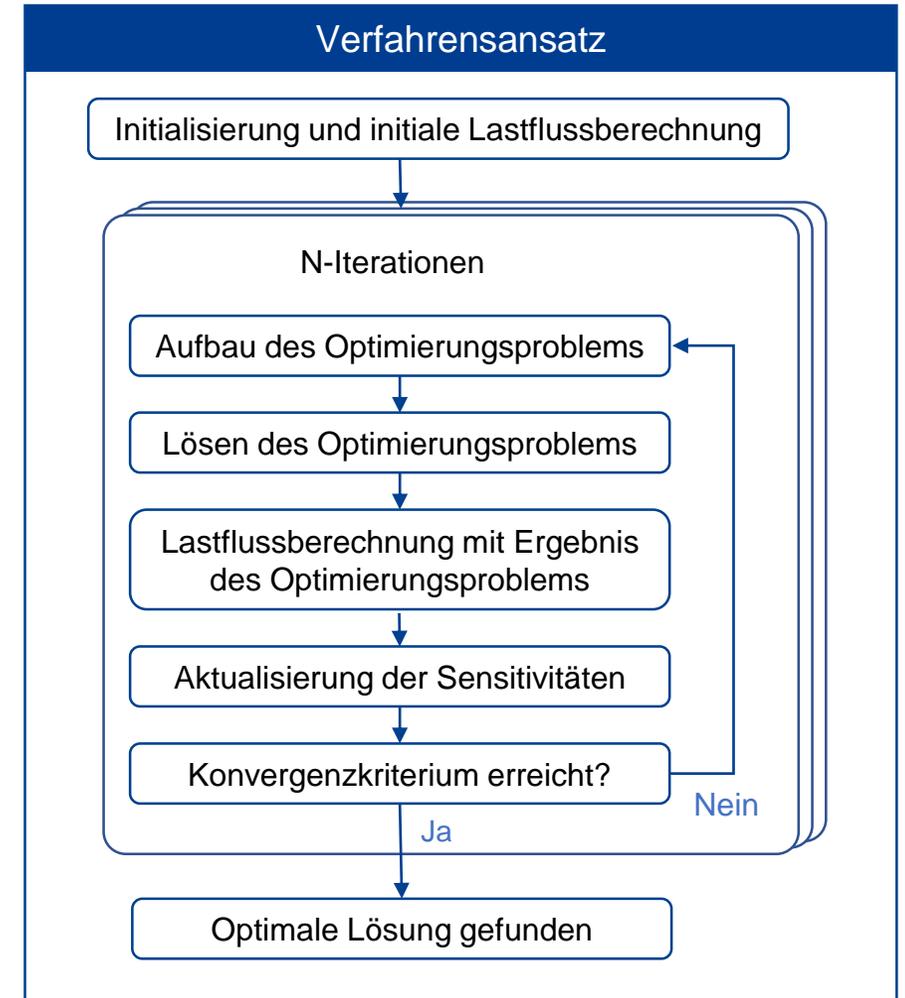
▶ **Verfahrensansatz**

Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

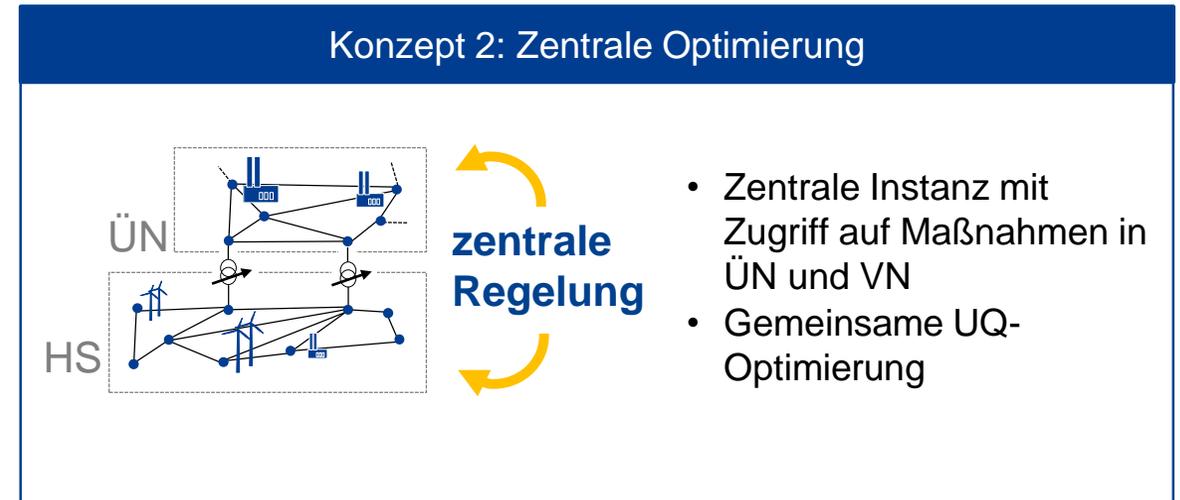
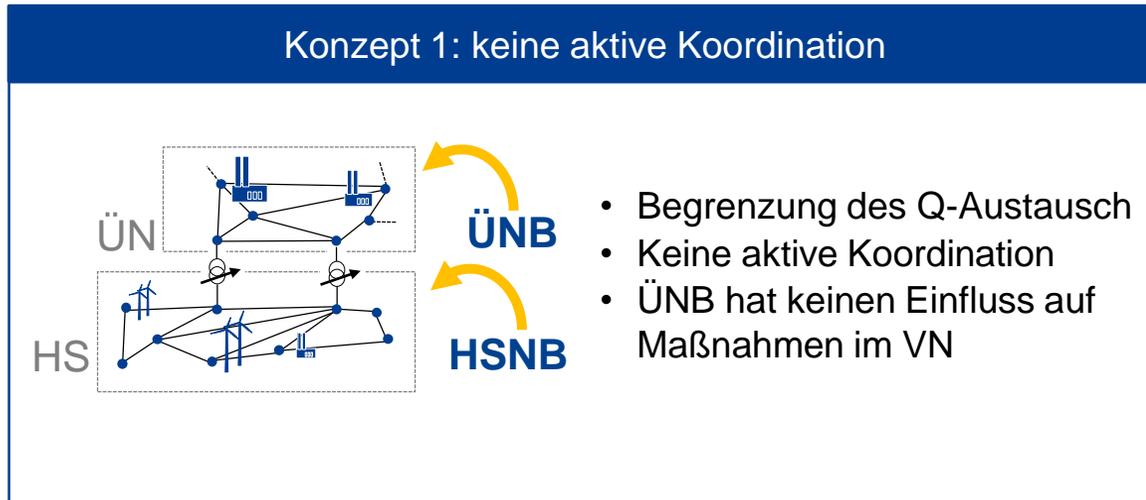
Spannungs-Blindleistungsoptimierung

- Minimierung der Wirkleistungsverluste bei Einhaltung der Lastflussgleichungen und Nebenbedingungen
- Sensitivitätsberechnung auf Basis inverser Jacobimatrix
- Linearisierte Abbildung aller Nebenbedingungen
- Lösung des Optimierungsproblems mittels sukzessiv linearer Programmierung
- Wahl eines iterativen Ansatzes mit adaptiver Schrittweitensteuerung, um Linearisierungsfehler auszugleichen und Konvergenzverhalten zu verbessern
- **Ziel: Bewertung der Potentiale der VN-Ebene zur netzdienlichen, effektiven Blindleistungsbereitstellung**
- **Ansatz: Formulierung von zwei vergleichenden Koordinationskonzepten zur Spannungshaltung**



Spannungsebenen-übergreifende Spannungshaltung

- Ziel: Aufzeigen der Hebung von Blindleistungspotentialen aus der VN-Ebene im Rahmen der Spannungshaltung
- Konzept 1: aktuelle Ausgestaltung, keine aktive Koordination
- Konzept 2: maximale Hebung von Blindleistungspotentialen durch zentrale Koordination



➤ Integration der Konzepte in Spannungs-Blindleistungsoptimierung

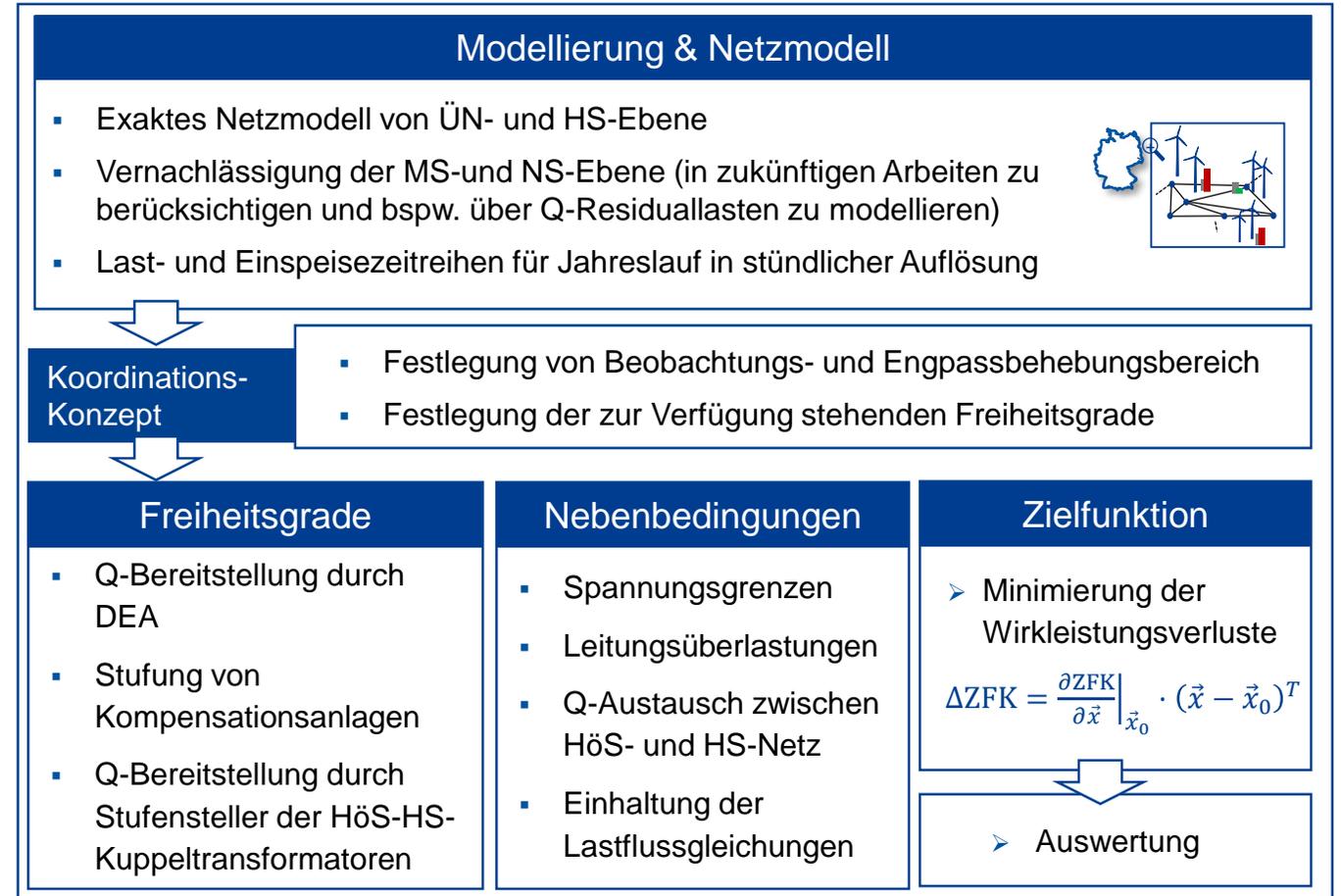
Implementierung der Konzepte

Konzept 1: keine aktive Koordination

- 1. UQ-Optimierung der HS-Ebene
 - Q-Bereitstellung durch DEA
 - Unterspannungsseitige Festlegung der Stufung der Netzkoppeltransformatoren
- Übergabe der resultierenden P- und Q-Flüsse an ÜN
- 2. UQ-Optimierung der HöS-Ebene
 - Q-Flüsse aus 1. Optimierungsfluss als Eingang
 - Optimierung der Freiheitsgrade im ÜN

Konzept 2: zentrale Koordination

- Gemeinsame UQ-Optimierung
- Aufweitung des Beobachtungs- und Engpassbehebungsbereichs auf alle Spannungsebenen
- Abbildung einer spannungsebenen-übergreifenden Spannungshaltung



Einleitung

Analyse und Modellbildung

Verfahrensansatz

▶ **Untersuchungen**

Zusammenfassung und Ausblick

Netzmodell und systemischer Betrachtungsbereich

- Zeitreihenbasierte Zeitpunkt Betrachtung auf Basis eingeschwungener, stationärer Systemzustände
- Netzmodell basierend auf Simbench-Netz: 1-EHVHV-mixed-1-0-sw
- Exakte, detailgetreue Modellierung der HöS- und HS-Ebene und dessen Netznutzung
 - Vernachlässigung der Abbildung von MS- und NS-Netzen

Anpassungen am Netzmodell

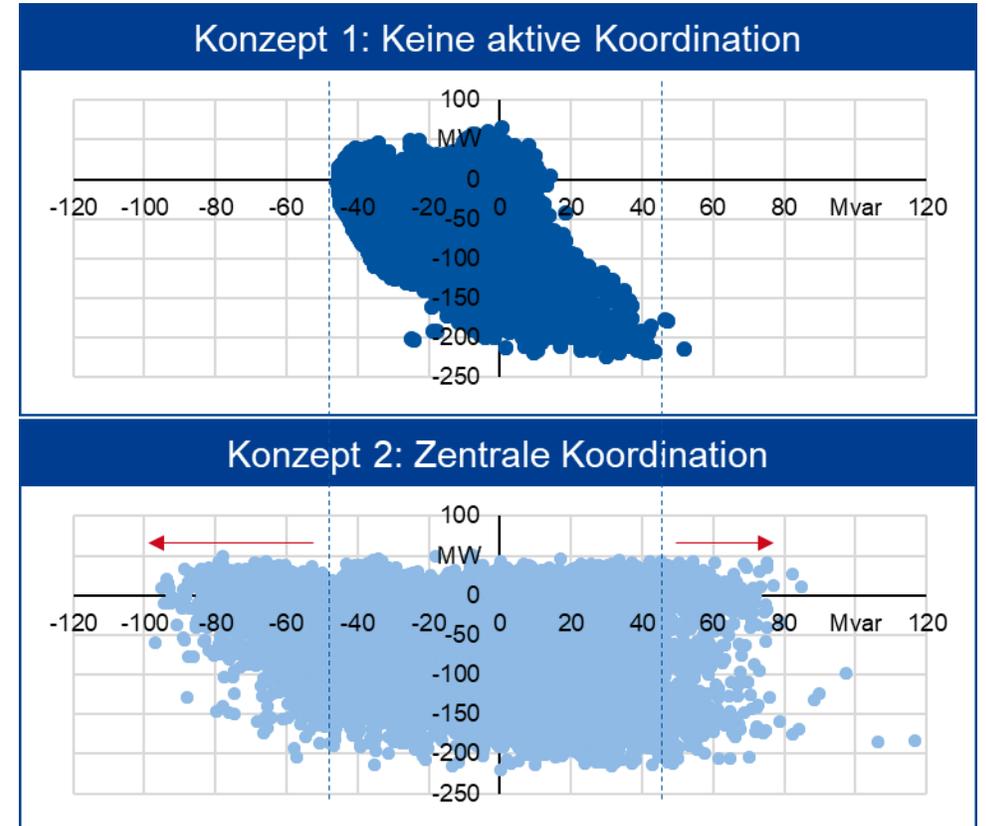
- Erweiterung des Netzmodells um Blindleistungsgrenzen der Einspeisungen gemäß TAB in Abhängigkeit der Spannungsebene
 - 380-kV-Ebene: $\cos(\varphi) = 0,95$ 220-kV-Ebene: $\cos(\varphi) = 0,95$ 110-kV-Ebene: $\cos(\varphi) = 0,9$
- Positionierung von Kompensationsanlagen gemäß Standarddimensionierung auf 220-kV- und 380-kV-Ebene über Heuristik
 - Virtueller Zubau von Kompensationsanlagen an allen Knoten
 - Einsatzmöglichkeit der Kompensationsanlagen zum Erreichen eines konvergenten Grundlastflusses
 - Zubau Entscheidung über Auswertung des Einsatzes der virtuellen Kompensationsanlagen über alle Netznutzungsfälle
 - Drosseln: 60 Mvar, Kondensatoren: 100 Mvar

Untersuchungen

Blindleistungsflüsse auf den Kuppeltransformatoren

Exemplarische Untersuchung der Blindleistungsflüsse auf den Kuppeltransformatoren

- Flussrichtung von HöS- in unterlagerte HS-Ebene definiert
- Negativer Blindleistungsfluss wirkt spannungshebend auf das ÜN, positiver Blindleistungsfluss wirkt spannungssenkend auf das ÜN
- Deutliche Hebung des Q-Austauschs durch spannungsebenen-übergreifend koordinierten Blindleistungsaustausch
- Im Besonderen spannungshebende Wirkung der 110-kV-Ebene auf das ÜN

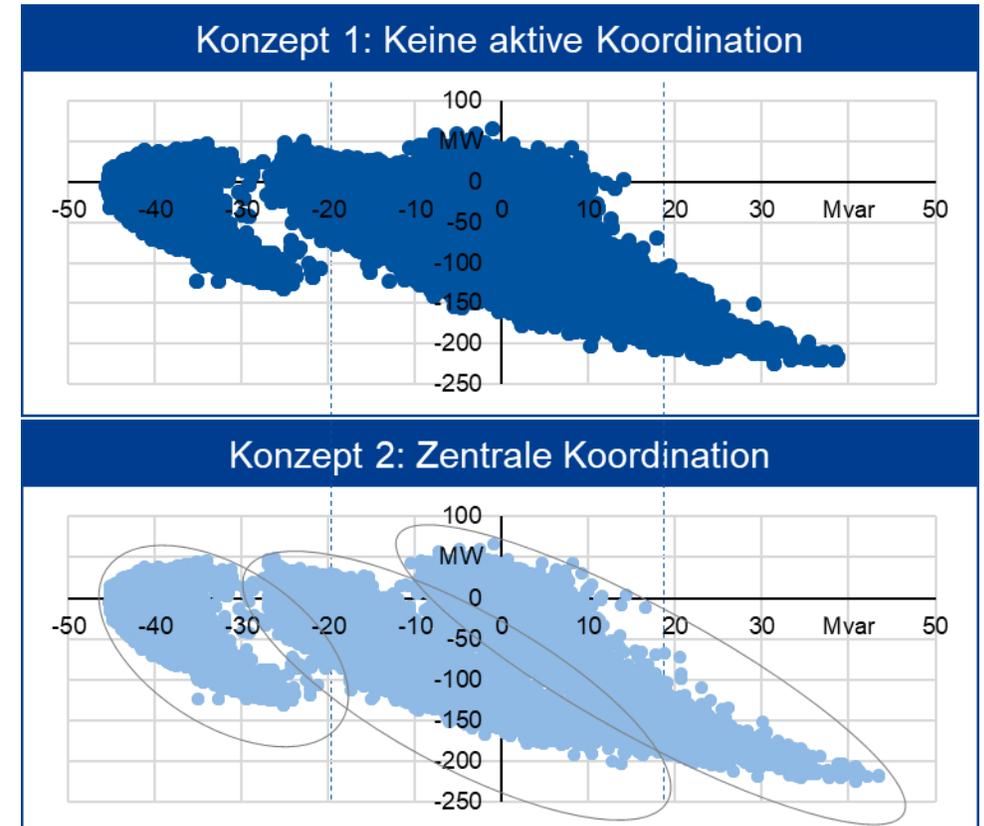


Untersuchungen

Blindleistungsflüsse auf den Kuppeltransformatoren

Exemplarische Untersuchung der Blindleistungsflüsse auf den Kuppeltransformatoren

- Untersuchung der Sensitivität der Kostenparametrierung der Stufung der Netzkuppeltransformatoren auf den resultierenden Q-Austausch
 - Erhöhung des Kostenfaktors um den Faktor: 100
 - Interpretation des Kostenterms als Pönale auf den Q-Austausch über Kuppeltransformatoren
- Erkennbare Cluster der PQ-Wolken in Abhängigkeit des Standorts
- Geringer Einfluss der Kostenparametrierung auf das Konzept 1
 - Q-Austausch bereits vorher stark begrenzt
- Hohe Sensitivität der Kosten auf den Q-Austausch bei zentraler Koordination
- Hebung von Q-Potentialen durch spannungsebenen-übergreifend koordinierten Blindleistungsaustausch kostenabhängig



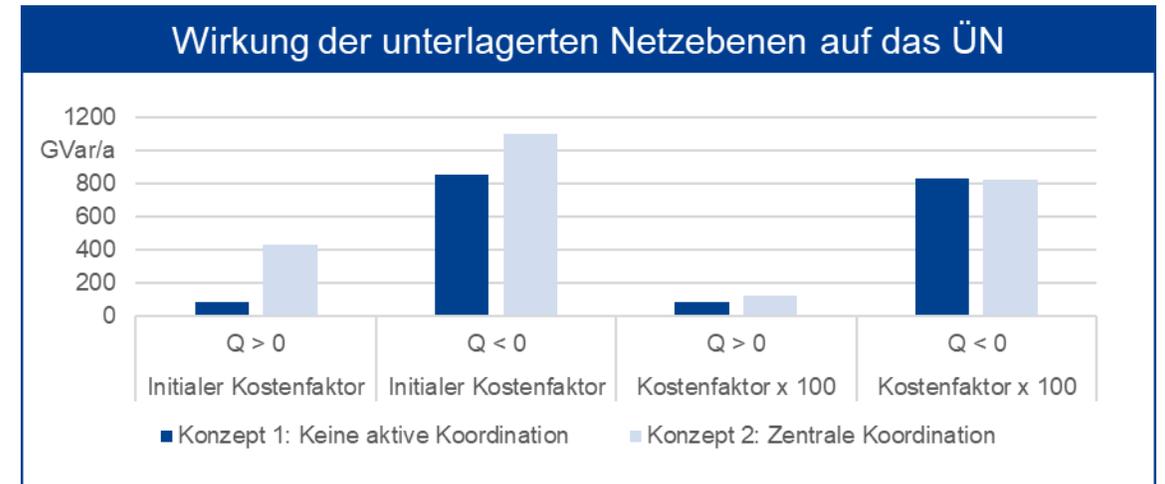
- Flussrichtung von HöS- in unterlagerte HS-Ebene
- Neg. Q wirkt spannungshebend auf ÜN, pos. Q wirkt spannungssenkend auf das ÜN

Untersuchungen

Q-Bereitstellung durch DEA und Einsatz von Kompensationsanlagen

Q-Beeinflussung im ÜN durch VN-Ebene

- HS-Ebene mit vorwiegend spannungshebender Wirkung auf das ÜN
- Zentrale Koordination führt zu massiver Hebung von Q-Potentialen:
 - Spannungssenkende Wirkung: Anstieg um Faktor 5
 - Spannungshebende Wirkung: Anstieg um Faktor 1.3
- Starke Begrenzung des Q-Austauschs über Kostenparametrierung
 - Leichte Senkung der spannungshebenden Wirkung aus der HS-Ebene



➤ Neg. Q wirkt spannungshebend auf ÜN, pos. Q wirkt spannungshebend

Einsatz von DEA und Kompensationsanlagen

- Zentrale Koordination führt zu einer hohen Anhebung induktiver und kapazitiver Q-Bereitstellung aus DEA in 110-kV-Ebene bei gleichzeitiger Reduktion der Q-Bereitstellung aus DEA mit Anschluss in HöS-Ebene
- Untersuchungen zeigen keine signifikanten Auswirkungen der Koordinationskonzepte auf die Stufung der Kompensationsanlagen
 - Aktuell kein Anreiz in der Optimierung Kompensationsanlagen auszuschalten bzw. DEA bevorzugt einzusetzen
 - Weiterentwicklungsbedarf des Verfahren: Zukünftige Diskussion um Trade-Off zwischen Zubau von Kompensationsanlagen im ÜN oder erweiterter Q-Bereitstellung aus DEA

Einleitung

Analyse und Modellbildung

Verfahrensansatz

Untersuchungen

▶ Zusammenfassung und Ausblick

Motivation und Ziel der Arbeit

- Zunehmende Q-Bedarfe im ÜN könnten zukünftig durch DEA mit Anschluss in der VN-Ebene gedeckt werden

Ziel der Forschungsvorhabens

Untersuchung der Hebung von Blindleistungspotentialen aus der Verteilnetzebene durch die Implementierung einer spannungsebenen-übergreifenden Blindleistungsoptimierung

Verfahrensansatz und Ergebnisse

- Implementierung einer spannungsebenen-übergreifenden Spannungs-Blindleistungsoptimierung basierend auf einer sLP
- Bestimmung des Einflusses der unterlagerten VN-Ebene durch Vergleich von zwei Konzepten zur Koordination des Q-Austausches
 - 1. Konzept: keine aktive Koordination
 - 2. Konzepte: Zentrale Koordination
- Deutliche Hebung des Q-Austauschs durch spannungsebenen-übergreifend koordinierte Spannungshaltung
- Im Besonderen spannungshebende Wirkung der 110-kV-Ebene auf das ÜN

Ausblick & Diskussion

- Erweiterung des Verfahrens um einen Anreiz zum Ausschalten von Kompensationsanlagen
- Bewertung des Trade-Offs zwischen Zubau von Kompensationsanlagen und erweiterter Q-Bereitstellung aus DEA
- Analyse von Sensitivitäten der aktuellen Q-Grenzen von DEA aus TAB auf Ausbauentcheidung von Kompensationsanlagen im ÜN

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



M.Sc. Christian Ziesemann

RWTH Aachen University

Institut für Elektrische Anlagen & Netze,
Digitalisierung und Energiewirtschaft

Übertragungsnetze und Energiewirtschaft

Tel. +49 (0) 241 / 80 92473

c.ziesemann@iaew.rwth-aachen.de

Kurzlebenslauf

Nachname: Ziesemann

Vorname: Christian

Email: c.ziesemann@iaew.rwth-aachen.de

Tel: +49 241 80 92473



Forschungsschwerpunkt und Hintergrund

Christian Ziesemann arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen University.

Sein Forschungsschwerpunkt ist die Spannungshaltung in Höchst- und Hochspannungsnetzen. Hierbei beschäftigt er sich um Fragestellungen rund um die zukünftige Beschaffung von Blindleistung für das Übertragungsnetz.

Vor seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAEW studierte Christian Ziesemann Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Elektrische Energietechnik an der RWTH Aachen University.