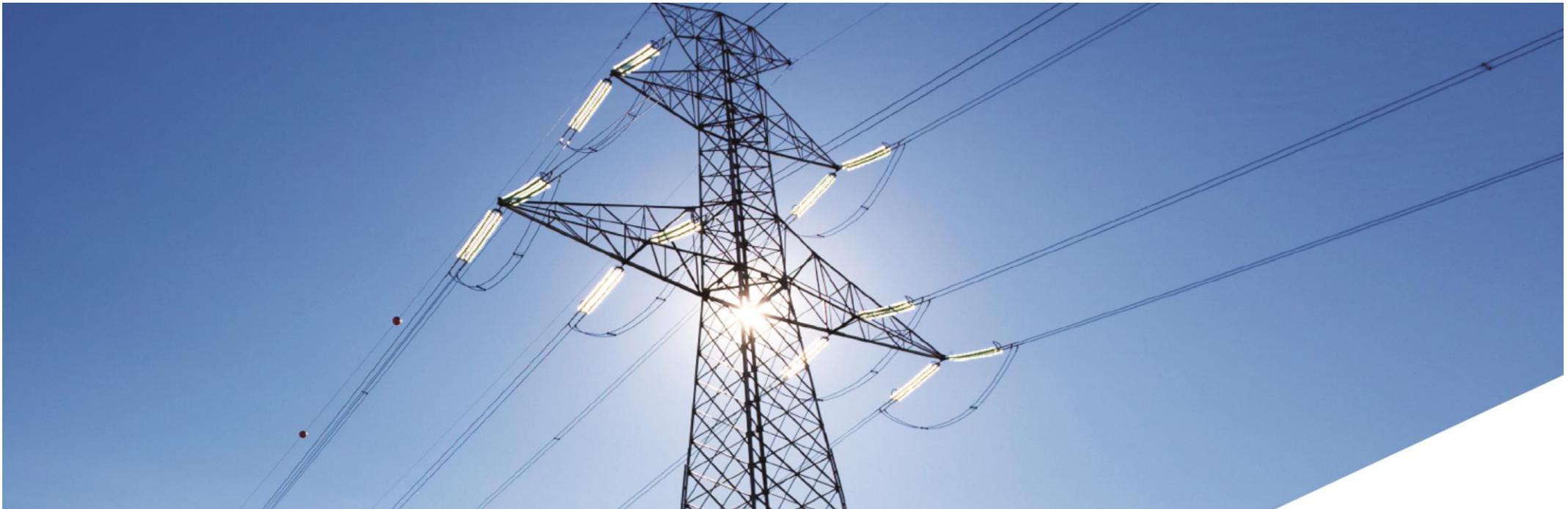


# Ein Security Constrained Optimal Power Flow zur Berücksichtigung bipolarer HGÜ-Konfigurationen in vermaschten AC und DC-Übertragungsnetzen

Felix Rudolph, FGH GmbH

Graz, 16.02.2024



# Aufbau der Präsentation

Einleitung & Motivation

Modellierung

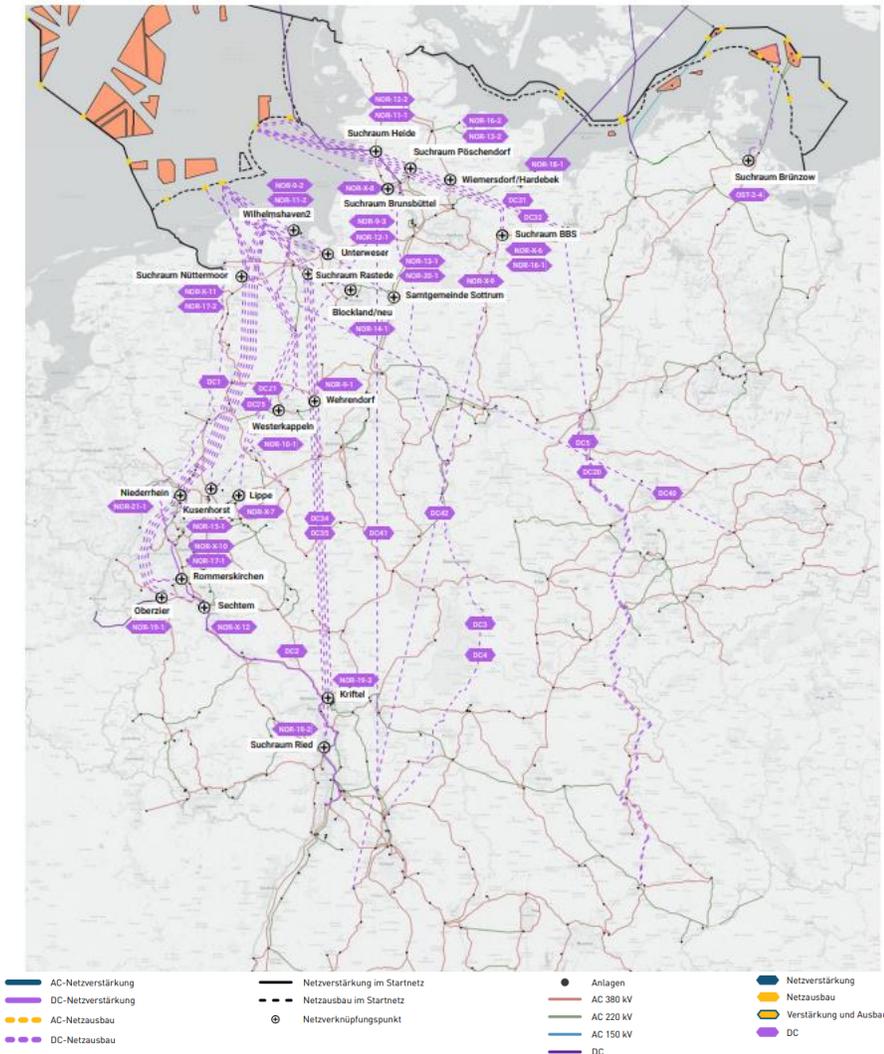
Verfahren

Exemplarische Ergebnisse

Zusammenfassung

## Ausbau des Übertragungsnetzes mit HGÜs

- Ausbauziele der deutschen Bundesregierung sehen für 2045 min. 70 GW installierte Leistung von Offshore-Windenergie vor
  - Anbindung der Offshore-Windparks (OWP) über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) an das Onshore-Übertragungsnetz
  - Erweiterung des Onshore-Übertragungsnetzes mit HGÜs zu Lastzentren in West- und Süddeutschland geplant
  - Kombination der OWP-Anbindung und des Onshore-HGÜ-Ausbaus möglich
  - Erweiterung des Offshore-HGÜ-Netzes durch Interkonnektoren mit anderen HGÜ-Netzen im Ausland
- ➔ Errichtung von (vermaschten) Multi-Terminal-HGÜ-Systemen



Quelle: NEP kompakt\_2037\_2045\_V2023\_2E\_1  
Übertragungsnetzbetreiber / Kartengrundlage © Mapbox, © OpenStreetMap 222

# Berücksichtigung von HGÜ-Konfigurationen in Netzplanung und Netzbetrieb

- HGÜ-Verbindung kann in verschiedenen Konfigurationen realisiert werden

Asymmetrischer Monopol	Symmetrischer Monopol	Bipol (mit metallischem Rückleiter)
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Verwendung einer Verbindungsleitung und eines metall. Rückleiters</li><li>▪ Konverterausfall führt zu Komplettverlust der Verbindung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Positiver und negativer Pol, beide Leiter für max. Übertragungsleistung ausgelegt</li><li>▪ Konverterausfall führt zu Komplettverlust der Verbindung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Zwei asymm. Monopole durch geerdeten Pol verbunden, jeder Konverter mit Leiter</li><li>▪ Konverterausfall kann bei Rückleiter nur zu Verlust von 50 % Übertragungskapazität führen</li></ul>

- Aktuelle Umsetzungen des HGÜ-Netzes zumeist als Bipol-Konfiguration geplant
  - Z.B. mit 525 kV und 2 GW Übertragungsleistung
- System Operations Guideline verpflichtet Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zu (n-1) Simulationen und Engpassbehebungsmaßnahmen
- ÜNBs benötigen für Netzplanung und Betriebsplanung entsprechende Werkzeug zur Berücksichtigung der HGÜ-Konfigurationen
- Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Engpassbehebung (Security Constrained Optimal Power Flow) für Berücksichtigung von Bipol-HGÜ-Konfigurationen in vermaschten AC und DC-Netzen

## Bewertung des Systems benötigt Modellierung des quasistationären Zustands

### Erzeugung

- Minimale und maximale Wirkleistungsgrenzen
- Leistungsabsenkung von EE-Anlagen
- Leistungsübertragung Offshore-Konverter durch OWP vorgegeben

### AC und DC-Zweige

- Abbildung der thermischen Belastbarkeit durch Stromgrenzen
- Abbildung beider Flussrichtungen durch gleiche Absolutwerte der Stromgrenzen

### AC/DC-Konverter

- Minimale und maximale Wirkleistungsgrenzen
- Konformitätsbedingung: alle Wirkleistungsübertragungen von Konvertern eines DC-Netzes müssen in Summe 0 ergeben

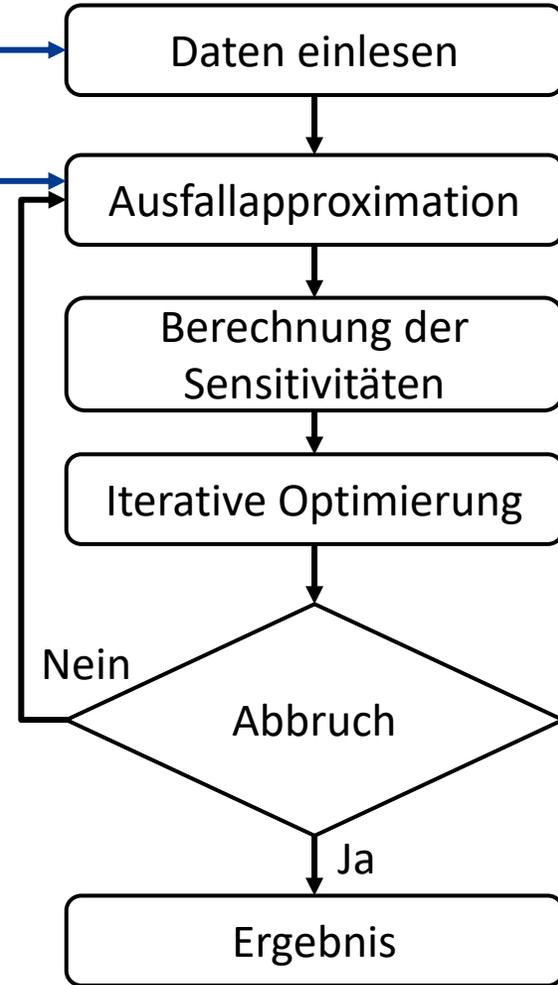
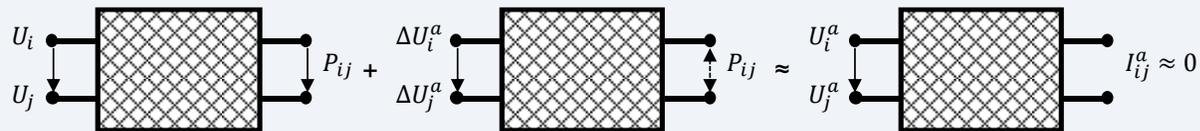
### Slack Variablen

- Lösungsfindung bei Nichteinhaltung der therm. Leistungsgrenzen muss ermöglicht werden
- Erweiterung des Lösungsraumes durch Einführung von Slackvariablen in Zweig-Nebenbedingungen

## Datenaufbereitung und Ausfallapproximation

- Einlesen der Netzdaten und Netznutzungsfälle
- Aufbereiten der Daten (Leistungsgrenzen Kraftwerke und Konverter, Stromgrenzen von Zweigen, Ausfallsituationen ...)

- Bewertung des (n-1) Zustands der AC und DC-Netze durch ein Verfahren auf Basis einer Methode mit virtuellen Leistungsinjektionen
- Berücksichtigung der Ausfälle von bipolar DC-Zweigen und Konverter
- Modifikation der Admittanzmatrix des Grundlastfalls
  - Unterscheidung ob Komplett- oder Teilausfall
- Modifizierte Admittanzmatrix bildet Basis für neue Jacobimatrix  $J^a$
- Erstellung virt. Injektionsvektor  $\vec{S}_{a,Inj}$  mit Wirkleistungsflussinjektionen an Anfangs- und Endknoten
- Berechnung Spannungsänderung durch:  $J^a * \Delta \vec{U}^a = \vec{S}_{a,Inj}$
- Anwendung des Superpositionsverfahrens zur Ermittlung von Spannungen der Ausfallsituation  $\underline{U}^a$  und anschließende Berechnung der Ströme  $\underline{I}_Z^a$

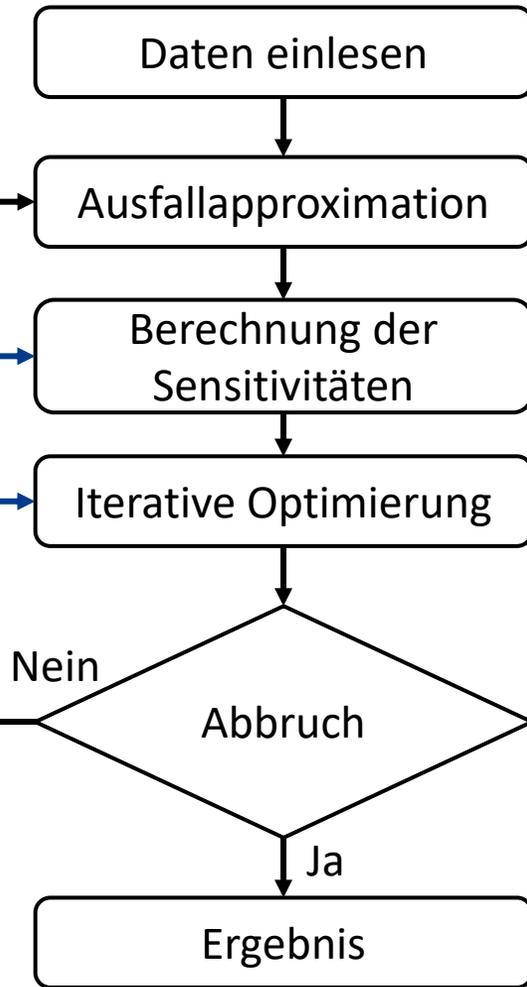


## Sensitivitätsberechnung und Optimierung

- Linearisierung des nichtlinearen Optimierungsproblems notwendig
- Berechnung von Sensitivitäten zur Abbildung der Änderung des Stroms auf einen Zweig bei Wirkleistungsänderung am Konverter
- Ermittlung von Sensitivitäten für (n-0) und (n-1) Situationen

- Aufbau des Mixed Integer Linear Program (MILP)
- Gemeinsame iterative Optimierung der AC und DC-Teilnetze führt zu schneller Lösungsfindung und guter Konvergenz beim Lastfluss
- **Variablen:** Leistungsänderungen von Kraftwerken und Konvertern
- **Nebenbedingungen:** Stromgrenzen der Zweige, Konverter-Leistungskonformität
- **Zielfunktion:** Behebung von Engpässen durch kostenminimalen RD-Einsatz

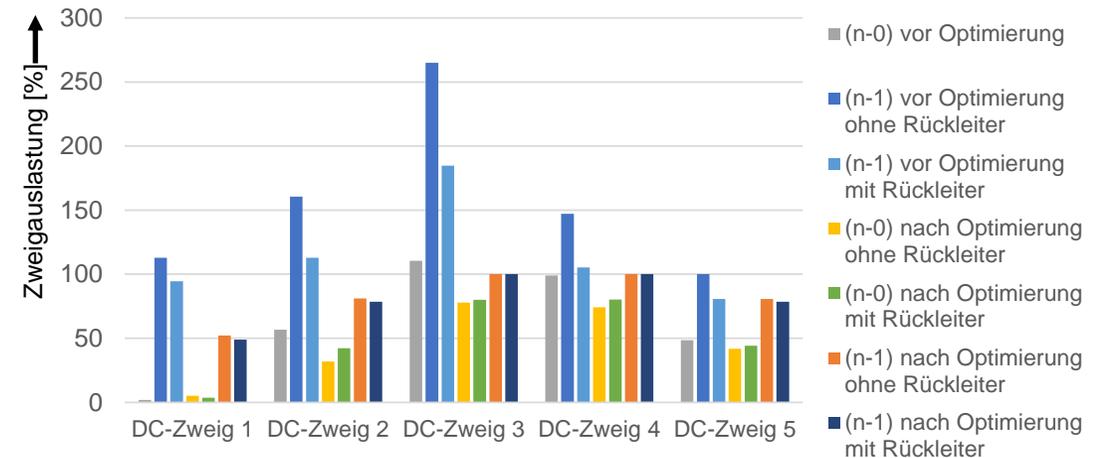
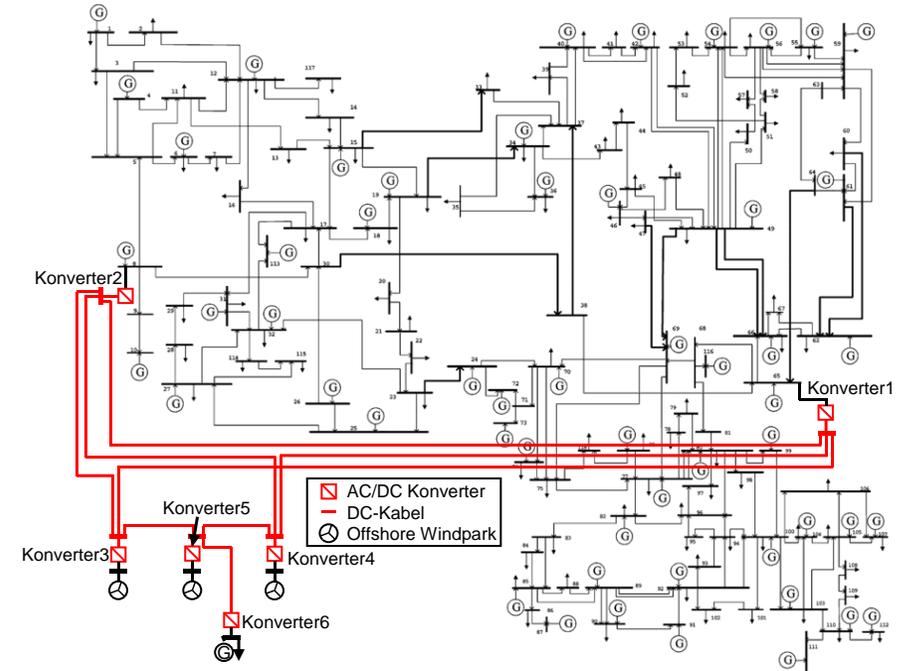
- Abbruch der Optimierung wenn
  - Iterationslimit erreicht
  - Keine neuen Engpässe vorhanden sind
  - Nur geringfügige Änderungen ggü. vorheriger Iteration



# Exemplarische Ergebnisse

## Ermittlung der Funktionsfähigkeit des Verfahrens

- Verfahren wurde anhand eines modifizierten IEEE 118-Knotennetzes verifiziert
  - Integration eines vermaschten HGÜ-Netzes (Bipol wahlweise mit/ohne Rückleiter)
- Initiale Engpässe im AC und DC-Netz in (n-0) und (n-1)
  - Durch Ausfallapproximation bestimmte (n-1) Engpassleistung fällt bei Bipol mit Rückleiter geringer aus
    - Berücksichtigung von 50 % verbleibender Übertragungskapazität nach Ausfall
- Anwendung des SCOPF führt zu Beseitigung aller Engpässe im AC und DC-Netz
  - Geringere Änderungen der Konvertereinstellungen sowie OWP-Abregelung bei Berücksichtigung eines Rückleiters
- Funktionsfähigkeit des Verfahrens bestätigt



# Ein Security Constrained Optimal Power Flow zur Berücksichtigung bipolarer HGÜ-Konfigurationen in vermaschten AC und DC-Übertragungsnetzen

- Zukünftiger Ausbau von Multi-Terminal HGÜ-Netzen in bipolarer Konfiguration
- ÜNB benötigen für Netzplanung und Netzbetrieb ein Verfahren zur Berücksichtigung von Ausfallsituationen in (vermaschten) Multi-Terminal HGÜ-Netzen
- Erweiterung eines bestehenden Verfahrens zur Berücksichtigung bipolarer HGÜ-Konfigurationen mit/ohne Rückleiter
  - Ausfall, z.B. eines Konverters, würde mit Rückleiter nur zu 50 % Verlust der Übertragungskapazität führen
  - Ausfallapproximation erlaubt schnelle Bestimmung des (n-1) Zustands in AC und DC-Netzen
  - Gemeinsame Optimierung der vermaschten AC und DC-System für (n-0) und (n-1) Situationen in einem iterativen Verfahren zur Engpassbehebung
- Die exemplarischen Ergebnisse auf Basis eines modifizierten IEEE Testnetzes haben die Funktionsfähigkeit des Verfahrens bestätigt
  - Alle Engpässe konnten mit den HGÜ-Konfigurationen identifiziert und durch Redispatch sowie Änderung von Konvertereinstellungen beseitigt werden

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ein Security Constrained Optimal Power Flow zur Berücksichtigung bipolarer HGÜ-Konfigurationen in vermaschten AC und DC-Übertragungsnetzen

Felix Rudolph – [felix.rudolph@fgh-ma.de](mailto:felix.rudolph@fgh-ma.de)

