



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



**ESEA**  
Institut für Energiesysteme  
und Elektrische Antriebe

# **Einfluss von Hochspannungs-Gleichstromsystemen auf die Zuverlässigkeit von Übertragungsnetzen**

Gerhard Theil  
Technische Universität Wien  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
1040 Wien, Gußhausstraße 25  
[gerhard.theil@tuwien.ac.at](mailto:gerhard.theil@tuwien.ac.at)

# Zentrale Fragestellung

Untersuchung der Auswirkung von Ausbaumaßnahmen auf die Netzzuverlässigkeit am Beispiel eines realen Hochspannungs-Übertragungsnetzes

- A) Ringschlüsse im 380-kV-Drehstromnetz
- B) Überlagertes Hochspannungs-Gleichstromnetz

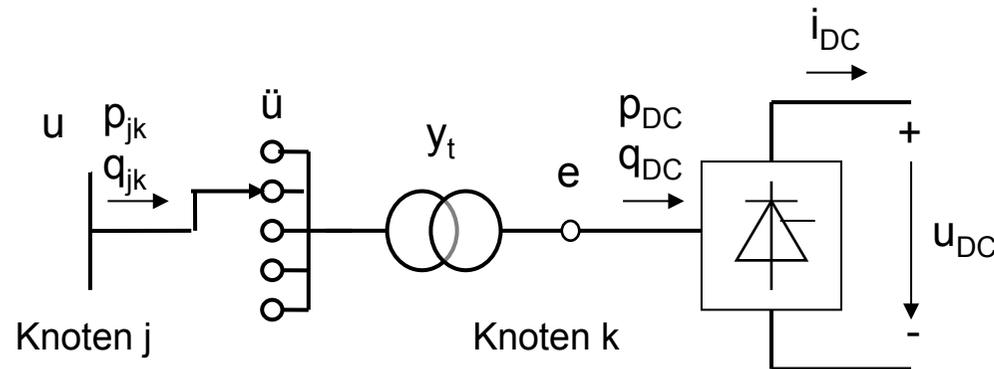
Betrachtete Strukturen des Gleichstromnetzes:

- Punkt-zu-Punkt (HGü-Leitung)
- Baumstruktur
- Schienenstruktur
- Ring

# Methodische Vorgangsweise

- Mathematische Modellierung der HGÜ-Systeme
- Implementation der HGÜ in die Wechselstrom-Lastflussrechnung
- Entwicklung von Algorithmen zur Simulation der Regelungseigenschaften der HGÜ
- Implementation der HGÜ in die Zuverlässigkeitsanalyse-Software
- Präsentation von Zuverlässigkeitsanalysen für mehrere Varianten eines realen 380-kV/220-kV-Übertragungsnetzes

# Modellierung der HGÜ-Systeme



Modell einer Stromrichterbrücke

- u, e Wechselspannungen auf Primär- und Sekundärseite des Stromrichtertransformators
- $p_{jk}$ ,  $q_{jk}$ ,  $p_{DC}$ ,  $q_{DC}$  Wirk- und Blindleistung auf der Primär- und Sekundärseite des Stromrichtertransformators
- $\ddot{u}$  Variable Spannungsübersetzung des Stromrichtertransformators,  $\ddot{u} = u/e$
- $y_t$  Längsimpedanz des Stromrichtertransformators
- $u_{DC}$  Gleichspannung am Stromrichter
- $i_{DC}$  Gleichstrom des Stromrichters (positiv: Gleichrichterbetrieb, negativ: Wechselrichterbetrieb)

Normierte Stromrichtergleichung (in per-unit)

$$u_{DC} = k \cdot e \cdot \cos \theta - x_c \cdot i_{DC}$$

# Mathematische Modellierung des Stromrichters

Stromrichtergleichung (in per-unit)

$$u_{DC} = k.e.\cos\theta - x_c i_{DC}$$

$$k = \frac{3\sqrt{2}.n_B U_b}{\pi.U_{DC,b}} \quad x_c = \frac{3.n_B X_c .P_{DC,b}}{\pi.U_{DC,b}^2}$$

$n_B$  Anzahl der Brücken

$U_b$  Wechselstrom-Bezugsspannung in kV

$U_{DC,b}$ ,  $P_{DC,b}$ : per-unit- Bezugsgrößen für Spannungen und Leistungen des Gleichstromsystems in kV bzw. MW

$X_c$  Kommutierungsreaktanz in Ohm

$\theta$  Zünd- bzw. Löschwinkel

# Mathematische Modellierung des Stromrichters

Stromrichter-Strom

$$i_{DC} = \frac{k.e.\cos\theta - u_{DC}}{x_c}$$

Gleichstromleistung

$$p_{DC} = i_{DC} \cdot u_{DC}$$

Kommutierungsblindleistung

$$q_{DC} = |p_{DC}| \sqrt{\frac{(k.e_k)^2}{u_{DC}^2} - 1}$$

# Modellierung des Gleichstromnetzes

In Vektor- Matrizendarstellung:

$$\mathbf{i}_{DC} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}_{DC}$$

**G** Leitwertmatrix, Dimension: Anzahl der Knoten des Gleichstromnetzes

Das Gleichungssystem ist bei Monopolar- und bei Bipolarsystemen identisch, unterschiedlich sind lediglich die Gleichungen zur Umrechnung der Admittanzen auf per-unit.

Monopolarsystem

$$Z_{DC,bb} = \frac{U_{DC,b,LE}^2}{P_{DC,b}}$$

Bipolarsystem

$$Z_{DC,bb} = \frac{U_{DC,b,LL}^2}{2P_{DC,b}}$$

# Kombination des Gleich- und Wechselstromsystems

An der Schnittstelle zwischen Stromrichter und Gleichstromnetz muss die folgende Bilanzgleichung erfüllt sein:

$$\Delta i_{b,k} = i_{DC,k} - g_{DC,k} \cdot u_{DC} = 0$$

$g_{DC,k}$  k-te Zeile der Admittanzmatrix  $\mathbf{G}$  des Gleichstromnetzes

Bilanzgleichungen für die Wechselstromseite des Stromrichters:

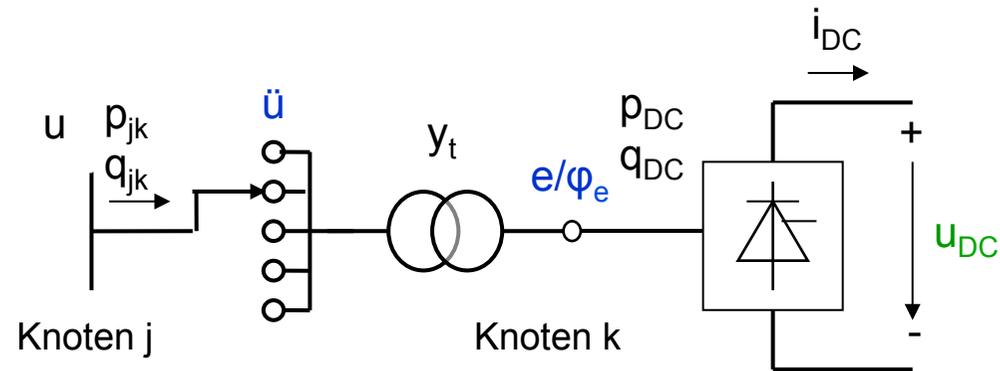
$$\Delta p_k = p_{g,k} - p_{b,k}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}) - p_{DC,k}(e_k, u_{DC,k}, \theta, \dots) = 0$$

$$\Delta q_k = q_{g,k} - q_{g,k}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}) - q_{DC,k}(e_k, u_{DC,k}, \dots) = 0$$

$p_{g,k}$ ,  $q_{g,k}$  Vorgegebene Wirk- und Blindleistungsbilanzen in Knoten k (0, da sich an Knoten k weder Lasten noch Einspeisungen befinden)

$p_{b,k}$ ,  $q_{b,k}$  Berechnete Wirk- und Blindleistungsflüsse in Knoten k aus j

# Zustandsgrößen des Stromrichters



Wechselstromseite:

$e, \varphi_e, \ddot{u}$

Gleichstromseite:

$u_{DC}, \cos\theta$

Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  wird hier als fester Eingabewert betrachtet, es verbleiben somit **4** Zustandsgrößen.

Für deren Bestimmung werden ebenso viele Vorgabewerte benötigt.

# Festlegung der Stromrichter- Zustandsgrößen

Den 4 Zustandsgrößen  $e$ ,  $\varphi_e$ ,  $u_{DC}$ ,  $\cos\theta$   
stehen zur Bestimmung gegenüber:

Bilanzgleichungen:

$$\Delta i_{b,k} = i_{DC,k} - g_{DC,k} \cdot u_{DC} = 0 \quad (7)$$

$$\Delta p_k = p_{g,k} - p_{b,k}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}) - p_{DC,k}(e_k, u_{DC,k}, \theta, \dots) \quad (8)$$

$$\Delta q_k = q_{g,k} - q_{g,k}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}) - q_{DC,k}(e_k, u_{DC,k}, \dots) \quad (9)$$

Es fehlt noch eine weitere Gleichung.  
Diese resultiert aus einer Sollwertvorgabe.

# Stromrichter-Sollwertvorgabe

## Möglichkeiten:

- Wirkleistung oder Strom (Leistung bzw. Strom vom Stromrichter in das Gleichstromnetz eingespeist oder von dort abgenommen)
- Konstante Stromrichterspannung  $u_{DC}$
- Konstanter Zünd-/Löschwinkel  $\theta$  bzw.  $\cos\theta$

## Mathematisches Modell der Wirkleistungs- oder Stromsollwertvorgabe

$$\Delta p_{DC,k} = p_{DC,soll,k} - p_{DC,k}(u_{DC,k}, u_{DC,l}, \dots) \quad (10)$$

## Mathematisches Modell der Spannungs- und Zünd-/Löschwinkelvorgabe

Gleichspannung oder  $\cos\theta$  wird aus dem Lösungsgleichungssystem eliminiert,  
analog zur Behandlung von Spannungsbeträgen bei PV-Knoten

# Zustandsgrößen des Wechselstromsystems

Gemäß klassischer Lastflussrechnung:  
Knotenspannungsbeträge und Spannungswinkel  
Bestimmung durch Wirk- und Blindleistungsresiduen der  
Knotenbilanzen

$$\Delta p_j = p_{g,j} - p_{b,j}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}, \dots)$$

$$\Delta q_j = q_{g,j} - q_{g,j}(u_j, \varphi_{u,j}, e_k, \varphi_{e,k}, \dots)$$

$j: 1 \dots n-1$  (n Knoten, 1 Slack),  $\Delta q_j$  nicht relevant für PV-Knoten

# Stromrichterregelung, Hierarchiestufe 1

Ziel: Erfüllung von Sollwertvorgaben

Bez.	$p_{DC}, i_{DC}$	$\cos\theta$	$u_{DC}$	$e$	$\varphi_e$	$\ddot{u}$	Res.1 (7)	Res.2 (10)	Res.3 (8)	Res.4 (9)
A	/	fix	var	var	var	fest	$\Delta i_{b,DC}$	/	$\Delta p$	$\Delta q$
B	fix	var	var	var	var	fest	$\Delta i_{b,DC}$	$\Delta p_{DC}$	$\Delta p$	$\Delta q$
C	fix	var	var	var	var	fest	$\Delta i_{b,DC}$	$\Delta i_{DC}$	$\Delta p$	$\Delta q$
D	/	var	fix	var	var	fest	$\Delta i_{b,DC}$	/	$\Delta p$	$\Delta q$

$\ddot{u}$  immer fest gemäß Eingabe

Res.3 und Res.4 bestimmen Wechselstrom-Zustandsgrößen  $e$  und  $\varphi_e$

Res.1 immer aktiv, damit Knotenbilanz Stromrichter – Gleichstromnetz erfüllt ist, es verbleibt ein Freiheitsgrad.

Variante A), D) Direkte Festlegung einer der Zustandsgrößen  $u_{DC}$  oder  $\cos\theta$ , kein Residuum Res.2 erforderlich

Variante B), C) Festlegung einer der abhängigen Größen  $p_{DC}$  oder  $i_{DC}$  durch Residuum Res.2

# Stromrichterregelung, Hierarchiestufe 2

Übergeordnete Regelung zur Erreichung einer  
**globalen Zielvorgabe** (Minimierung einer Zielfunktion)  
erfolgt durch Variation der Sollwertvorgaben mittels eines  
Optimierungsverfahrens

## **Zielfunktionen:**

**A)** Summe der Grenzwertverletzungen  
(Erfüllung von Sicherheitskriterien)

**B)** Minimale Verluste,  
Sicherheitskriterien als Nebenbedingungen

## **Optimierungsalgorithmus:**

Evolutionstrategie

# Evolutionstrategische Optimierung

## Individuum: Vektor von Objektparametern

(Stromrichtersollwerte  $\cos\theta$ ,  $u_{DC}$ ,  $p_{DC}$ ,  $i_{DC}$ , ferner  $\ddot{u}$  - ev. auch von Netztransformatoren -,  $|u|$  von PV-Knoten)

## Vektor von Strategieparametern

(Streuungen der Objektparameter)

## Variation der Elternindividuen

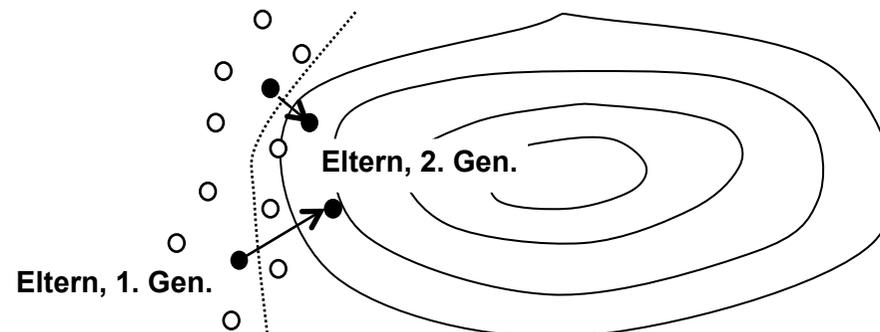
durch Variation der Objektparameter entsprechend der Strategieparameter

=> **Nachkommen**

## Selektion der besten Nachkommen

(Minimale Zielfunktion, keine Grenzwertverletzungen)

=> **Neue Elterngeneration**



# Lösung des kombinierten Gleich/ Wechselstrom-Problems nach Newton-Raphson

- Zusammenfassung sämtlicher Residuen des Gleich- und Wechselstromsystems im Vektor  $\Delta \mathbf{r}$ ,
- Zusammenfassung sämtliche Zustandsgrößen in  $\Delta \mathbf{x}$
- Bilden der Funktionalmatrix  $\mathbf{F}$  der Residuen bezüglich Zustandsgrößen

Es ergibt sich das Lösungsgleichungssystem:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{x}$$

Bzw. die iterative Prozedur:

$$\Delta \mathbf{x}^{\nu} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{r}^{\nu-1}$$

$$\mathbf{x}^{\nu} = \mathbf{x}^{\nu-1} + \Delta \mathbf{x}^{\nu}$$

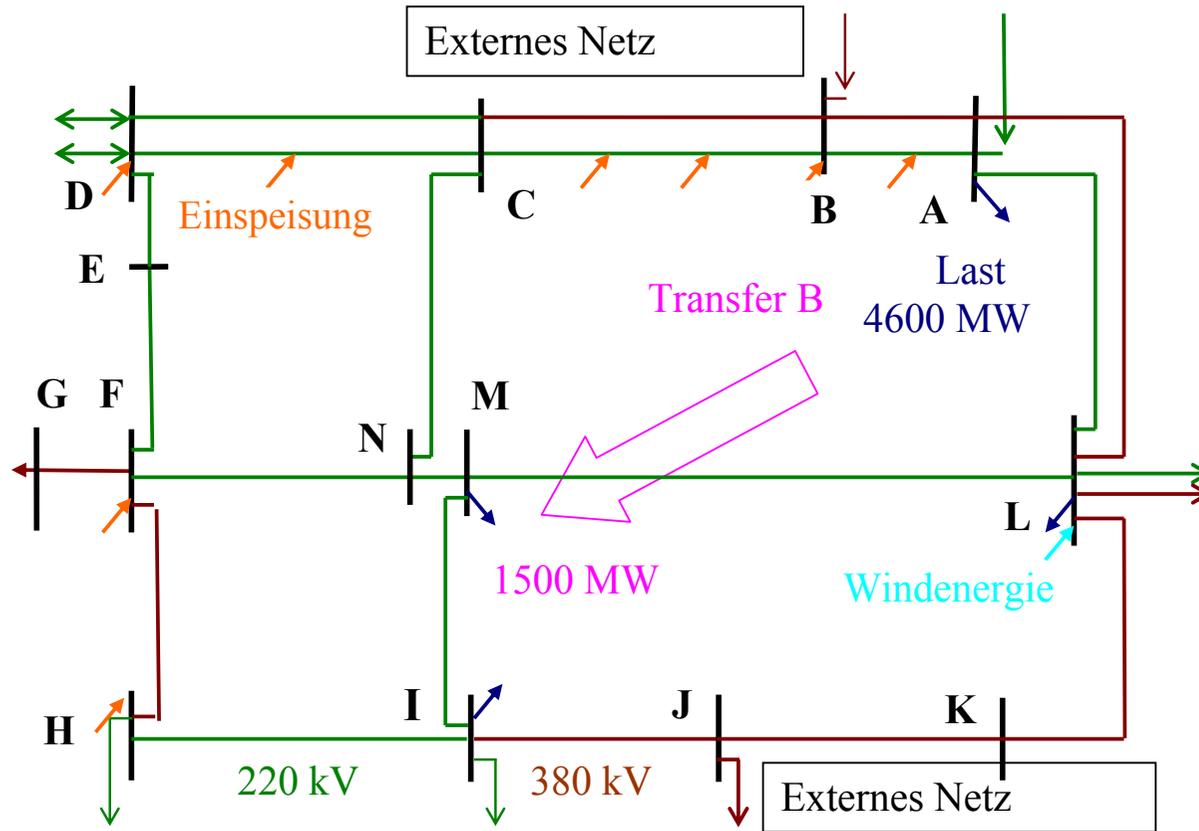
# Zuverlässigkeitsanalyse

## **Aktivitäten bzw. Algorithmen:**

- Simulation von Betriebsmittelausfällen (bis 4. Ordnung)
- Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten der Ausfälle (Markov- Methode)
- Bewertung der Ausfallfolgen mittels Fehlereffektanalyse, Simulation korrektiver Maßnahmen (durch Lastflussrechnung und Lastflussoptimierung)
- Wichtung der Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem Bewertungsindex der Ausfallfolgen,
- Akkumulation der gewichteten Ausfallwahrscheinlichkeiten zu System-Zuverlässigkeitsindizes (Ausfallhäufigkeit, Nichtverlässlichkeit)

# Resultate

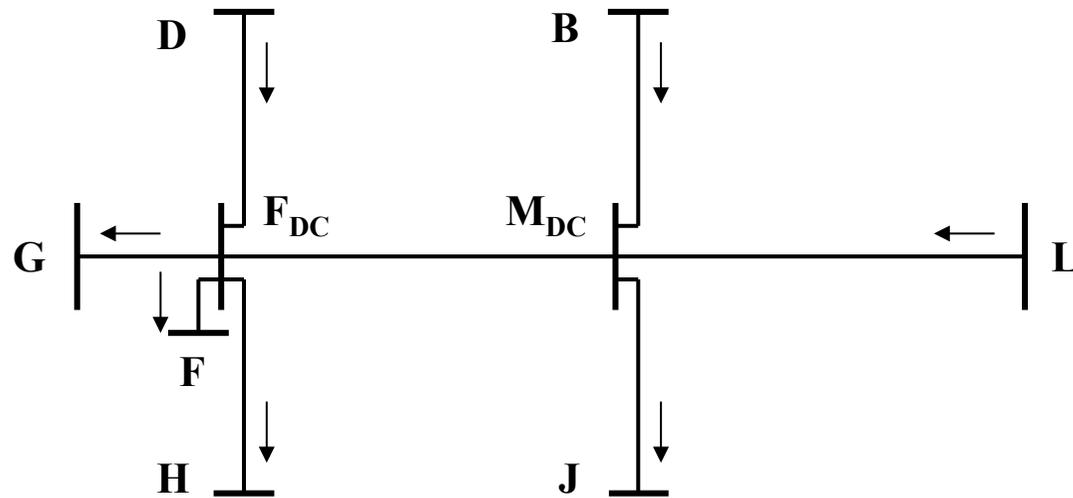
## Struktur des Hochspannungs-Drehstromnetzes



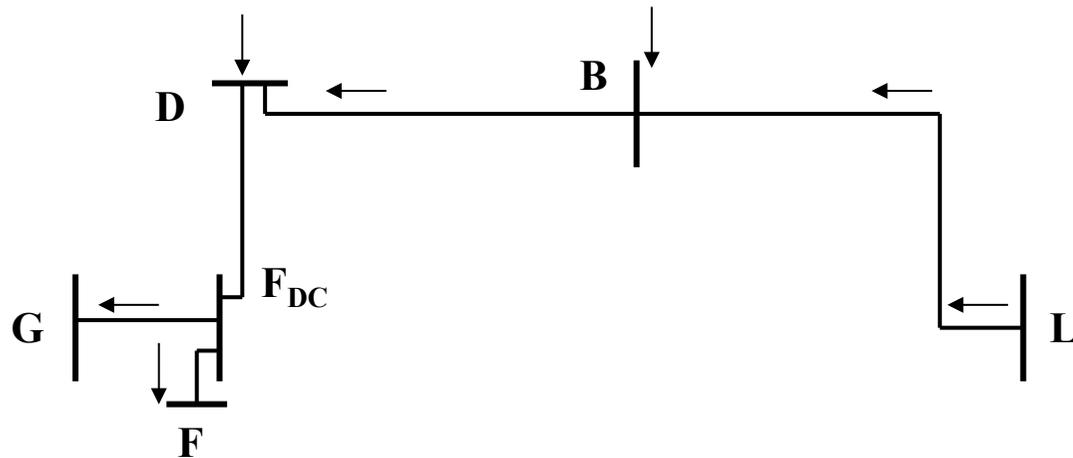
Externes Netz: Ward Äquivalent

# Strukturen der HGÜ-Netze

Baumstruktur

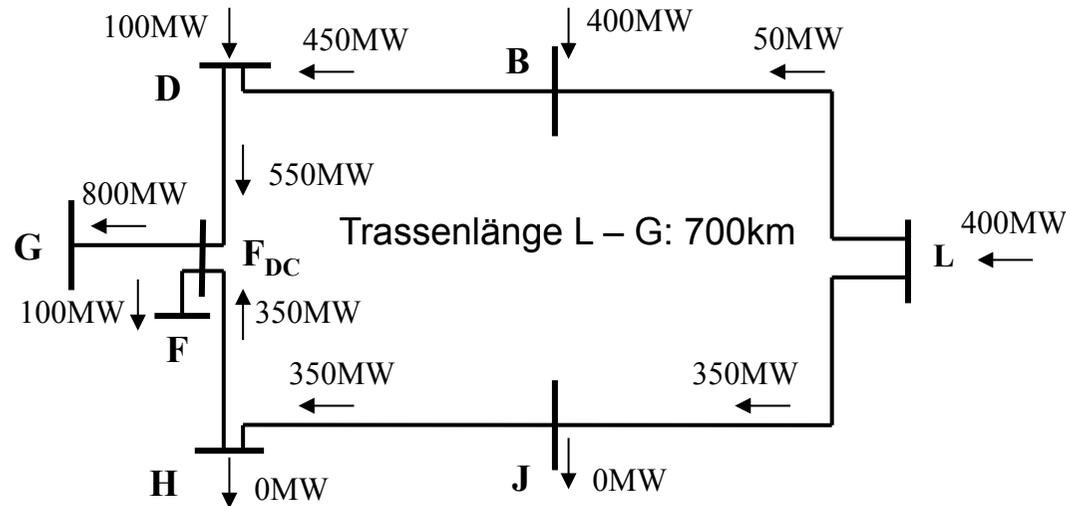


Schienenstruktur



# Strukturen der HGÜ-Netze

## Ringstruktur



**Stromrichtertechnik:** 12-pulsig, Bipolarsysteme,  $\pm 500\text{kV}$

**Regelungsparameter** (Minimierung von Grenzwertverletzungen):

- Sollleistungen der Stromrichter in Knoten B, D, F, H, J, L
- Sollspannung des Stromrichters in Knoten G
- Stufenstellungen der Stromrichtertransformatoren
- Stufenstellungen der Netztransformatoren 380-kV/220-kV

# Netz- und Regelungsvarianten, Bezeichnungsweise

## 1. Zeichen: Netzvariante Drehstromsystem

Nr.3: 380-kV-Netz gemäß Abb. "Drehstromnetz" braun

Nr.2: Wie Nr.3, Transfer B reduziert um 700MW

Nr.4: Offene Ringe im 380-kV-Netz geschlossen (grün => braun)

## 2. Zeichen: Netzvariante Gleichstromsystem

'b': Baumstruktur

'c': Schienenstruktur

'd': Ringnetz

'-': kein Gleichstromnetz

## 3. Zeichen: Regelungsvariante

'p': Sollleistungen und Spannungen der Stromrichter,  
PV-Knotenspannungen,

Stufenstellungen der Stromrichtertransformatoren und Phasenschieber

Kein DC-Netz: Phasenschieber und PV-Knoten

't': Zusätzlich Stufenstellungen der Netztransformatoren

'o': Keine Regelung mit Ausnahme der Generator-PV-Knoten

# Zuverlässigkeitsdaten der Netzkomponenten

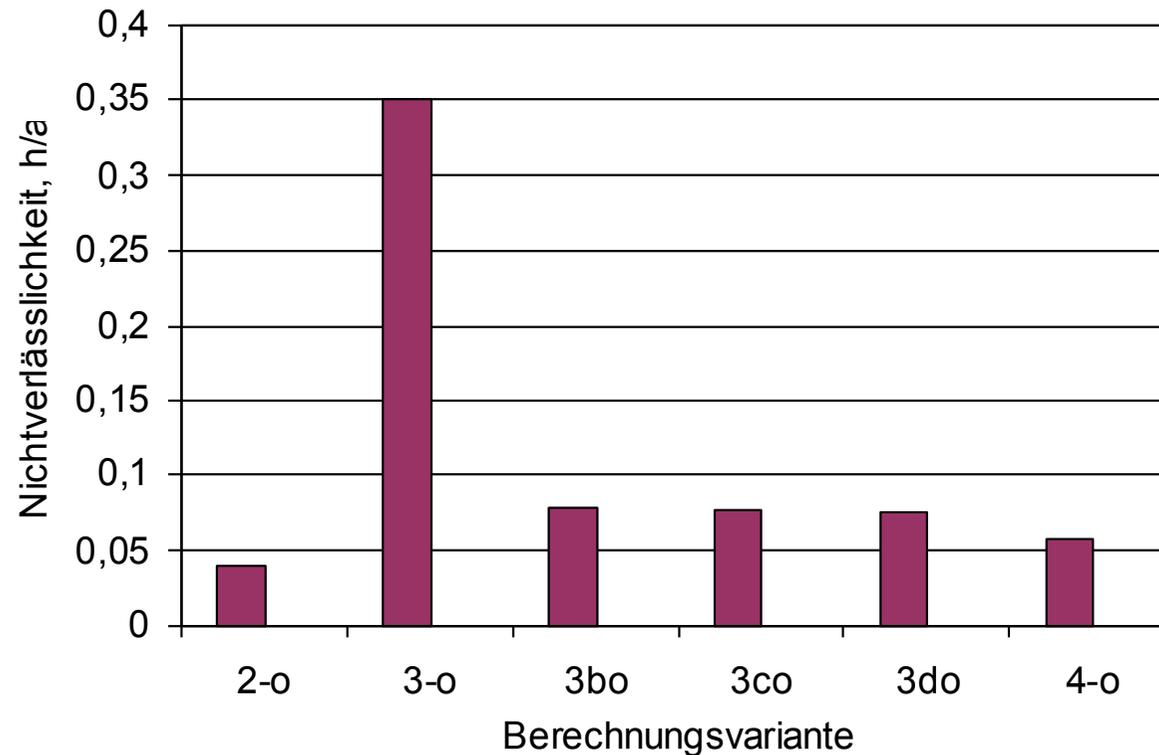
Stromrichtertransformatoren (Standardwerte für Transformatoren):  
Ausfallhäufigkeit 0,116/a, mittlere Ausfalldauer 28,6h

Stromrichterbrücken (angenommen):  
Ausfallhäufigkeit 0,022/a, mittlere Ausfalldauer 24h

Restliche Betriebsmittel: Standardwerte

# System- Energienichtverlässlichkeiten ohne Optimierung

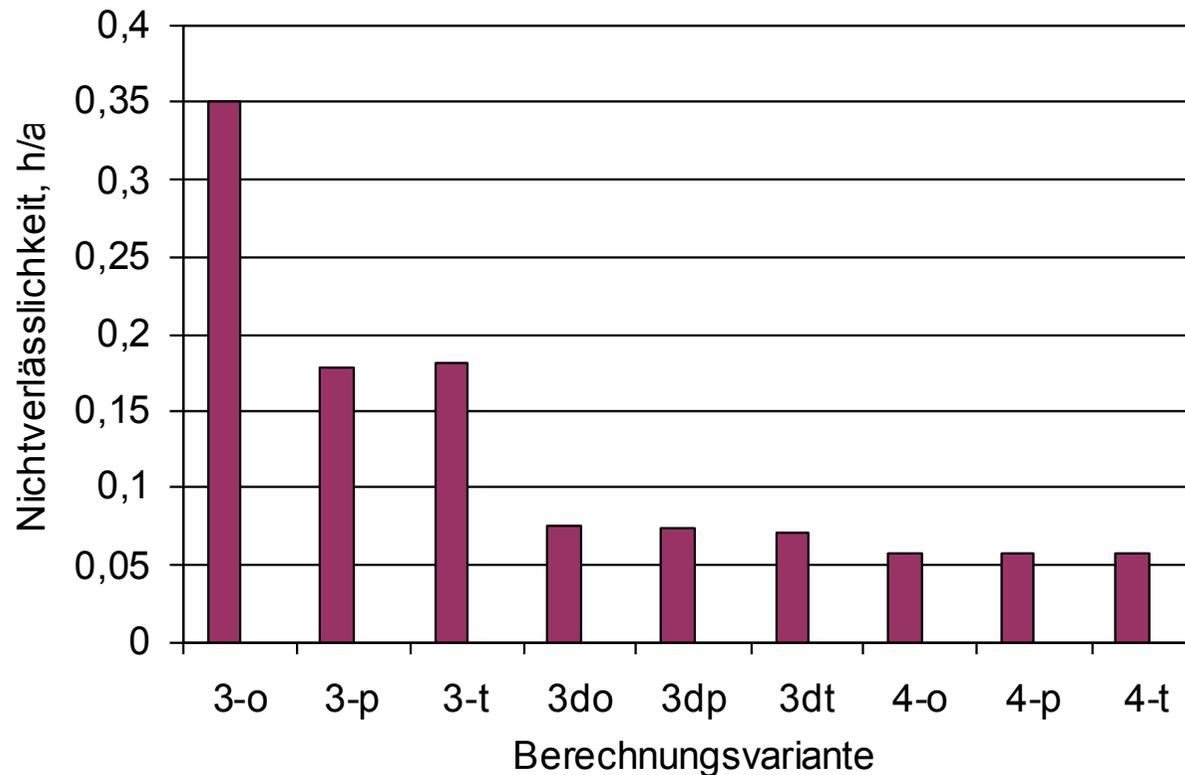
Sollwerte bleiben unverändert gemäß Vorgabe



Effizienz: Ring (d) vor Schiene (c) vor Baum (d), jedoch  
380-kV-Ring (4) am besten

# System- Energienichtverlässlichkeiten mit Optimierung

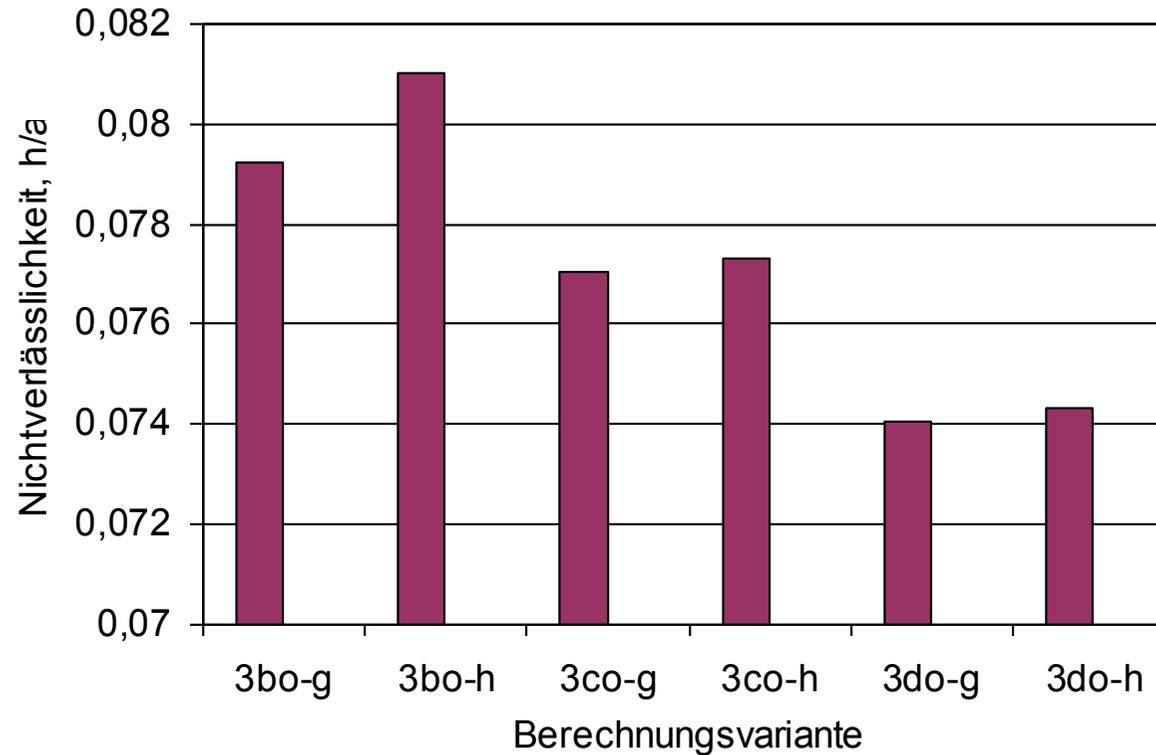
Sollwerte werden zur Minimierung von Grenzwertverletzungen  
verändert



Verbesserungspotential durch Regelung in allen Varianten vorhanden, jedoch  
in Netzvariante 3 ohne Gleichstromnetz höher als mit Gleichstromnetz

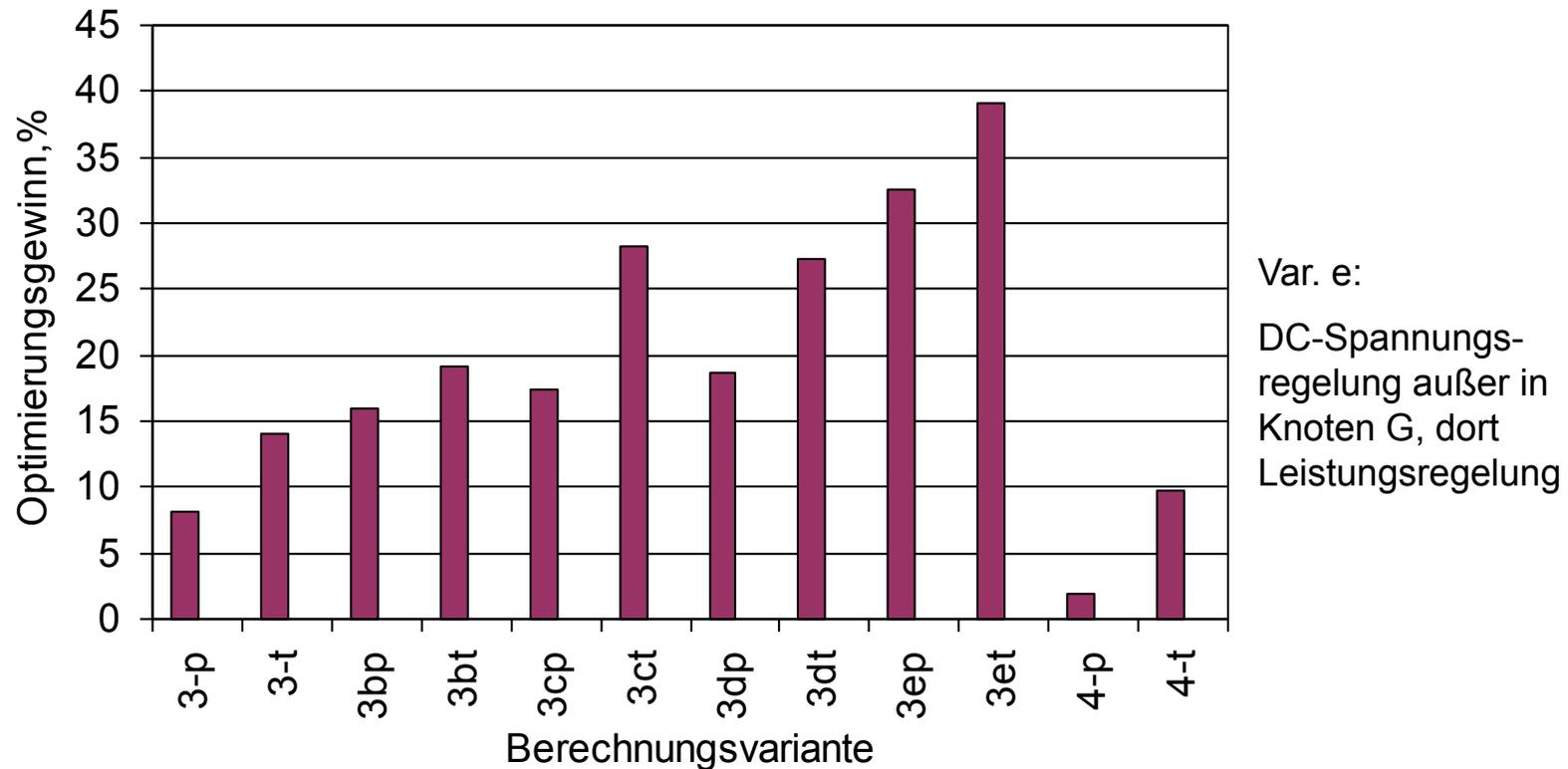
# System- Energienichtverlässlichkeiten

## Einfluss der Stromrichter-Ausfallhäufigkeiten



-g: Basiswerte, -h: um Faktor 10 erhöhte Ausfallhäufigkeiten

# Lastflussberechnung mit Verlustminimierung



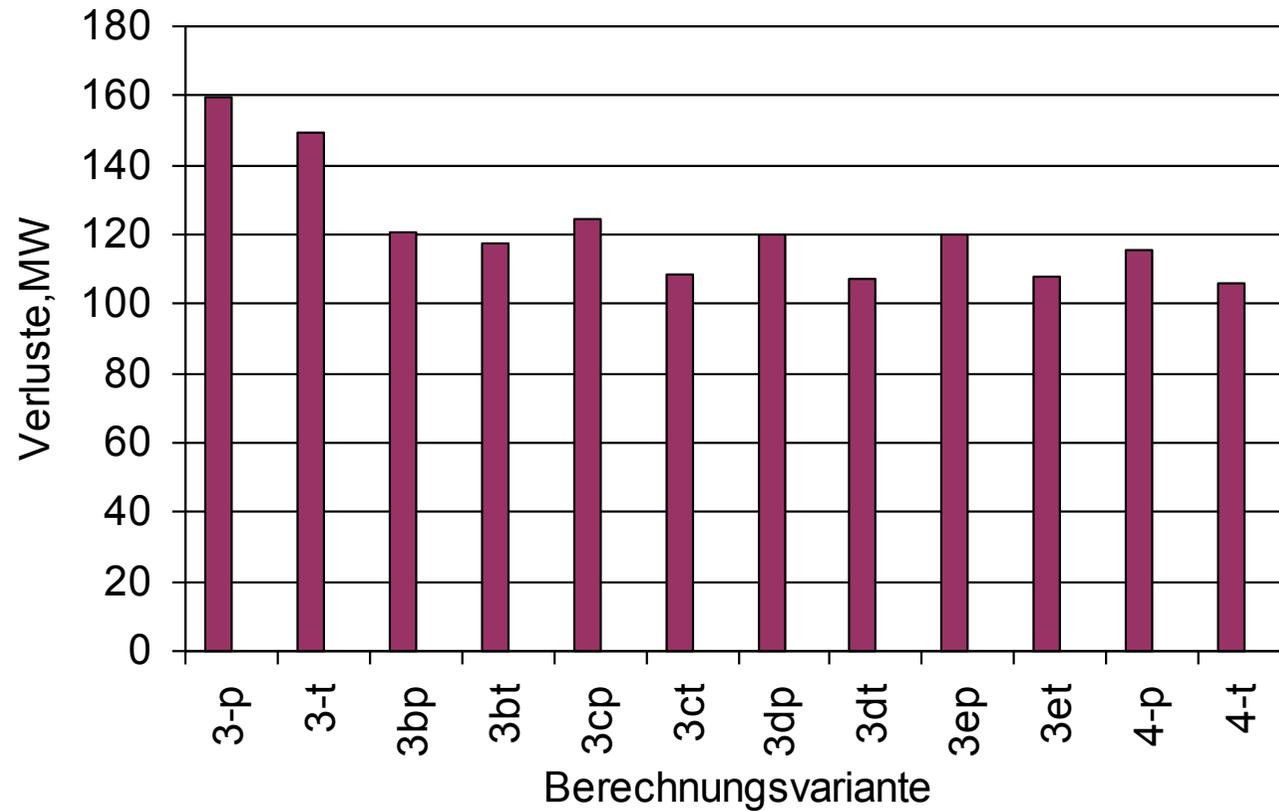
Bei Varianten mit Gleichstromnetz höhere Optimierungsgewinne infolge größerer Anzahl von Freiheitsgraden

Spiegelt sich dies auch in den Absolutwerten der Verluste wider?

Siehe nächste Folie

# Lastflussberechnung mit Verlustminimierung

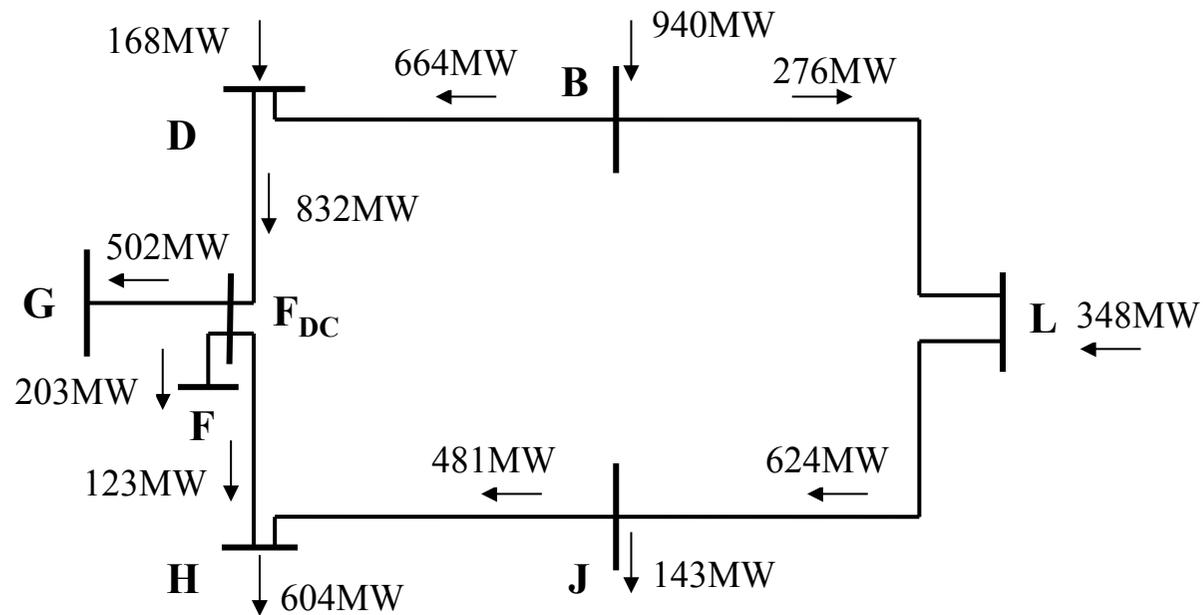
Verluste, Absolutwerte



Ring (d) tendentiell besser als Baum (b) und Schiene (c), jedoch geringste Verluste bei 380-kV-Ring (4)

# Lastflussberechnung mit Verlustminimierung

## Leistungsverteilung



# Zusammenfassung

- Ein überlagertes Gleichstromnetz bewirkt bei allen betrachteten Strukturvarianten eine deutliche Verbesserung der Systemzuverlässigkeit, und zwar bereits ohne evolutionsstrategische Parameterregelung.
- Das Verbesserungspotential durch Parameterregelung ist bei den Netzvarianten mit Gleichstromnetz geringer als bei den anderen Varianten.
- Die Gleichstromnetz-Ringstruktur erbringt das beste Ergebnis, gefolgt von der Schienenstruktur und danach der Baumstruktur.
- Die mittels Parametervariation erreichbaren Verlustreduktionen fallen bei den Varianten mit überlagertem Gleichstromnetz höher aus als bei den anderen vergleichbaren Systemen.
- Sie erreichen jedoch nicht das Ausmaß der Variante "vollständig ausgebautes 380-kV-Netz,,.

# Zusammenfassung

Die Resultate der vorliegenden Untersuchungen lassen somit den Schluss zu, dass ein Ausbau der 380-kV-Spannungsebene für das vorliegende System sowohl hinsichtlich Zuverlässigkeit als auch hinsichtlich Verluste vorteilhafter ist als die Überlagerung eines schwächer dimensionierten 380-kV-Netzes durch ein Gleichstromnetz.