



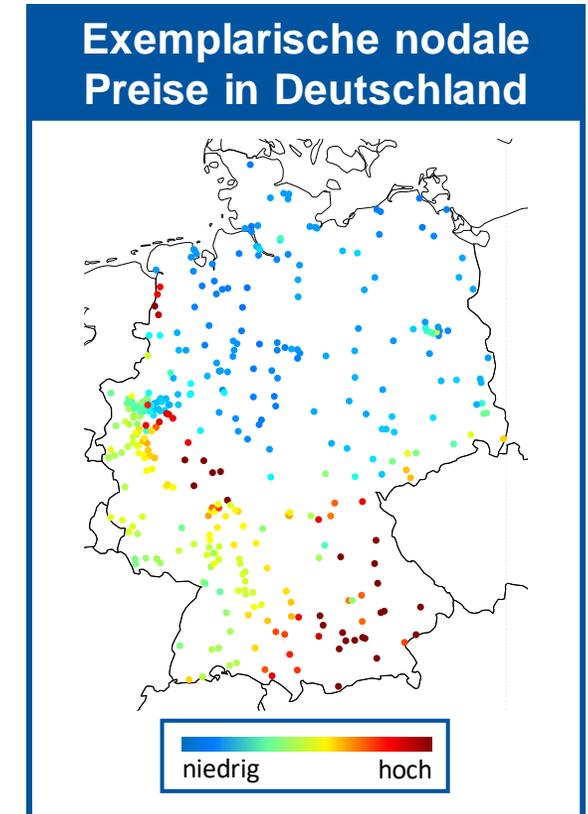
Auswirkung von Power-to-Gas Anlagen auf nodale Preise in gekoppelten Strom- und Gasnetzen

Lukas LÖHR*, Christian FESTER*, Albert MOSER

16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria

Nodale Preise in Strom- und Gastransportnetzen

- Abkehr von Leitbild „All Electric Society“:
 - Zunehmende EE*-Über- und Unterdeckung
 - Steigende Netzengpässe bei verzögertem Netzausbau
- **Nodale Preise als Indikator für fehlende Flexibilität**
 - Nodal Pricing Teil des Strommarktdesigns bspw. in PJM Interconnection Region (USA)
 - In Europa politisch schwer umsetzbar
 - Indikator für Bildung geeigneter Gebotszonenzuschnitte
- Kopplung des Strom- und Gassystems als diskutierte Lösungsoption
 - Power-to-Gas und Gaskraftwerke als Kopplungsanlagen beider Transportnetze
 - Erschließung der Transport- und Speicherkapazität des Gassystems
- **Erweiterung des Konzepts nodaler Preise auf gekoppelte Strom- und Gasnetze**
- **Wechselwirkungen nodaler Preise bidirektional gekoppelter Netze**



Bestimmung nodaler Preise

Nodalen Preise stellen lokale Werte einer Energieeinheit bzw. dessen Lastdeckung an einem Netzknoten dar. Der Preis besteht aus Erzeugungskosten der Energieeinheit und deren Übertragungskosten zum Netzknoten.

Übertragungsnetz

Nodale Preise:

- Duale Variablen der Kirchhoff'schen Knotengleichung im Übertragungsnetz

Leistungsfluss:

- Trigonometrisch, quadratische Beziehungen der Zustandsvariablen P, Q, U und θ (stationär)

Linearisierung:

- Wirkleistungsfluss in Übertragungsnetzen mit geringem Fehler

Fernleitungsnetz

Nodale Preise:

- Duale Variablen der Kirchhoff'schen Knotengleichung im Fernleitungsnetz

Leistungsfluss:

- Quadratische, nichtkonvexe Beziehungen der Zustandsvariablen \dot{V}_n und p (stationär)

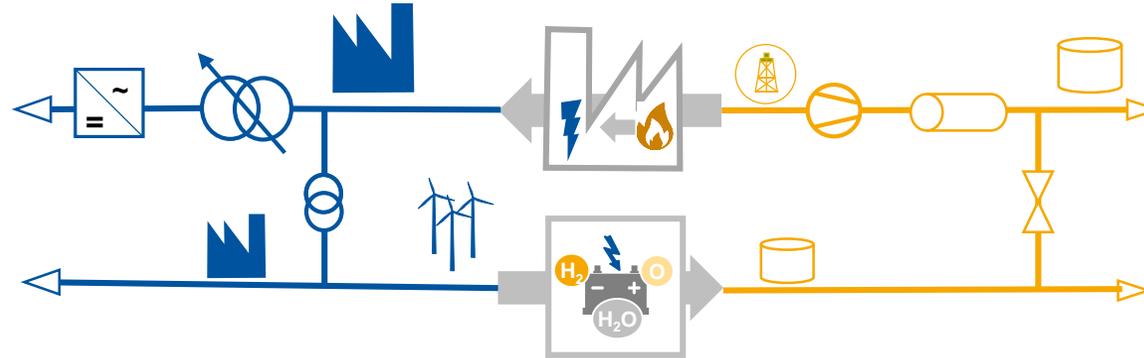
Linearisierung:

- Network-Flow-Modellierung unter Annahme vollständiger Steuerbarkeit durch Verdichter- und Mengenregelanlagen

Betriebsoptimierung Strom und Gas

Freiheitsgrade Strom

- Einsatz Kraftwerke
- Abregelung EE
- Einsatz Phasenschieber-
transformatoren
- Einsatz DC-Leitungen
- Einsatz Stromspeicher
- Einsatz Gas-to-Power
- Einsatz Power-to-Gas



Freiheitsgrade Gas

- Importe
- Einspeisung Biogas
- Gasfluss über Leitungen,
Verdichter, Regler
- Einsatz Gasspeicher
- Einsatz Power-to-Gas
- Einsatz Gas-to-Power

Nebenbedingungen

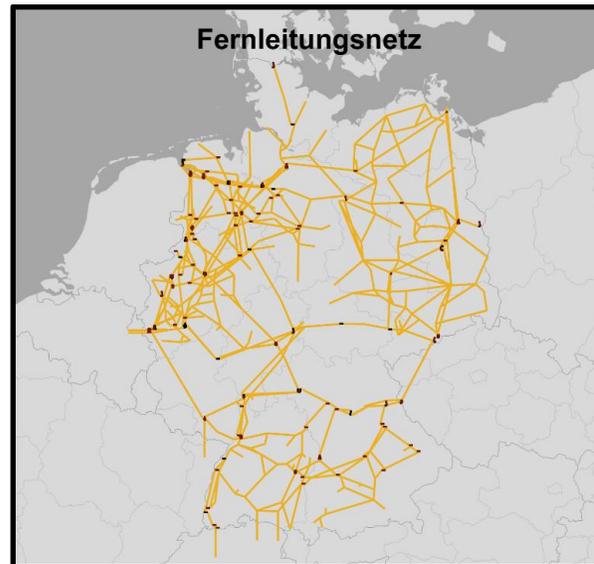
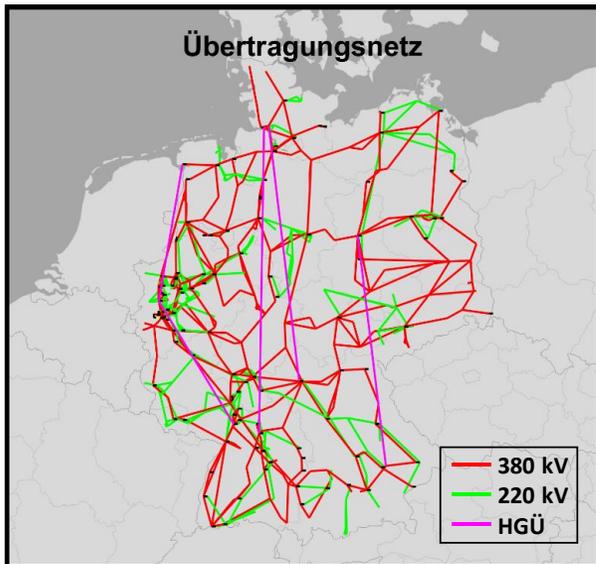
- **Knotenbilanzen Strom und Gas**
- Umwandlung Strom \leftrightarrow Gas
- Speicherkontinuität
- Betriebsgrenzen von Anlagen und Betriebsmitteln

Zielfunktion: Minimierung der Erzeugungs- und Netzkosten des gekoppelten Energiesystems

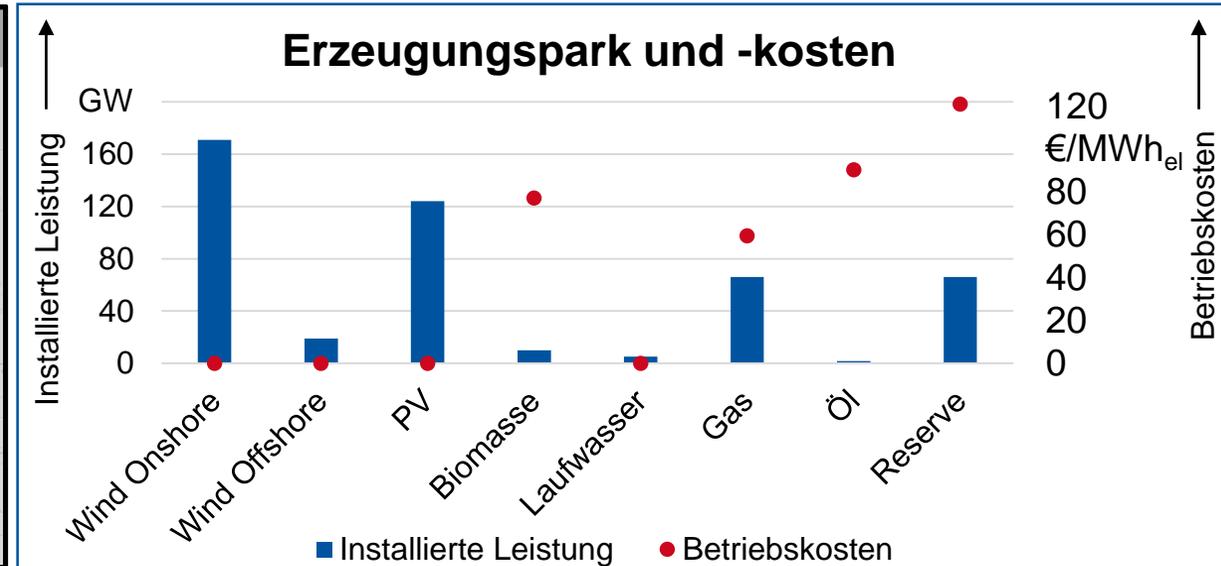
Zentrale Annahme: Volkswirtschaftlicher, integrierter Einsatz von Erzeugung und Netz sowie des Strom- und Gassystems

Untersuchungsprogramm

- Untersuchungsszenario basierend auf TM 80% Szenario der dena-Leitstudie *Integrierte Energiewende*
- Zukunftsszenarien für Übertragungs- und Fernleitungsnetz ~ 2030
- Importpreise zwischen $28,72 - 31,82 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{th}}$



Versorgungsaufgabe	Endenergieverbrauch	Jahreshöchstlast
Übertragungsnetz	568 TWh _{el} /a	101 GW _{el}
Fernleitungsnetz	499 TWh _{th} /a	119 GW _{th}



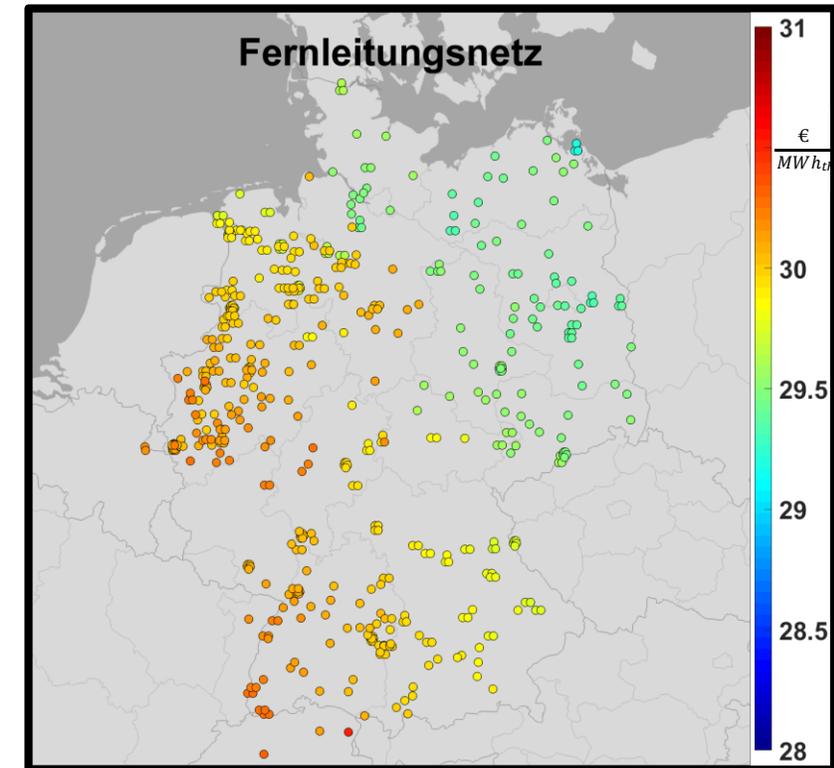
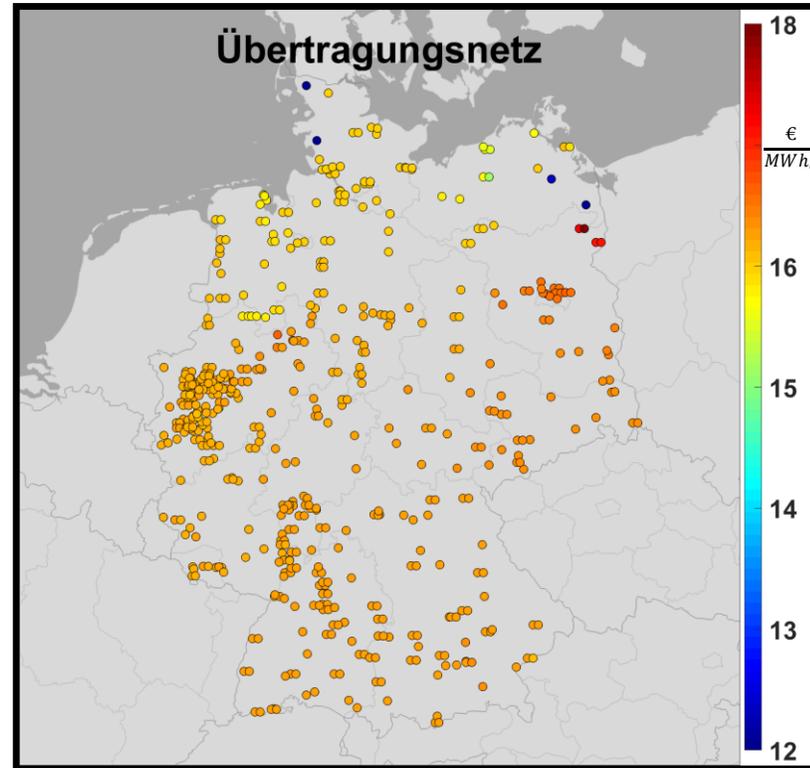
Nodale Durchschnittspreise (ohne Power-to-Gas)

Strom

- Durchschnitt: $16,18 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$
- Niedrigere Preise als im Gas
- Wenige Knoten stechen durch Netzengpässe hervor

Gas

- Durchschnitt: $29,88 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{th}}$
- Vergleichsweise konstante nodale Gaspreise
- Höhere Preise im Südwesten durch höhere Transport- und Importkosten



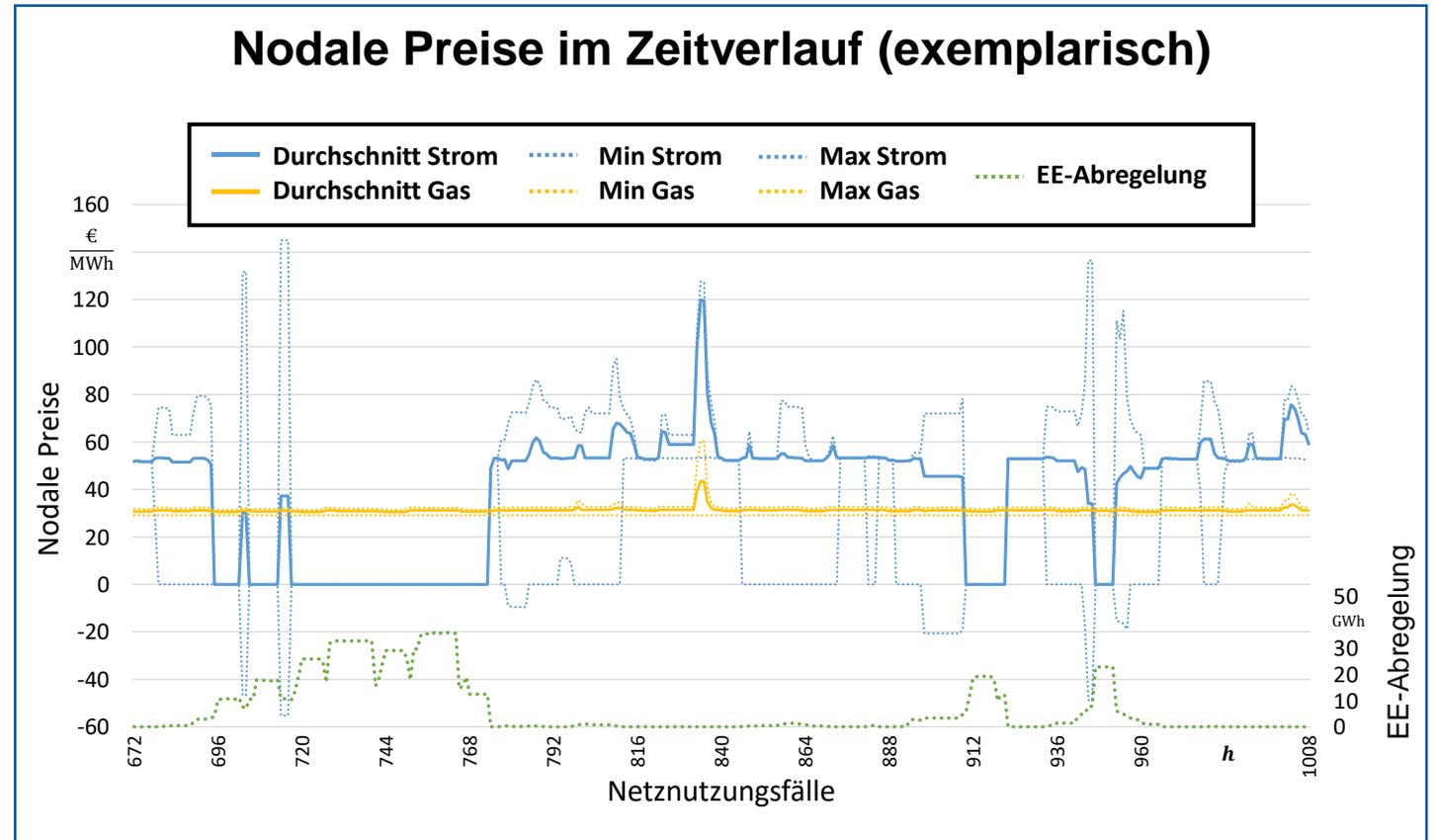
Nodale Preise im Zeitverlauf (ohne Power-to-Gas)

Strom

- In Zeiten von EE-Abregelung sind Preise häufig bei Null (EE-Überschuss)
- Stark positive und negative Preise bei Netzenpässen

Gas

- Vergleichsweise konstante nodale Gaspreise
- Geringe Schwankungen zwischen minimalem und maximalem Preis zu einem Zeitpunkt
- Selten signifikanter Anstieg der Knotenpreise



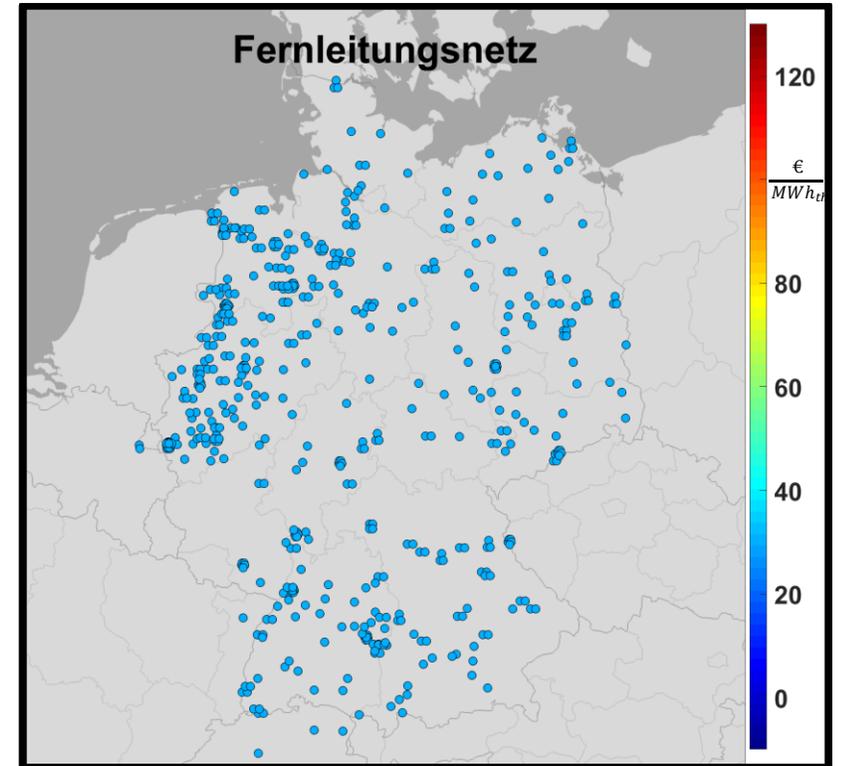
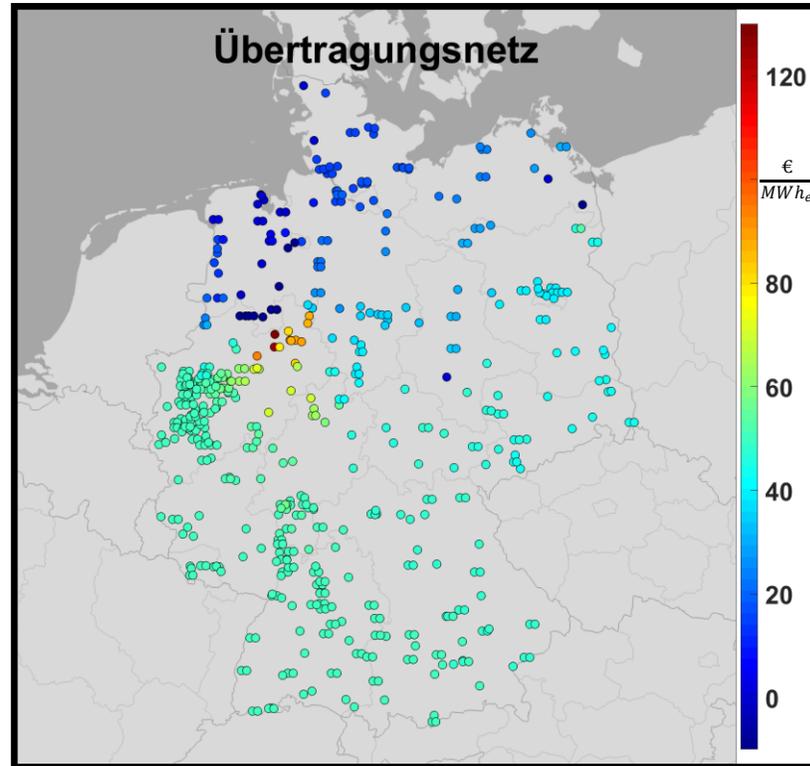
Extremsituation – Netzengpass Strom

Strom

- Hohe Preisunterschiede vor und hinter Netzengpässen
- Norden: Preise um $0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$ (EE-Strom nicht integrierbar)
- Süden: Gaspreis (wirkungsgradabhängig)
- Ursache: EE-nicht integrierbar, Gaskraftwerke versorgen Süden

Gas

- Preis entspricht Gasimportpreis
- Keine Netzengpässe



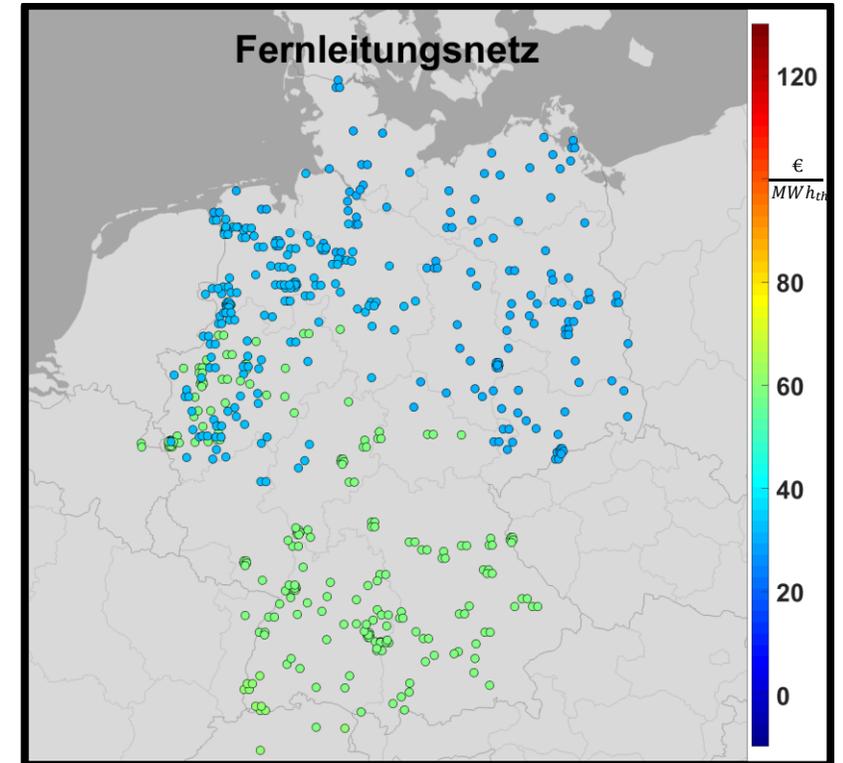
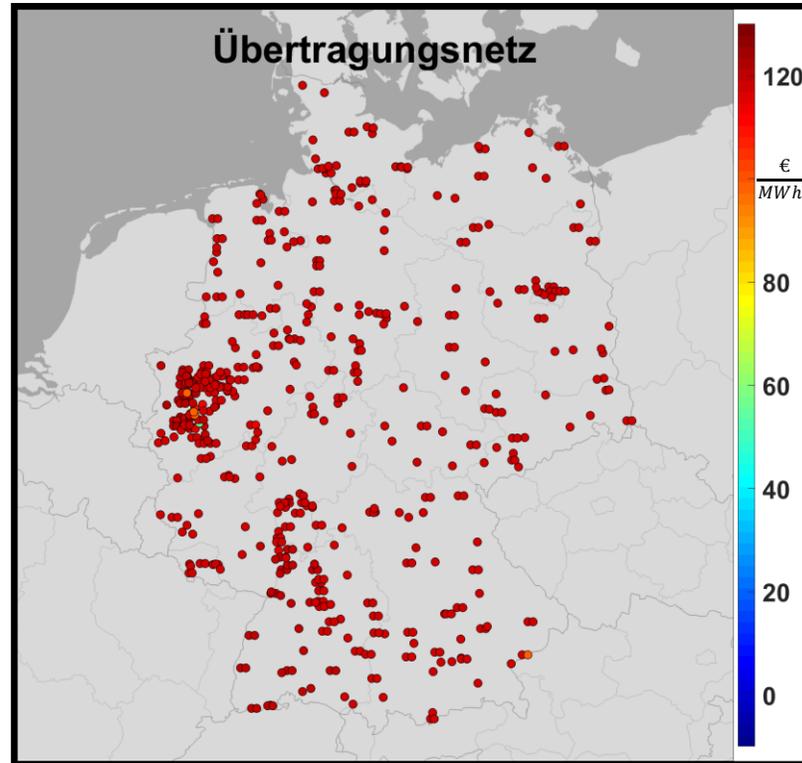
Extremsituation – Starklast (Netzengpass Gas)

Strom

- Hohes Preisniveau durch Reservekraftwerkseinsatz
- Keine Netzengpässe

Gas

- Engpässe trennen das Gasnetz in zwei Preiszonen
- Südlicher Preis entspricht Reservekraftwerkspreis Strom (bereinigt um Wirkungsgrad)
- Ursache: Erhöhung der Gaslast im Süden verringert Gaskraftwerks- und erhöht Reservekraftwerkseinsatz

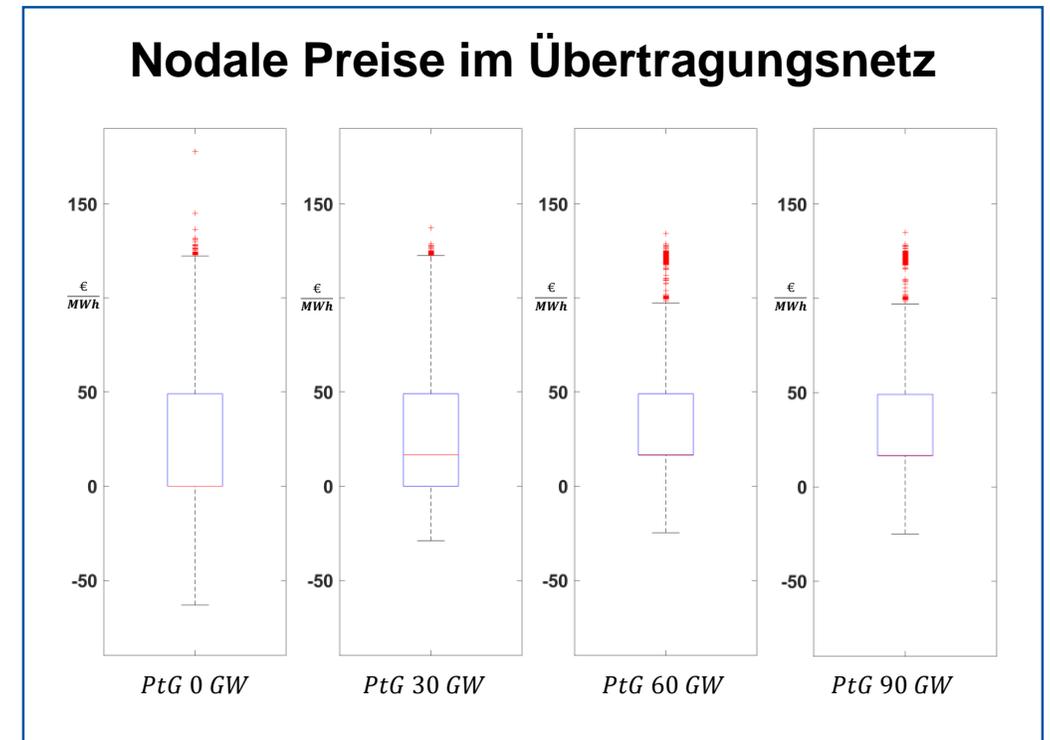


Einfluss von Power-to-Gas

- Power-to-Gas Kapazität von 0 auf 30, 60 und 90 GW erhöht

Strom

- Power-to-Gas verringert Preisen von Null und senkt maximale Preise (Ausreißer)
 - Neuer Preis entspricht Gasimportpreis (wirkungsgradbereinigt) und entspricht der Opportunität Gasimporte zu substituieren: $16 - 17 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$
- **Power-to-Gas gibt EE-Überschussstrom einen Wert**
- Sättigung des Effekts

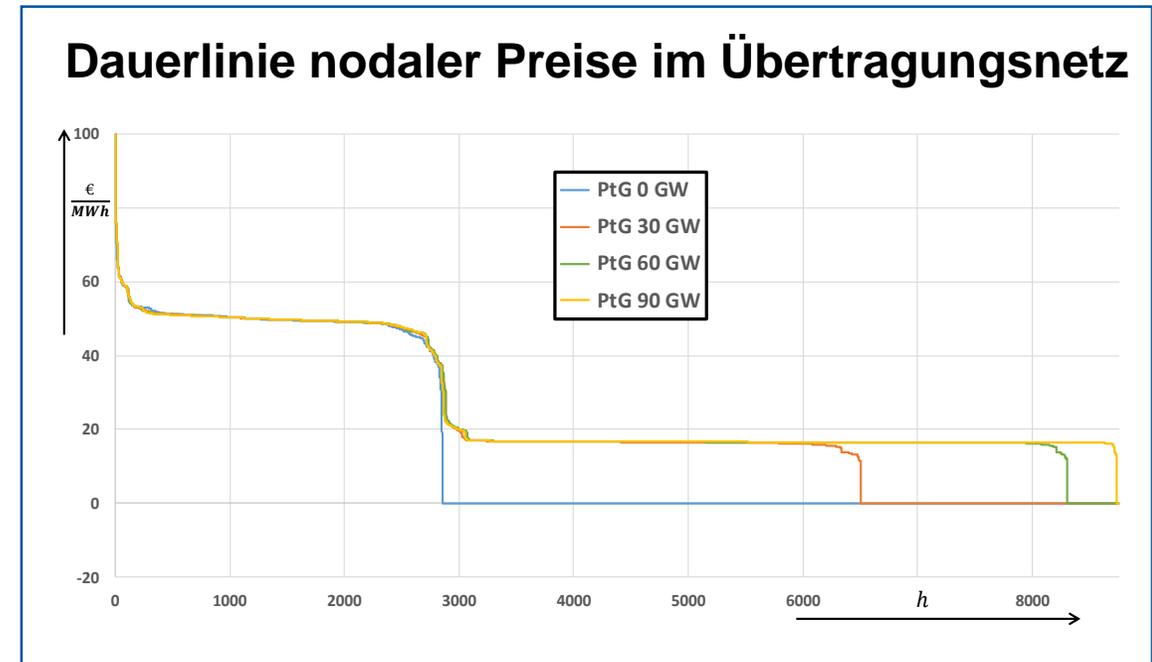


Einfluss von Power-to-Gas

- Power-to-Gas Kapazität von 0 auf 30, 60 und 90 GW erhöht

Strom

- Power-to-Gas verringert Preisen von Null und senkt maximale Preise (Ausreißer)
 - Neuer Preis entspricht Gasimportpreis (wirkungsgradbereinigt) und entspricht der Opportunität Gasimporte zu substituieren: $16 - 17 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$
- **Power-to-Gas gibt EE-Überschussstrom einen Wert**
- Sättigung des Effekts



Einfluss von Power-to-Gas

- Power-to-Gas Kapazität von 0 auf 30, 60 und 90 GW erhöht

Strom

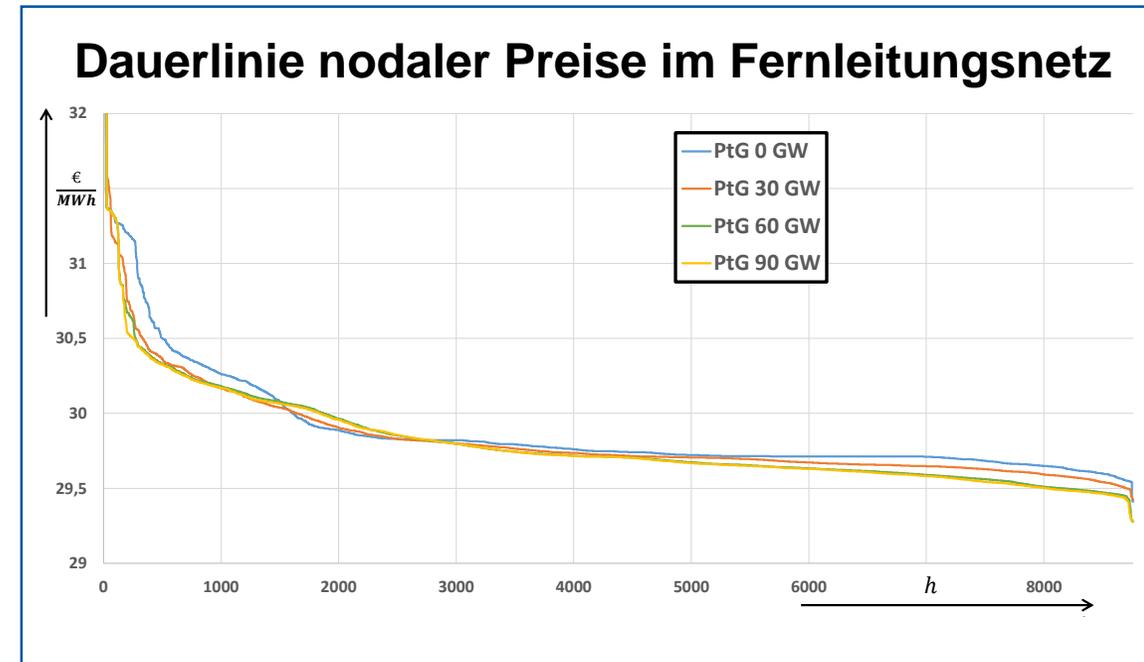
- Power-to-Gas verringert Preisen von Null und senkt maximale Preise (Ausreißer)
- Neuer Preis entspricht Gasimportpreis (wirkungsgradbereinigt) und entspricht der Opportunität, Gasimporte zu substituieren: $16 - 17 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$

→ **Power-to-Gas gibt EE-Überschussstrom einen Wert**

- Sättigung des Effekts

Gas

- Gaspreise durch Substitution teurerer Importe reduziert
- Kopplung an Strompreis erst bei vollständiger Substitution der Importe oder Gasnetzengpässen
- Sättigung des Effekts



Zusammenfassung

Motivation

- Nodale Preise als Indikator für Flexibilitätsmangel
- Kopplung des Strom- und Gassystems erhöht Flexibilität
- These: Flexibilitätsgewinn durch Kopplung von Strom- und Gassystem in nodalen Preisen sichtbar

Verfahrensansatz

- Lineares Optimierungsproblem zur Betriebsoptimierung von gekoppelten Strom- und Gassystemen
- Nodale Preise als dualen Variablen der Kirchhoff'schen Knotenbilanzen beider Netze

Ergebnisse

- Kopplung der nodalen Strom- und Gaspreise
 - Gaskraftwerke im Stromnetz preisbestimmend
 - Power-to-Gas Einsatz zur Integration von EE-Überschussstrom
 - Engpässe im Gasnetz limitieren Gaskraftwerkseinsatz
- Sättigung der Vorteile von Power-to-Gas bei zunehmenden installierten Kapazitäten

Ausblick

- Ausweitung der Analyse dualer Variablen zur Systemzustandsbewertung auf Anlagen und Betriebsmittel

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Lukas Löhr

IAEW der RWTH Aachen University

Schinkelstraße 6, 52056 Aachen

+49 241 80-97651

l.loehr@iaew.rwth-aachen.de

www.iaew.rwth-aachen.de