

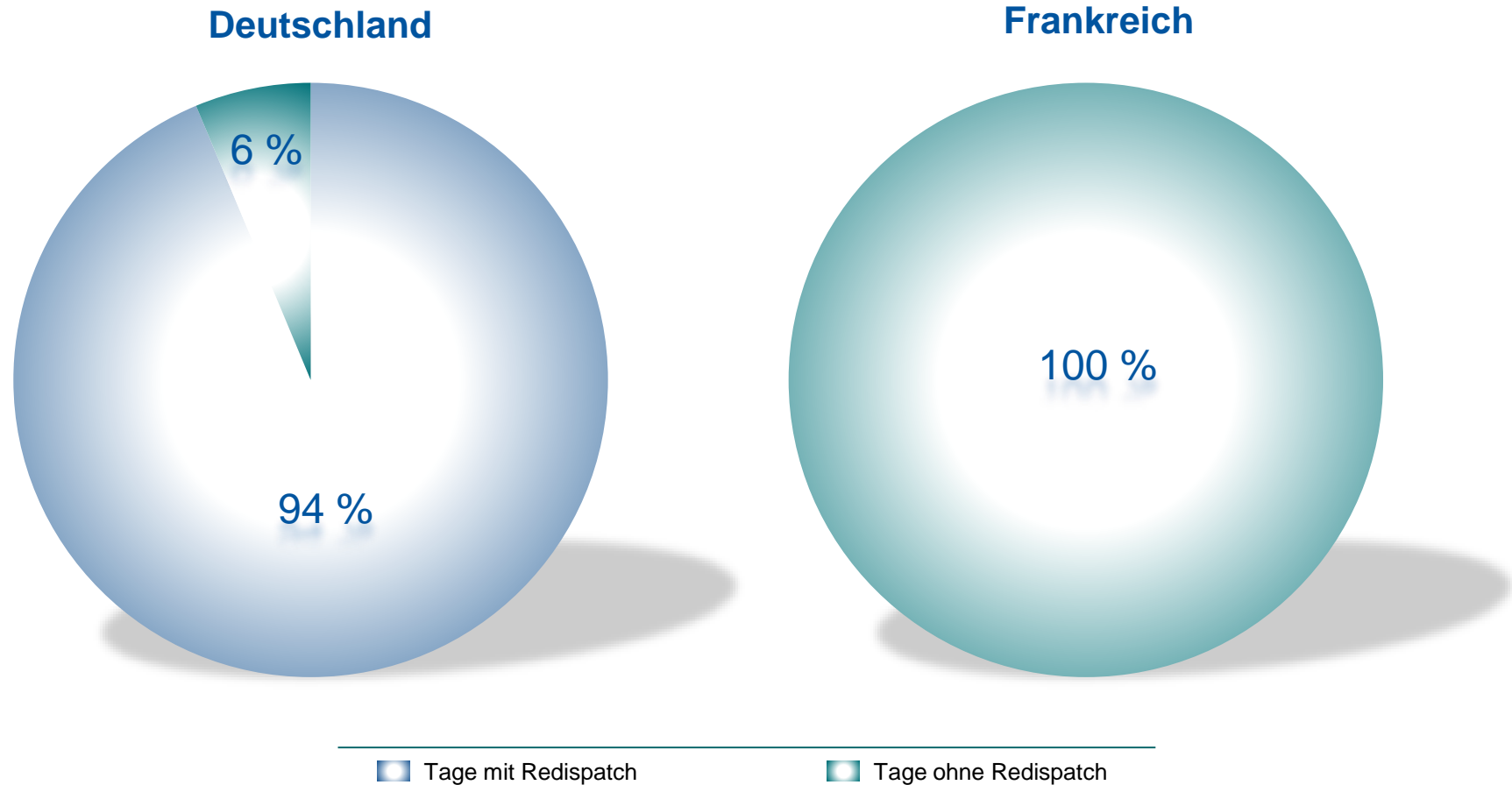
# Einfluss des Unit-Commitment im Redispatch

- Hintergrund
- Optimierungsverfahren
- Exemplarische Untersuchungen
- Zusammenfassung

Jonas Eickmann, Jens Priebe, Albert Moser

Graz, 11.02.2016

# Häufigkeit von Redispatchmaßnahmen 2015



# Kosten für Redispatch und Countertrading 2015

Deutschland

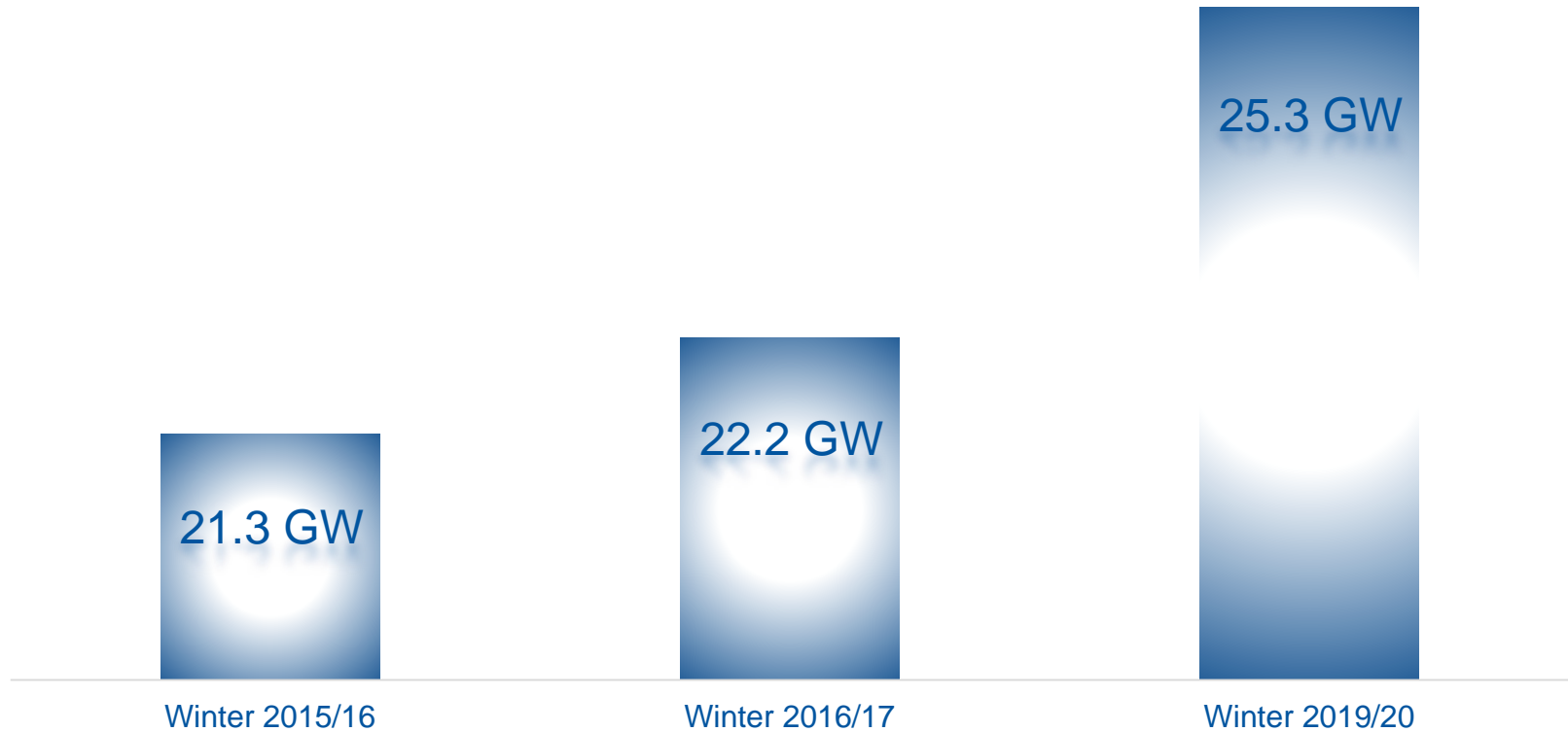


1.000 Mio. €

Frankreich

1,14 Mio. €

# Zukünftige Entwicklung der Redispatchleistungen



**Erw. pos. Redispatchleistung gemäß Systemanalysen der deutschen ÜNB**

# Maßnahmen innerhalb des Engpassmanagements

## Redispatch, Einspeisemanagement und Lastabschaltung

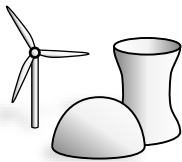
### ○ Regulatorische Vorgaben

- ◆ Redispatch nur nach Ausschöpfung netzbezogener Maßnahmen
- ◆ Einspeisemanagement nur nach Ausschöpfung konventioneller Redispatchpotenziale
- ◆ Abschaltung nicht kontrahierter Verbraucher als letzte Maßnahme
- ◆ Quotient  $\frac{\text{Kosten}}{\text{Wirkung}}$  ist Basis zur Auswahl der Redispatchmaßnahmen

### ○ Technische Restriktionen

- ◆ Minimal- und Maximalleistungen
- ◆ Maximale Leistungsgradienten thermischer Kraftwerke
- ◆ Mindestbetriebs- und -stillstandszeiten thermischer Kraftwerke
- ◆ Beckenfüllstände hydraulischer Kraftwerke
- ◆ Möglichkeit einer Wirkleistungsbeeinflussung von EEG-Anlagen

➔ Simulation der Wirkleistungsbeeinflussung im Redispatch muss gemischt-ganzzahlige Entscheidungen umfassen



# Formulierung der Engpassbehebung als Optimierungsproblem

## Leistungsflussgleichungen

$$\underline{S}^s = \text{diag}(\underline{U}^s) \cdot \underline{Y}^{s*} \cdot \underline{U}^{s*} \quad \forall s \in \Omega$$

$$\underline{Y}^s = \sum_{z \in Z_g^s} \underline{A}_z \cdot \underline{Y}_z \cdot \underline{A}_z^T = \underline{Y} - \sum_{z \in Z_g^s} \underline{A}_z \cdot \underline{Y}_z \cdot \underline{A}_z^T$$

## Betriebliche Grenzwerte

$$\Delta \theta_z^s = \left| \arg \left( (1 \ 0) \cdot \underline{A}_z^T \cdot \underline{U}^s \right) - \arg \left( (0 \ 1) \cdot \underline{A}_z^T \cdot \underline{U}^s \right) \right|$$

$$\bar{I}_z^s \leq \bar{I}_{\max,z}^s + v_{I,z}(s) \quad \begin{array}{l} v_{I,z}(s) \in \mathbb{R}_0^+ \\ \forall s \in \Omega \\ \forall z \in Z_b \end{array}$$

$$U_{\min,i}^s - v_{U,i}^-(s) \leq |U_i^s| \leq U_{\max,i}^s + v_{U,i}^+(s) \quad \begin{array}{l} v_{U,i}^{+/-}(s) \in \mathbb{R}_0^+ \\ \forall s \in \Omega \\ \forall i \in K \end{array}$$

$$\Delta \theta_z^s \leq \Delta \theta_{\max,z}^s + v_{\Delta \theta,z}(s) \quad \begin{array}{l} v_{\Delta \theta,z}(s) \in \mathbb{R}_0^+ \\ \forall s \in \{\Omega_a \cup \Omega_{a,\tau}\} \\ \forall z \in Z_a^s \end{array}$$

$$P_{\min,g}^s - v_{Y,g}^-(s) \leq \sum_{z \in Y_g^s} P_{\text{ack},z}^s \leq P_{\max,g}^s + v_{Y,g}^+(s) \quad \begin{array}{l} v_{Y,g}^{+/-}(s) \in \mathbb{R}_0^+ \\ \forall s \in \Omega_0 \\ \forall g \in \Theta \end{array}$$

$$I_{\max}^s = \begin{cases} I_{\max}^{s,(n-0)} & \text{falls } s \in \Omega_0 \\ I_{\max}^{s,(n-1),\tau} & \text{falls } s \in \Omega_{a,\tau} \\ I_{\max}^{s,(n-1)} & \text{falls } s \in \Omega_a \end{cases}$$

$$U_{\min/\max}^s = \begin{cases} U_{\min/\max}^{(n-0)} & \text{falls } s \in \Omega_0 \\ U_{\min/\max}^{(n-1)} & \text{falls } s \in \{\Omega_a \cup \Omega_{a,\tau}\} \end{cases}$$

## Betriebliche Freiheitsgrade

$$\underline{A}_z(\Omega^t) \in \Lambda_z$$

$$b_k(\Omega^t) \in \{0, 1\}$$

$$\underline{S}_k(s) = P_k(s) + j Q_k(s) \leq b_k(s) \cdot \underline{S}_{\max,k}$$

$$b_k(\Omega^t) \geq b_k(\Omega^{t-\varsigma}) - b_k(\Omega^{t-\varsigma-1}) \quad \forall \varsigma \in \{n \in \mathbb{N}_0 | n < T_{\text{bet},\min}\}$$

$$b_k(\Omega^t) \leq b_k(\Omega^{t-\varsigma}) - b_k(\Omega^{t-\varsigma-1}) + 1 \quad \forall \varsigma \in \{n \in \mathbb{N}_0 | n < T_{\text{still},\min}\}$$

$$|P_k(s_a) - P_k(s_0)| \leq b_k(s_0) \cdot \frac{\partial P}{\partial \tau_{\max,k}} \cdot \tau_x$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} \cdot \Delta t \leq P_k(s_0^{t+1}) - P_k(s_0^t) \leq \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \Delta t$$

$$\Delta P_{pu}(s_0^t) = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{pu} \cdot \Delta q_{pu}(s_0^t) \cdot \frac{1}{\eta_{pu}}$$

$$\Delta P_{tu}(s_0^t) = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{tu} \cdot \Delta q_{tu}(s_0^t) \cdot \eta_{tu}$$

$$V_{\min,\beta} \leq V_{0,\beta}^t + \sum_{\varsigma=0}^t \left( + \sum_{tu \in I_{\beta,UB}^t} \Delta q_{tu}(s_0^t) + \sum_{pu \in I_{\beta,UB}^t} \Delta q_{pu}(s_0^t) - \sum_{tu \in I_{\beta,OB}^t} \Delta q_{tu}(s_0^t) - \sum_{pu \in I_{\beta,OB}^t} \Delta q_{pu}(s_0^t) \right) \leq V_{\max,\beta}$$

$$\underline{Y}_r(s) = \underline{Y}_r(\gamma(s)) = \underline{Y}_r(\gamma_0^{\Omega^t}) + \Delta \gamma_r(s) \quad \gamma \in \Psi_r \subset \mathbb{Z}$$

$$\underline{Y}_\kappa(\Omega^t) = \underline{Y}_\kappa(\gamma_\kappa(\Omega^t)) = \underline{Y}_\kappa(\gamma_0^{\Omega^t}) + \Delta \gamma_\kappa(\Omega^t) \quad \gamma \in \Psi_\kappa \subset \mathbb{Z}$$

$$\underline{S}_{hk}(s) = P_{hk}(s) + j Q_{hk}(s) = \underline{S}_{0,hk}^{\Omega^t} + \Delta \underline{S}_{hk}(s) \leq \underline{S}_{\max,hk}(\underline{U})$$

$$P_{hk2}(s) = P_{hk2}(P_{hk1}(s))$$

$$|P_{hk}(s_a) - P_{hk}(s_0)| \leq \Delta P_{\max,\tau_r,hk}$$

$$0 \leq P_{ee}(s) = P_{0,ee}^{\Omega^t} + \Delta P_{ee}(s) \leq P_{0,ee}^{\Omega^t}$$

$$P_{0,v}^{\Omega^t} \leq P_v(s) = P_{0,v}^{\Omega^t} + \Delta P_{0,v}(s) \leq 0$$

$$\Delta \underline{S}_f(s) = j \Delta Q_f(s)$$

$$Q_{\min,f}(\underline{U}) \leq Q_{0,f}^s + \Delta Q_f(s) \leq Q_{\max,f}(\underline{U})$$

## Zielfunktionsanreize

$$o(\tilde{x}) = C_{\text{loss}} + C_{\text{netz}} + C_{\text{mark}} + C_v$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_{s_0^t \in \Omega_0} c_{\text{loss}} \cdot \left( \sum_{z \in Z} P_{\text{loss},z}(s_0^t) + \sum_{hlrg \in Z_{DC}} P_{\text{loss},hlrg}(s_0^t) \right)$$

$$C_{\text{mark}} = \sum_{s_0^t \in \Omega_0} \left( + \sum_{k \in G} c_{\text{start},k}^{s_0^t} \cdot \max \left( \left[ 0, b_k(s_0^t) - b_k(s_0^{t-1}) \right] \right) \right. \\ \left. + \sum_{s \in \Omega} \left( + \sum_{k \in [G,P,T]} \left( c_{P,k}^s \cdot \Delta P_k(s) + c_{P|,k}^s \cdot |\Delta P_k(s)| \right) \right. \right.$$

$$\left. + c_{Q|,k}^s \cdot |\Delta Q_k(s)| \right) \\ + \sum_{ee \in EE} c_{P|,ee}^s \cdot |\Delta P_{ee}(s)|$$

$$\left. + \sum_{v \in V} \left( c_{P,v}^s \cdot \Delta P_v(s) + c_{P|,v}^s \cdot |\Delta P_v(s)| \right) \right)$$

$$C_{\text{netz}} = \sum_{s_0^t \in \Omega_0} \left( + \sum_{z \in Z} \begin{cases} c_{\text{top},z} & \text{falls } \underline{A}_z(s_0^t) \neq \underline{A}_{0,z}^{s_0^t} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \right. \\ \left. + \sum_{\kappa \in K} c_\kappa \cdot |\Delta \gamma_\kappa(s_0^t)| \right) \\ + \sum_{s \in \Omega} \left( + \sum_{f \in F} c_f^s \cdot |\Delta Q_f(s)| \right. \\ \left. + \sum_{hk \in H} \left( c_{P|,hk}^s \cdot |\Delta P_{hk}(s)| + c_{Q|,hk}^s \cdot |\Delta Q_{hk}(s)| \right) \right)$$

$$C_v = \sum_{s_0^t \in \Omega_0} \left( + \sum_{g \in \Theta} \left( c_{Y,g}^{+,s_0^t} \cdot v_{Y,g}^{+,s_0^t}(s_0^t) + c_{Y,g}^{-,s_0^t} \cdot v_{Y,g}^{-,s_0^t}(s_0^t) \right) \right. \\ \left. + \sum_{s \in \Omega} \left( + \sum_{z \in Z} c_{I,z}^s \cdot v_{I,z}(s) \right. \right. \\ \left. + \sum_{z \in Z_g^s} c_{\Delta \theta,z}^s \cdot v_{\Delta \theta,z}(s) \right. \\ \left. + \sum_{i \in K} \left( c_{U,i}^{+,s} \cdot v_{U,i}^{+,s}(s) + c_{U,i}^{-,s} \cdot v_{U,i}^{-,s}(s) \right) \right)$$

$$c^s = \begin{cases} c_0 & \text{falls } s \in \Omega_0 \\ p(s) \cdot c_0 & \text{falls } s \in \Omega_a \\ 0 & \text{falls } s \in \Omega_{a,\tau} \end{cases}$$

➔ Geeignetes Verfahren zur Lösung des umfangreichen Optimierungsproblems erforderlich

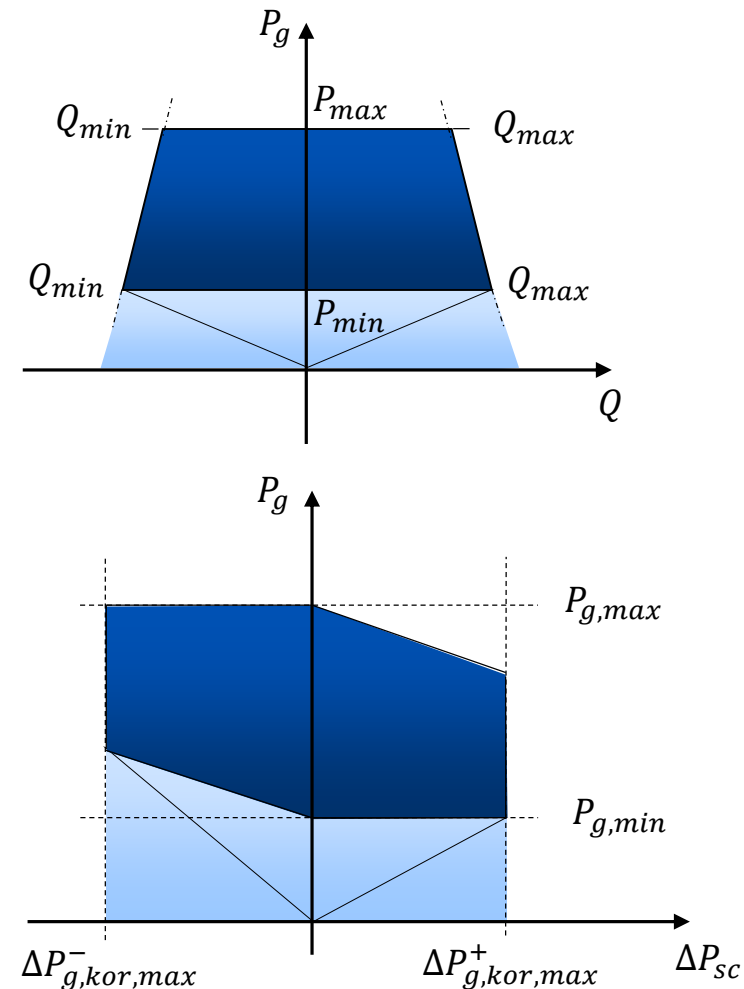
# Betriebsbereichsrelaxierung

## Lösung ganzzahliger Optimierungsprobleme

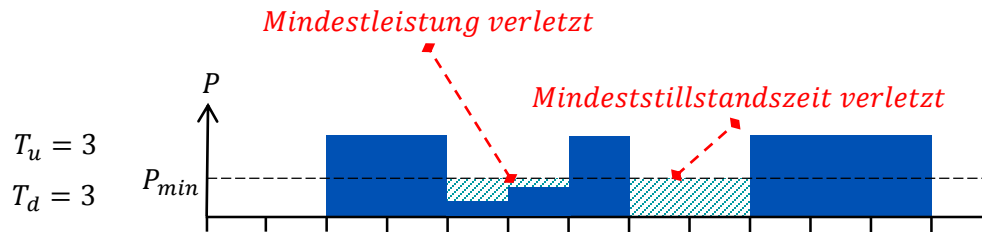
- Lösung eines kontinuierlich relaxierten Teilproblems gängige Komponente in der Lösung ganzzahliger Optimierungsprobleme
- Direkte Relaxierung der Einsatzentscheidungen führt zu
  - ◆ vielen technisch nicht gültigen Zuständen
  - ◆ hohem Berechnungsaufwand
- ➔ Angepasste Relaxierung erstrebenswert

## Optimierte Betriebsdiagrammrelaxierung

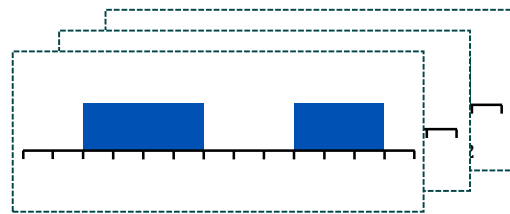
- Lösungen der linearen Programmierung liegen in einer Ecke des Lösungsraums
- ➔ Alle Ecken des relaxierten Betriebsdiagramms sollten technisch gültige Zustände sein
- ➔ Geringe Anzahl technisch nicht gültiger Zustände in Lösung des relaxierten Problems
- ➔ Effiziente Bestimmung optimierter Ganzzahligkeitsentscheidungen



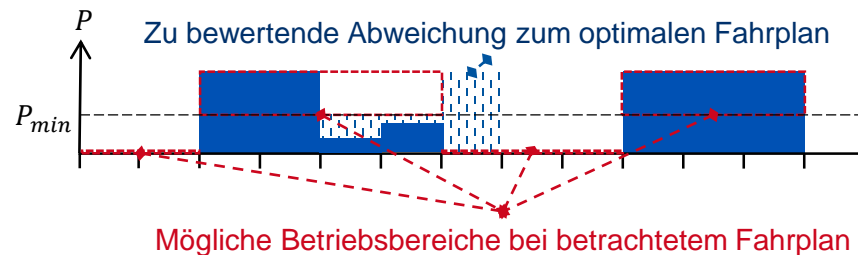
# Fahrplanbasierte Entscheidungsfindung



Optimierungsergebnis des relaxierten Problems

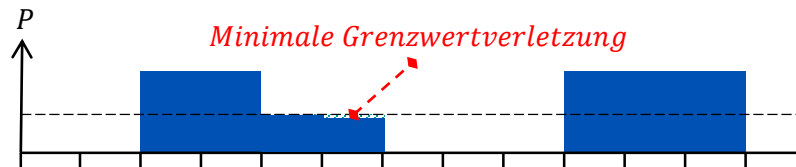


Generierung aller technisch gültigen Fahrpläne, falls ganzzahlige Nebenbedingungen verletzt



Bewertung aller Fahrpläne mit partieller Ableitung der Zielfunktion (ZF) im Arbeitspunkt

➔ Beschränkung auf die maximal  $N_{dispatch}$  besten Einsätze je Kraftwerk

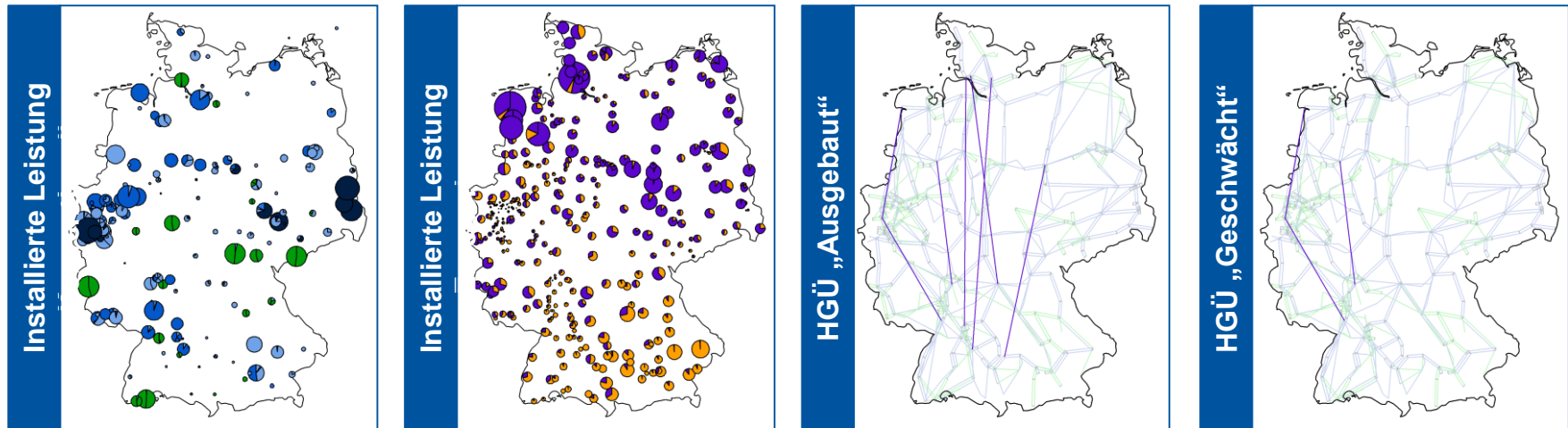
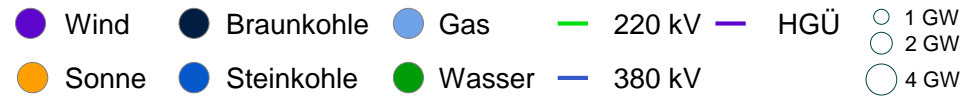


Direkte Übernahme eindeutiger Einsatzentscheidungen

➔ Keine Berücksichtigung von Fahrplänen, die mehr  $f_{dis,max}$  mal teurer sind als bester Einsatz



# Untersuchungsübersicht



## Untersuchungsszenario

- Erzeugungskapazitäten gemäß Szenario Netzentwicklungsplan (NEP) B 2024
- Drehstromnetz basierend auf öffentlichen Daten und Netzausbau gemäß NEP B 2024

## Betrachteter HGÜ-Ausbau

- „Ausgebaut“:  
Alle HGÜ-Korridore
- „Geschwächt“:  
Nur HGÜ-Korridore A und B

## Untersuchung

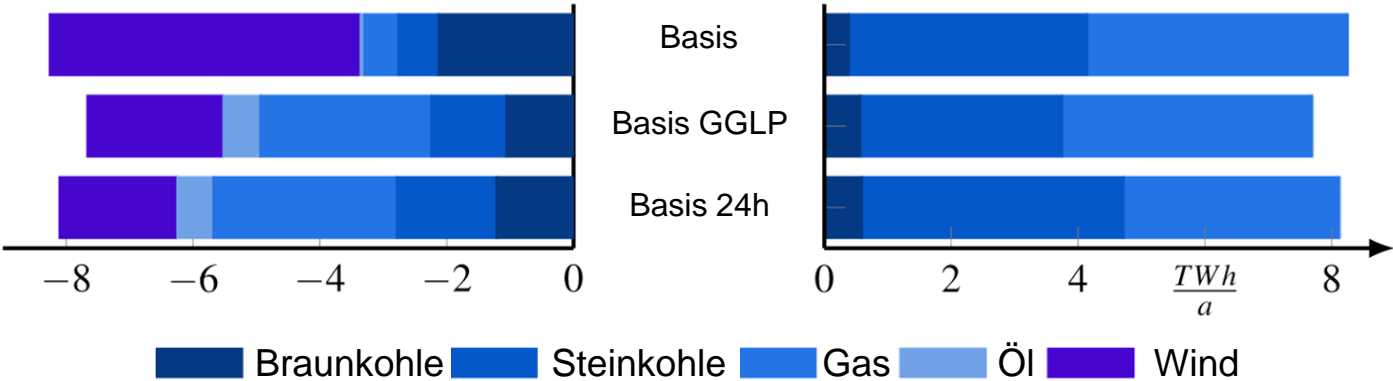
- Einfluss ganzzahliger Kraftwerkseinsatzentscheidungen auf simulierte Redispatchmaßnahmen bei geschwächtem Netzmodell

# Einfluss ganzzahliger Kraftwerkseinschaltentscheidungen

	Redispatch & Einspeisemanagement	Ganzzahlige Kraftwerks-einschaltentscheidungen	Zeitkoppelnde Betriebsrestriktionen fossiler Kraftwerke
Basis	x		
Basis GGLP	x	x	
Basis 24h	x	x	x

- Berechnung der Redispatchmengen für 8760 Last-/Einspeisesituationen auf geschwächtem Netzmodell
- Ganzzahlige Kraftwerkseinsatzentscheidungen (insbesondere Kraftwerksabschaltung) haben großen Einfluss auf Zusammensetzung der Redispatchmaßnahmen
- Zeitkoppelnde Restriktionen führen zu leichter Erhöhung der Stromerzeugung aus trägen Kraftwerkstechnologien
- ➔ Ganzzahlige und zeitkoppelnde Restriktionen verändern die Zusammensetzung des Redispatch, jedoch kaum die Redispatchmenge

Jährliche Redispatchmenge bei geschwächtem Netzmodell



# Zusammenfassung

## Hintergrund

- Wachsende Rolle von Redispatchmaßnahmen im Übertragungsnetzbetrieb
- ➔ Welche technischen Anforderungen stellen sich bei der Simulation von Redispatchmaßnahmen für zukünftige Szenarien?

## Optimierungsverfahren

- Optimierte Relaxierung der Betriebsdiagramme
- Heuristische, fahrplanorientierte Wahl geeigneter Kraftwerkseinsätze

## Exemplarische Untersuchungen

- Redispatchmenge von ganzzahligen Entscheidungen kaum beeinflusst
- Zusammensetzung der Redispatchmengen nach Primärenergieträger stark von der Möglichkeit der Kraftwerksabschaltung abhängig
- Geringer Einfluss von Mindestbetriebs- und -stillstandszeiten

## Weitere Fragen?

Dr.-Ing. Jonas Eickmann  
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW)  
RWTH Aachen University

Tel: +49 (0)241 80-96711  
E-Mail: [je@iaew.rwth-aachen.de](mailto:je@iaew.rwth-aachen.de)  
<http://www.iaew.rwth-aachen.de>

## Institutsleiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser