



Foto: Martin Braun

# Netzwerkreduktionsverfahren zur Beschleunigung weiträumiger Energiesystemoptimierungsmodellen

Claire LAMBRIEX\*, Albert MOSER

17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz

# Hintergrund und Motivation

## Entwicklungen des Energiesystems zur Erreichung der Klimaziele

- Dezentralisierung
  - Schaffung gemeinsamer europäischen Elektrizitätsbinnenmarkt
  - Sektorenkopplung
- Zunehmende Komplexität des Energiesystems

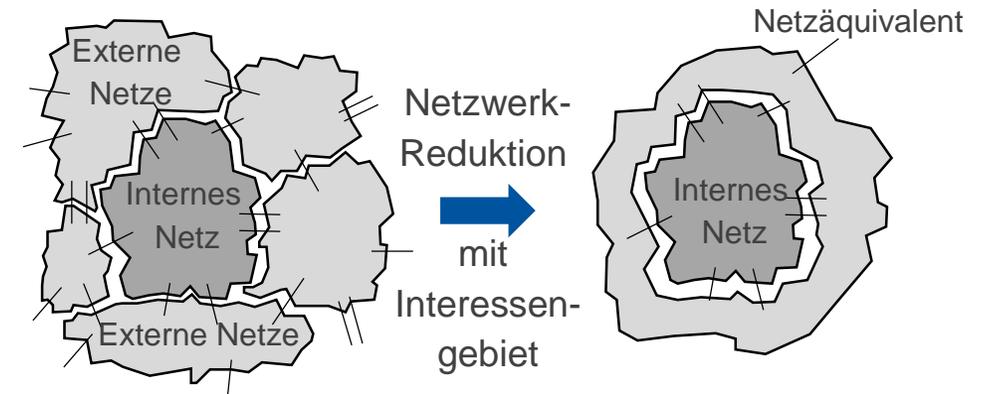
## Energiesystemoptimierungsmodelle

- Etablierte Instrumente zur Entscheidungsunterstützung
  - Zunehmende mathematische Komplexität
- Notwendigkeit von modellbasierten Beschleunigungstechniken

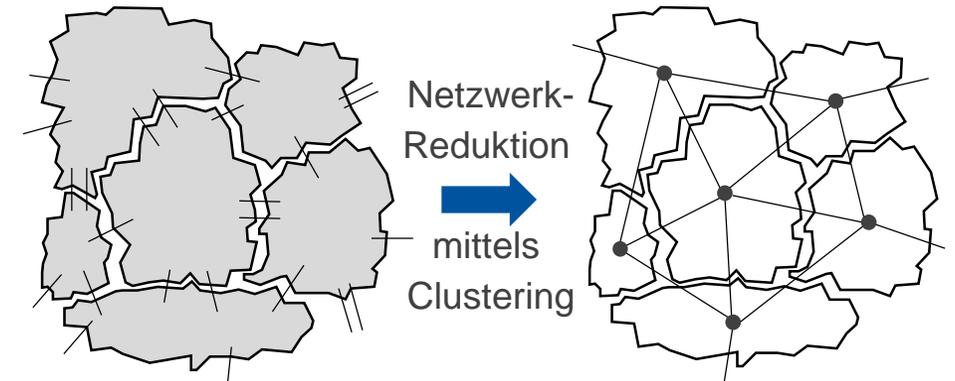
## Netzwerkreduktion

- Räumliche Aggregation von Netzen
- Hauptsächlich zwei Arten von Netzwerkreduktionsverfahren

→ Entwicklung eines Netzwerkreduktionsverfahrens zur Beschleunigung weiträumiger Energiesystemoptimierungsmodelle bei möglichst genauer Abbildung des elektrischen Verhalten eines Netzes



Nachteil: Abbildung von Leistungsflüsse nur im Interessengebiet



Nachteil: inkorrekte Abbildung des physikalischen Verhalten

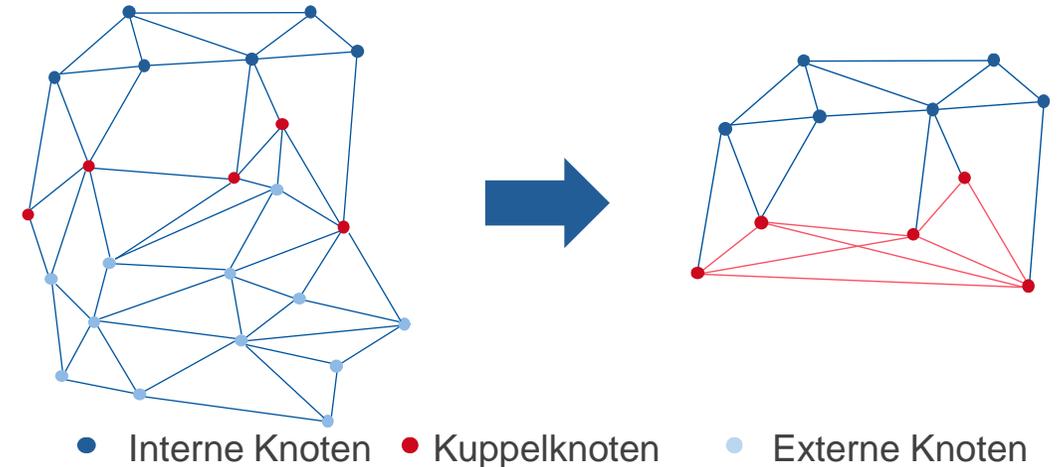
### Ward-Netzwerkreduktion

- Ersetzen externes Netz ( $E$ ) durch Ersatzleitungen zwischen Kuppelknoten ( $K$ ) berechnet aus Admittanzmatrix
- Suszeptanz Ersatzleitungen ( $B$ : Suszeptanzmatrix):

$$\Delta B_{KK} = -B_{KE} \cdot B_{EE}^{-1} \cdot B_{EK}$$

- Ersatzspeisungen ( $P$ : Wirkleistungspeisung):

$$\Delta P_K = -B_{KE} \cdot B_{EE}^{-1} \cdot P_E$$



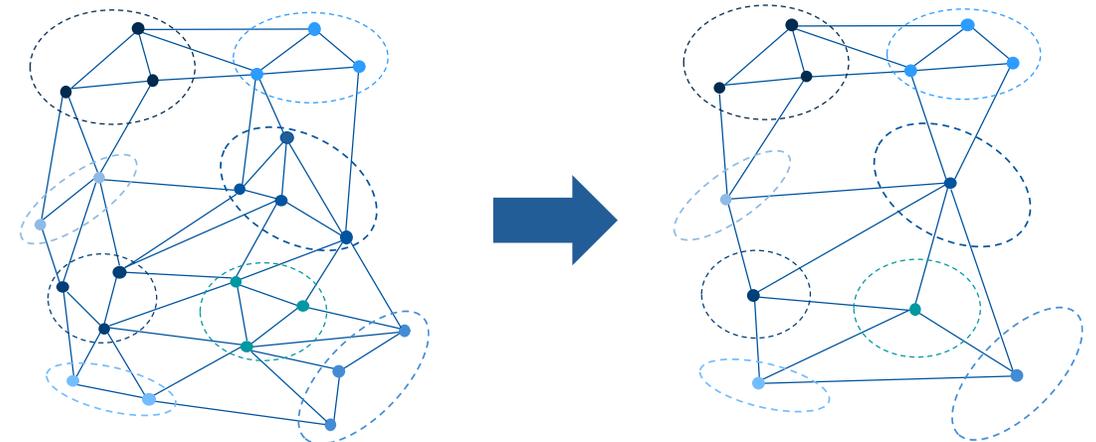
### Cluster-Netzwerkreduktion

- Einteilung der Knoten in Cluster, Aggregation von Knoten innerhalb und Leitungen zwischen externe Cluster
- Ersatzleitung zwischen Cluster  $i$  und  $j$

- Suszeptanz:  $B_{i,j} = \sum_{l \in SL_{i,j}} B_l$

- Übertragungskapazität:  $P_{i,j}^{max} = \sum_{l \in SL_{i,j}} P_l^{max}$

- Ersatzspeisungen Cluster  $k$ :  $P_k = \sum_{i \in C_k} P_i$



- Kombination aus Ward- und Clusternetzwerkreduktion
  - Internes Netz: wie im Originalnetz
  - Externes Netz: Cluster-Netzwerkreduktion
  - Übergang: Abwandlung des Ward-Verfahrens

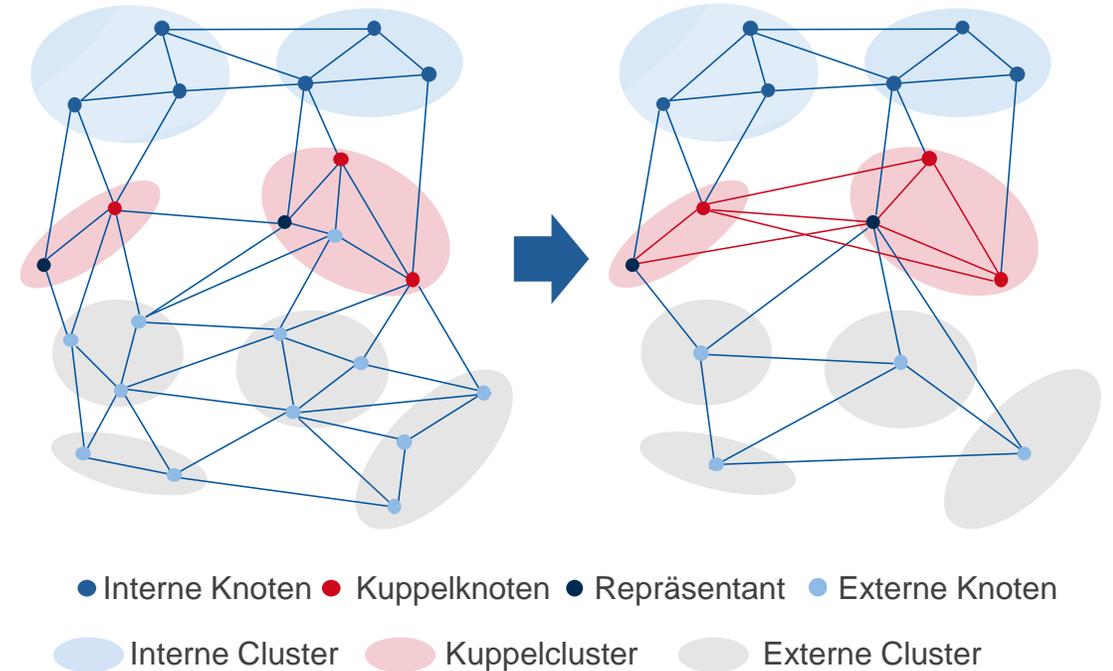
1. Hinzufügen von Repräsentanten ( $R$ ) an Menge der Kuppelknoten: ( $K' = K \cup R$ )

2. Bestimmung von Ersatzleitungen:  $\Delta B_{K'K'} = -B_{K'E} \cdot B_{EE}^{-1} \cdot B_{EK'}$

3. Ward-Ersatzleitungen nur für tatsächliche Kuppelknoten:  $\Delta B_{KK} \subseteq \Delta B_{K'K'}$

4. Bestimmung aller anderen Leitungen mittels Cluster-Netzwerkreduktion

5. Anschluss aller Einspeisungen an Repräsentanten



### Energiesystemoptimierungsmodell

#### Betriebsoptimierung des Stromsystems

- Freiheitsgrade
  - Einsatz Kraftwerke
  - Abregelung EE
  - Einsatz Phasenschiebertransformatoren
  - Einsatz DC-Leitungen
  - Einsatz Stromspeicher
- Nebenbedingungen
  - Knotenbilanz
  - Speicherkontinuität
  - Betriebsgrenzen von Anlagen und Betriebsmitteln
- Zielfunktion: Minimierung der Erzeugungskosten des Stromsystems

Einspeisungen  
und  
Entnahmen



### Lastflussberechnung

#### Untersuchung nichteingehaltener Betriebsmittelgrenzen

- Slack-Variablen für Betriebsmittel:

$$-P_l^{max} - P_l^{Slack,neg} \leq P_{l,t} \leq P_l^{max} + P_l^{Slack,pos}$$

$$\forall l \in \{AC - Leitungen \cup Transformatoren\}$$

Ergebnisse pro  
Netzwerkreduktionsverfahren

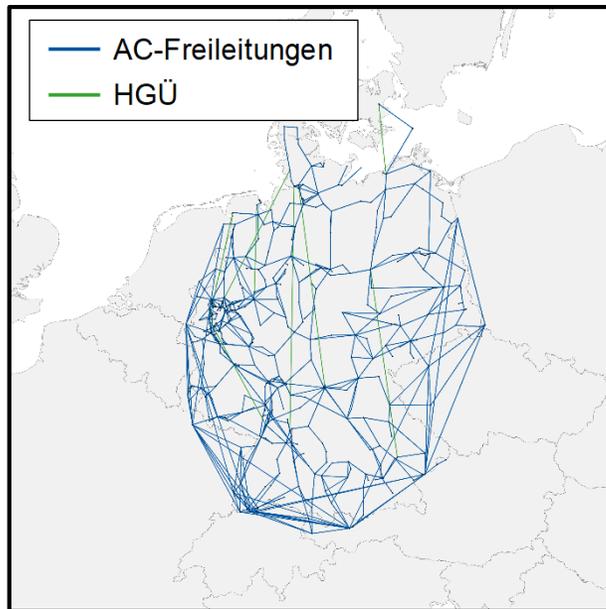
### Bewertung und Vergleich

#### Kriterien

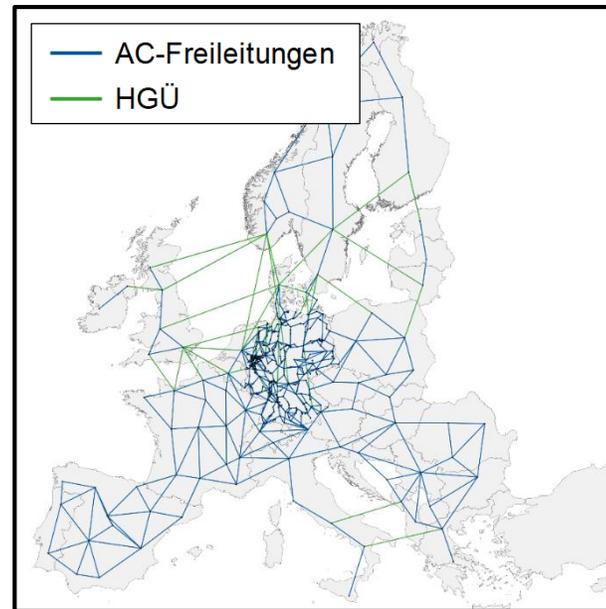
- Slackeinsatz Betriebsmittel
- Rechenzeit

# Exemplarische Untersuchungen

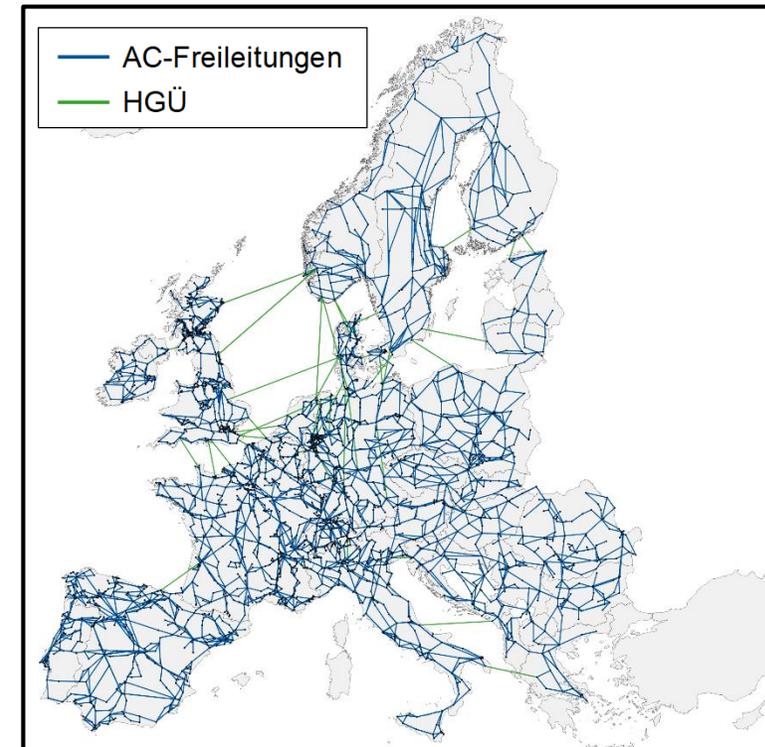
- Betrachtungsbereich: Europa
- Szenario: Global Ambition 2040<sup>1</sup>
- Betriebsoptimierung exemplarisch für 1 Tag



**Ward-Netzwerkreduktion**



**Cluster-Netzwerkreduktion**

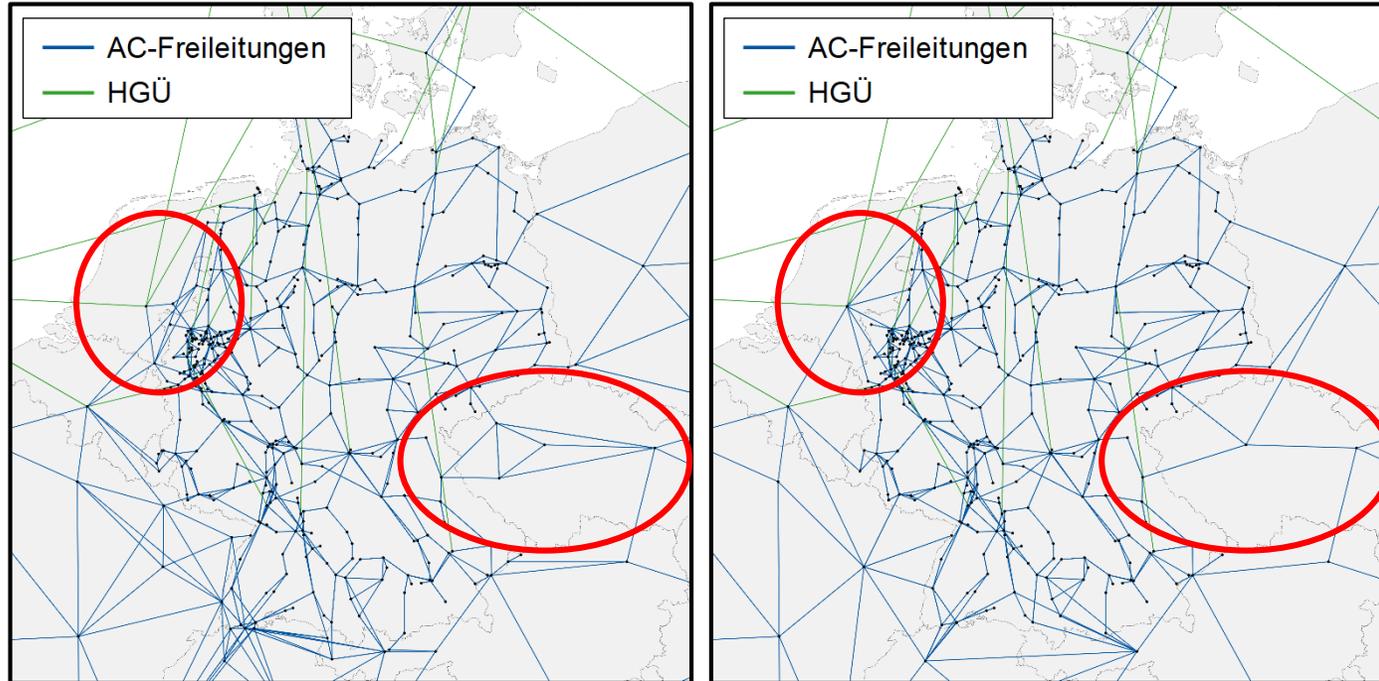


**Originalnetz**

<sup>1</sup>European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), “Ten-Year Network Development Plan 2020 – Main Report“, 2021

# Exemplarische Untersuchungen

## Ersatznetze

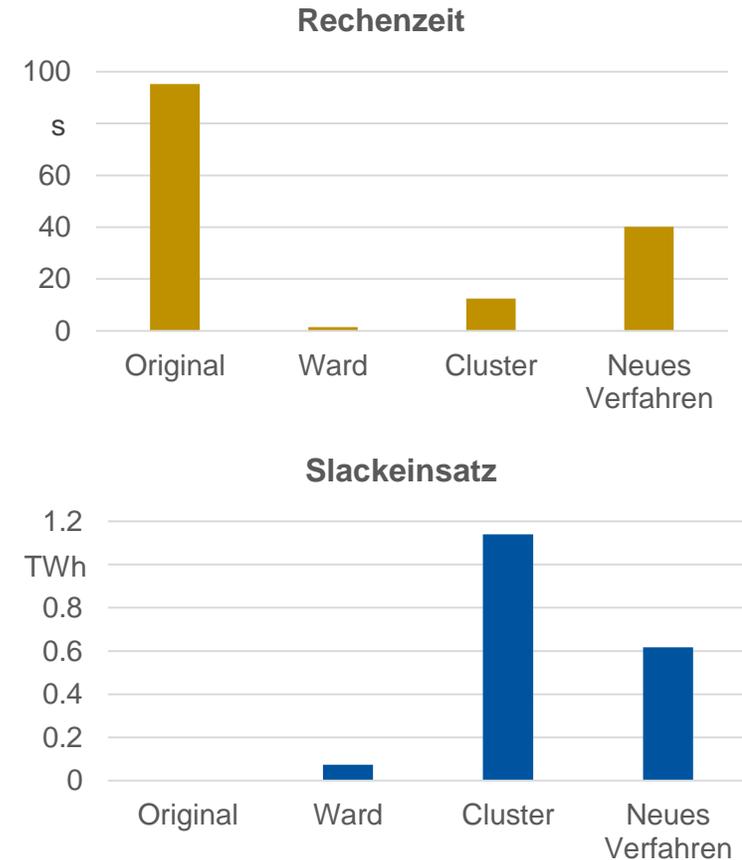


Neues Verfahren

Cluster-Netzwerkreduktion

- Alle Netzwerkreduktionsverfahren verringern die Rechenzeit
- Ward liefert beste Ergebnisse, aber keine Analyse im externen Netz möglich
- Weniger Überschreitungen vom Betriebsmittelgrenzen im neuen im Vergleich zum Cluster-Verfahren

## Ergebnisse



# Zusammenfassung

---

## Motivation

- Steigende Komplexität des Energiesystems führt zu steigender mathematischer Komplexität von Energiesystemoptimierungsmodellen
- Bestehende Netzwerkreduktionsverfahren nicht gut geeignet für weiträumige Energiesysteme

## Methodik

- Entwicklung eines Netzwerkreduktionsverfahrens, das Eigenschaften der Ward- und Cluster-Netzwerkreduktion kombiniert
- Vergleich der drei Netzwerkreduktionsverfahren anhand von Rechenzeit und Überschreitungen von Betriebsmittelgrenzen

## Exemplarische Ergebnisse

- Ward-Netzwerkreduktionsverfahren liefert besten Ergebnisse, bietet aber nicht die Möglichkeit, das gesamte Netz zu analysieren
  - Neues Netzwerkreduktionsverfahren führt zu einem besseren Ergebnis in Bezug auf Einhaltung der Betriebsmittelgrenzen als Clusternetzwerkreduktionsverfahrens
- Neues Netzwerkreduktionsverfahren gut geeignet zur Beschleunigung weiträumiger Energiesystemoptimierungsmodelle

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Claire Lambriex

RWTH Aachen University  
Institut für Elektrische Anlagen & Netze,  
Digitalisierung und Energiewirtschaft  
Schinkelstraße 6, 52056 Aachen

Tel. +49 (0) 241 / 80 92475

[c.lambriex@iaew.rwth-aachen.de](mailto:c.lambriex@iaew.rwth-aachen.de)

[www.iaew.rwth-aachen.de](http://www.iaew.rwth-aachen.de)