

Jakob Leide  
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

# Neue Berechnungsmethode für den Distanzschutz zur Anwendung bei Zwischensystemfehlern auf Doppelleitungen

19. Symposium Energieinnovation // Donnerstag, 12. Februar 2026

# Einleitung

## Problemstellung und Motivation

- Wachsende Einspeisung regenerativer Erzeuger erfordert **Netzausbau**
- **Trassenbündelung** vereinfacht Genehmigungsverfahren [1]
  - Mehrere Stromkreise auf gemeinsamen Mastgestängen
  - Auch Stromkreise unterschiedlicher Spannung
- Gefahr für **Zwischensystemfehler** steigt

## Stand der Technik

- Freileitungsschutz ist oft der **Distanzschutz**
- Ziegler [2] beschreibt einsystemigen Distanzschutz
- **Zwischensystemfehler** werden von Distanzschutz nicht ausgewertet
- Bachmatiuk und Izykowski [3]: Berechnungsmethode für **Doppelleitungen** unter Berücksichtigung der **Nullsystemkopplung**
  - Vereinfachungen schränken Anwendung ein

## Ziele

- Allgemeine Anwendbarkeit
- Verbesserte Genauigkeit bei Berechnung der **Fehlerdistanz**
  - Dafür ist genaue Berechnung der **Fehler-schleifenimpedanz** nötig
  - Basis für **Zonenentscheid**
- Selektiver Zonenentscheid

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Systematisierung von Zwischensystemfehlern
- 3 Dynamisches Netzmodell und Simulationsmodell
- 4 Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern
  - Einsystemiger Distanzschutz
  - Distanzberechnung nach Bachmatiuk und Iżykowski
  - Neue Berechnungsmethode
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

# Systematisierung von Zwischensystemfehlern

- *Kategorie 1:* Fehler, an denen Leiter aus Stromkreisen mit  $f = 50$  Hz beteiligt sind
  - *Kategorie 1-1:* Beteiligung von Leitern aus mehreren Stromkreisen
  - *Kategorie 1-2:* Beteiligung von Leitern aus mehreren, galvanisch getrennten Stromkreisen [4]
- *Kategorie 2:* Fehler, an denen Leiter aus Stromkreisen mit  $f = 50$  Hz und Spannungssystemen mit  $f \neq 50$  Hz beteiligt sind
- *Kategorie 3:* Fehler, an denen nur Leiter aus Spannungssystemen mit  $f \neq 50$  Hz beteiligt sind

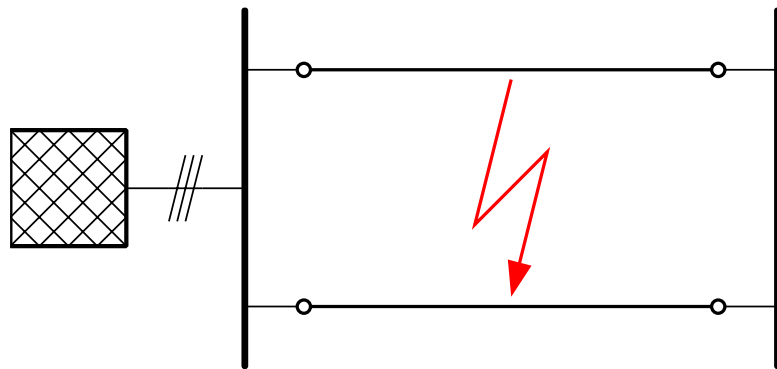


Bild 1: Fehler nach Kategorie 1-1

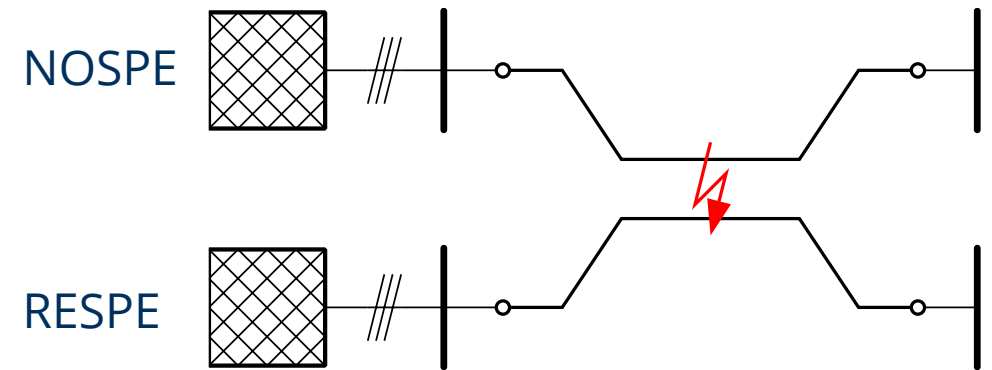


Bild 2: Fehler nach Kategorie 1-2

NOSPE... Niederohmige Sternpunktterdung  
RESPE... Resonanzsternpunktterdung

# Dynamisches Netzmodell und Simulationsmodell

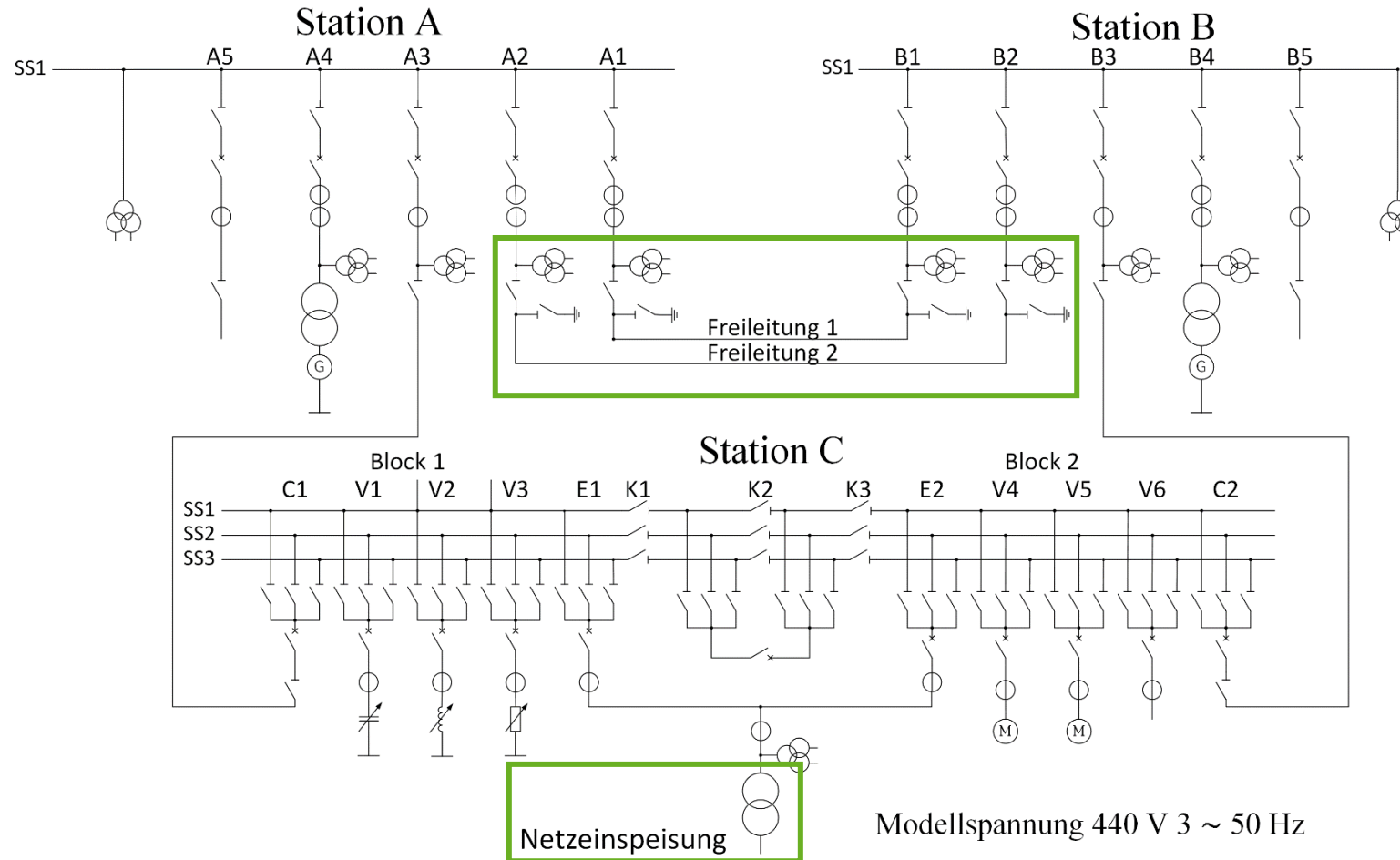


Bild 3: Dynamisches Netzmodell [5]

# Dynamisches Netzmodell und Simulationsmodell

- Nachbildung der Doppelleitung des Dynamischen Netzmodells (DNM) in Simulink [5]
  - 30 konzentrierte  $\Pi$ -Elemente
  - Konzentrisch verschachtelte Spulen mit induktiver Verkopplung
  - Bildet 150 km-Doppelleitung ab

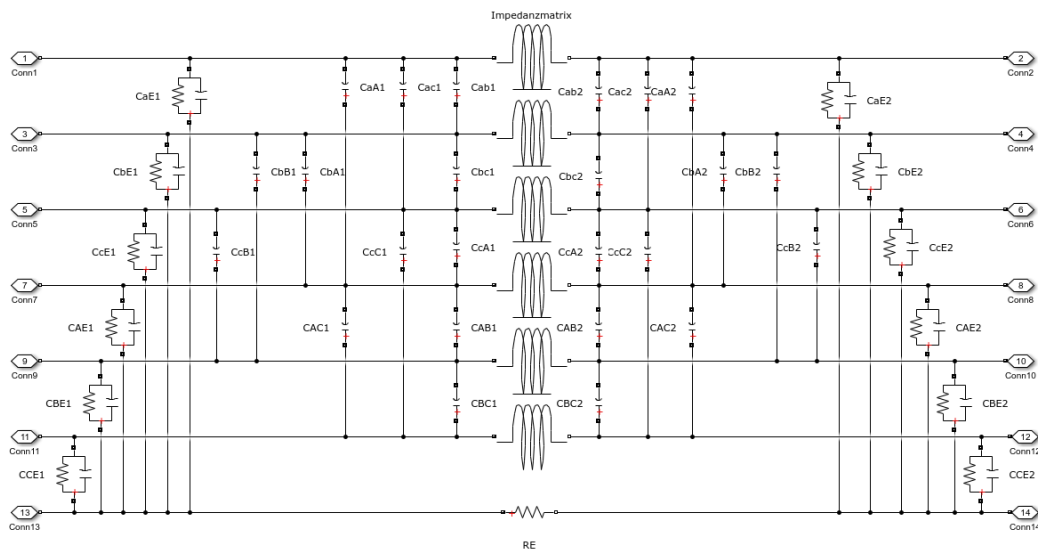


Bild 4:  $\Pi$ -Element in Simulink

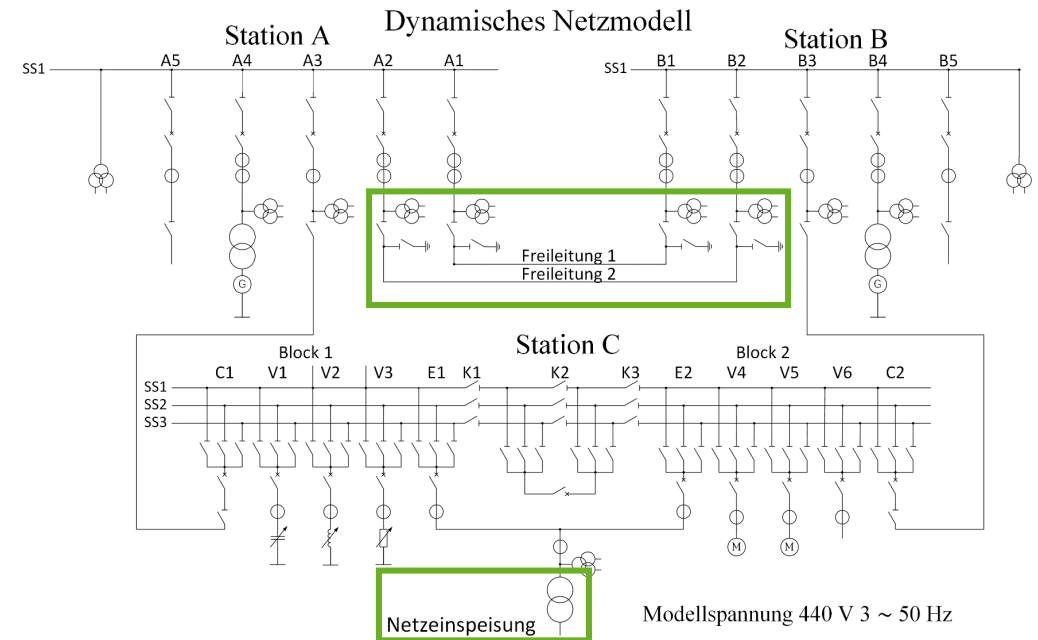


Bild 3: Dynamisches Netzmodell [5]

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Einsystemiger Distanzschutz

- Mehrere parallele Fehlerstrompfade
- Stromsumme weicht von Null ab  
→ Rechnerischer Erdstrom
  - Bei Leiter-Leiter-Fehlern Erdanregung des Distanzschutzes

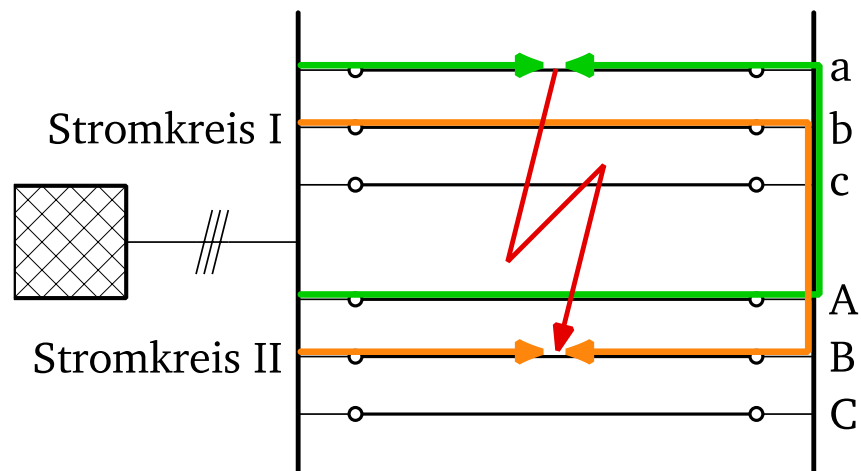


Bild 5: Fehlerstrompfade bei dem Fehler a-B

- Schleife a-B
- Schleife a-b
- Schleife A-B

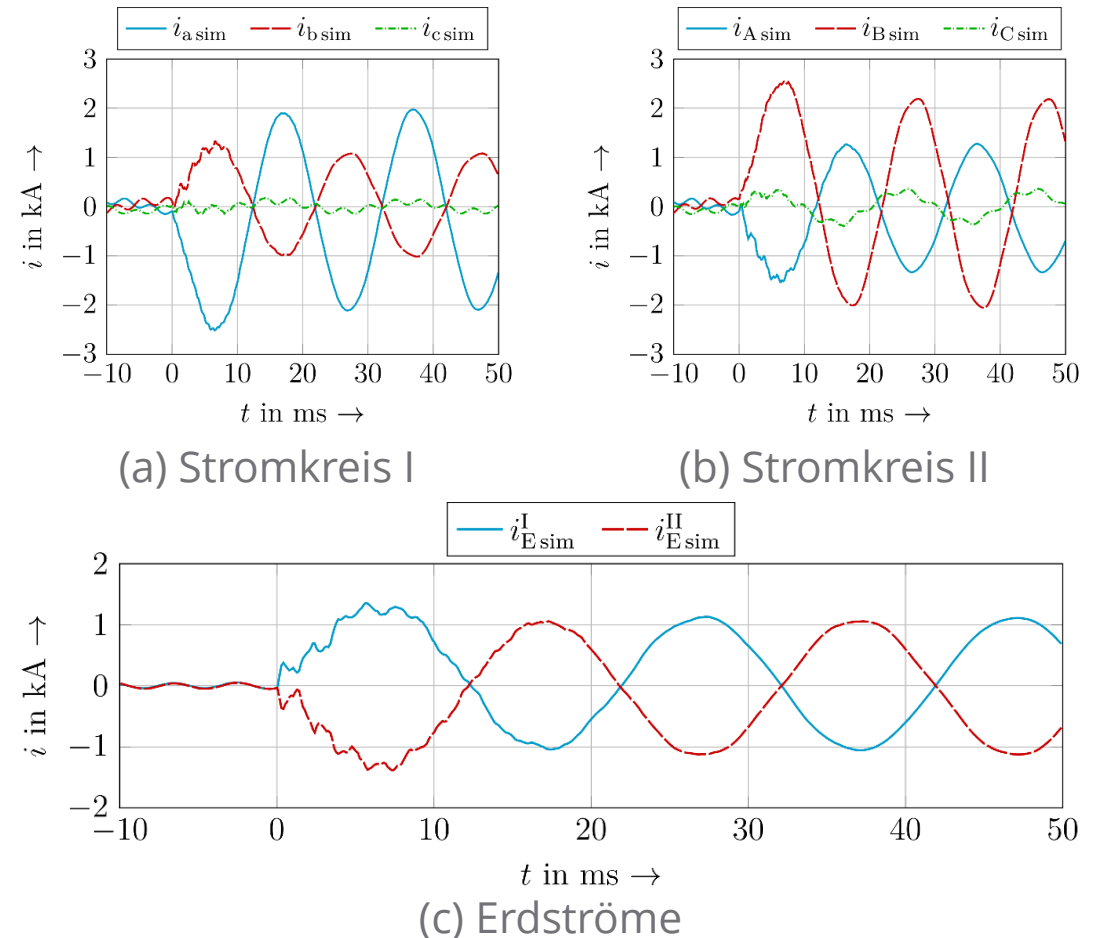


Bild 6: Ströme bei Fehler a-B in 100 km Entfernung

# Distanzberechnung

## Einsystemiger Distanzschutz [2]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_k}{\underline{I}_j - \underline{I}_k}$$

mit  $j, k = \{a, b, c\}, j \neq k$

$$\ell_{\text{mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\text{mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_1)} \cdot \ell_L \quad \Delta\ell_F = \frac{\ell_{\text{mess}} - \ell_F}{\ell_F} \cdot 100 \%$$

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Einsystemiger Distanzschutz

- Einsystemiger Distanzschutz wertet nur Schleifen innerhalb eines Stromkreises aus [2]
- Distanzberechnung mit den Leiter-Leiter-Schleifen führt zu Abweichungen bis 250 %
- Fehler ab 40 km Entfernung in Distanzzone 2 eingemessen
  - Zone 2 beginnt bei 127,5 km
- Abweichungen von 25 % (40 km) bei Fehlern am Leitungsende
- Unterreichweite des Distanzschutzes

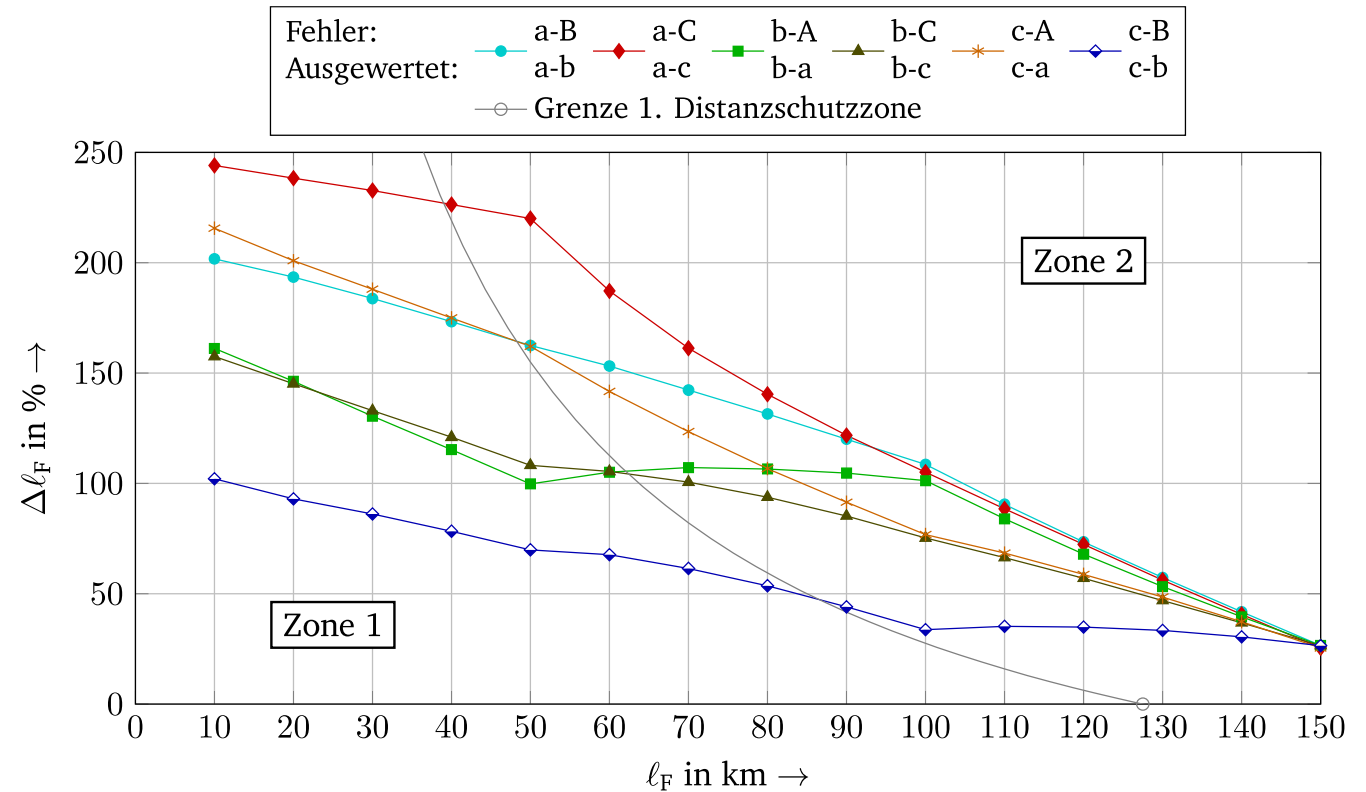


Bild 7: Abweichung der Distanzberechnung in Stromkreis I in Abhängigkeit des Fehlerortes – einsystemiger Distanzschutz

# Distanzberechnung

## Einsystemiger Distanzschutz [2]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_k}{\underline{I}_j - \underline{I}_k}$$

mit  $j, k = \{a, b, c\}, j \neq k$

## Berechnung nach Bachmatiuk und Izykowski [3]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{\underline{I}_j - \underline{I}_K - \underline{k}_{EOM}(\underline{I}_E^I - \underline{I}_E^{II})}$$

$$\underline{k}_{EOM} = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1}{3 \cdot \underline{Z}_1}$$

$$\underline{I}_E^I = -(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c)$$

$$\underline{I}_E^{II} = -(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)$$

mit  $j = \{a, b, c\}$  und  $K = \{A, B, C\}$

$$\ell_{\text{mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\text{mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_1)} \cdot \ell_L$$

$$\Delta \ell_F = \frac{\ell_{\text{mess}} - \ell_F}{\ell_F} \cdot 100 \%$$

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Distanzberechnung nach Bachmatiuk und Izykowski [3]

- Abweichungen im Bereich  $\pm 40\%$ 
  - Entspricht Genauigkeit des einsystemigen Distanzschutzes auf Einfachleitung [5]
- Fehler ab 100 km Entfernung in Distanzzone 2 eingemessen
  - Zone 2 beginnt bei 127,5 km
- Abweichungen von bis zu 36% bei Fehlern am Leitungsende
- Unterreichweite des Distanzschutzes

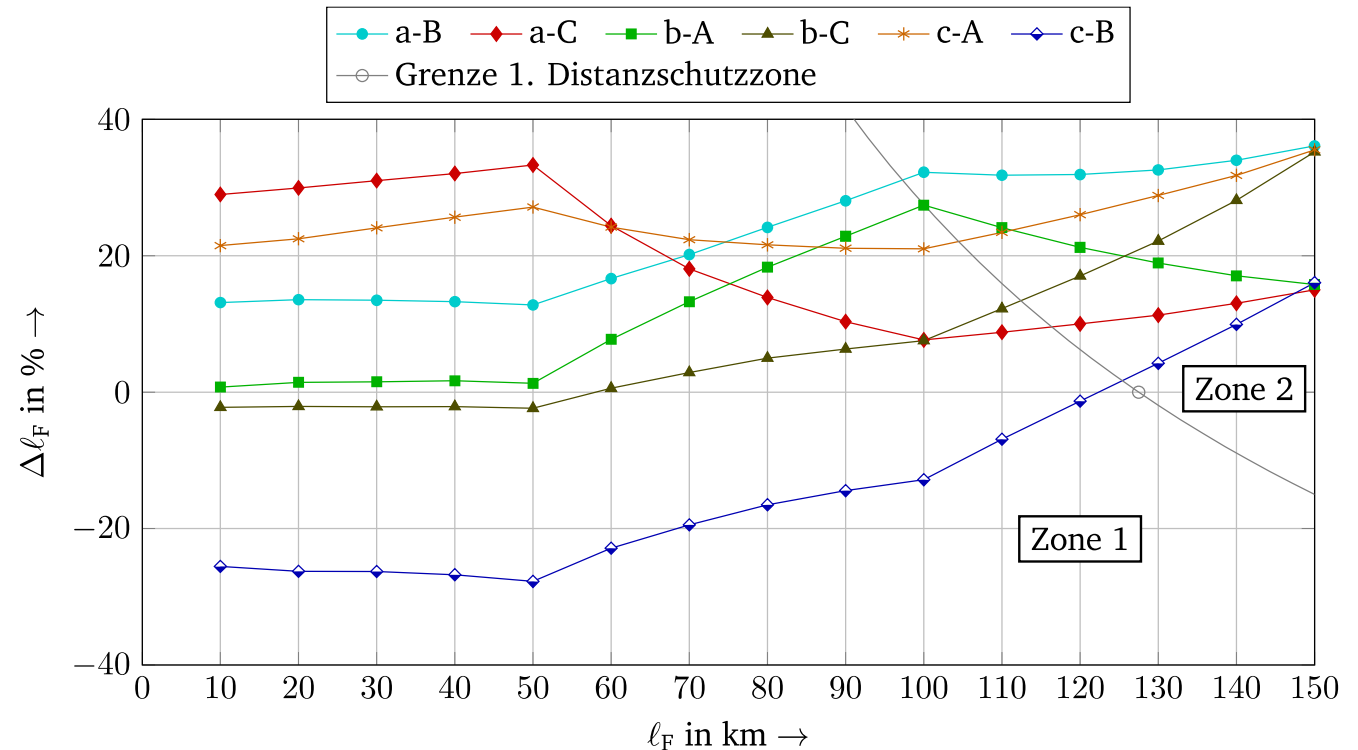


Bild 8: Abweichung der Distanzberechnung in Abhängigkeit des Fehlerortes – Berechnung nach Bachmatiuk und Izykowski aus [3]

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Neue Methode der Distanzberechnung

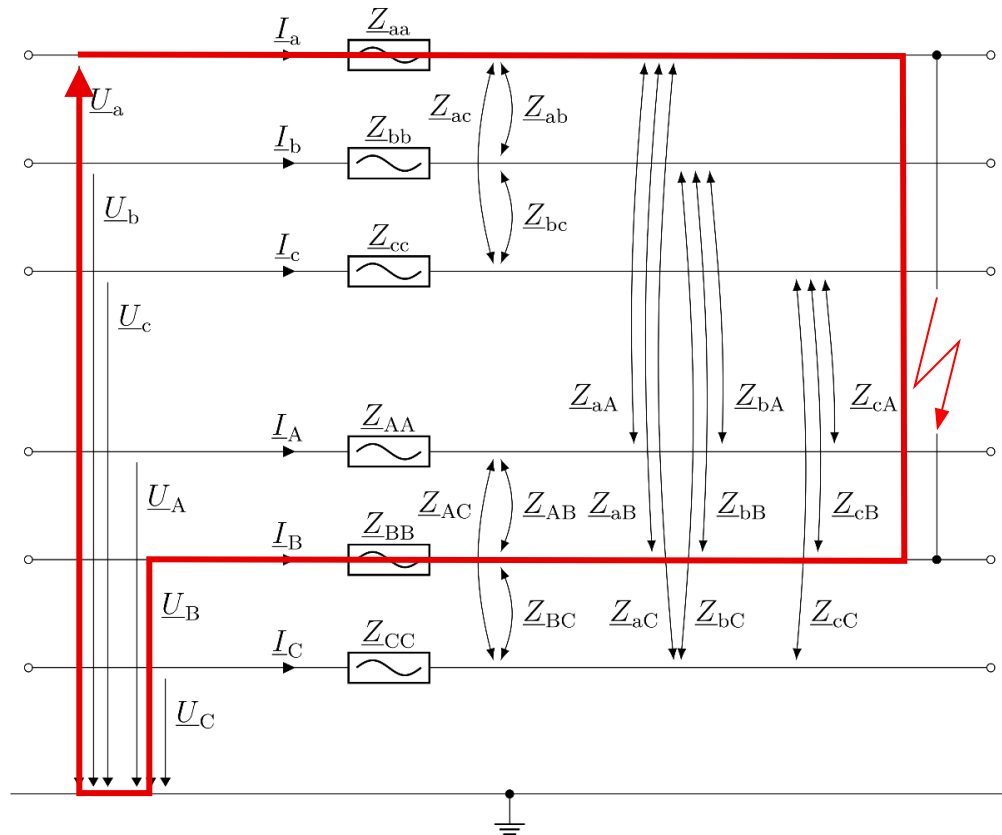


Bild 9: Induktive Verkopplung einer Doppelleitung mit Fehler a-B (vgl. [6])

$$0 = \underline{I}_a \underline{Z}_{aa} + (\underline{I}_b \underline{Z}_{ba} + \underline{I}_c \underline{Z}_{ca} + \underline{I}_A \underline{Z}_{Aa} + \underline{I}_B \underline{Z}_{Ba} + \underline{I}_C \underline{Z}_{Ca}) - (\underline{I}_a \underline{Z}_{aB} + \underline{I}_b \underline{Z}_{bB} + \underline{I}_c \underline{Z}_{cB} + \underline{I}_A \underline{Z}_{AB} + \underline{I}_C \underline{Z}_{CB}) - \underline{I}_B \underline{Z}_{BB} + \underline{U}_B - \underline{U}_a$$

**Annahme:** Verdrillte, symmetrische, nicht identische Stromkreise [7]

- Bezug auf  $\underline{Z}_1^I$
- Einführung von Koeffizienten
- Fehlerort kann im Leitungsverlauf liegen

$$\frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{\underline{I}_j - \underline{k}_1 \underline{I}_K - \underline{k}_{1M} (\underline{I}_k - \underline{I}_j) - \underline{k}_E^I \underline{I}_E^I + \underline{k}_E^{II} \underline{I}_E^{II}} = \underline{Z}_{\text{mess}}$$

$$j, k = \{a, b, c\}$$

$$J, K = \{A, B, C\}$$

# Distanzberechnung

## Einsystemiger Distanzschutz [2]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_k}{\underline{I}_j - \underline{I}_k}$$

mit  $j, k = \{a, b, c\}, j \neq k$

## Berechnung nach Bachmatiuk und Izykowski [3]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{\underline{I}_j - \underline{I}_K - \underline{k}_{E0M}(\underline{I}_E^I - \underline{I}_E^{II})}$$

$$\underline{k}_{E0M} = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1}{3 \cdot \underline{Z}_1}$$

$$\underline{I}_E^I = -(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c)$$

$$\underline{I}_E^{II} = -(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)$$

mit  $j = \{a, b, c\}$  und  $K = \{A, B, C\}$

## Neue Berechnungsmethode

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{\underline{I}_j - \underline{k}_1 \underline{I}_K - \underline{k}_{1M}(\underline{I}_k - \underline{I}_j) - \underline{k}_E^I \underline{I}_E^I + \underline{k}_E^{II} \underline{I}_E^{II}}$$

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{Z}_1^{II}}{\underline{Z}_1^I} \quad \underline{k}_{1M} = \frac{\underline{Z}_{1M}}{\underline{Z}_1^I}$$

$$\underline{k}_E^I = \frac{\underline{Z}_0^I - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1^I + \underline{Z}_{1M}}{3 \cdot \underline{Z}_1^I}$$

$$\underline{k}_E^{II} = \frac{\underline{Z}_0^{II} - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1^{II} + \underline{Z}_{1M}}{3 \cdot \underline{Z}_1^I}$$

mit  $j, k = \{a, b, c\}, j \neq k$  sowie  $J, K = \{A, B, C\}$

$$\ell_{\text{mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\text{mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_1)} \cdot \ell_L$$

$$\Delta \ell_F = \frac{\ell_{\text{mess}} - \ell_F}{\ell_F} \cdot 100 \%$$

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Neue Methode der Distanzberechnung

- Abweichungen im Bereich  $\pm 35\%$ 
  - Auf Grund geometrischer Unsymmetrie innerhalb der Verdrillungsabschnitte
  - Korrigierbar mit Verfahren aus [8]
  - Entspricht Genauigkeit des einsystemigen Distanzschutzes auf Einfachleitung [5]
- Abweichungen von  $\pm 6,5\%$  bei Fehlern am Leitungsende
- Zonengrenze zwischen 115 km und 140 km Fehlerentfernung
  - Zone 2 beginnt bei 127,5 km
- Selektiver Zonenentscheid
  - Fehler am Leitungsende in Zone 2

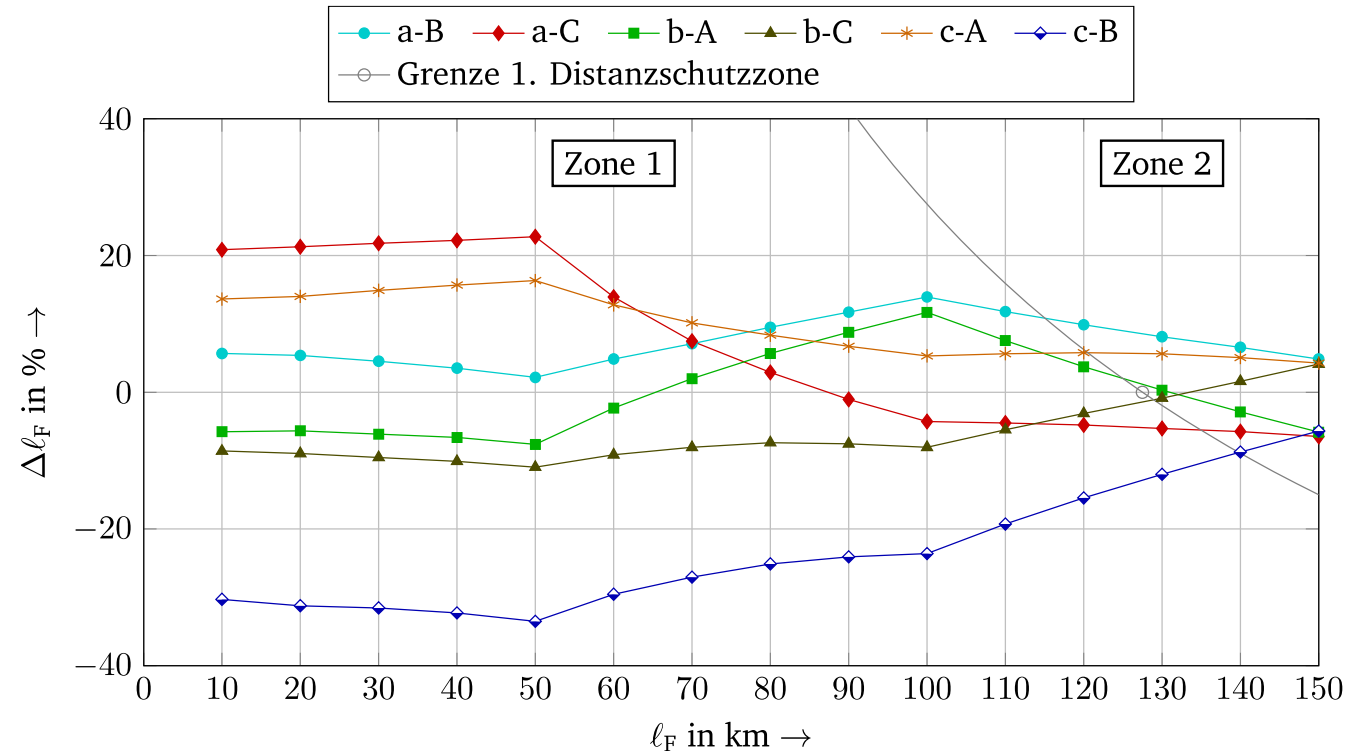


Bild 10: Abweichung der Distanzberechnung in Abhängigkeit des Fehlerortes – Neue Methode der Distanzberechnung (Kategorie 1-1)

# Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern

## Bewertung der Ergebnisse

Tabelle 1: Bewertung von Distanzberechnungen

Kriterium	Einsystemiger Distanzschutz	Bachmatiuk und Izykowski	Neue Berechnungsmethode
Maximale Abweichung	Bis zu 250 %	Bis zu $\pm 40\%$	Bis zu $\pm 35\%$
Genauigkeit am Leitungsende	Unter 27 %	Unter 36 %	Unter $\pm 6,5\%$
Benötigte Messwerte	Ein Stromkreis	Beide Stromkreise	Beide Stromkreise
Selektivität	Sehr gering	Gering	Hoch

# Zusammenfassung und Ausblick

## ➤ Zusammenfassung

- Zwischensystemfehler werden durch den einsystemigen Distanzschutz nicht ausgewertet
- Bekannte Methoden zur Distanzberechnung mit großen Abweichungen bei Zwischensystemfehlern
- ✓ Deutliche Verbesserung der Genauigkeit mit neuer Berechnungsmethode
  - ✓ Anwendbar bei Zwischensystemfehlern auf Doppelleitungen
  - ✓ Nutzt die Mit- und Nullsystemkopplung der Stromkreise
  - ✓ Ermöglicht selektive Behandlung von Zwischensystemfehlern durch den Distanzschutz

## ➤ Ausblick

- Erste Untersuchungen zeigen gute Anwendbarkeit der Berechnungsmethode auf Zwischensystemfehler der Kategorie 1-2
  - Weitere Untersuchungen notwendig
- Analyse der Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der neuen Berechnungsmethode nötig:
  - Impedanz eines impedanzbehafteten Fehlers
  - Vorfehlerzustand der Leitung
  - Sternpunktimpedanz
- Untersuchung von Zwischensystemfehlern der Kategorien 2 und 3

# Literaturverzeichnis

- [1] M. Schulze und U. Schmidt, „Systemberührungen von 400- und 100-kV-Parallelführungen im Übertragungs- und Verteilnetz,“ 24. Nachwuchswissenschaftler:innenkonferenz, Nr. 3, Hochschule Mittweida, Hrsg., S. 38–43, 2024, issn: 1437-7624.
- [2] G. Ziegler, *Digitaler Distanzschutz: Grundlagen und Anwendung*, 2. Aufl. Erlangen: Publicis Corp. Publ, 2008, 392 S., isbn: 978-3-89578-320-3.
- [3] A. Bachmatiuk und J. Iżykowski, „Distance protection performance under inter-circuit faults on double-circuit transmission line,“ *Przegląd Elektrotechniczny*, Jg. 89, Nr. 1, S. 7–11, Okt. 2013, issn: 0033-2097.
- [4] M. Schilbach, „Grundlegende Untersuchungen zu Zwischensystemfehlern,“ Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 29. Aug. 2016.
- [5] C. Liebermann und P. Schegner, „Kompensation der Messunschärfe durch Leitungsunsymmetrien bei der Distanzberechnung,“ präsentiert auf dem 18. Symposium Energieinnovation, Graz, Feb. 2024.
- [6] H. Koettnitz und H. Pundt, *Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*, 1. Aufl., Bd. 1, 3 Bde. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968.
- [7] B. R. Oswald, *Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. doi: 10.1007/978-3-8348-2621-3.
- [8] C. Liebermann und P. Schegner, „Compensation of incorrect measurement results as a result of conduction unbalance during distance calculation after short-circuit tripping“, in *2024 IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon)*, Kathmandu, Nepal: IEEE, Nov. 2024, S. 1–5. doi: 10.1109/PowerCon60995.2024.10870553.

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Dipl.-Ing. Jakob Leide

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Technische Universität Dresden/  
Technische Universität Darmstadt

Technische Universität Dresden  
Institut für Elektrische Energieversorgung  
und Hochspannungstechnik (IEEH)

[jakob.leide@tu-darmstadt.de](mailto:jakob.leide@tu-darmstadt.de)

[peter.schegner@tu-dresden.de](mailto:peter.schegner@tu-dresden.de)

+49 615 116-24666

+49 351 463-33202

 Jakob Leide