



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



ESEA
Institut für Energiesysteme
und Elektrische Antriebe

Statische Stabilität von Stromnetzen

Erfahrungen bei Analyse realer Systeme

Gerhard Theil
Technische Universität Wien
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
1040 Wien, Gußhausstraße 25
gerhard.theil@tuwien.ac.at

Problembeschreibung

Bei Auftreten von Lastsituationen für welche die elektrischen Energienetzen ursprünglich nicht dimensioniert wurden besteht:

Gefahr des Kollapses der Energieversorgung

Beispiele zum Dimensionierungsproblem im österreichischen 220kV/380kV-Netz:

- Zu schwach ausgebautes 380kV-Netz
- Zu geringe Kapazität der Verbindungsleitungen zu den nördlichen und südlichen Nachbarnetzen

Stabilitätsprobleme im Energienetz

Gliederung hinsichtlich Zeitkonstanten:

- Stationär
- Dynamisch

Gliederung hinsichtlich physikalischer Effekte:

- Spannungsstabilität (Spannungskollaps)
- Rotorwinkelstabilität (Generatoren asynchron)

Behandlung des Spannungs- und Winkelstabilitätsproblems

Ansatz:

Stationär ("langsames" Anwachsen der Netzlast)

Weitere Einflussgrößen:

- Blindleistungsreserve
- Position der Einspeisepunkte
- Länge und Übertragungsfähigkeit der Leitungen
- Vermaschungsgrad

Ziel:

Ermittlung von Indikatoren zur Anzeige der Annäherung des Systems an die Stabilitätsgrenze bzw. für die Quantifizierung des Abstandes zur Stabilitätsgrenze

Stabilitätsindikatoren

- Globaler Stabilitätsindex (für Gesamtsystem)
- Grenzwerte für Spannungsbeträge und Spannungsdifferenzwinkel
- Lastniveau, bei dem die Grenzwerte erreicht werden
- Kritische Netzbereiche, in denen die Grenzwerte erreicht werden

Betrachtete Verfahren zur Stabilitätsanalyse

- Lastflussrechnung mit Konvergenzsteuerung
[Hartkopf]
- Knoten L-Index-Verfahren nach
[Kessel/Glavitsch]
- Continuation-Power-Flow
- Singulärwertmethode

Konvergenz der Lastflussiteration - Systemstabilität

Ziel der Lastflussiterationen:

Residuen $\Delta \underline{s} \rightarrow \mathbf{0}$

$$\Delta \underline{s} = \underline{s}_G + \underline{s}_L - \underline{s}(\underline{u})$$

$$\underline{s}(\underline{u}) = \underline{U} \cdot \underline{Y}^* \cdot \underline{u}^*$$

$\underline{s}_G, \underline{s}_L$ Vektoren der Einspeisungen und Lasten
 $\underline{U}, \underline{u}$ Diagonalmatrix und Vektor der komplexen Knotenspannungen
 \underline{Y}^* Knotenpunktadmittanzmatrix
Konjugiert komplex

Lösung:

$$\Delta \underline{u}^v = F_{v-1}^{-1} \cdot \Delta \underline{s}^{v-1}$$

$$\underline{u}^v = \underline{u}^{v-1} + \Delta \underline{u}^v$$

v Iterationszähler

Konvergenz der Lastflussiteration - Systemstabilität

Funktionalmatrix:

$$[\mathbf{F}] = \begin{bmatrix} \frac{\delta p_i}{\delta \varphi_k} & u_k \frac{\delta p_i}{\delta u_k} \\ \frac{\delta q_i}{\delta \varphi_k} & u_k \frac{\delta q_i}{\delta u_k} \end{bmatrix}$$

Det. $\mathbf{F} \rightarrow 0$: $\Delta \mathbf{u} \rightarrow \infty$ bei beliebig großem $\Delta \mathbf{s}$

Lastflussalgorithmus konvergiert nicht

Physikalisches Äquivalent: Systeminstabilität

Wann wird Det. \mathbf{F} zu Null?

- Spannungsbeträge überschreiten Grenzwert \rightarrow
Spannungsinstabilität
- Spannungswinkel überschreiten Grenzwert \rightarrow
Rotorwinkelinstabilität

Methoden der Stabilitätsanalyse

Lastflussrechnung mit Konvergenzsteuerung nach [Hartkopf]

Prinzip: Optimierung nach Gradientenmethode

$$f^v = \Delta \underline{s}^{vT} \cdot \Delta \underline{s}^v \rightarrow \text{Min}$$

Aus Minimierungsbedingung wird Schrittweitenfaktor $c \leq 1$ abgeleitet:

$$\underline{f}^v > f^{v-1} : c < 1$$

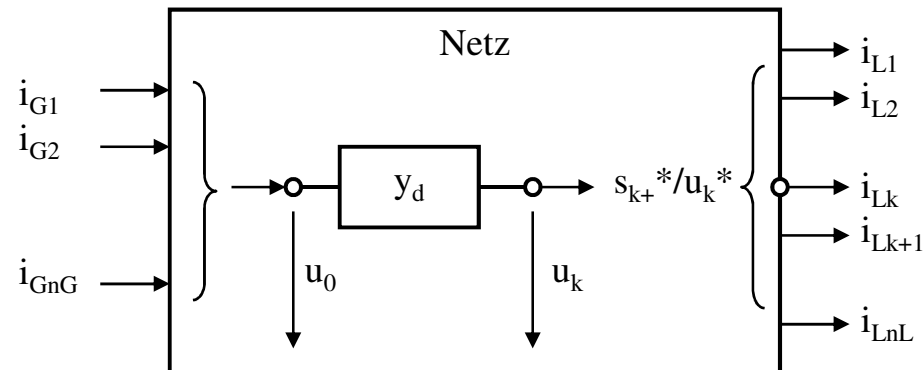
Spannungskorrekturen erfolgen mit c :

$$\underline{u}^v = \underline{u}^{v-1} + c \Delta \underline{u}^v$$

Methoden der Stabilitätsanalyse

Knoten-L-Index-Methode nach [Kessel/Glawitsch]

Prinzip: Reduktion des Netzes auf einen Einspeise-, einen Lastknoten mit der äquivalenten Last s_{k+}^*/u_k^* und eine Verbindungsleitung.



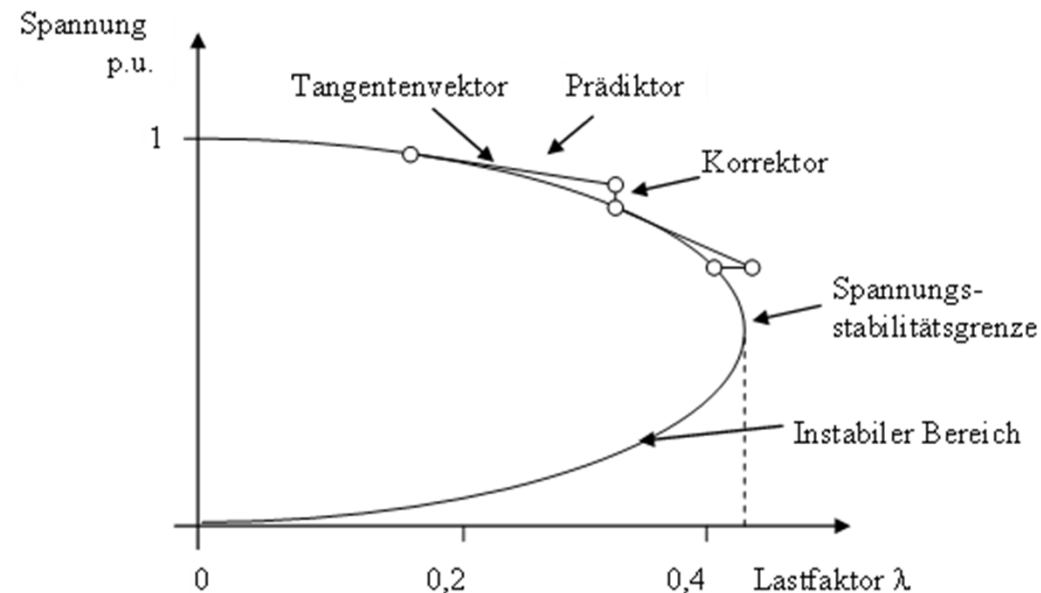
Resultat: **L-Index** $L \leq 1$ (an Stabilitätsgrenze 1 – theoretisch)

$$L_k = \frac{|s_k^+|}{u_k^2 \cdot y_d}$$

Methoden der Stabilitätsanalyse

Continuation-Power-Flow (CPF)

Prinzip: Prädiktor- Korrektorverfahren



Prädiktor: Schritt entlang des Tangentenvektors

Korrektor: Lastflussiterationen, ausgehend von Prädiktorlösung

(mit $\lambda = \text{const.}$ Oder $u = \text{const.}$)

Stabilitätsgrenze: Tangente 90 Grad (parallel zu Ordinate)

Kritische Netzknoten: Max. Spannungs-Tangentenvektorkomponenten

Methoden der Stabilitätsanalyse

Singulärwertmethode

Prinzip: Eigenwertanalyse

Det. $\mathbf{F} \rightarrow 0$: Ein Eigenwert von \mathbf{F} wird zu Null

Singulärwerte:

Wurzeln der Eigenwerte von

$$\underline{\underline{\mathbf{F}^T \mathbf{F}}}$$

Methoden der Stabilitätsanalyse

Singulärwertdekomposition

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta u \end{bmatrix} = [F]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = [V\Sigma^{-1}W^T] \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix}$$

$[W] = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ Matrix der linken Singulärvektoren

$[V] = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ Matrix der rechten Singulärvektoren

Σ Singulärwert-Diagonalmatrix, σ_1 : Größter - σ_n : Kleinster Singulärwert

Annahme:

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = [w_n]$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta u \end{bmatrix} = [V\Sigma^{-1}W^T] [w_n] = v_n \cdot \sigma_n^{-1}$$

Konditionszahl:

$$K = \frac{\sigma_1}{\sigma_n}$$

Methoden der Stabilitätsanalyse

Singulärwertdekomposition

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta u \end{bmatrix} = [V\Sigma^{-1}W^T][w_n] = v_n \cdot \sigma_n^{-1}$$

Folgerungen:

σ_n klein: Starke Spannungsbetrags- und Spannungswinkeländerungen bei kleinen Leistungsänderungen; Das System ist instabil.

Größte Komponenten des Vektors $v_n \cdot \sigma_n^{-1}$: Kritische Knoten des Netzes.

Vektor w_n : Hinsichtlich Stabilität empfindlichste Richtung der Wirk- und Blindleistungsänderungen.

Anwendung der Methoden

Basis:

Um CPF erweiterte Lastflussanalysesoftware

Spezifikationen der Analyse

- Große Einspeisungen werden als PV-Knoten, Lasten als PQ-Knoten nachgebildet.
- In den Einspeiseknoten werden Wirk- und Blindleistungsgrenzen kontrolliert, die Lasten unterliegen keiner Begrenzung.
- Die Spannung des Bezugsknotens wird fest gehalten, seine Leistung wird nicht beschränkt.
- Überschreitungen von Grenzleistungen der Betriebsmittel werden in beliebig hohem Ausmaß toleriert.
- Transformatorstufen werden fest gehalten.

Testnetze:

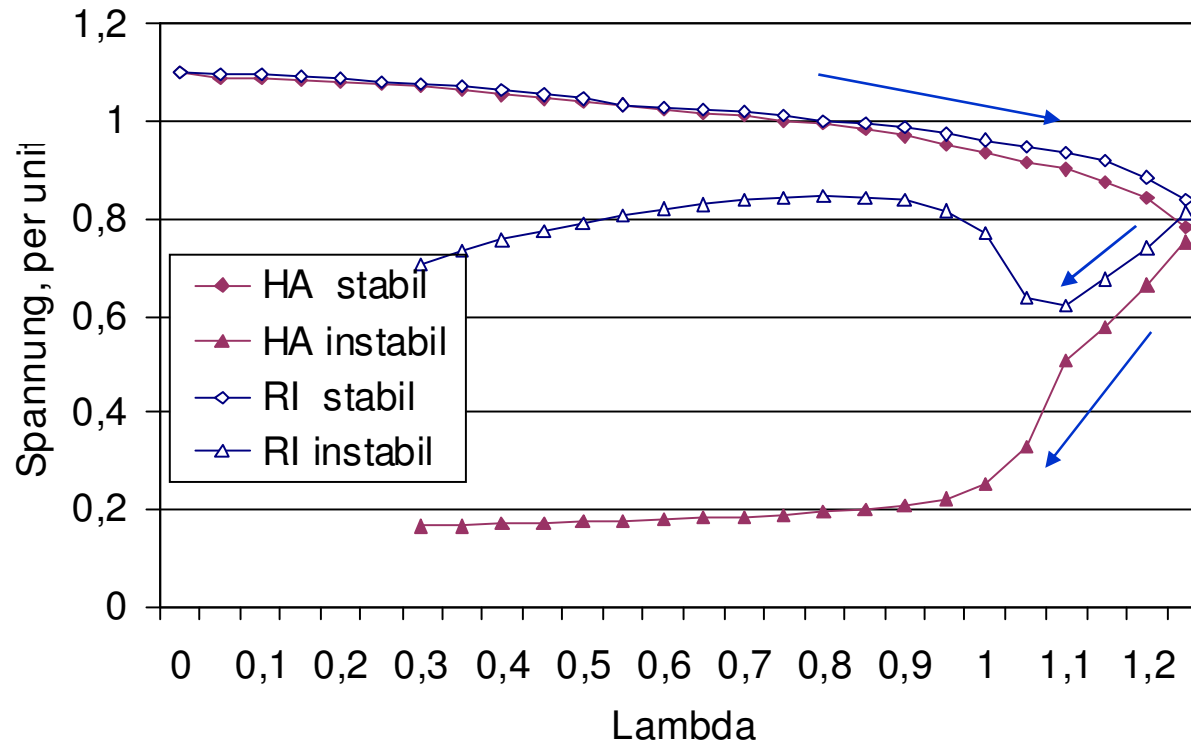
Reale Netze mit bis zu 310 Knoten

Resultate

310-Knoten-Netz

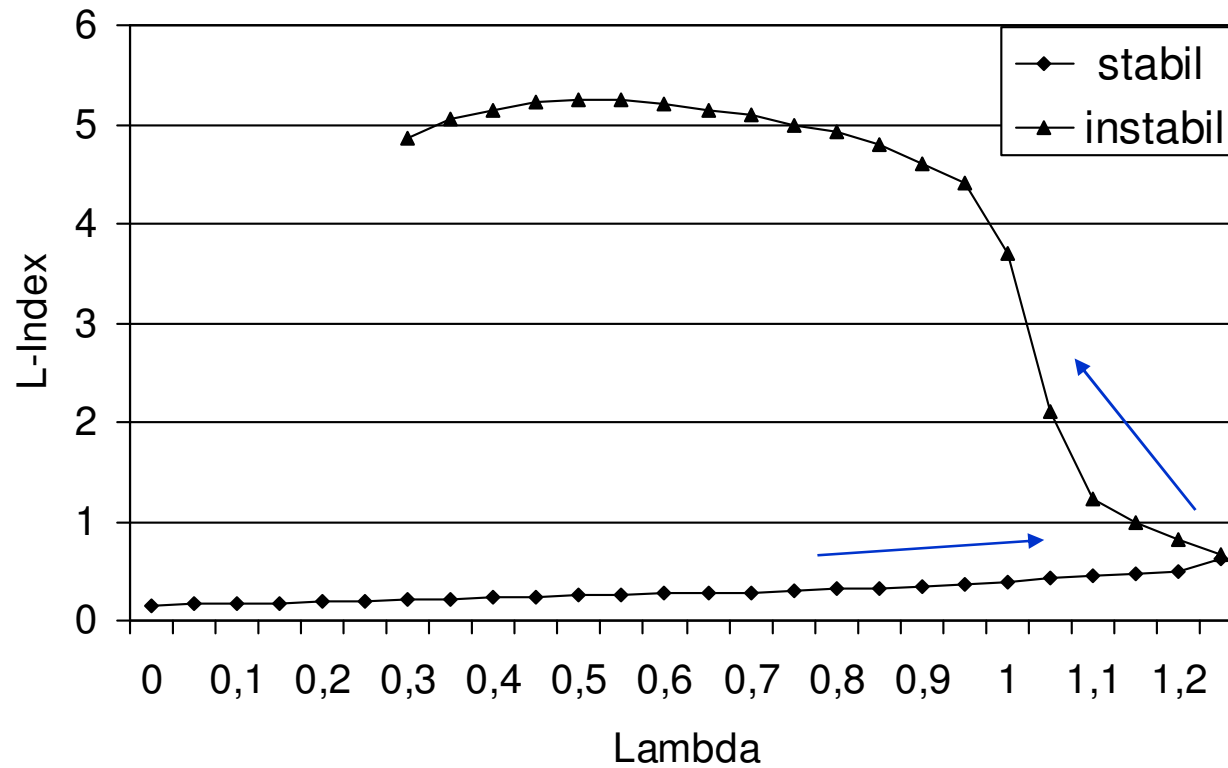
Continuation Power Flow

PV-Kurve, kritischer Knoten HA und weniger kritischer Knoten RI



Resultate

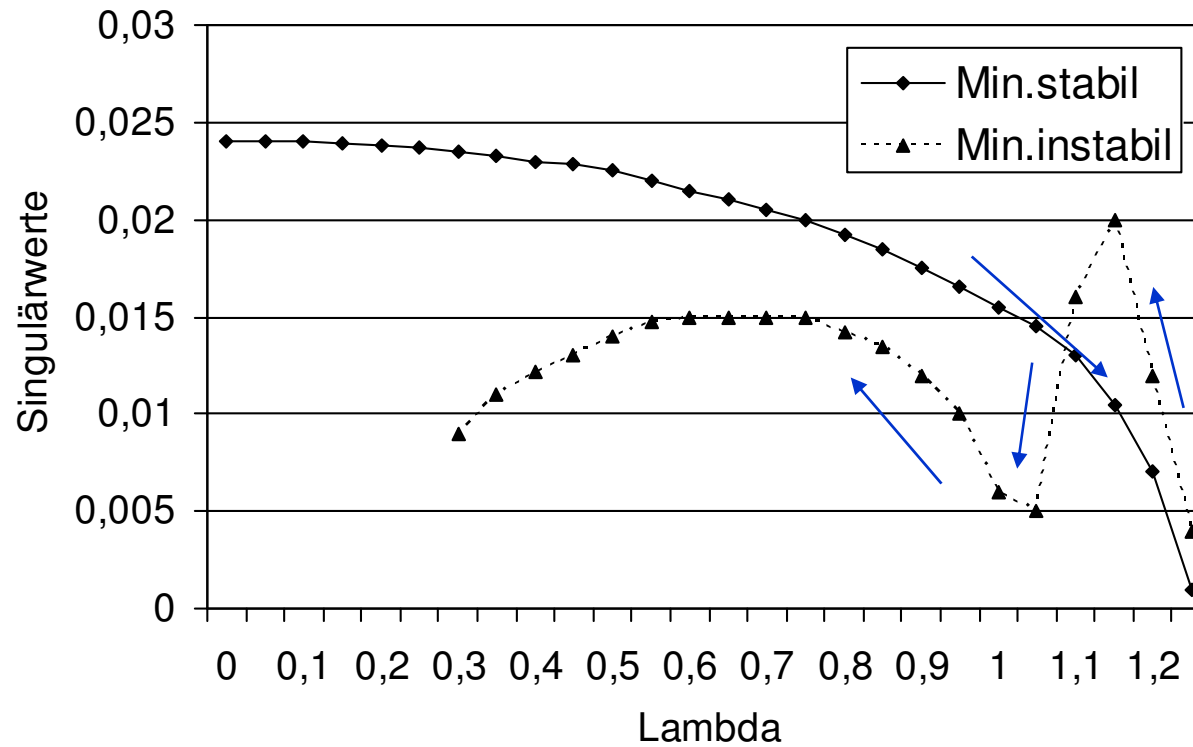
Knoten-L-Index Verfahren



L-Index an Stabilitätsgrenze: 0,63

Resultate

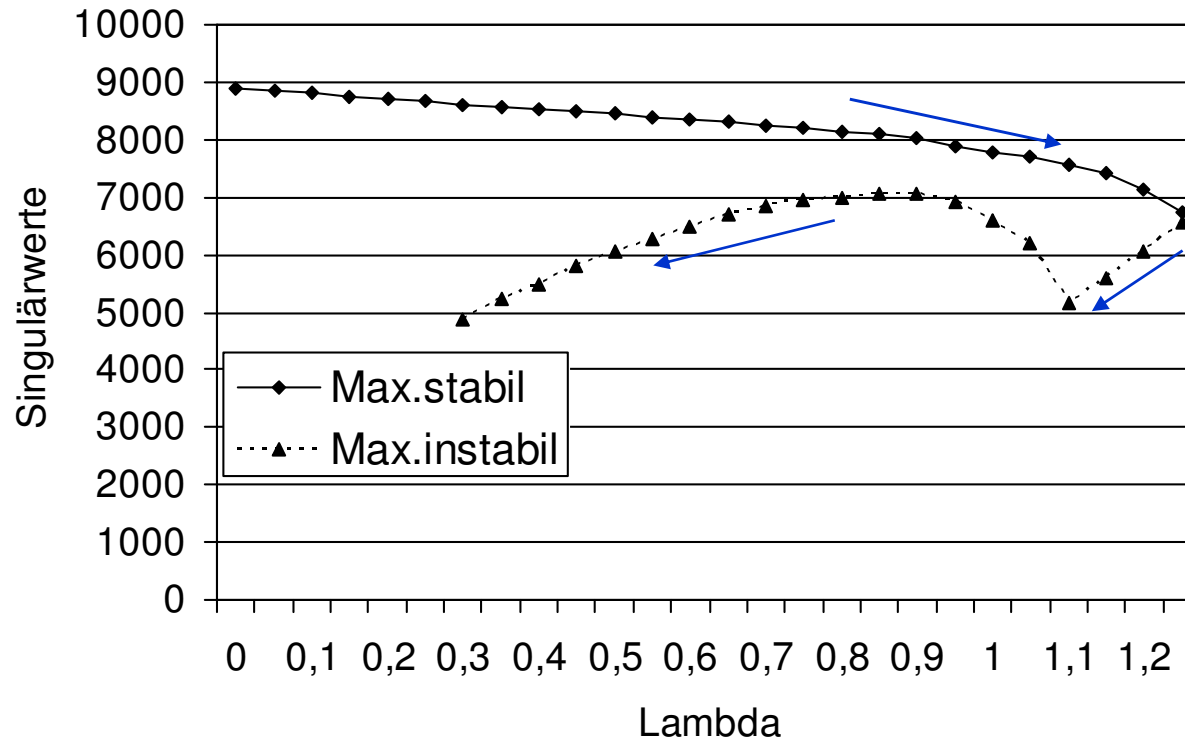
Minimale Singulärwerte



Zweites Minimum bei Lambda=1,05 korreliert mit Krümmungsunstetigkeiten der PV-Kurven und des L-Index

Resultate

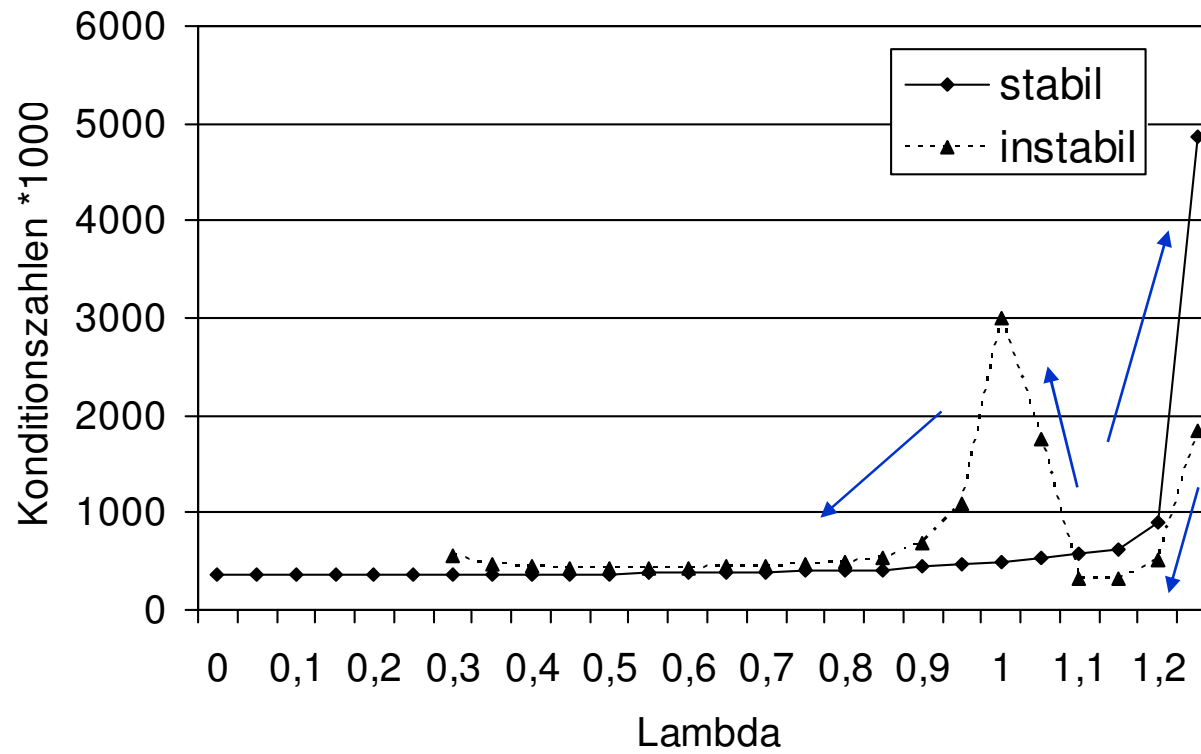
Maximale Singulärwerte



Verlauf ähnlich wie bei minimalen Singulärwerten

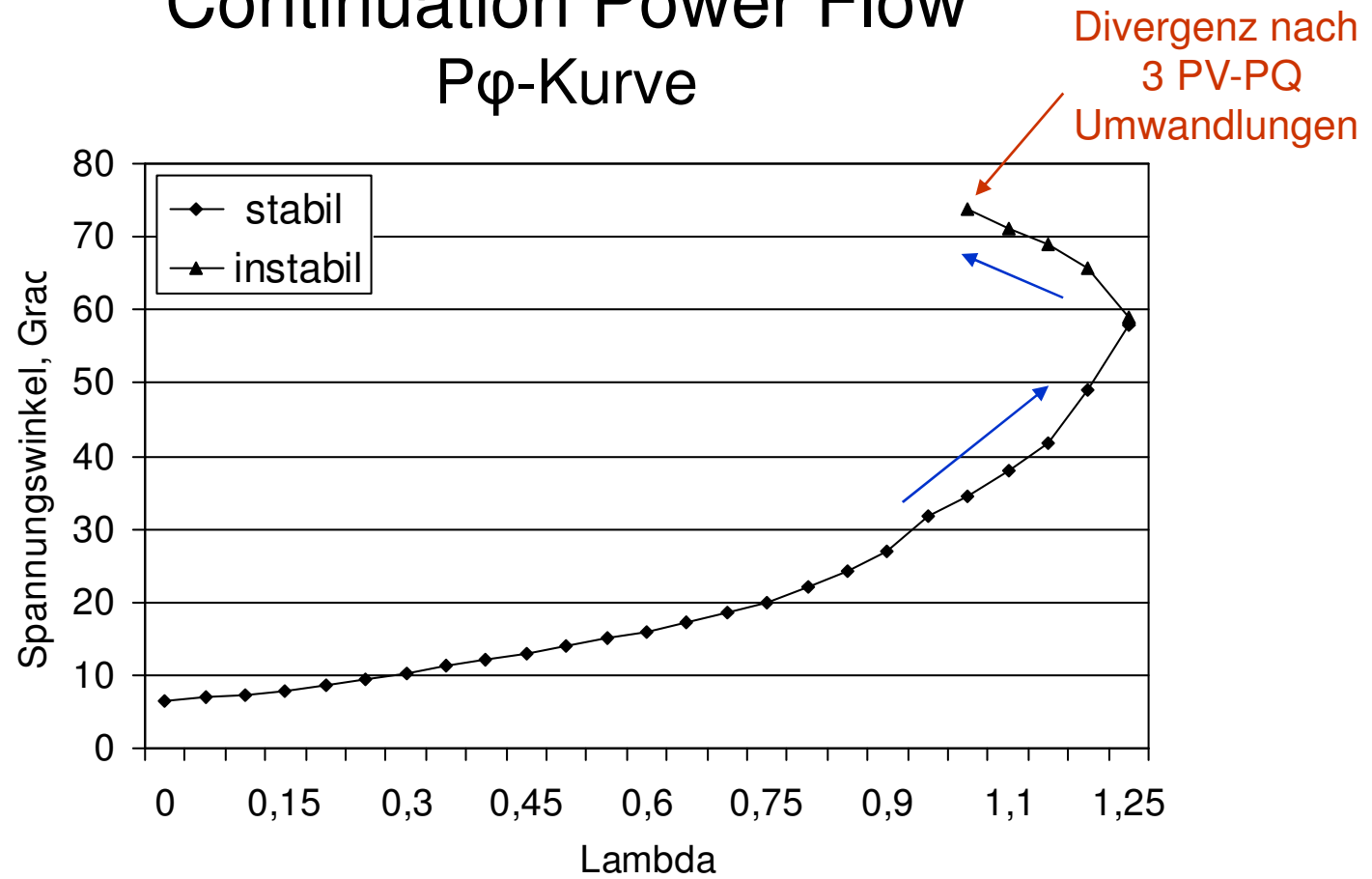
Resultate

Konditionszahlen



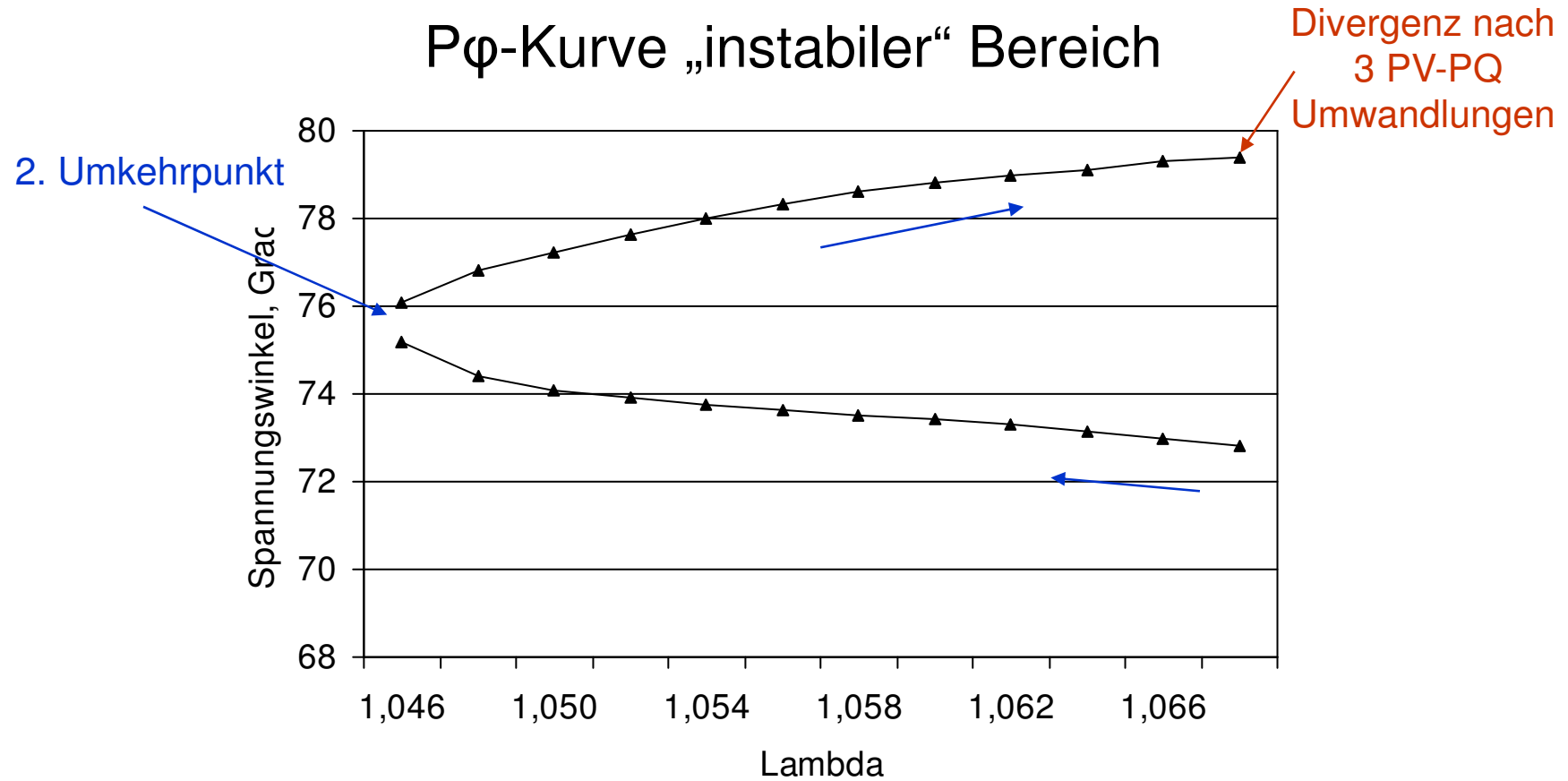
Resultate

Continuation Power Flow P ϕ -Kurve



Resultate

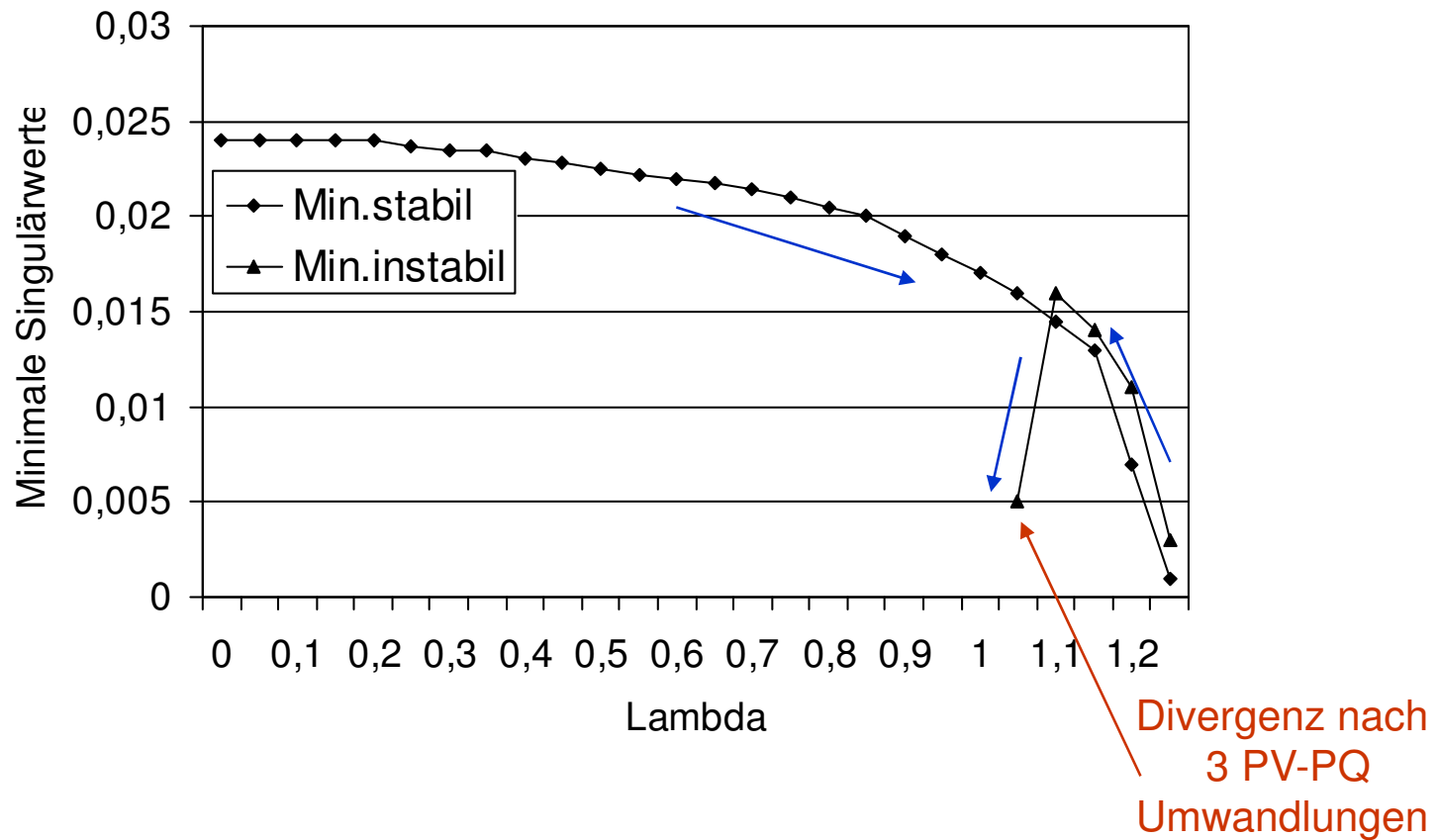
Continuation Power Flow $P\phi$ -Kurve „instabiler“ Bereich



Rechter unterer Ast schließt an linken oberen Ast der vorhergehenden Abbildung an

Resultate

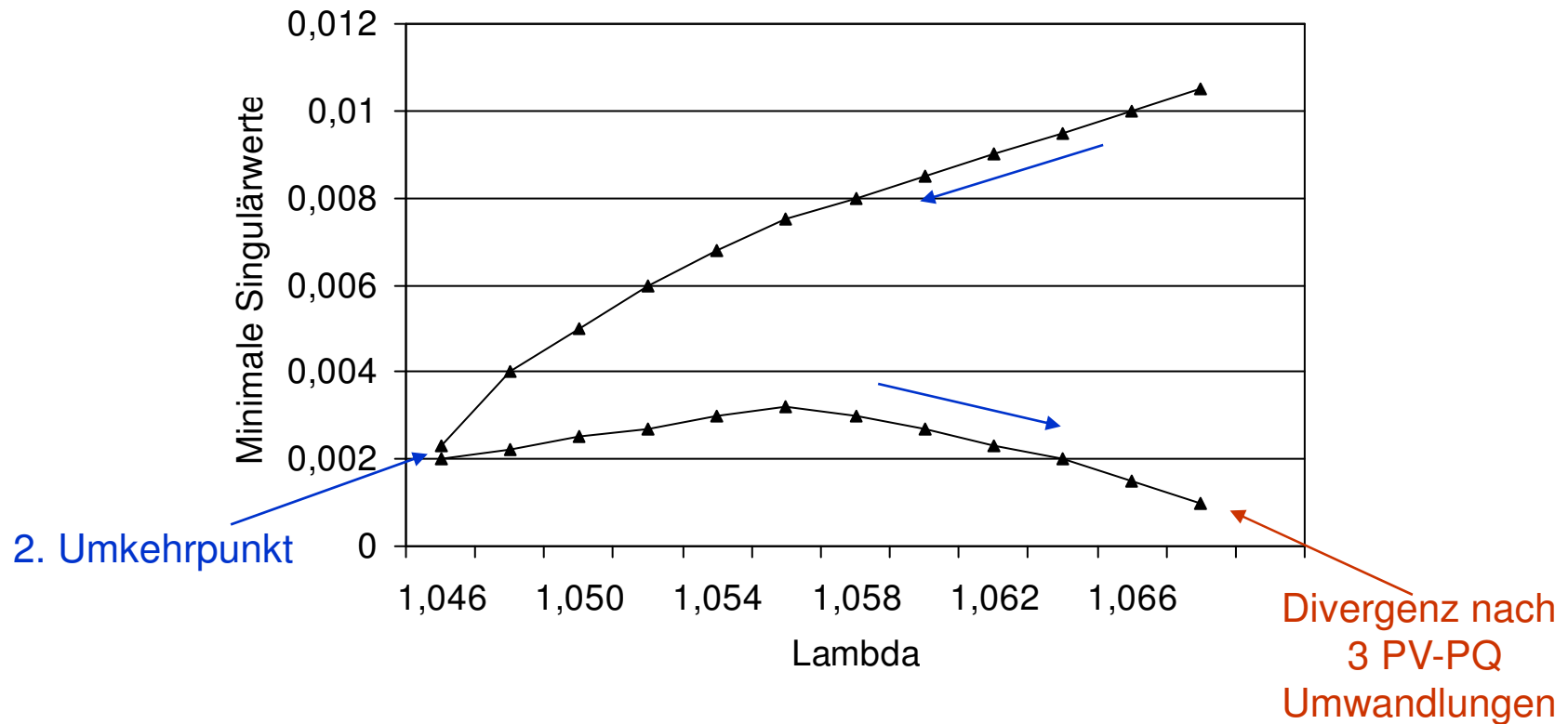
Rotorwinkelstabilität Minimale Singulärwerte



Resultate

Rotorwinkelstabilität

Minimale Singulärwerte „instabiler Bereich“



Rechter oberer Ast schließt an linken unteren Ast der vorhergehenden Abbildung an

Zusammenfassung

Alle vorgestellten Methoden eignen sich zur Spannungsbetrags- und Rotorwinkel- Stabilitätsanalyse

Konvergenzsteuerung nach Hartkopf

- Adäquat, wenn Detailanalyse der gefährdeten Netzteile nicht erforderlich ist, z.B. automatisch ablaufende Ausfallsimulation innerhalb der Zuverlässigkeitsanalyse

Knoten-L-Index-Methode

- Ermittlung der gefährdeten Netzteile möglich
- Stabil, Algorithmus kann nicht divergieren
- Betrag des L-Index an der Stabilitätsgrenze abhängig vom untersuchten System

Singulärwertmethode

- Ermittlung der gefährdeten Netzteile möglich (Singulärvektor)
- Betrag des minimalen Singulärwertes an der Stabilitätsgrenze abhängig vom untersuchten System, jedoch
- stärkerer Gradient im Bereich der Stabilitätsgrenze als bei L-Index
- Konditionszahl ergibt einen Index zur strukturellen (lastunabhängigen) Konditionierung des Systems

Zusammenfassung

Continuation-Power-Flow

- Stabilitätsgrenze eindeutig zu erkennen (Umkehrpunkt der PV-Kurve)
- Ermittlung der gefährdeten Netzteile möglich (Continuation Parameter, Spannungstangentenvektorkomponenten)
- Divergenz der Korrektoriterationen möglich (Heuristiken zur Vermeidung von Divergenz erforderlich)

Zusammenfassende Beurteilung

CPF: Mächtigstes der hier betrachteten Analyseinstrumente

L-Index: Von Vorteil, wenn Rechenzeit und Stabilität der Algorithmen entscheidend sind

Hartkopf: Fehlereffektanalyse innerhalb Zuverlässigkeitsanalyse

Singulärwertmethode: Ergänzendes Analyseinstrument