

# Kritikalität der Parallelführung eines 110-kV-Netzes mit einem MS-Netz und der Einfluss der Nichtlinearität der Petersenspule

**Elisabeth Hufnagl**

12.02.2016

# Agenda

- Problemstellung
- Lösungsansatz
- Erdschlussbetrachtungen
- Nichtlinearität der Petersenspule
- Erkenntnisse

## Problemstellung

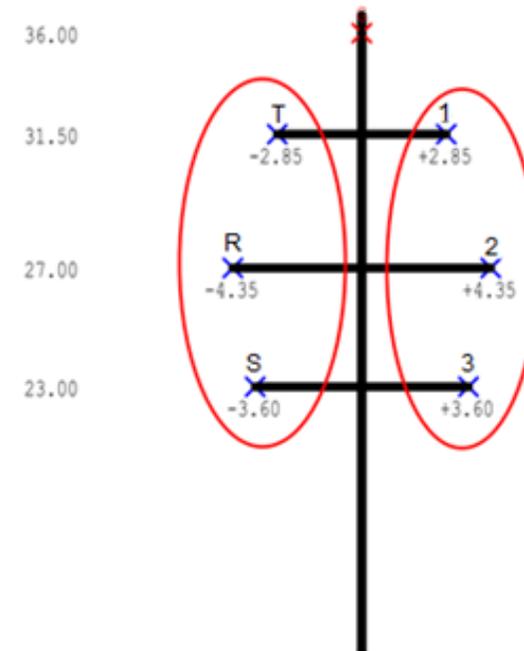
- Parallelführung eines MS-Netzes mit dem 110-kV-Netz
  - Über wenige Kilometer auf gemeinsamen Gestänge
  - Möglichkeit von Sonderschaltzuständen  
→ Klein-Netz, welches gelöscht betrieben wird

## Problemstellung

- Führen Unsymmetrien
  - Im fehlerfreien Betrieb
  - In Kombination mit 110-kV-Erdschluss
  - Doppel-ES-Varianten (gemeinsamer Fußpunkt)  
...zu unzulässigen Spannungsüberhöhungen?
- Reduktion der Verlagerungsspannung der MS-Seite
  - Im Resonanzfall
  - Basierend auf der Nichtlinearität der Löserspule

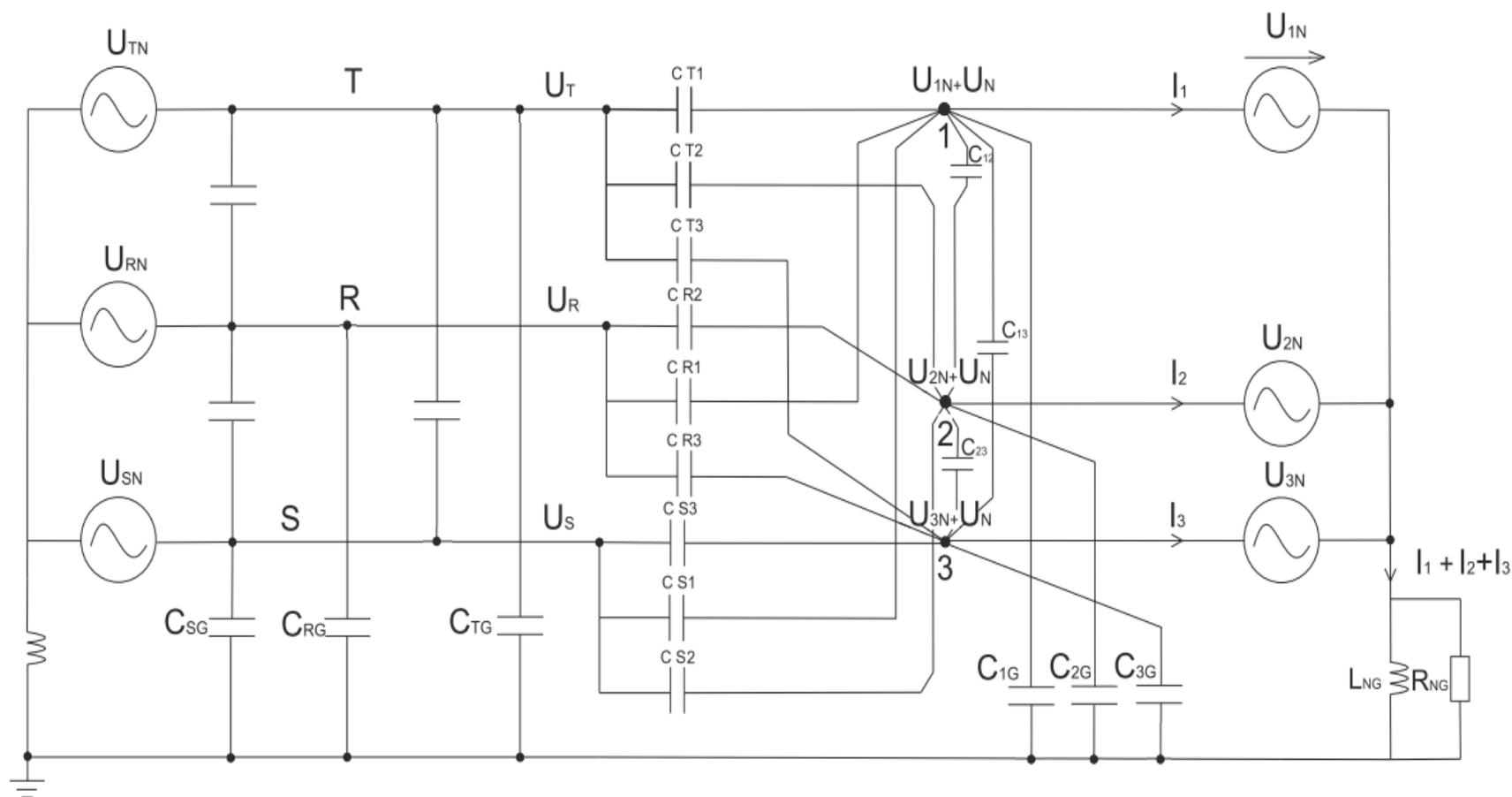
# Lösungsansatz: Ermittlung der Systemparameter

- Koppelkapazitäten zwischen den Spannungssystemen
- Eigenkapazitäten



# Lösungsansatz: Bestimmung der Verlagerungsspannung

Gleichungssystem anhand Schaltbild:



# Erdschlussbetrachtungen

## Einphasiger Erdschluss:

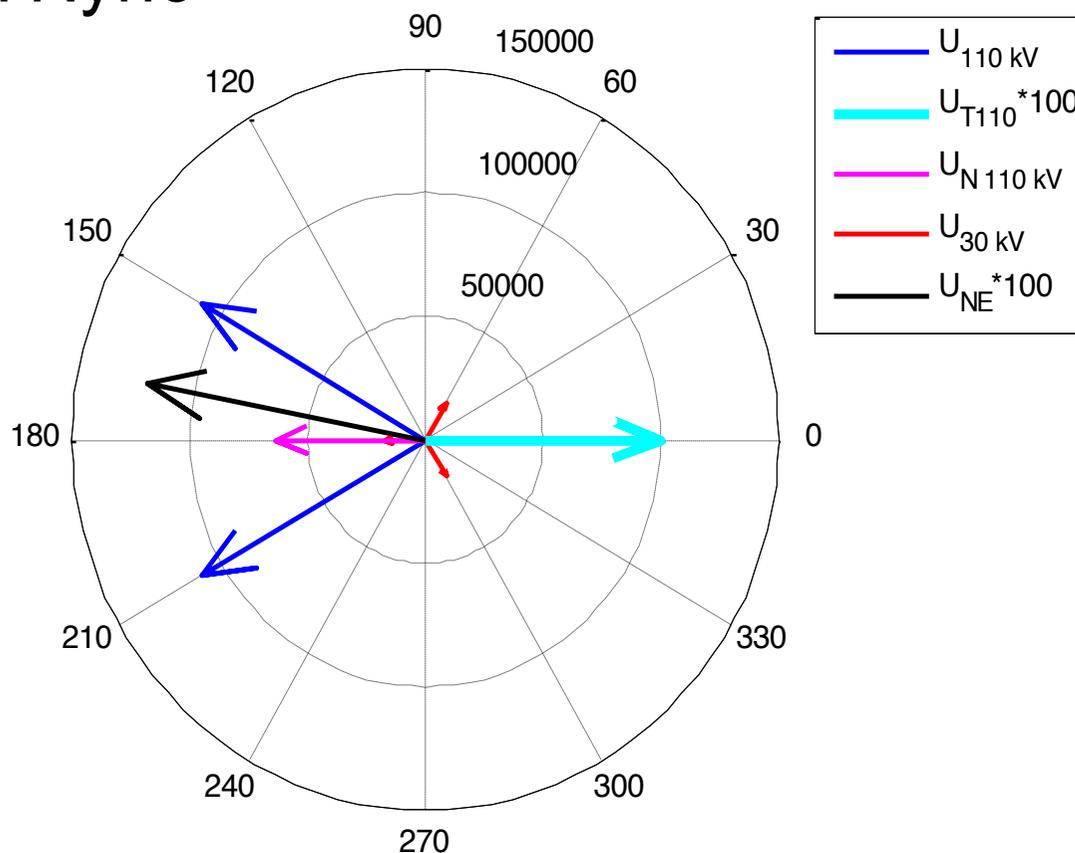
- Kapazitiver Strom abhängig von den
  - Spannungssternen
  - Koppelkapazitäten
- Leiter-Erde-Spannungen der gesunden Phasen angehoben
- Verzerrung des Spannungsterns
- Verlagerungsspannung  $U_N$

# Erdschlussbetrachtungen

- ES in Phase T mit Restspannung 1 kV
- Schaltgruppe: YNyn6

- $U_{NE} = 1,2 \text{ kV}$

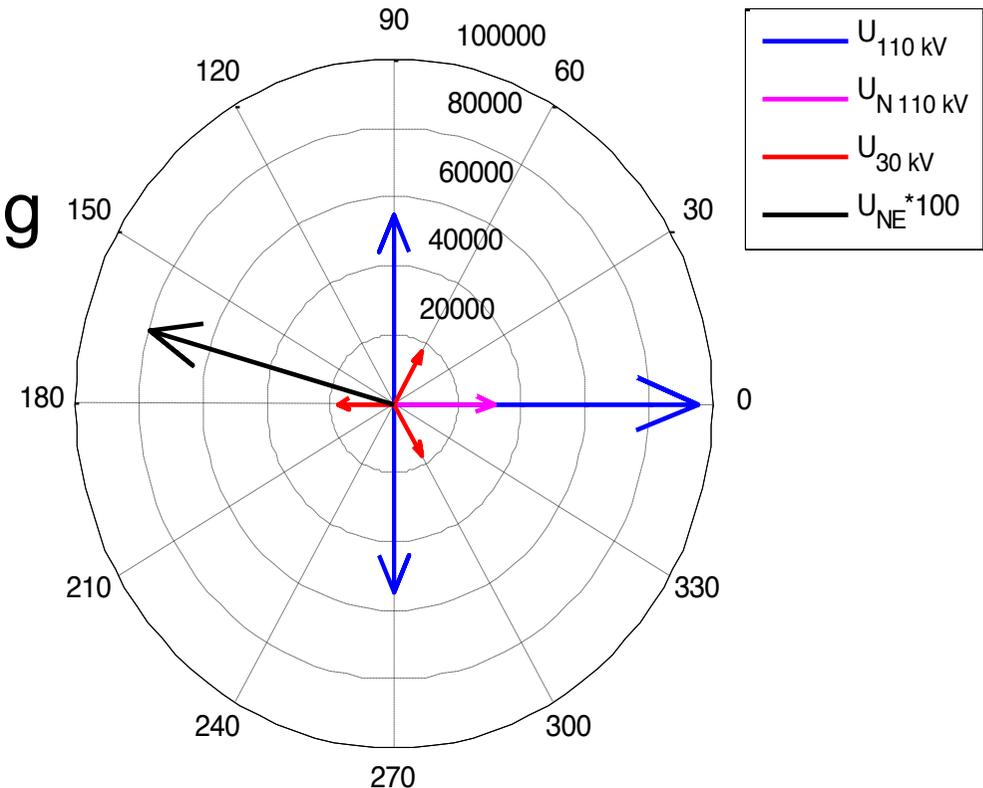
- Worst-Case:  
ES in Phase T



# Erdschlussbetrachtungen

Doppelerdschluss:

- ES: R+S
  - Sternpunktverlagerung
  - $U_{NE} = 796,8 \text{ V}$
  - Worst-Case:  
R+T :  $U_{NE} = 1,03 \text{ kV}$



# Nichtlinearität der Petersenspule

## Sonderfall Resonanz:

- Möglichkeit einer Parallelresonanz am Sternpunkt der MS-Seite durch ungünstigen Schaltzustand
- Ungesättigter Fall (linearer Betriebsbereich der Petersenspule) :
  - Durch die steigende Spannung wird der Resonanzpunkt (infolge eintretender Sättigung) wieder verlassen

# Nichtlinearität der Petersenspule

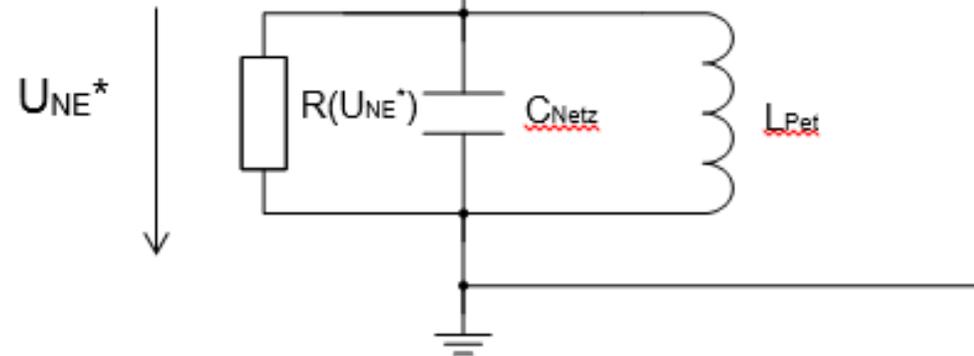
- Nichtlineares Verhalten:
  - Gesucht ist jene Spannung  $U_{NE}$ , und die daraus ableitbare Netzkapazität  $C_{Netz}$ , die zu perfekter Resonanzabstimmung führt

# Nichtlinearität der Petersenspule

Vollständiger Spannungsteiler:

$$\frac{U_{NE}}{U_Q} = \frac{|Z_{parallel}|}{\sqrt{|Z_{parallel}|^2 + X_K^2}}$$

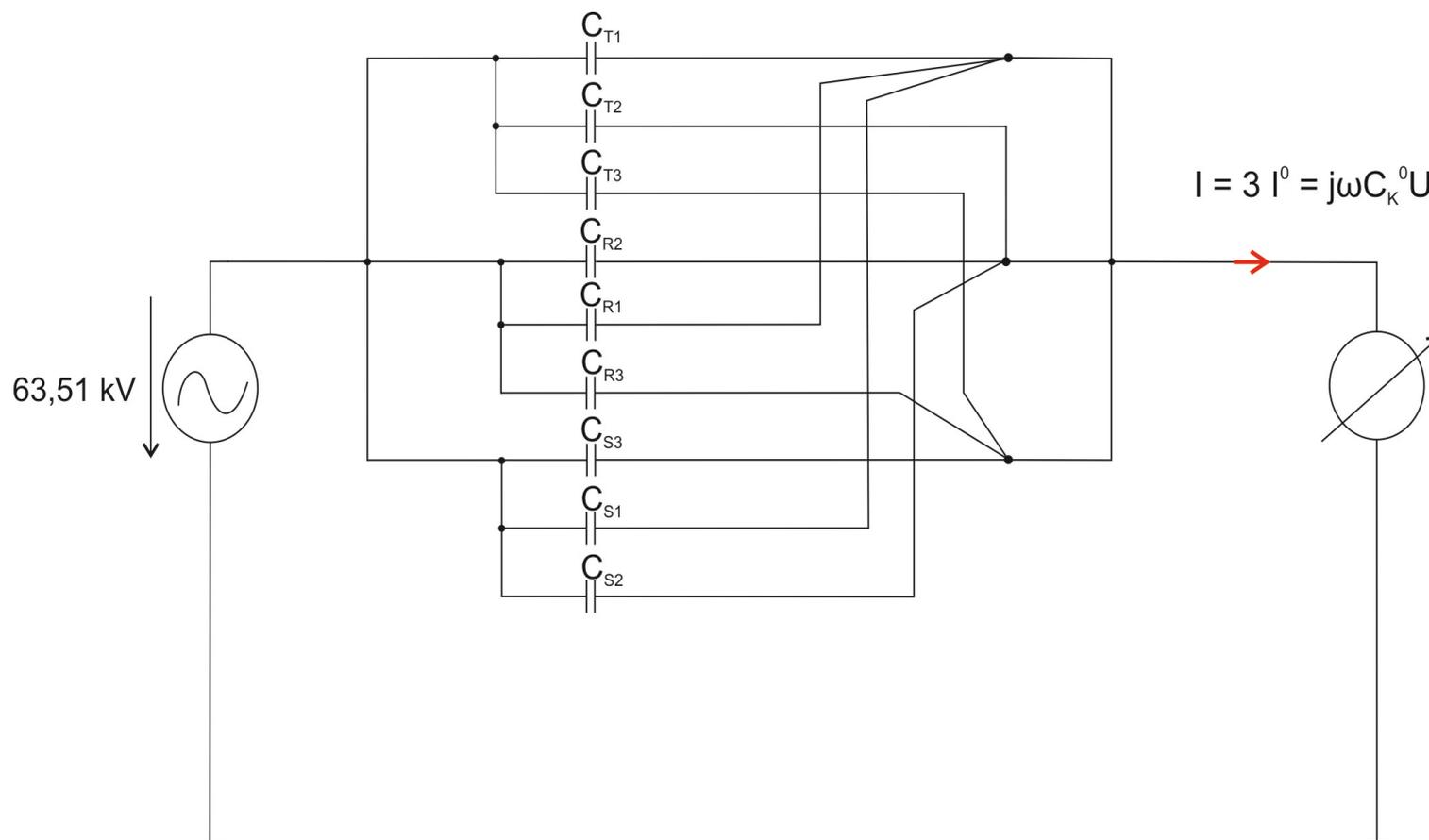
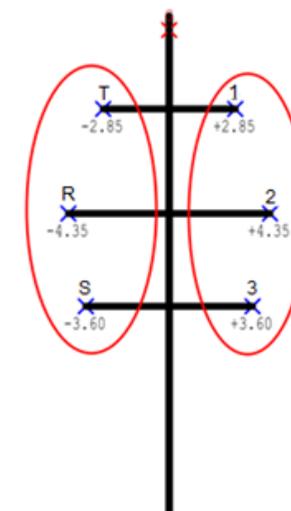
$$Z_{parallel} = \frac{1}{\frac{1}{j \omega \cdot L_{Pet}} + j \omega \cdot C_{Netz} + \frac{1}{R}}$$



R ab Überschreiten der Kniespannung spannungsabhängig!

# Nichtlinearität der Petersenspule

Bestimmung der Koppelkapazität:



# Nichtlinearität der Petersenspule

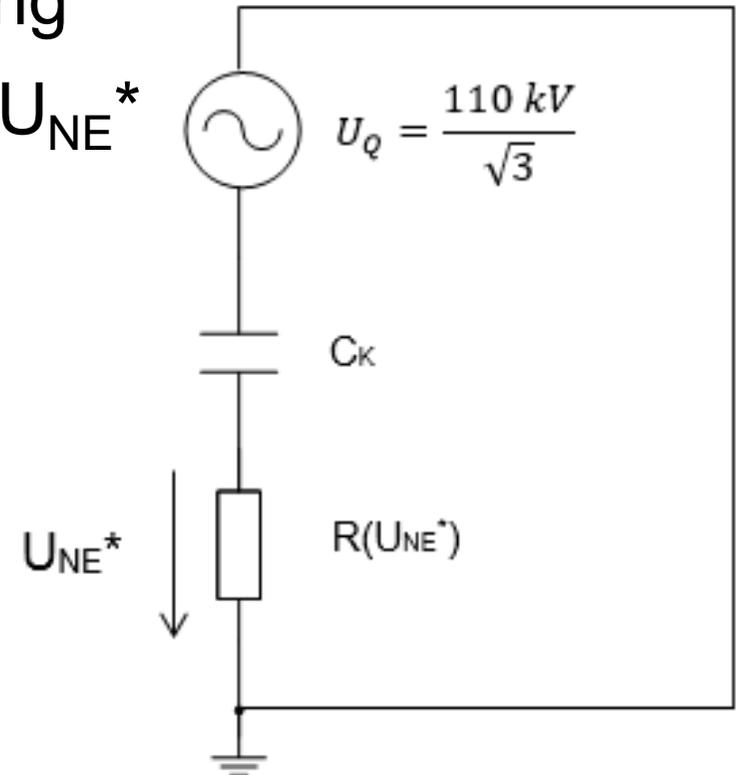
- Parallelresonanz → es wirkt nur noch der spannungsabhängige Verlustwiderstand der Petersenspule
- Berücksichtigung der Nichtlinearität:
  - Größtmögliche Verlagerungsspannung  $U_{NE}$  der Mittelspannungs-Seite gesucht
  - Bestimmung des wirksamen Verlustwiderstands für die jeweilige Spannung
  - Spannungsteiler mit der Koppelkapazität  $C_K$

# Nichtlinearität der Petersenspule

Bestimmung des spannungsabhängigen  
Verlustwiderstandes  $R(U_{NE}^*)$ :

- Spulenstrom und Verlustleistung für ausgewählte Spannungen  $U_{NE}^*$  vom Spulenhersteller
- Gesucht ist  $U_{NE}^*$ , für die gilt:

$$U_{NE}^* - U_Q \cdot \frac{R(U_{NE}^*)}{\sqrt{R(U_{NE}^*)^2 + X_K^2}} = 0$$



# Nichtlinearität der Petersenspule

Berechnung mit Werten vom Spulen-Hersteller:

- Spannungsteiler zwischen  $U_{NE}^* = 21,0 \text{ kV}$  und  $U_{NE}^* = 22,5 \text{ kV}$  erfüllt
- Verlagerungsspannung genauer bestimmen
  - Betriebspunkte interpolieren
  - $U_{NE}^* = 21,3 \text{ kV}$  erfüllt Gleichung
- Entspricht einer Spulenreaktanz von  $3,3 \text{ k}\Omega$
- Abzuführende Verlustleistung von  $7,6 \text{ kW}^1$

<sup>1</sup> Interpolierter Wert; nicht von SpulenhHersteller bestätigt

## Erkenntnisse I

- Unsymmetrie führt im fehlerfreien Betrieb zu **keiner** unzulässigen Verlagerungsspannung
- Im ES-Fall wird über die Kopplung der Nullkapazitäten ein Strom in das als gesund angenommene MS-Netz eingeprägt
  - Strom deutlich unter 1 A
  - Fließt über Parallelschaltung der Leiter-Erde-Kapazitäten des gesamten Netzes mit der Petersenspule gegen Masse ab

## Erkenntnisse II

- Verlagerungsspannungen liegen deutlich unter der Kniespannung der LÖschspule → akzeptierbar
- Ungewollte Parallelresonanz bedenklich
  - Steiler Verlauf der Resonanzkurve  
→ hohe Sensibilität bezüglich Systemparameter
  - Signifikante Verlustleistung
  - Erwärmungszeitkonstanten von wenigen Minuten

## Erkenntnisse III

- Erwärmung des Transformatorbleches kann bei andauernden Sättigungsbetrieb sehr hohe Werte annehmen → Folgeschäden
- Parallelführung vermeiden, oder Parallelresonanz der Netzkapazitäten mit der Löschspule ausschließen

# Kritikalität der Parallelführung eines 110-kV-Netzes mit einem MS-Netz und der Einfluss der Nichtlinearität der Petersenspule

**Elisabeth Hufnagl**

**TU Graz**

**Institut für Elektrische Anlagen – IfEA**

**Inffeldgasse 18**

**8010 Graz**

**[www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)**

**12.02.2016**

# Anhang

Gesund, T1:

ergebnis\_final =

betr\_IL1 = 0.2350

winkel\_IL1 = 95.0916

betr\_IL2 = 0.1394

winkel\_IL2 = -10.4714

betr\_IL3 = 0.0968

winkel\_IL3 = -148.1026

betr\_INE = 0.1612

winkel\_INE = 77.7865

betr\_UNE = 930.5278

winkel\_UNE = 166.4367