Karlsruher Institut für Technologie

IEH

Wie geht Klimaschutz morgen? Herausforderungen für das Stromnetz der Zukunft

Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

EnergieCampus 2017, Karlsruhe

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)

Agenda

Verteilnetze

Quelle: innogy

Übertragungsnetze

Quelle: transnetBW

Verteilnetze

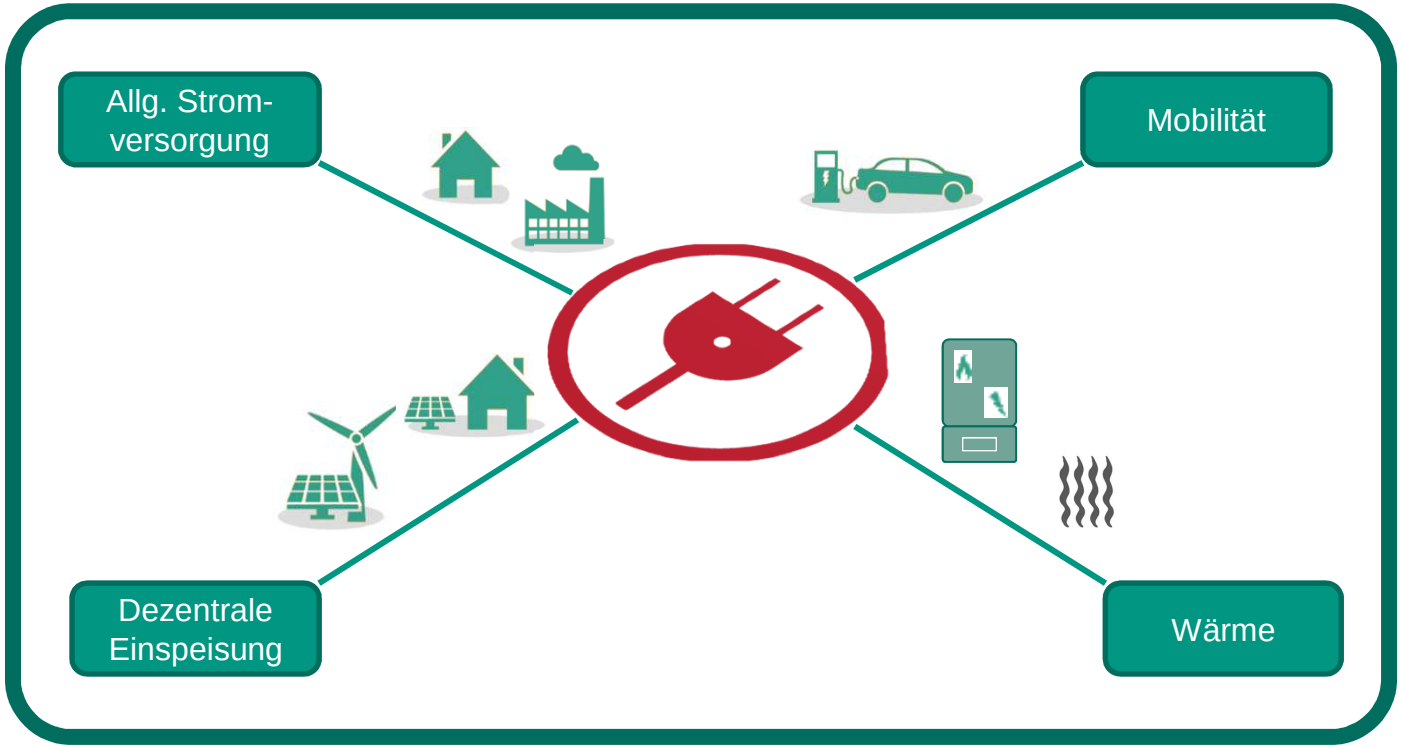
Herausforderungen für Verteilnetze

- Zunehmende Komplexität der Versorgungsaufgabe:
  - Allg. Stromversorgung (Haushalte, Gewerbe, Industrie)
  - Regenerative, dezentrale Einspeisung (Wind, Photovoltaik,…)
  - Heimspeicher
  - Elektromobilität
  - Wärmeversorgung
    - Wärmepumpen
    - Kraft-Wärme-Kopplung
    - Power-to-Heat
    - Thermische Speicher

Koordination und systemdienliche Einbindung der Akteure notwendig

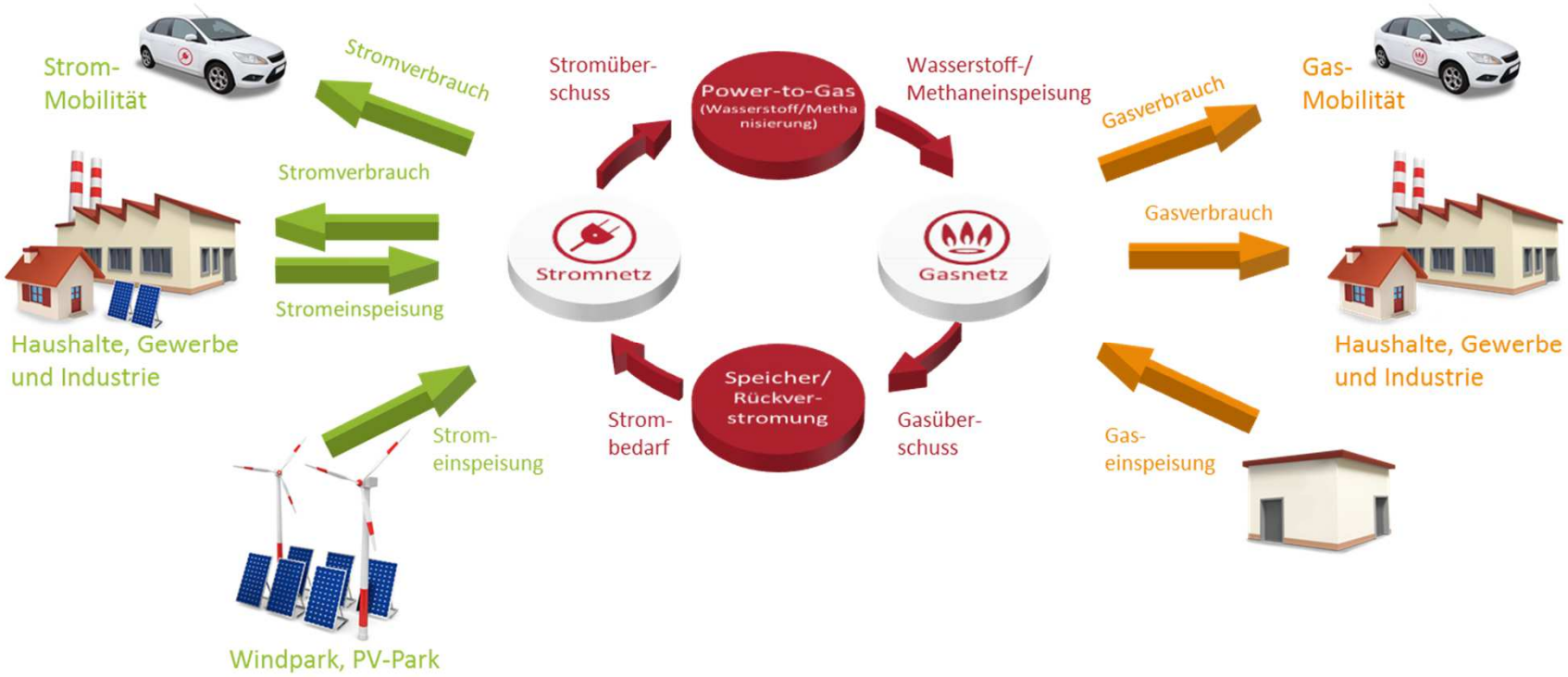
Herausforderungen für Verteilnetze

- Lösungsansatz: Sektorenkopplung
  - Betrachtung des gesamten Energiesystems
  - Ausnutzung von Synergien durch Kopplung der Sektoren
  - Flexibilität



Herausforderungen für Verteilnetze

- Das Gasnetz als flexible Speichermöglichkeit
  - Speicherung in Form von Wasserstoff und/oder Methan (Power-to-Gas)
  - Rückverstromung durch KWK-Anlagen



Das Forschungsprojekt RegEnKibo

- Projektziele
  - **Reg**ionalisierung der **En**ergieversorgung auf Verteilnetzebene am Modellstandort **Ki**rchheim**bo**landen (RegEnKibo)
  - Minimierung der el. Ausgleichsenergie durch Kopplung von Strom- und Gasnetz
  - Optimierte stromnetzdienliche Einbindung von KWK-Anlagen und einer Power-to-Gas-Anlage
- Allgemeines
  - Projektpartner:
  - Kennzahlen:
    - Zeitraum: 01.06.2015 – 30.05.2018 (36 Monate)
    - Gesamtes Projektvolumen: 2.466.000 €

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
STROMNETZE
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Das Forschungsprojekt RegEnKibo

- Der Modellstandort
  - Haushalts- und Industrielasten
    - Jahresverbrauch 70 GWh
  - Zwei Windparks (Gesamtleistung 38,6 MW)
  - Photovoltaik (Leistung 9,5 MWp)
  - Biogasanlage als mögliche CO_2-Quelle für Methanisierung

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
STROMNETZE
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Das Forschungsprojekt RegEnKibo

- Die Methodik: Modellprädiktive Regelung
  - Allgemein:

$$\min_{x} f(x_1, \ldots, x_n)$$

Optimierungsziel

$$\begin{aligned} \textit{subject to}: \quad & A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ & A \cdot x \leq b \\ & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \\ \textit{bounds}: \quad & lb \leq x \leq ub \end{aligned}$$

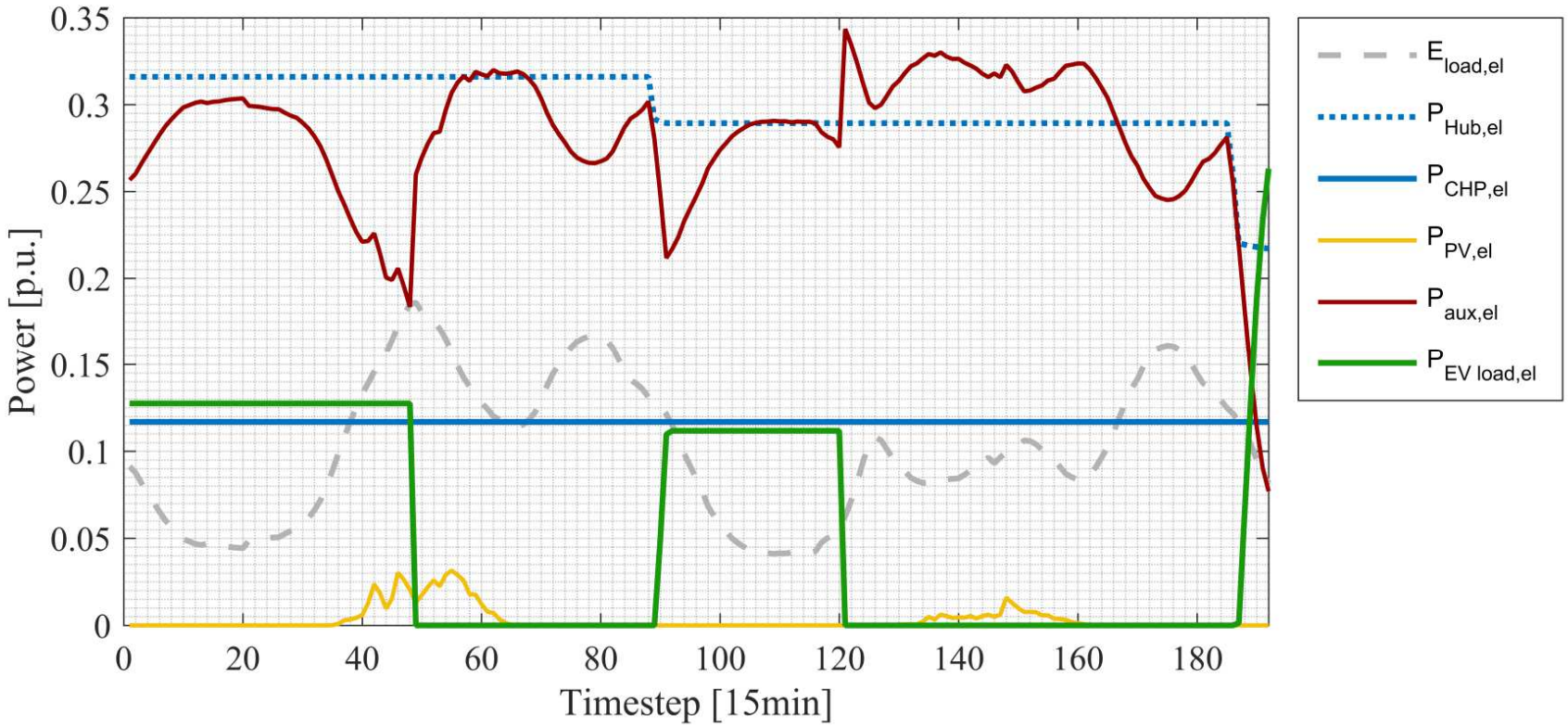
Berücksichtigung technischer Randbedingungen

  - Zielfunktion in RegEnKibo:

$$f(x) = \sum_{t=0}^{T} {P_{slack}}^2$$

Modellprädiktive Regelung

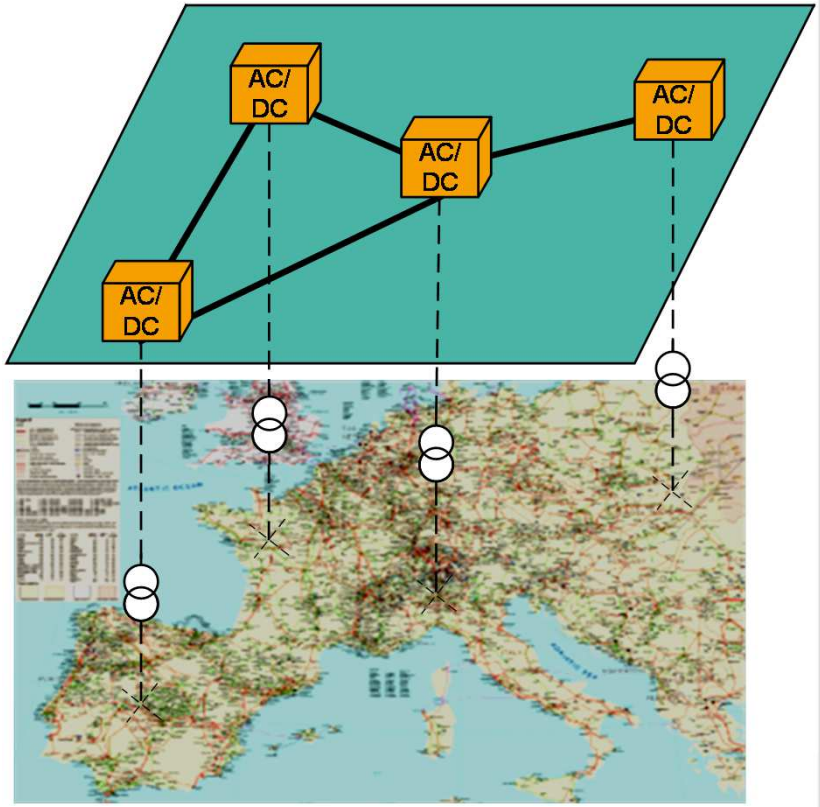
- Beispielergebnis



Übertragungsnetze

Zukünftige Übertragungsnetzstrukturen

- Zunehmende Zahl leistungselektronischer Systeme auf Übertragungsnetzebene
  - Integration Erneuerbarer Energien in großem Maßstab (Offshore-Windkraft)
  - Erhöhung der Übertragungskapazitäten zwischen Regelzonen
  - Kopplung asynchroner AC-Netze (Bsp. DE – DK, NL - GB)
- Stand der Technik:
  - HGÜ Punkt-zu-Punkt Verbindungen
- Zukünftige Vision:
  - Überlagerte Multiterminal DC-Overlaynetze

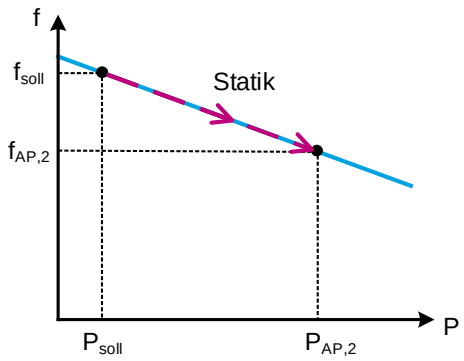


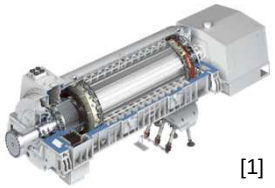
Systemführung, Regelung und Stabilität zukünftiger hybrider AC/DC-Netzstrukturen

Vergleich Systemführung HVAC/HVDC-Netze

HVAC

- Wirkleistungsgleichgewicht → Frequenz f (global)
- Blindleistungsbalance → Knotenspannungen U_n
- Energiebilanz über gespeicherte kinetische Energie im Turbinen-Generator Satz

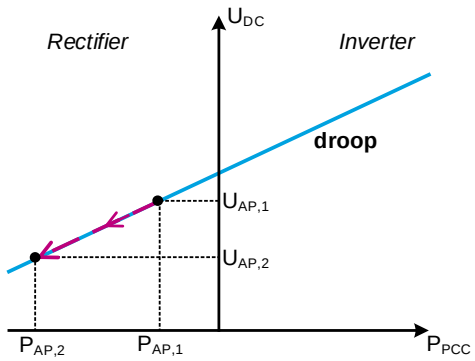




[1]

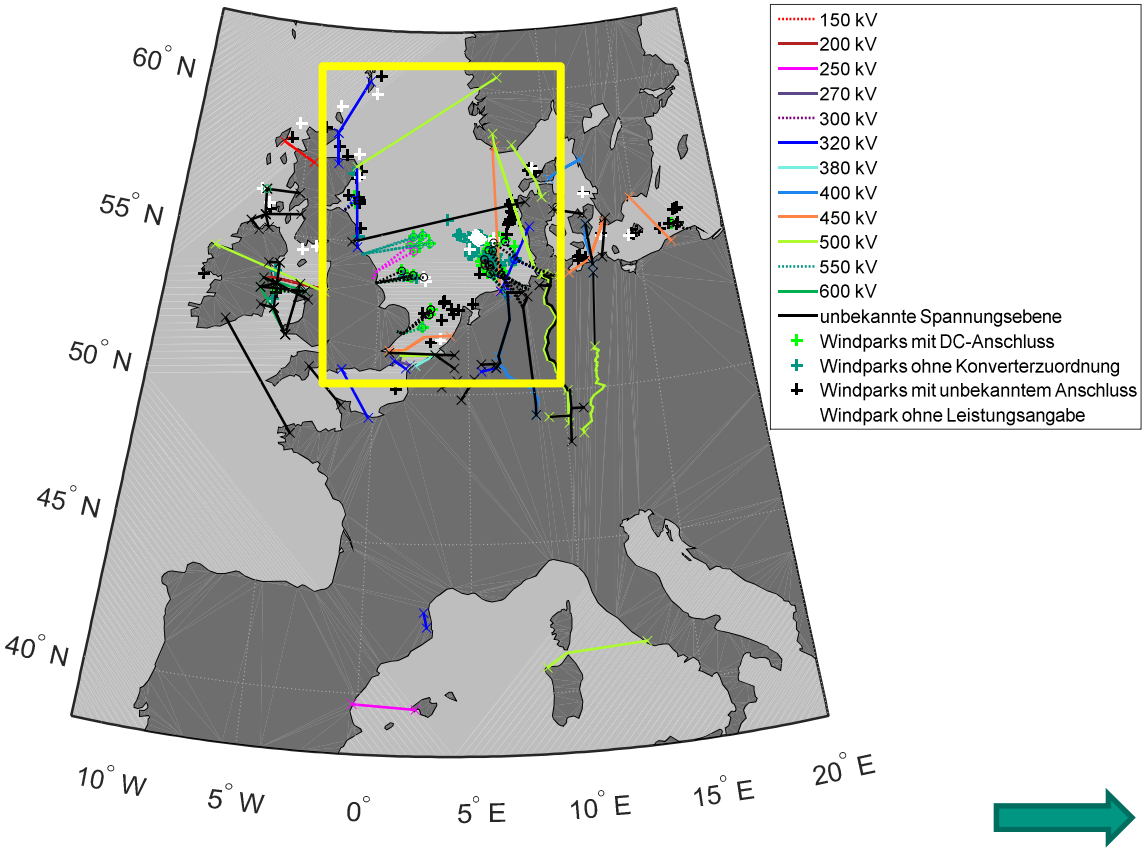
HVDC

- Wirkleistungsbilanz → Spannung (lokal)
- Spannung im Gegensatz zur Frequenz lokale Größe und von Leistungsfluss über Leitungen abhängig
- Energiebilanz im DC-System über gespeicherte elektrische Energie in Kapazitäten und Induktivitäten



[2]

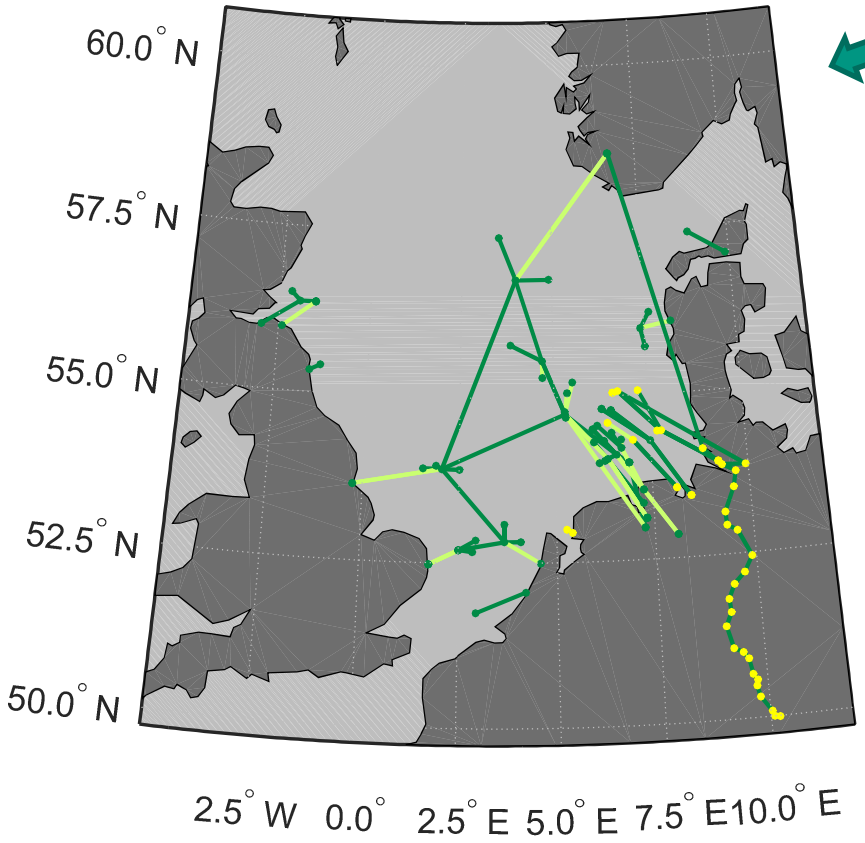
Cluster-basierte Systemführungsstrategien von Offshore Multi-Terminal HGÜ-Netzen

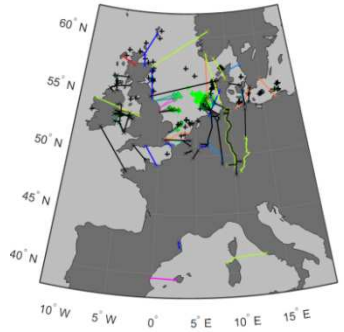


- Datenbasis: Aktuelle und geplante offshore Windparks und HGÜ Verbindungen bis 2030
- Punkt-zu-Punkt Verbindungen
- unterschiedliche Spannungsebenen
- AC und DC Technologie

→ Multi-Terminal HGÜ-Netz in der Nordsee (MTDC)

Szenario: Offshore Multi-Terminal HGÜ-Netz in Ringstruktur

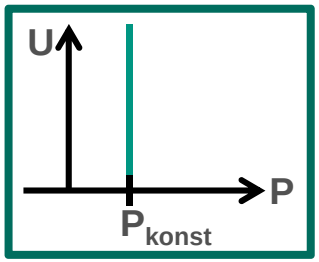




- 71 Windparks bis 2030 (DC, 90 MW – 1,8 GW)
- 28 offshore HGÜ Converter
- 18 onshore HGÜ Converter
- 59 DC-Kabelstrecken (6767 km) (-28 % gegenüber Punkt-zu-Punkt)
- 5 Cluster: DE, NO, NL, GB Süd, GB Nord
- Austauschleistung: 4,1 GW international; 44,3 GW onshore

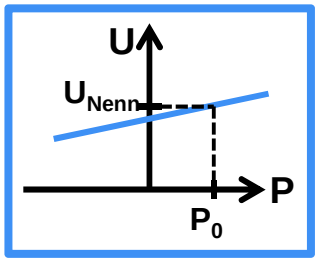
Cluster-basierte Regelungsstrategie Offshore MTDC-Netz

Windparks-Converter: Leistungsgeregelt



$$P = const.$$

Onshore-Converter: P-U_{DC} Statik

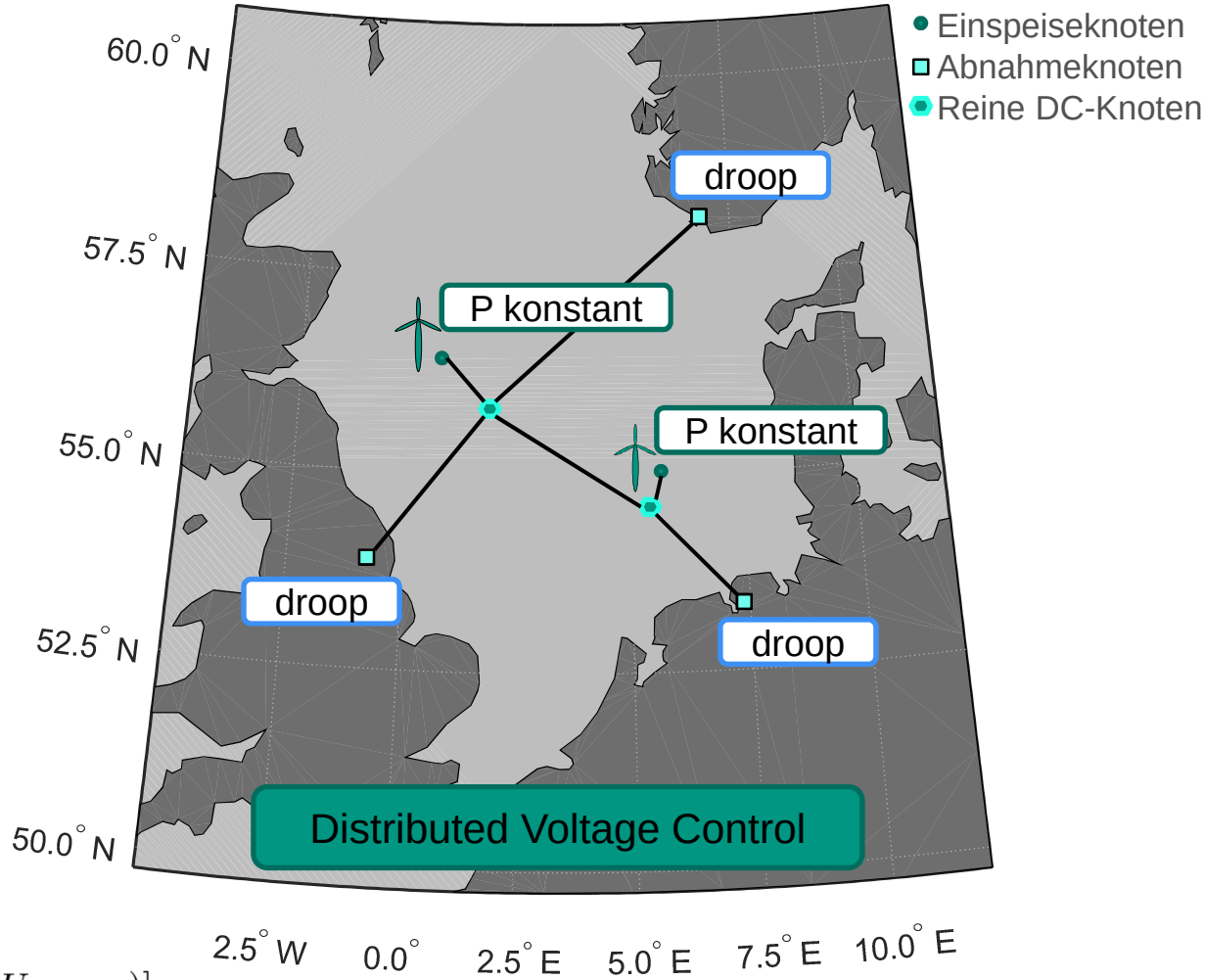


$$P = f(U_{\mathrm{DC}})$$

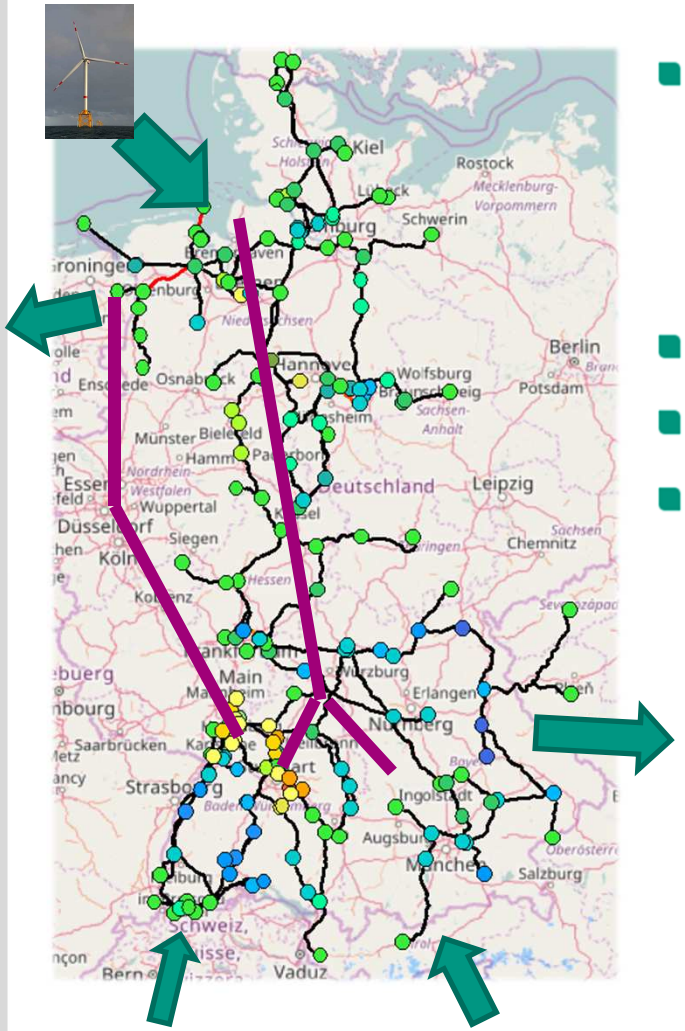
$$k_{\mathrm{droop}} = \frac{\Delta U}{\Delta P}$$

Spannungs-Sollwerte in Abhängigkeit der Vorhersage der Windgeschwindigkeiten

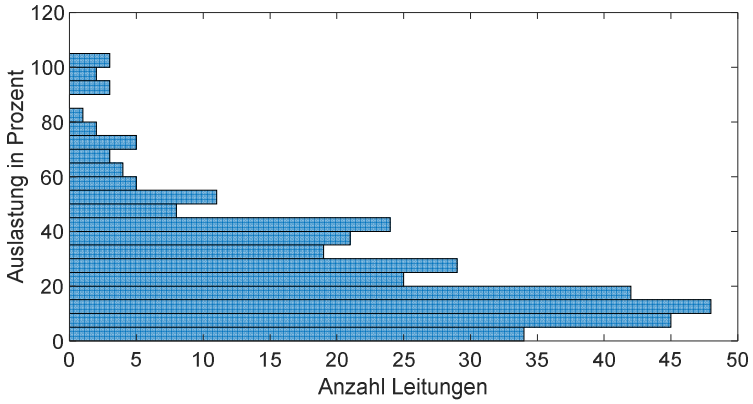
$$P_{\mathrm{conv,t}} = [P_{\mathrm{ref,i}} + \frac{1}{k_{\mathrm{droop,i}}}(U_{\mathrm{DC,meas}} - U_{\mathrm{DC,ref,i}})]_{\mathrm{t}}$$

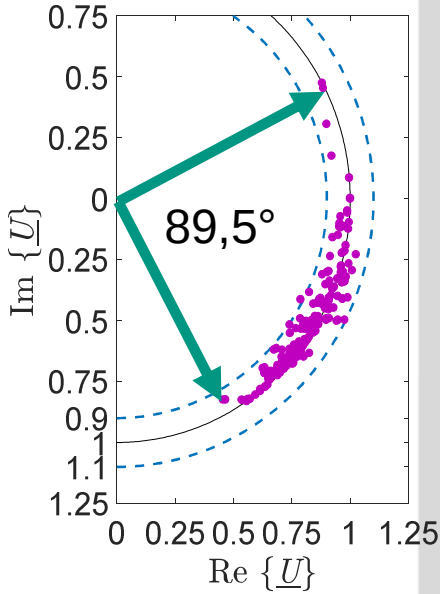


Auswirkungen zukünftiger Nordsee-Offshore-Windparks auf die Leistungsflüsse im Übertragungsnetz



- Szenario:
  - Einspeisung von 3,6 GW Offshore Windenergie
  - Abtransport über drei HGÜ-Korridore von Norden nach Süden
  - Import im Süden Deutschlands, Export nach Osten und Westen
- Leitungsauslastung im Norden höher als im Süden
- max. Leitungswinkel -61,1°
- sicherer Netzbetrieb gewährleistet

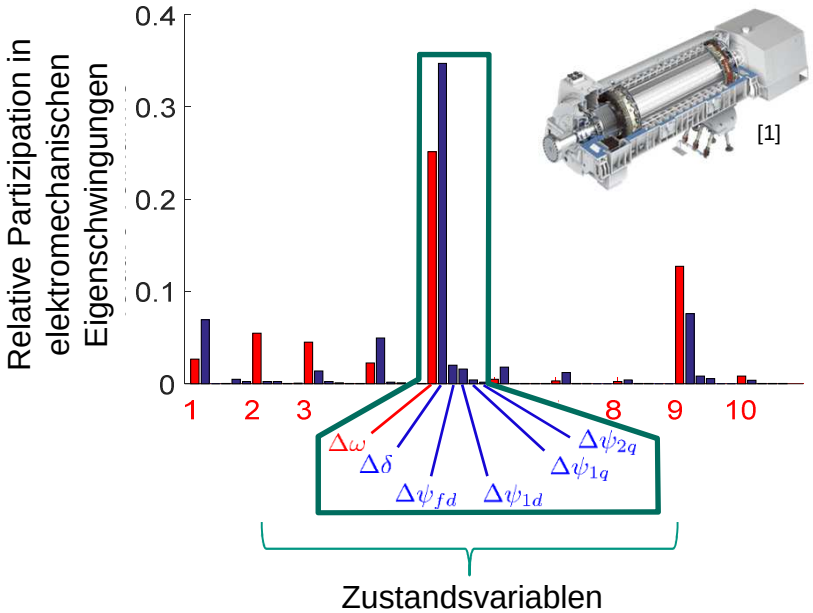


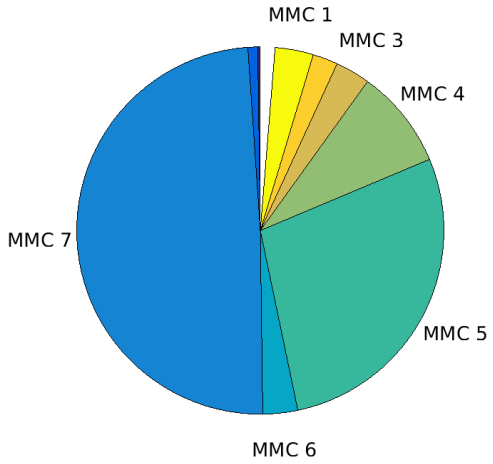


Systemstabilität zukünftiger hybrider AC/DC-Netze

- Analyse der Interaktionen von elektromechanischen und elektromagnetischen Eigenschwingungen in hybriden AC/DC-Netzen (Eigenwertanalyse)
- Formulierung analytischer Methoden zur Reglerparametrierung
- Einsatz von MMC-basierten HGÜ-Systemen zu Dämpfung von Leistungspendelungen in hybriden AC/DC-Systemen (Inter-Area-Oscillations / Power Oscillation Damping)

[2]

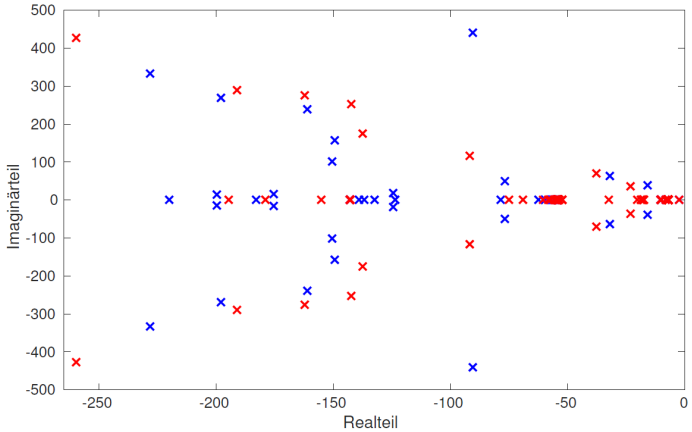




Relative Partizipation in elektromagnetischen Eigenschwingungen

Elektromagnetische Eigenschwingungen in MTDC Netzen

- MTDC Netz mit 9 Umrichterstationen
  - Reglerparameter für PI-Regler DC-seitig analytisch optimiert
  - Gütekriterium, numerisches Liniensuchverfahren
  - Eigenschwingungen besser gedämpft (Verschiebung Eigenwerte nach links)

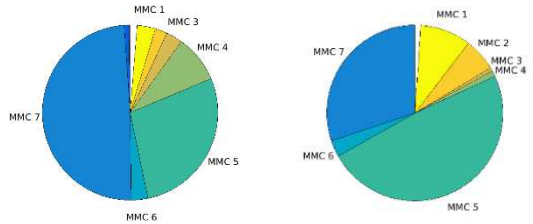


blau: optimiert
rot: heuristisch

- Partizipationsfaktoren
  - Eigenschwingungen mit mind. 50 % Umrichterbeteiligung:
    - heuristisch: 9
    - optimitiert: 4
  - ungünstige Konstellation
    - Partizipation vieler Umrichterstationen
    - geringe Dämpfung

- Beispiel: Zwei dominante Eigenschwingungen

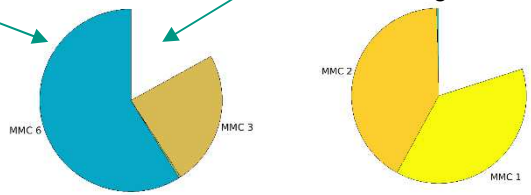
heuristisch



optimiert

MMCs

Kabel, Freileitungen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit