

Zustandsschätzung und Regelung in einem intelligenten Energieübertragungsnetz

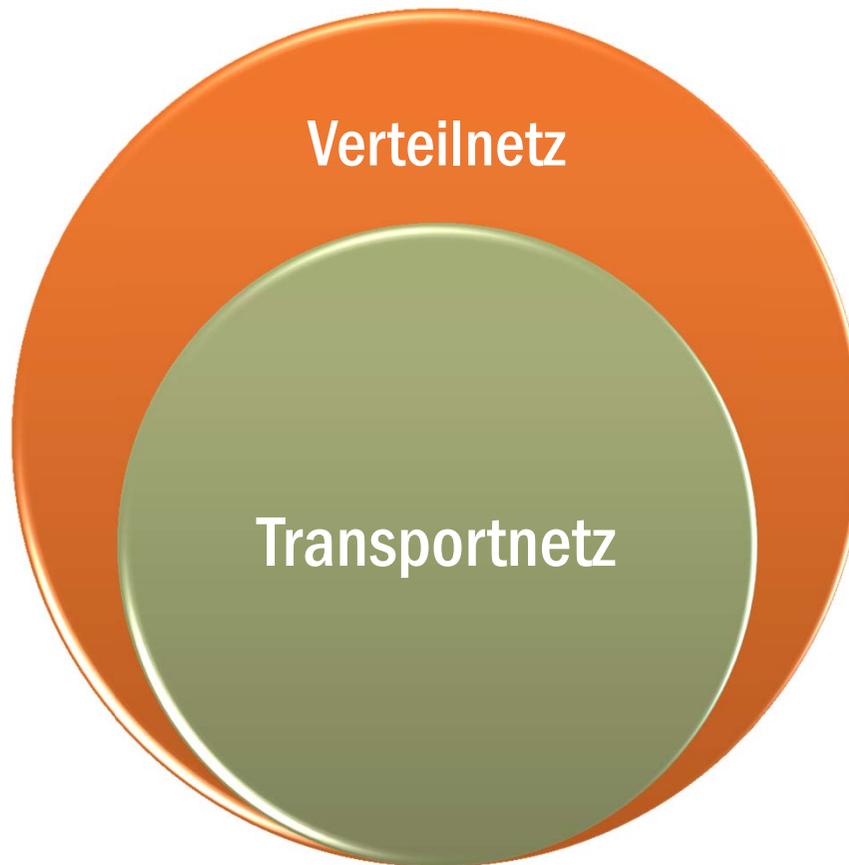
19. Juni 2012

Dipl. Ing. Matthias Kahl

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Netz im Wandel



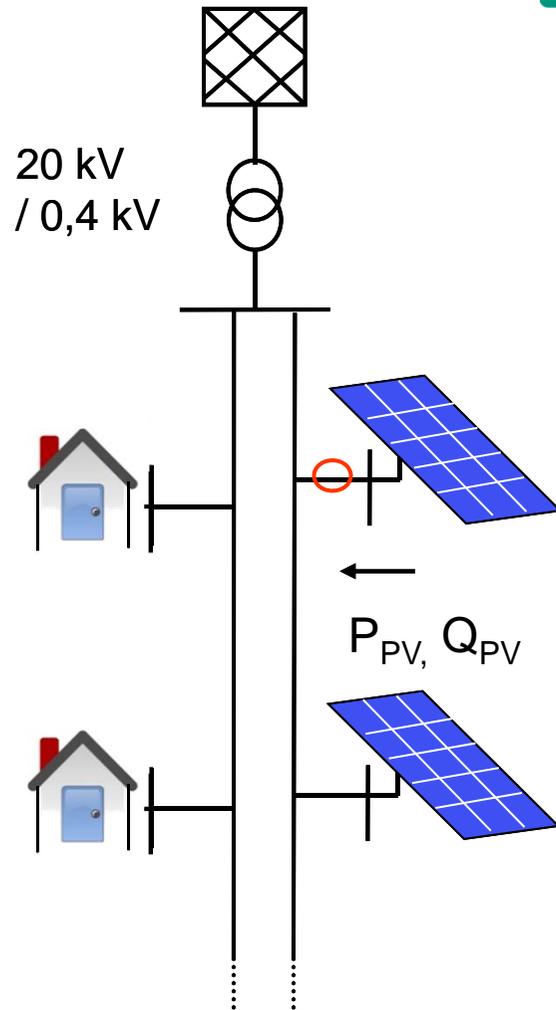
- Erzeugung in allen Netzebenen
 - Blindleistungsfähige PV-Anlagen im Niederspannungsnetz

↳ Auslegung dezentralen Regelung

- Fluktuierende Einspeisung
- Bedarf an Energietransport steigt

↳ Schätzung des Netzzustandes

Blindleistungskompensation



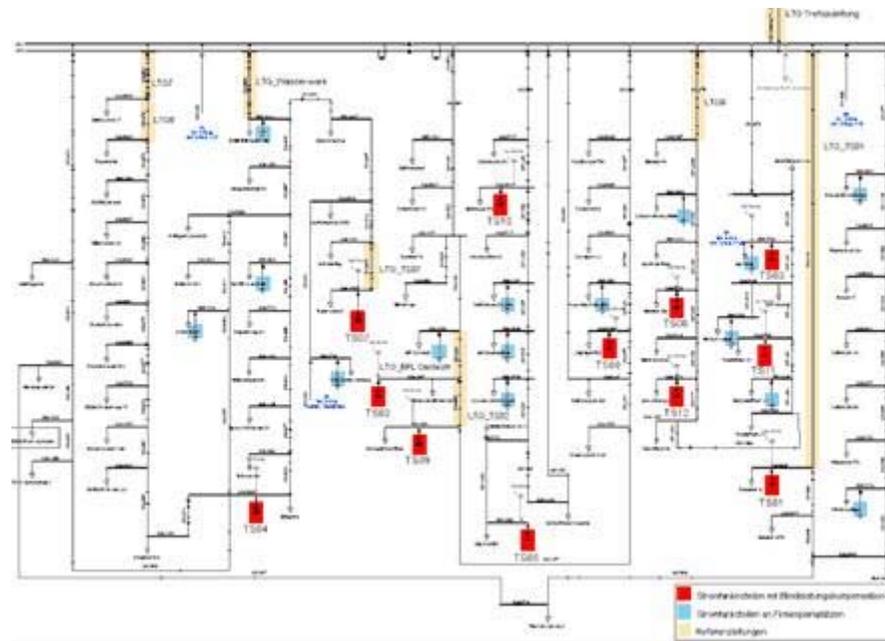
■ Wichtiger Baustein zur Netzoptimierung

- Einhaltung des Spannungsbandes
- Erhöhung der Übertragungskapazität
- Verlustminimierung

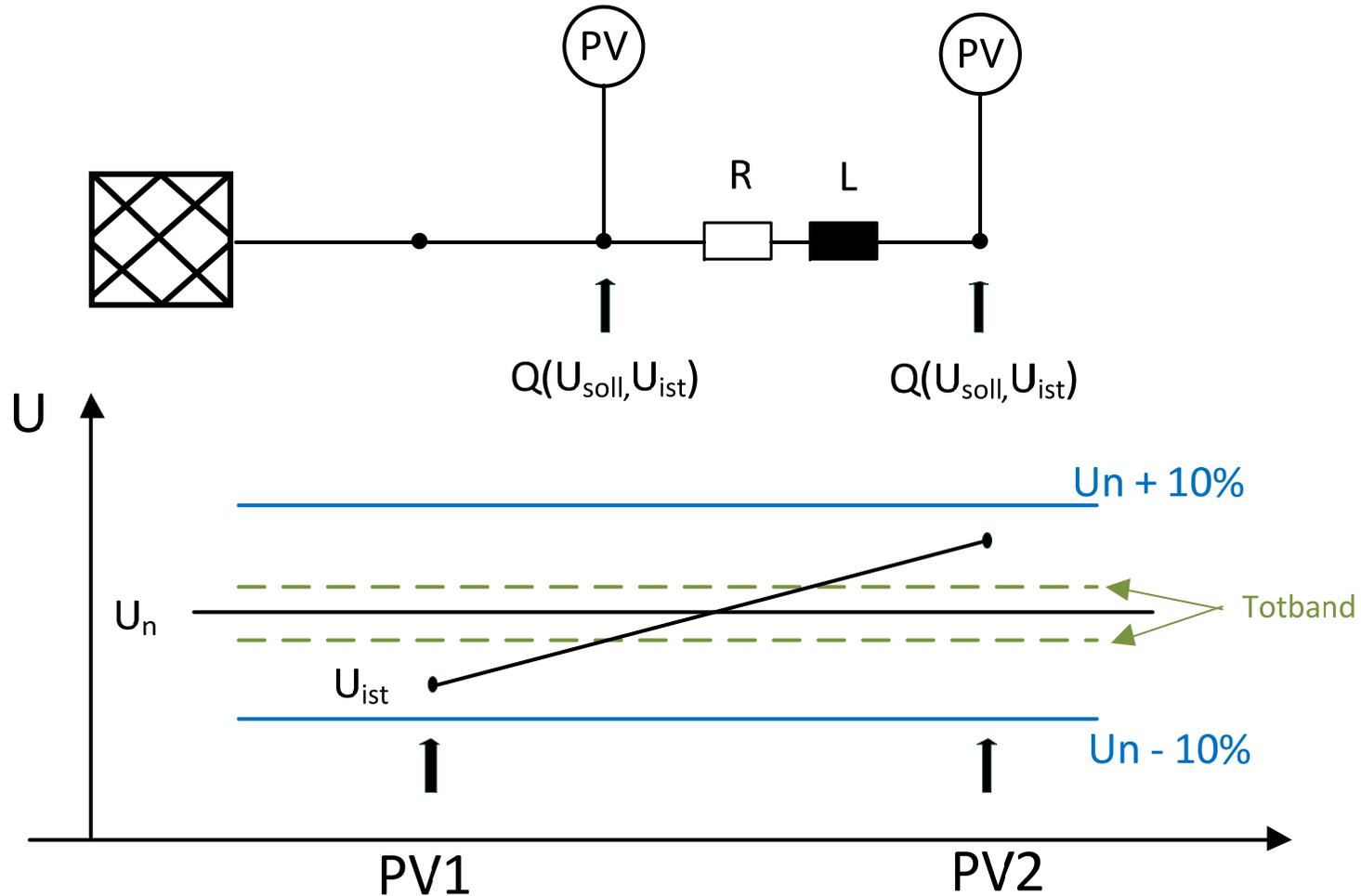


Lokale Regelung zur Blindleistungskomp.

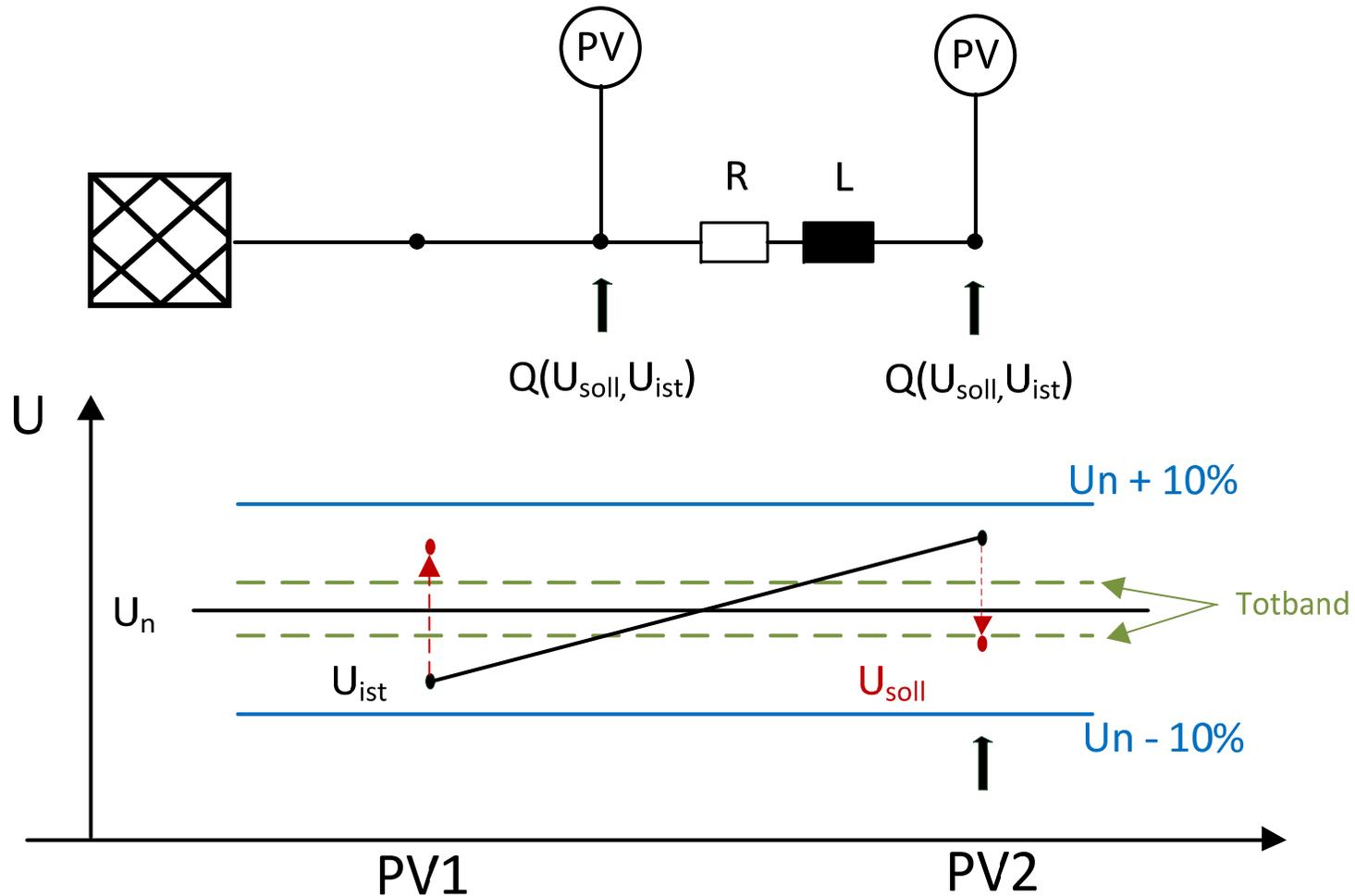
Wie verhalten sich eine Vielzahl von Anlagen im Netzverbund?



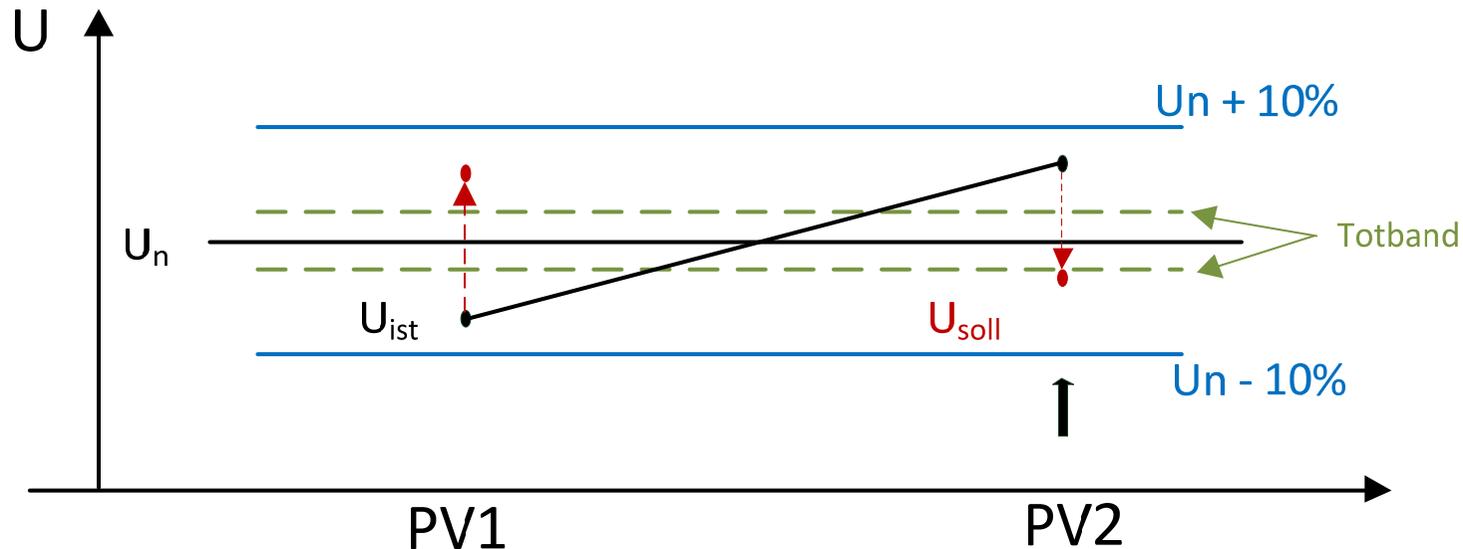
Kompensation im vermaschten Netz



Kompensation im vermaschten Netz

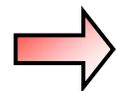


Kompensation im vermaschten Netz



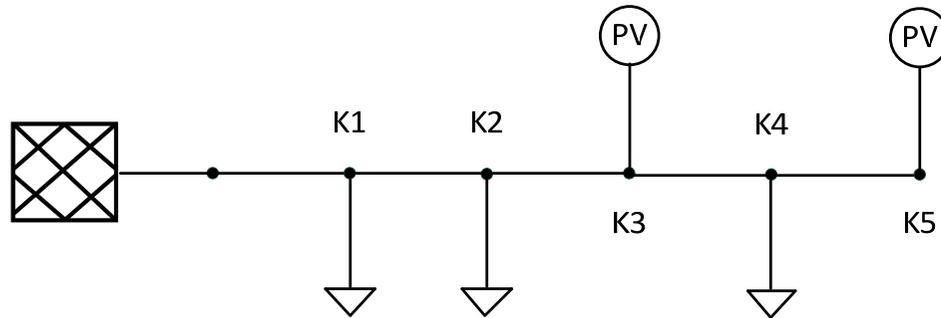
- Spannungsband soll angehoben werden
- Q steigt

- Spannungsband soll abgesenkt werden
- Q sinkt



- Netzknoten tauschen Q aus
- Sollwerte werden aufgrund dessen nicht erreicht

Beispielnetz



$$U_n = 20kV$$

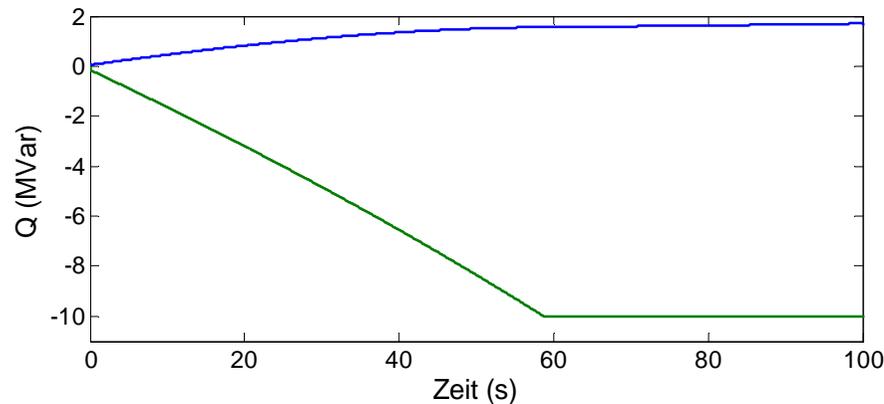
Leitungen : $5 \times 2km$

Lasten : $2MW + j1MVar$

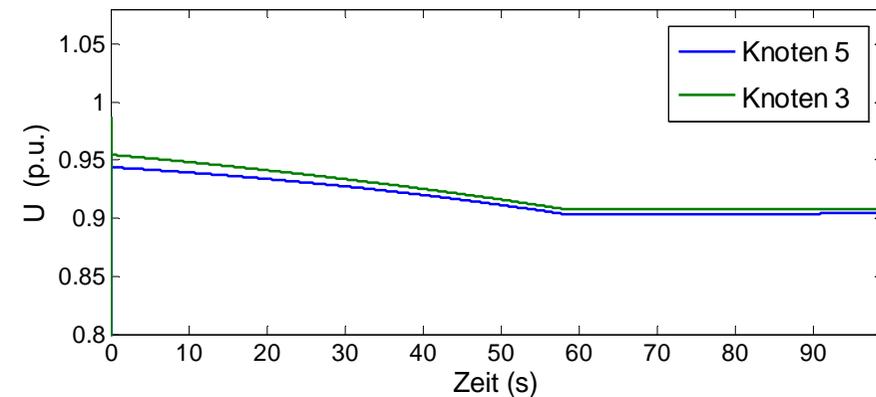
PV : $2MW$

$$U_{soll} = 1 pu$$

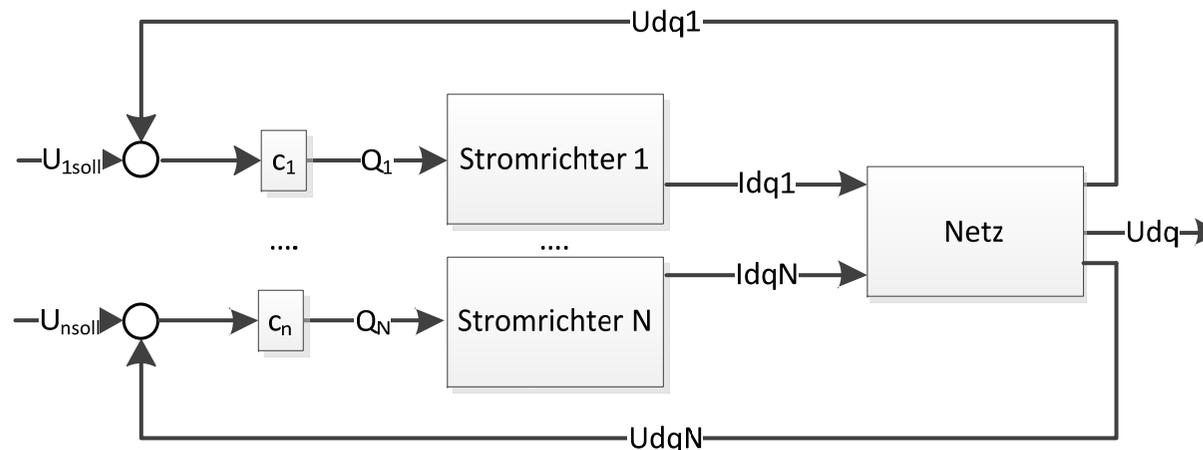
Blindleistung Knoten 3 & 5



Spannung Knoten 3 & 5



Aufstellung Gesamtmodell



■ Vorgehen

- Modellierung der einzelnen Komponenten
- Auslegung der Kompensatoren über Wurzelortskurven

Beschreibung von Energienetzen

Ziel:

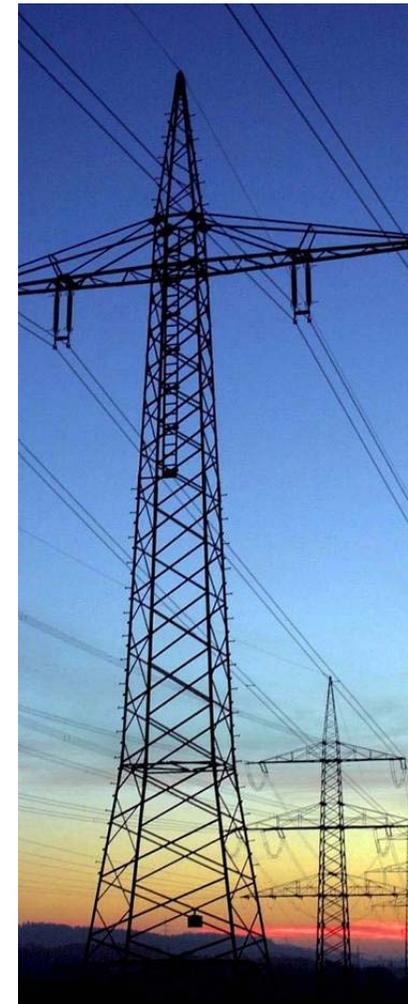
Modell zur Reglersynthese

Lastflussberechnung nicht geeignet

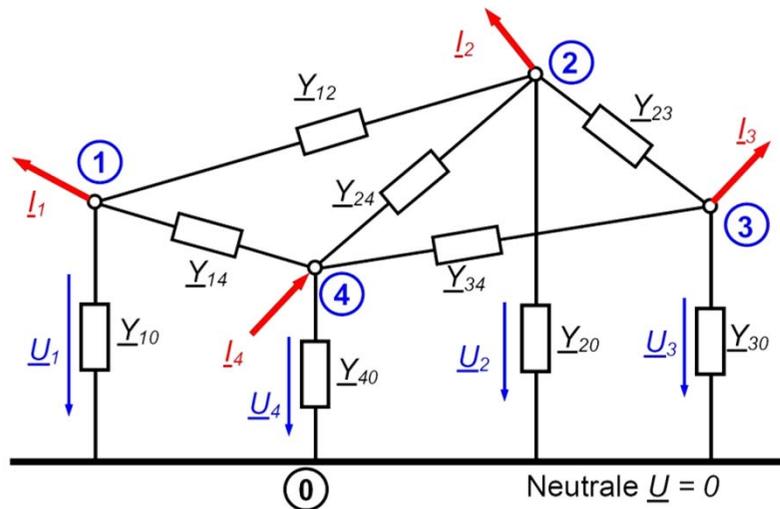
$$\begin{pmatrix} I_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{1n} & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_n \end{pmatrix}$$

Knotenpunktadmittanzmatrix
eingeschwungenes Verhalten

➔ bedingt geeignet



Dynamische Knotenpunktadmittanzmatrix



Energienetz wird als RLC
– Netzwerk beschrieben

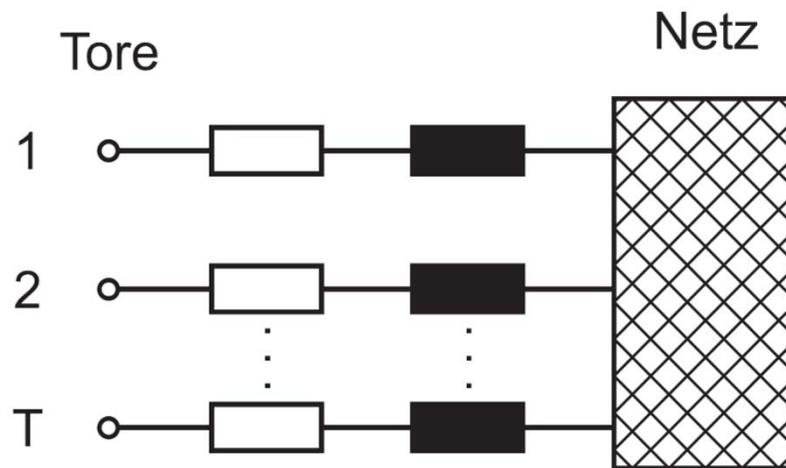
$X_L(j\omega), X_C(j\omega)$ frequenzabhängig

- Y als Laplace-Transformierte darstellbar

$$Y(j\omega) = Y(s)$$

- Beschreibt auch dynamische Vorgänge

Tor-Admittanz-Darstellung



Dynamische Beschreibung
des Netzes

Systemtheoretische Darstellung
zur Reglersynthese

Berücksichtigung von
Verkoppelungen

Tor-Admittanz

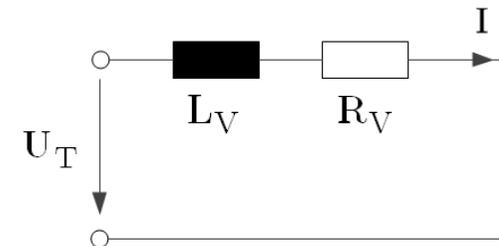
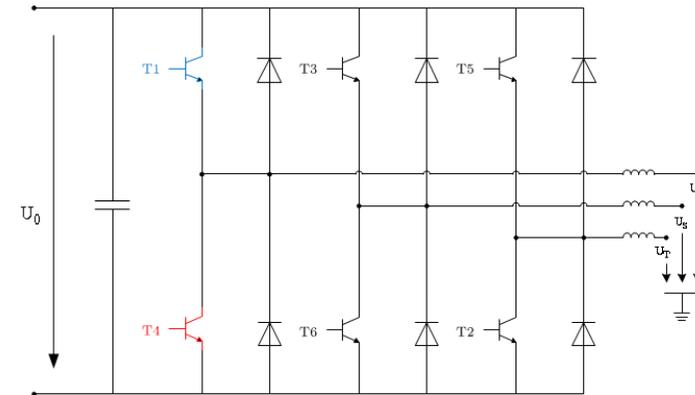
$$\begin{pmatrix} I_T(s) \\ I_K(s) = 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{TT}(s) & Y_{TK}(s) \\ Y_{KT}(s) & Y_{KK}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_T(s) \\ U_K(s) \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{dx(t)}{dt} = A x(t) + B I_T(t)$$

$$U(t) = C x(t) + R I_T(t) + L \frac{dI_T(t)}{dt}$$

Stromrichtermodell

- Stromrichter besteht aus schaltenden Elementen
- Nicht als lineares System darstellbar
- Klemmverhalten entscheidend
- Für die Stabilität ist die einwirkende Regelung Entscheidend



Stromrichtermodell

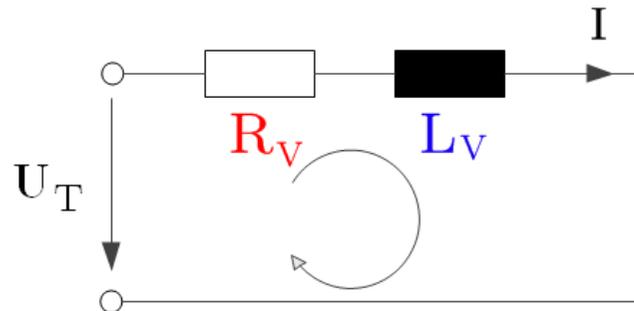
■ Spannungsgleichungen im RST-System

$$\begin{bmatrix} u_R \\ u_S \\ u_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_V & 0 & 0 \\ 0 & R_V & 0 \\ 0 & 0 & R_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R(t) \\ i_S(t) \\ i_T(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_V & 0 & 0 \\ 0 & L_V & 0 \\ 0 & 0 & L_V \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_R(t) \\ i_S(t) \\ i_T(t) \end{bmatrix}$$

■ Durch Linearisierung Bezug zur Leistung

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \cdot = \begin{bmatrix} -\omega \frac{P_V}{Q_V} & \omega \\ -\omega & -\omega \frac{P_V}{Q_V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{\omega Q_V}{(U_n \sin(\arctan \frac{Q_V}{P_V}))^2}}_{f(Q_V)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

$$P = \frac{(U \cos(\varphi))^2}{R}$$

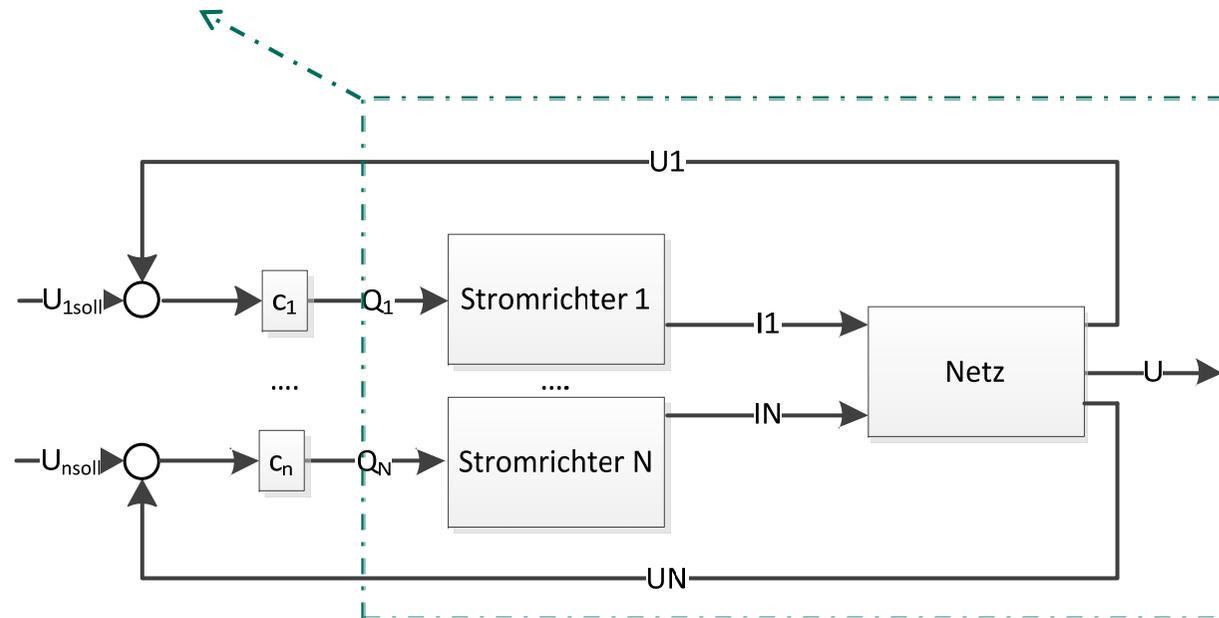


Zusammenfassung von
Photovoltaik und Stromrichter



Aufstellung Gesamtmodell

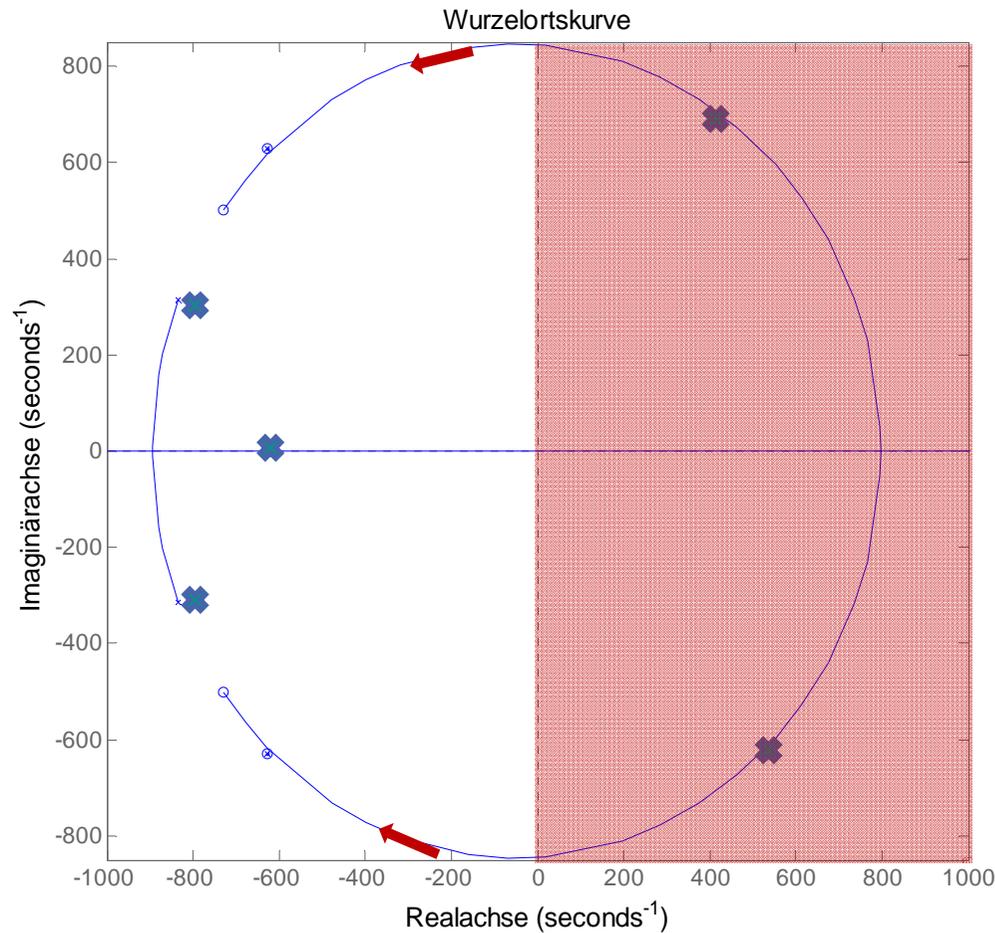
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$



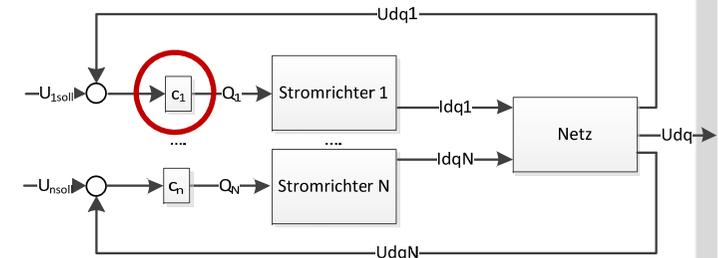
■ Vorgehen

- Modellierung der einzelnen Komponenten
- Auslegung der Kompensatoren über Wurzelortskurven

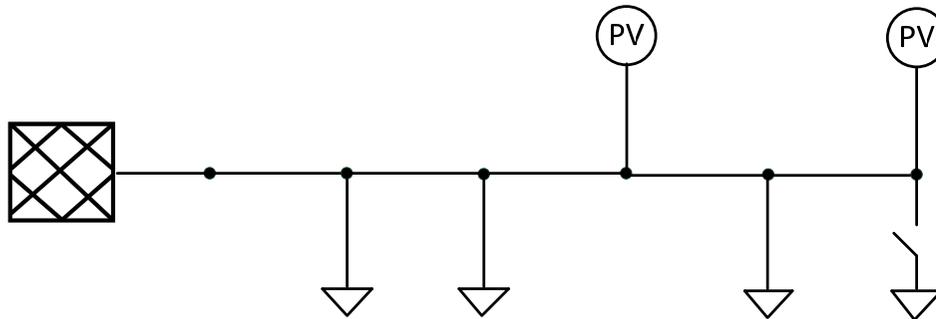
Auslegung $Q(\Delta U)$



✱ Pole
 → Wanderung der Pole



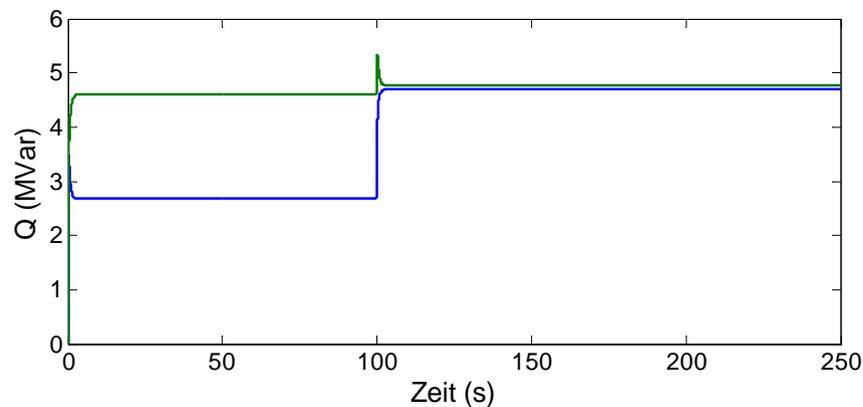
Beispielnetz



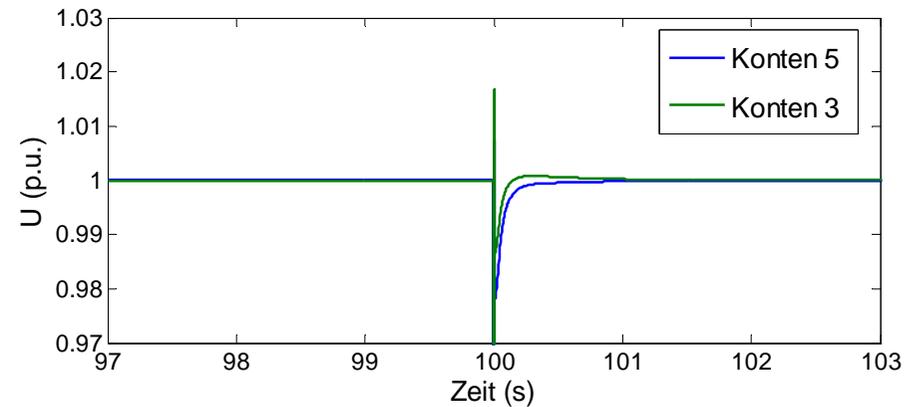
$U_{\text{soll}} = 1 \text{ p.u.}$

Lastzuschaltung nach 100s
von 2 MW + j1MVar

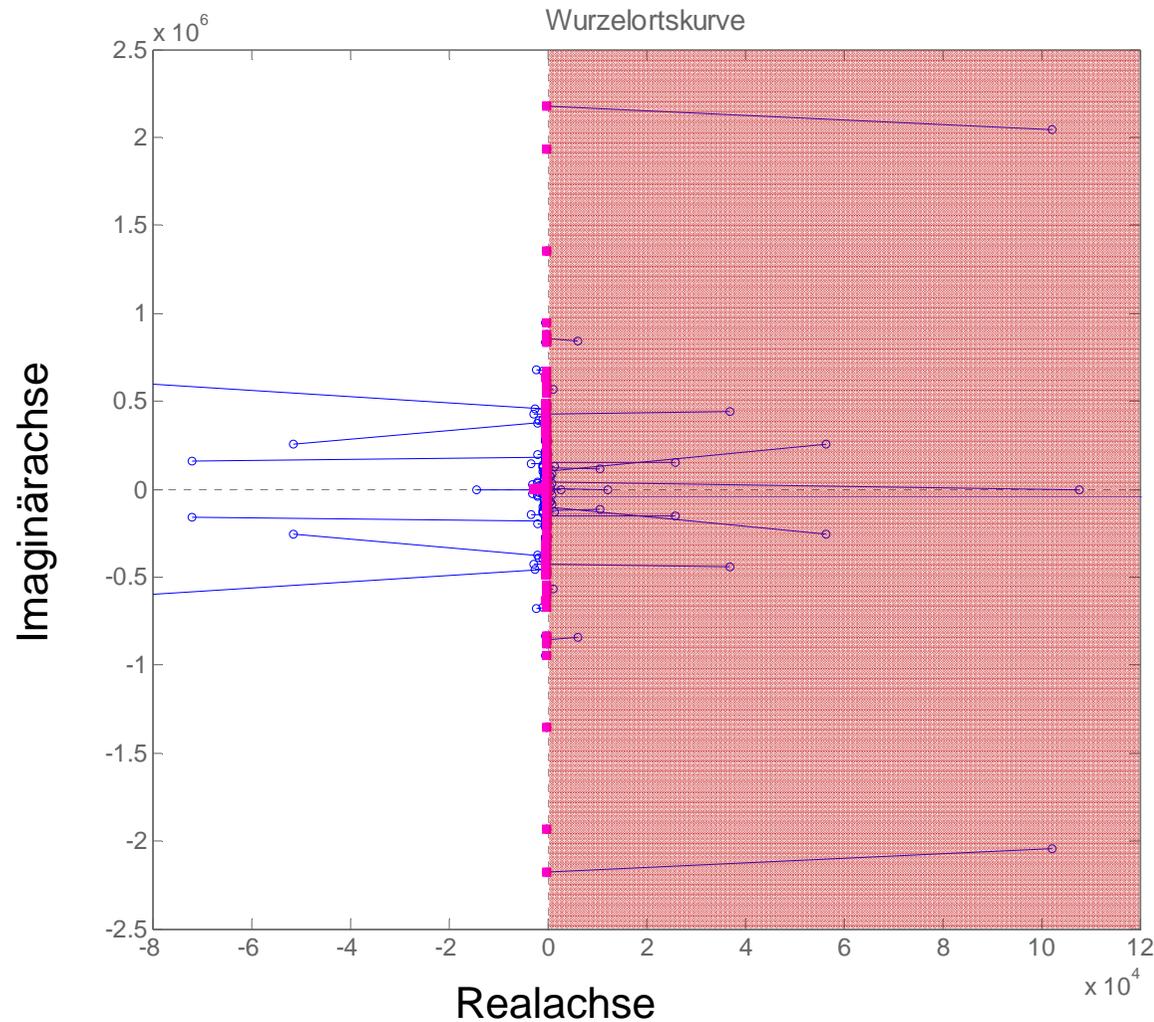
Blindleistung Knoten 3 & 5



Spannung Knoten 3 & 5



Wurzelortskurve Mittelspannungsnetz

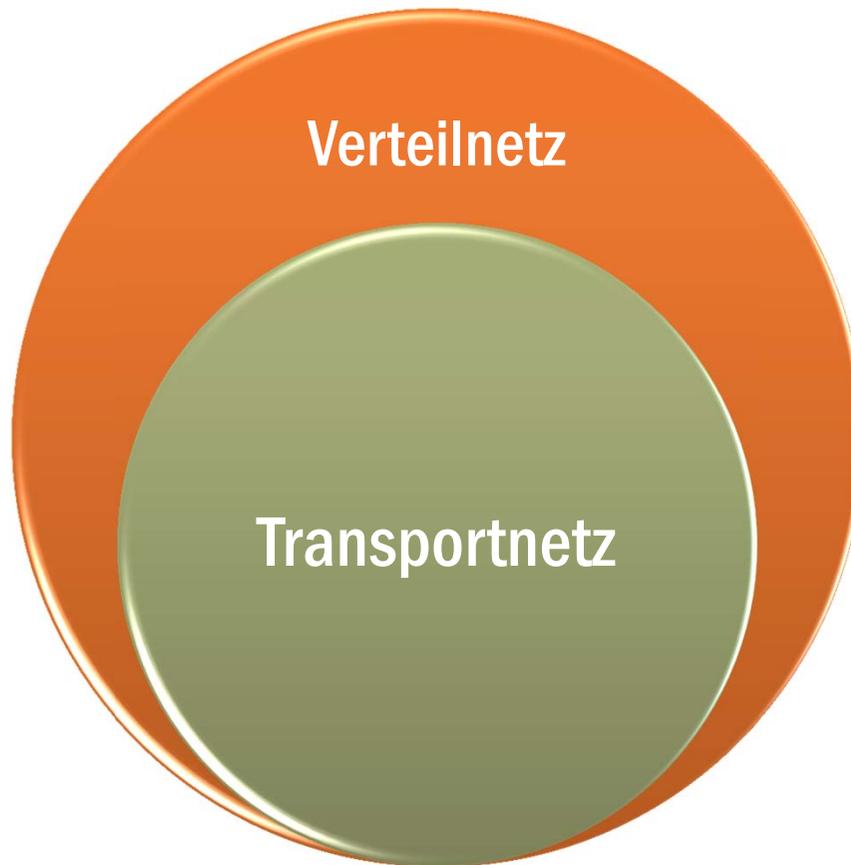


■ Pole

■ Mittelspannungs-
ebene

- 80 Knoten Netz
- 8 PV Anlagen

Netz im Wandel



- Erzeugung in allen Netzebenen
 - Blindleistungsfähige PV-Anlagen im Niederspannungsnetz

↳ Auslegung dezentralen Regelung

- Fluktuierende Einspeisung
- Bedarf an Energietransport steigt

↳ Schätzung des Netzzustandes

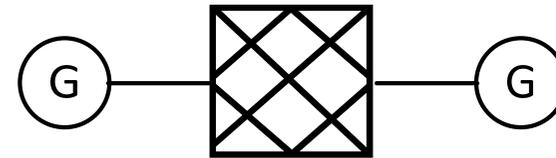
Zustandsschätzung

Durch fluktuierende Einspeisung und den steigt Energietransport wird eine zuverlässige Schätzung des Netzzustands immer wichtiger

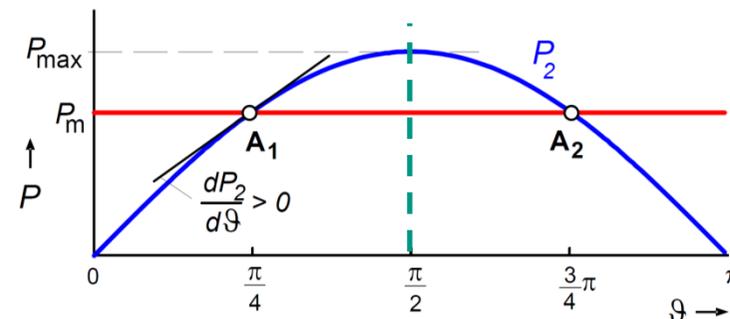
➔ Bessere Auslastung des Netzes

■ Frühzeitige Erkennung von

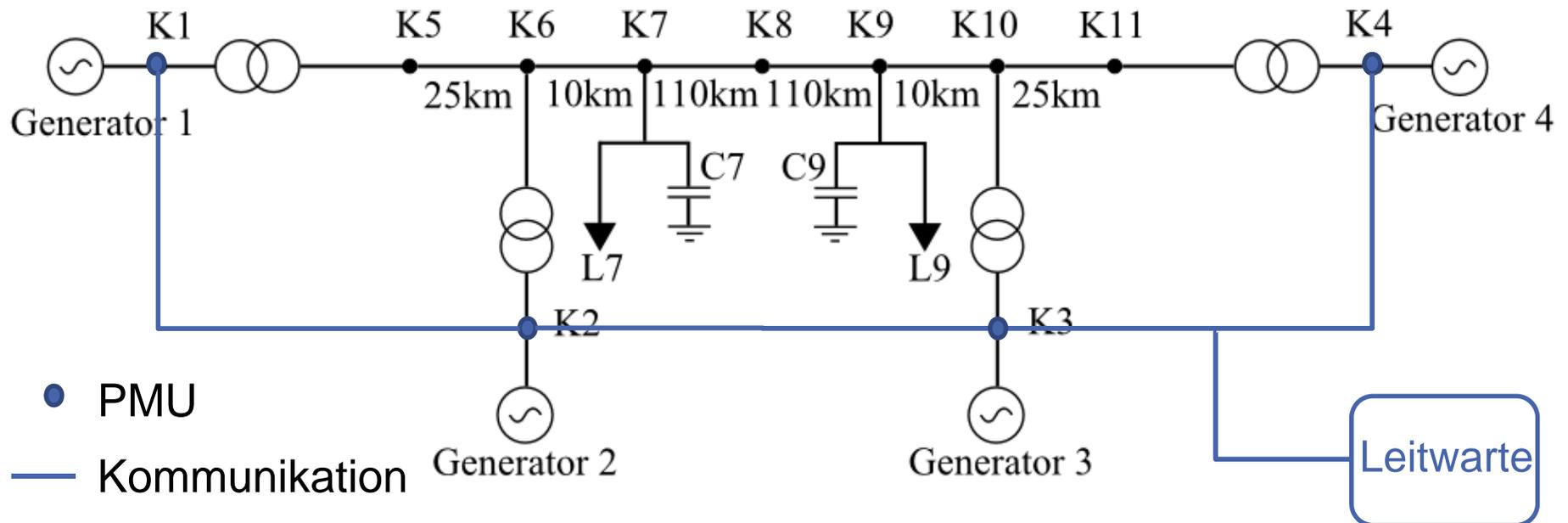
- Pendelschwingungen
- Spannungsinstabilitäten
 - Betrag außerhalb Toleranzband
 - Winkeldifferenz > 90°



$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$$



Simulation - 4 Generator Benchmark Modell



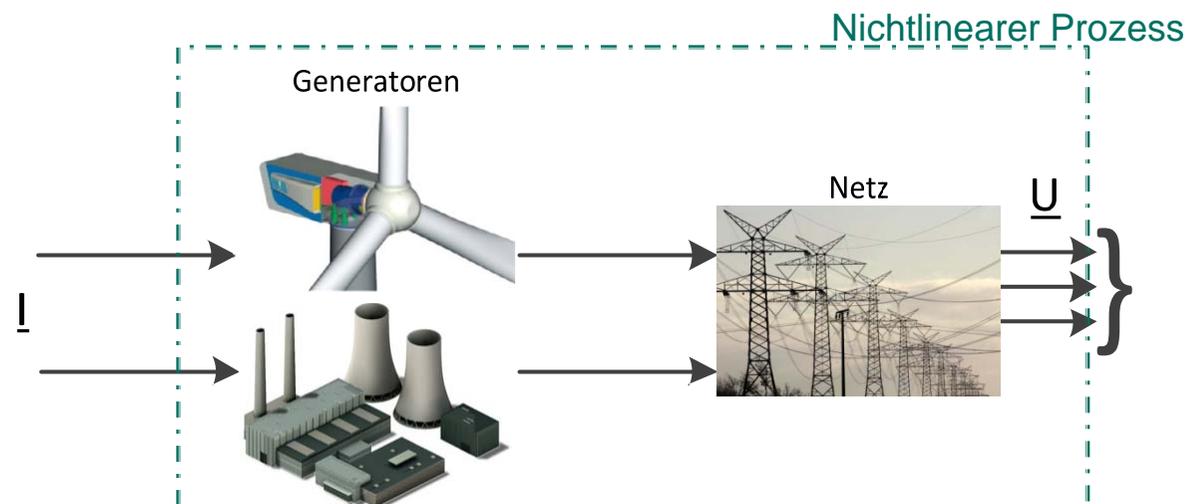
■ Phasen Messgerät

- Betrag U, I
- Phase U, I

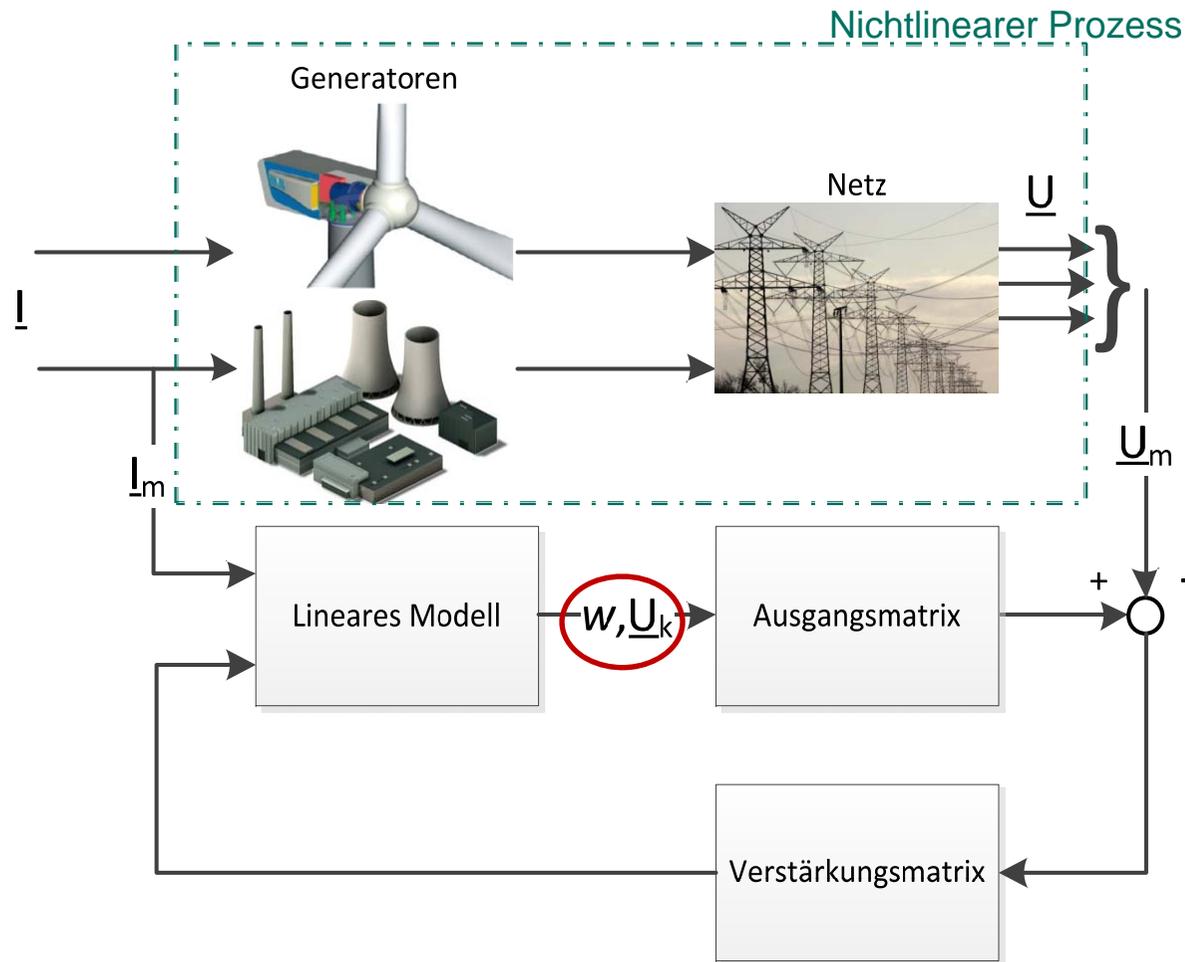
■ Schätzung \underline{U}, f

- Dynamischer Vorgang
- Bessere Genauigkeit, Konvergenz

Monitoring



Monitoring



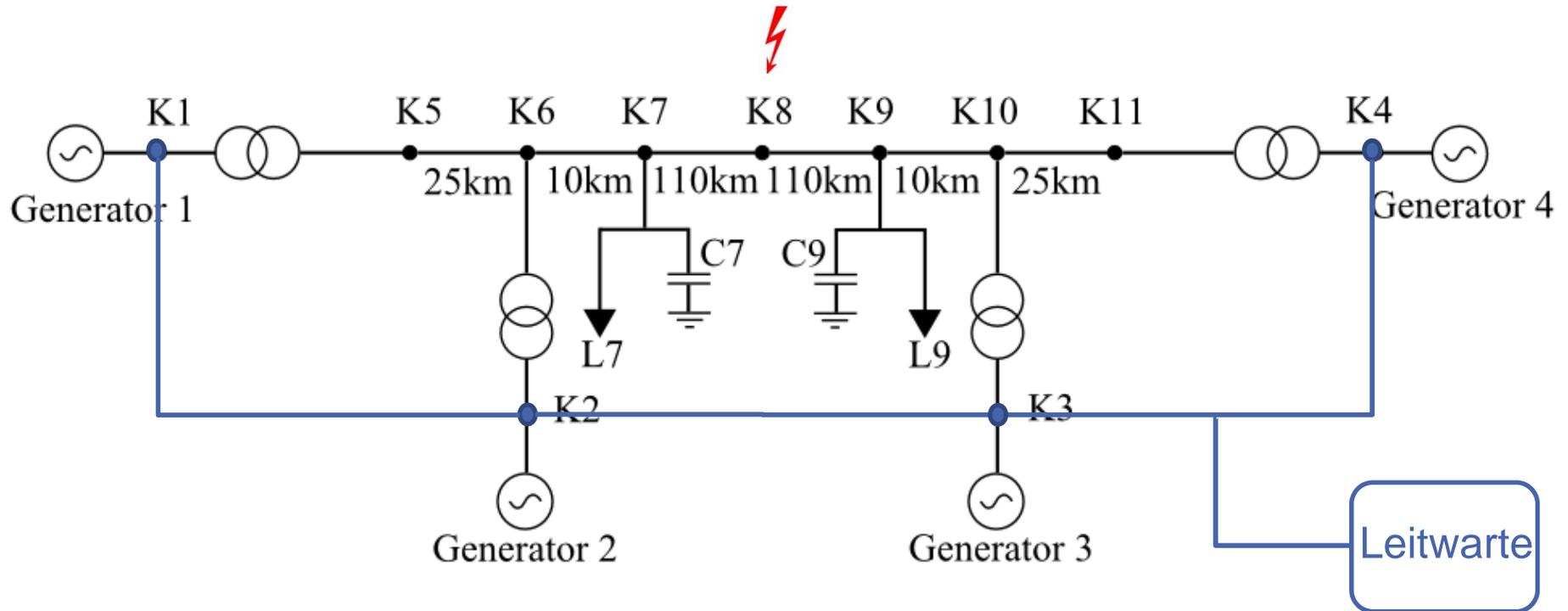
Geschätzte Größen:

\underline{U}_k Knotenspannungen
 w Drehzahl Generatoren

Messgrößen:

$\underline{U}_m, \underline{I}_m$

Simulation - 4 Generator Benchmark Modell



Generatoren

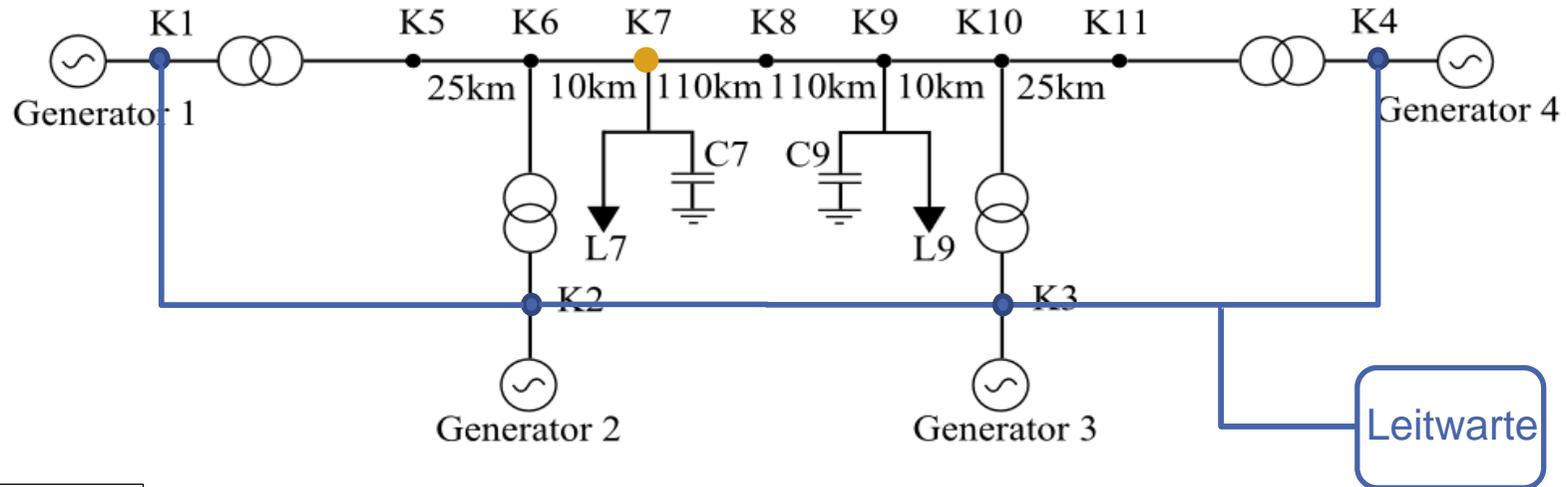
- 4 x 900 MVA
- 20kV

Netzdaten

- 230 kV
- L7: 1 GW, 100 MVar
- C7: 200 MVar
- L9: 1,7 GW, 100 MVar
- C9: 350 MVar

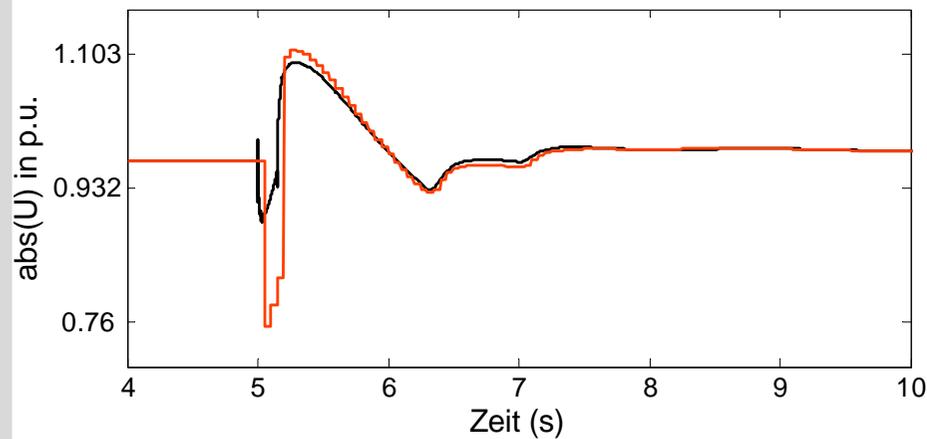
➔ Kurzschluss von 150ms an K8

Simulation - 4 Generator Benchmark Modell

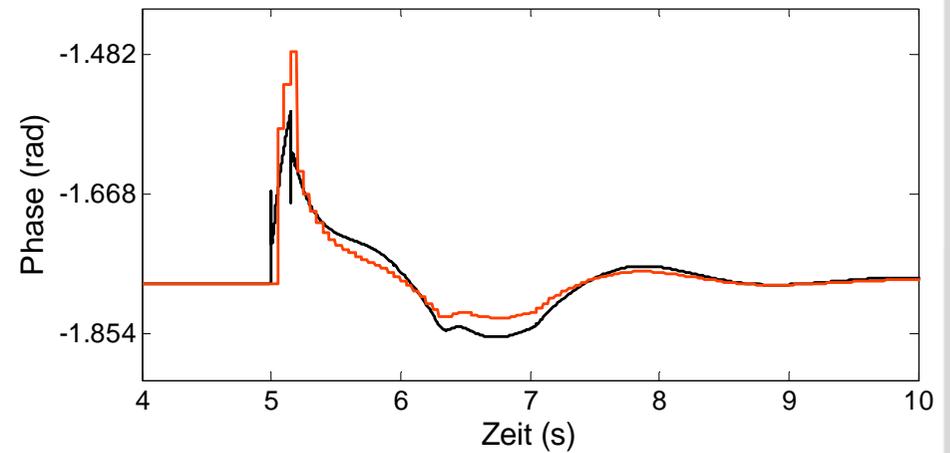


— Schätzwert
— Originalwert

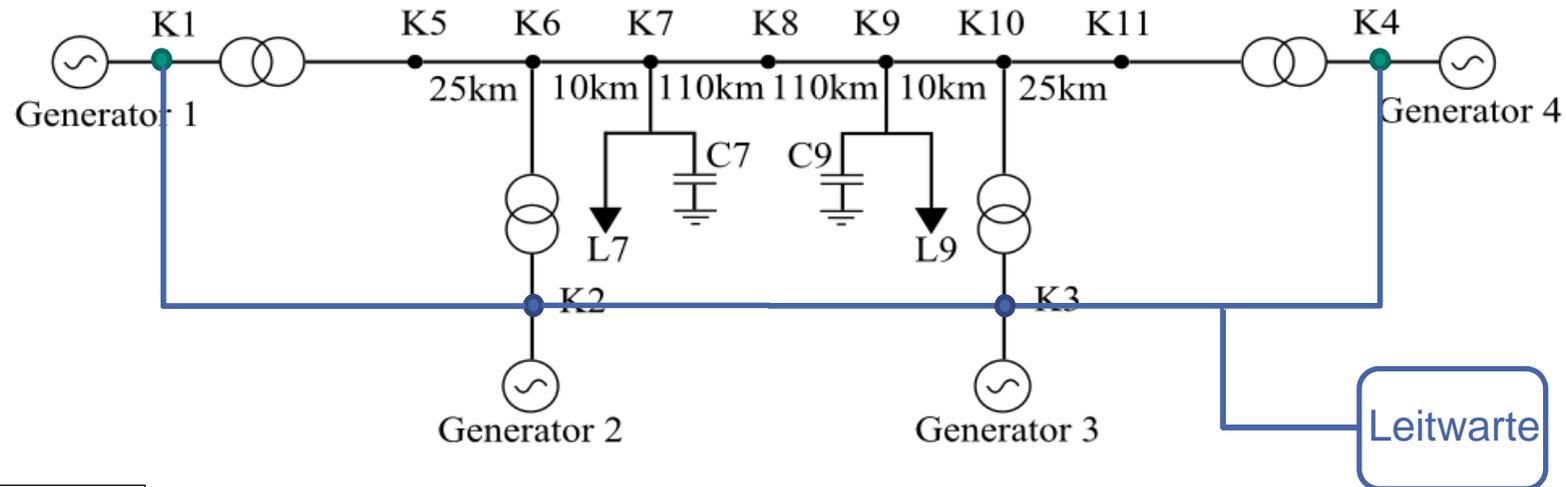
Betrag von U_{K7}



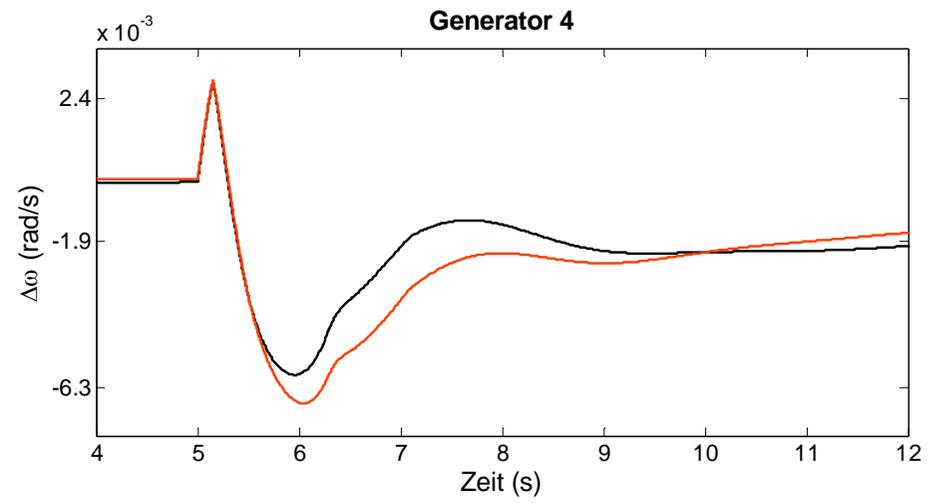
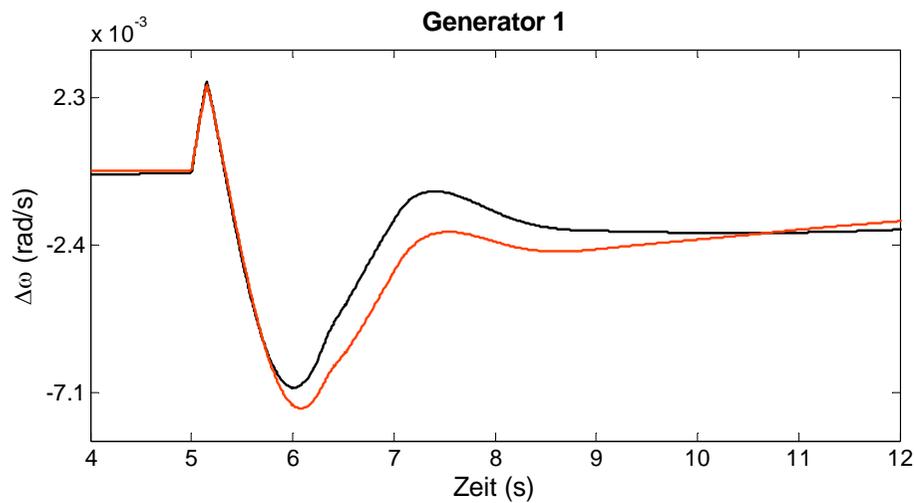
Phase von U_{K7}



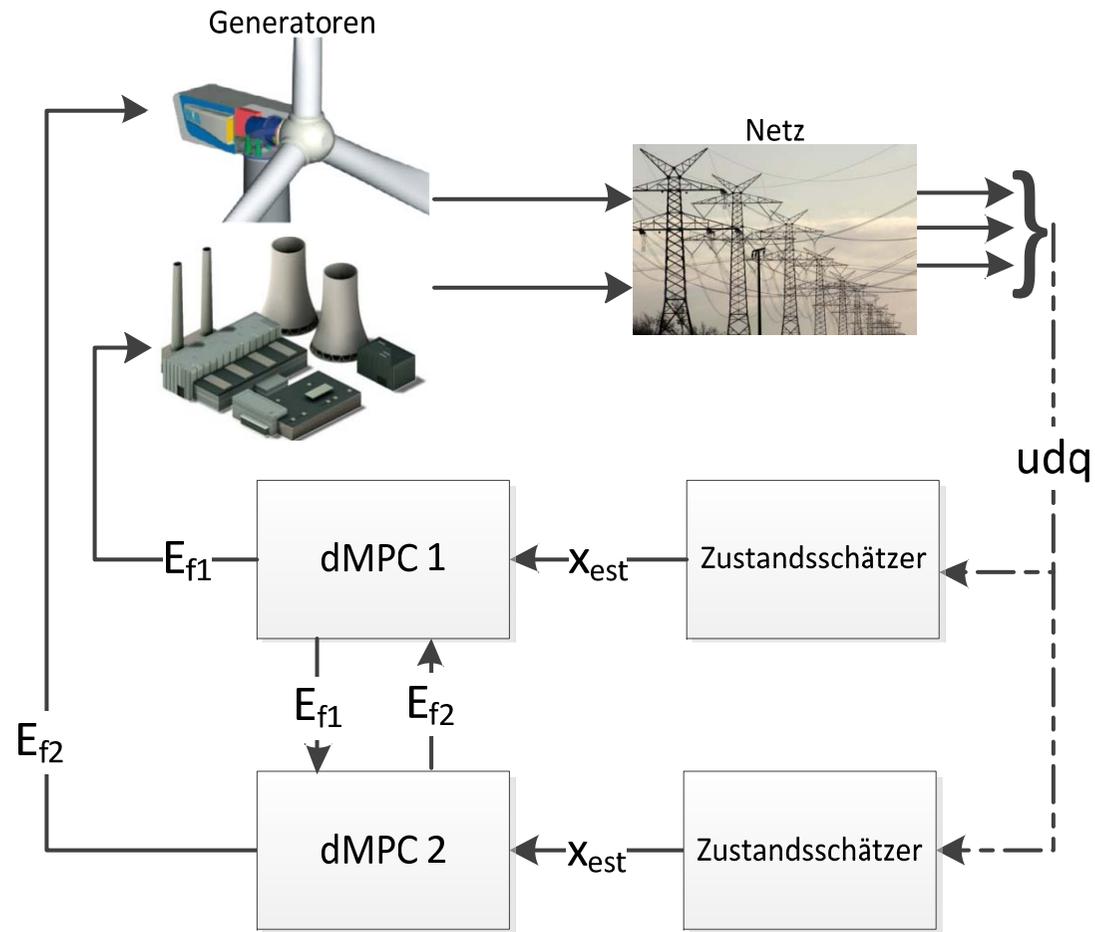
Simulation - 4 Generator Benchmark Modell



— Schätzwert
— Originalwert



Dezentrale Modellprädiktive Regelung



Zusammenfassung

- Dynamisches Netzmodell wurde entwickelt
 - Stromrichtermodell wurde entwickelt

→ Interaktion von einer Vielzahl von Generatoren und Stromrichtern kann analytisch beschrieben werden

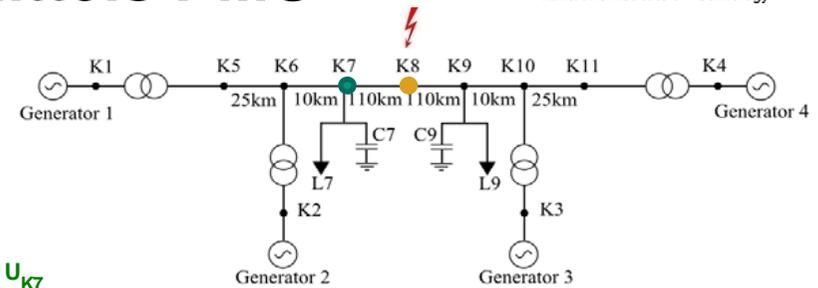
- $Q(\Delta U)$ Regelung kann Stabilität gefährden
- Durch eine passende Auslegung kann ein aufschwingen vermieden werden

- Zustandsschätzung mittels dynamischen Modells
 - Effizienterer Netzbetrieb
 - Übertragungsengpässe
 - Leistungspendelungen frühzeitig erkennbar

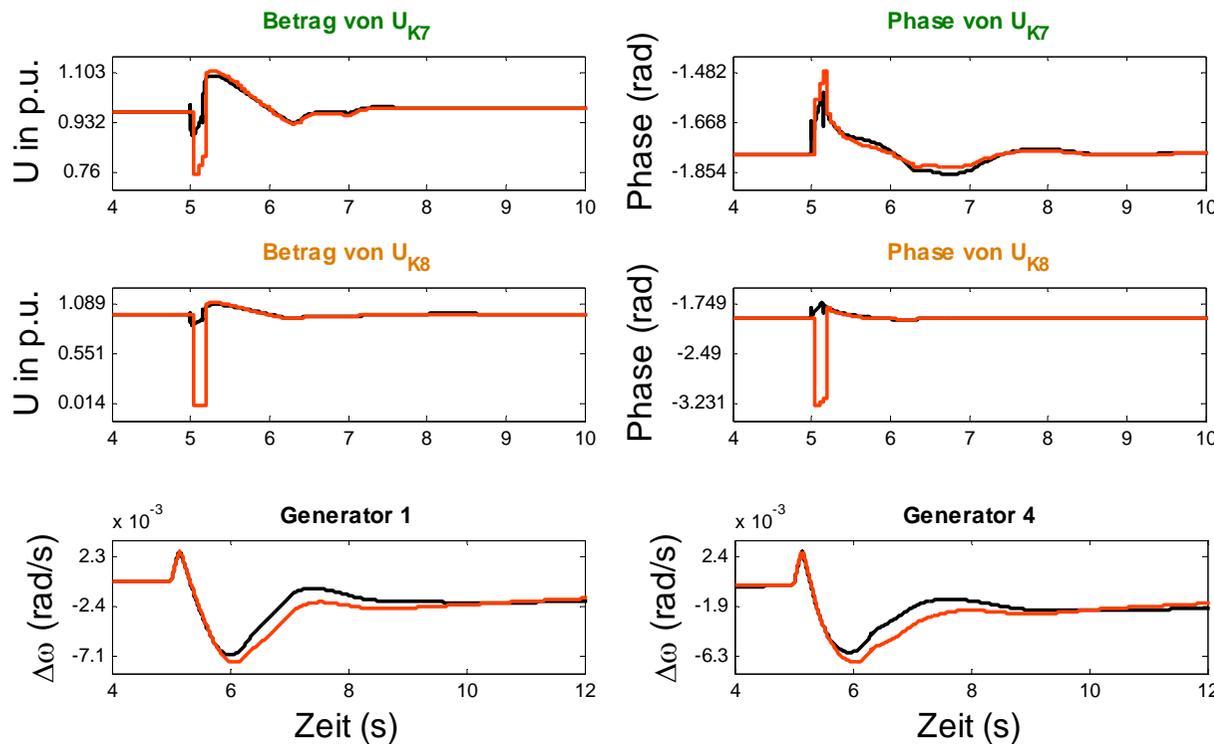
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Schätzung des Netzzustandes mittels PMU



— Schätzwert
— Originalwert



■ Schätzung nach einem Kurzschluss von 150ms