

Carlo Liebermann

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

Kompensation der Messunschärfe durch Leitungsunsymmetrien bei der Distanzberechnung

18. Symposium Energieinnovation – EnInnov2024

Graz

Freitag, 16. Februar 2024

Inhalte

1. Einleitung
 - Problemstellung und Motivation
 - Stand der Technik
 - Ziele
2. Modellierung des Gesamtsystems
 - Netzersatzschaltung
 - Leitung
3. Berechnung der Messabweichung
 - Schritte bei der Berechnung der vom Distanzschutz gemessenen Distanz
 - Korrektur der Messunschärfe
4. Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Beispiel
5. Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung

Problemstellung und Motivation

- Schutzgeräte setzen **symmetrische Impedanzen** bei Berechnungen voraus
- **Symmetrie** wird bei *vollständiger* Verdrillung nur am **Leitungsende** erreicht
- Berechnung der Distanz **nur am Leitungsende korrekt**
- Kurzschluss **im Verdrillungsabschnitt** (VAS) führt zu **Messabweichungen**

Stand der Technik

- Unschärfe-Problem ist bekannt
 - Messabweichung positiv und negativ
- Ziegler [1] zeigt, wie groß **maximale Abweichung** ist
 - Für **unverdrillte Leitungen**
 - **Keine Abschätzung bei verdrillten Leitungen**
- Ziegler [1]: **schleifenspezifische Einstellung** im Distanzschutz
 - weitaus komplizierter
 - Praktisch **nicht umsetzbar**
- Ziegler [1]: Offline-Korrektur denkbar
 - Kein Vorgehen angegeben

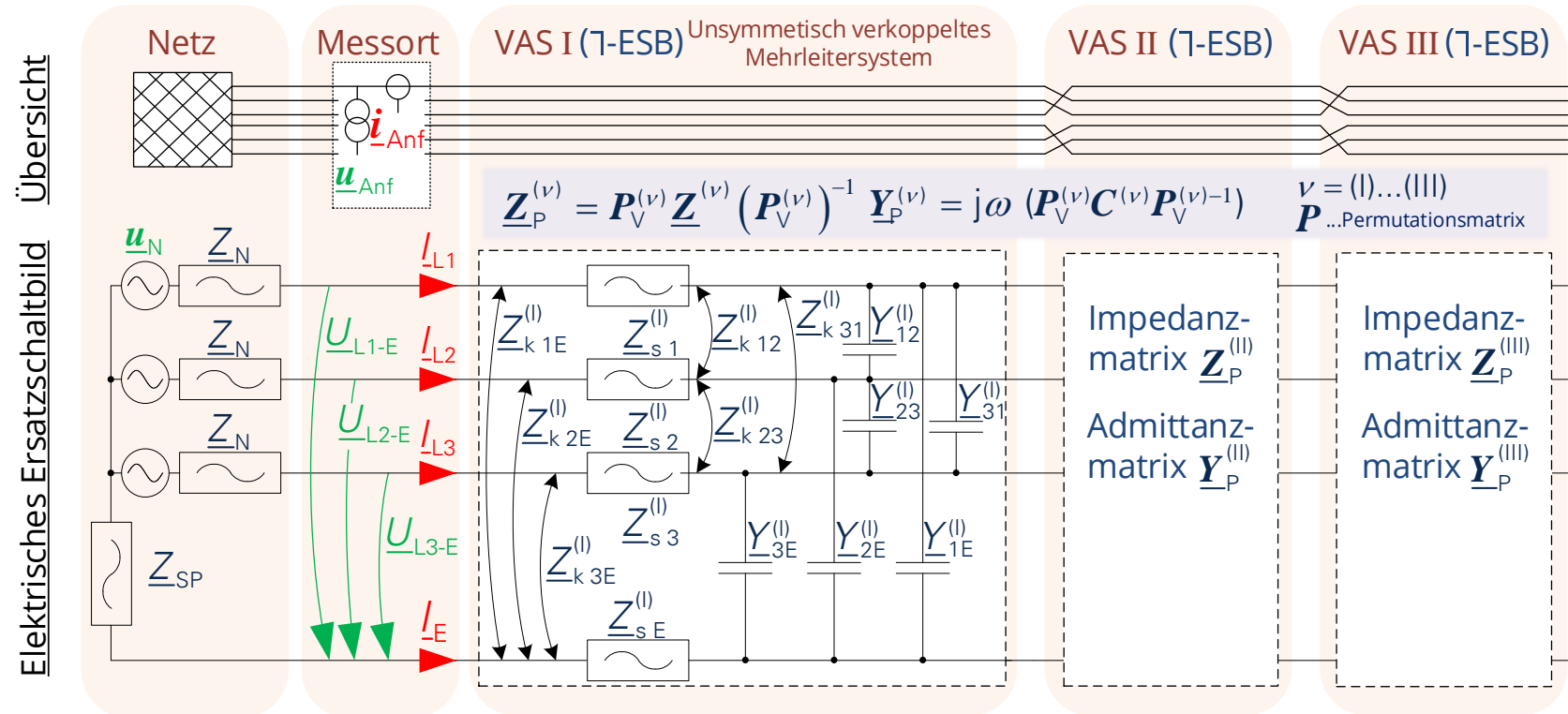
Ziele

- **Berechnung** der Unschärfe in Abhängigkeit von:
 - Mastbildgeometrie
 - Verdrillung/ Leiterfolge
 - Fehlerschleife
 - Schaltzustand
- Berücksichtigung der **kapazitiven Verkopplung**
- **Offline-Korrektur** der vom Relais bestimmten Distanz zur Fehlerstelle

Modellierung des Gesamtsystems

Übersicht

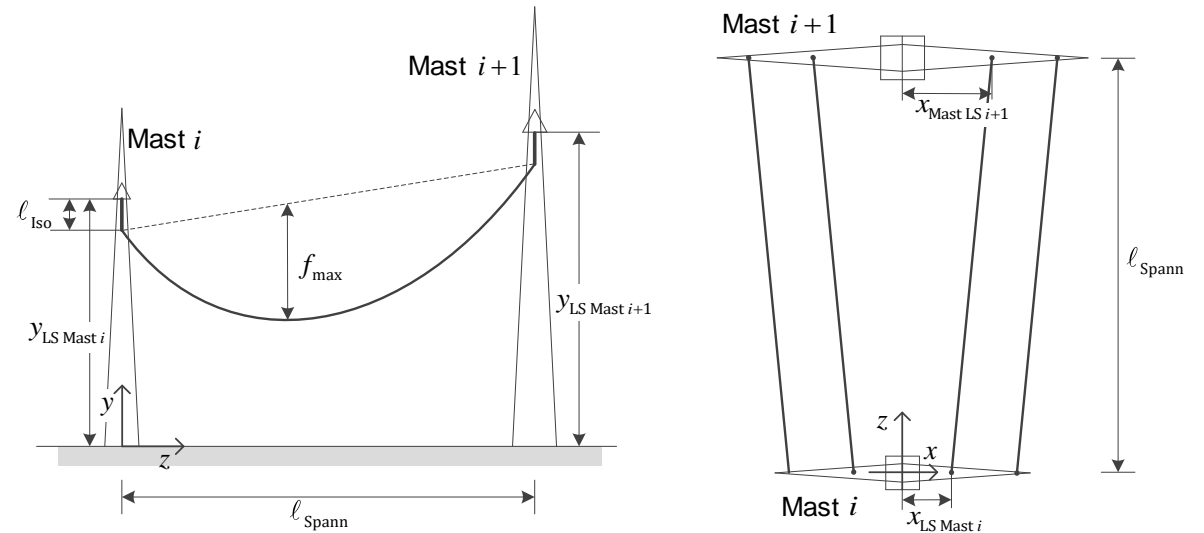
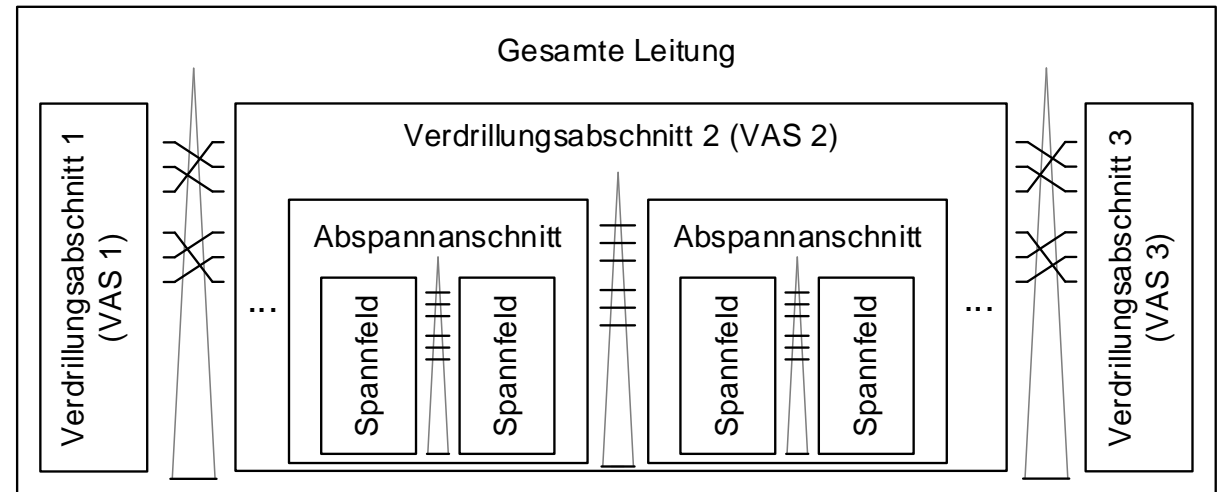
- Netzersatzschaltung
- Starre Netzspannung
- Netzimpedanz
 $\underline{Z}_N = f(S_{k \max}, U_N, \kappa)$
- Sternpunktimpedanz
 $\underline{Z}_{SP} = f(S_{k \min}, U_N, \kappa, \underline{Z}_N)$
- Messort
- Abgriff der Ströme und Spannungen für den Distanzschutz
- Leitung
- Bildet das elektrische Betriebsverhalten ab



Modellierung des Gesamtsystems

Übersicht ➤ Leitung

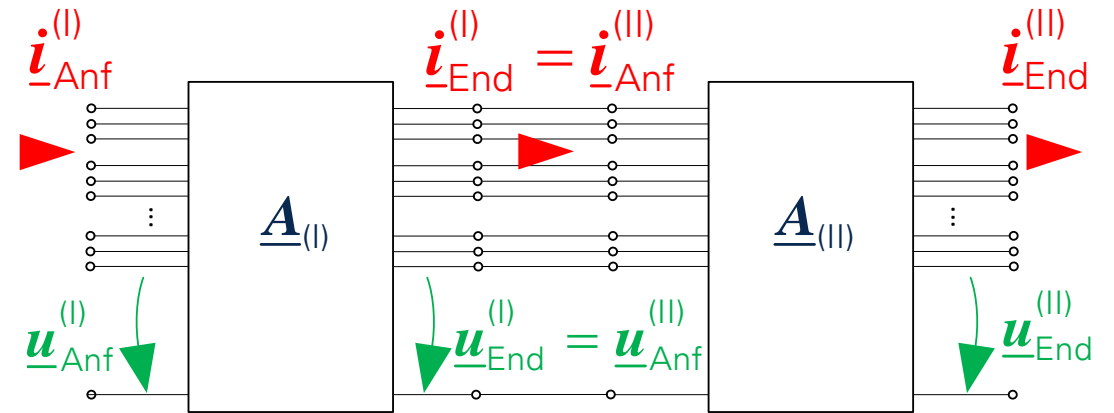
- Bildet das elektrische Betriebsverhalten ab
 - Mastbild-Geometrie
 - Spannungsfeldlänge
 - Durchhang
 - Leiterfolge bzw. Verdrillung
 - Elektrische Seilparameter
- Modellierungsabschnitte
 - Zweckweise Spannungsfelder
- Ersatzgeometrie
 - $\bar{x}_i = \frac{x_{LS \text{ Mast } i} + x_{LS \text{ Mast } i+1}}{2}$
 - $\bar{y}_i = \frac{y_{LS \text{ Mast } i} + y_{LS \text{ Mast } i+1}}{2} - \ell_{\text{Iso}}$
 - $\bar{h}_i = \bar{y}_i - 0,7 \cdot f_{\text{max}}$
- Berechnung der Koppelmatrizen
 - Impedanzen (Längselemente)
 - Admittanzen (Querelemente)



Modellierung des Gesamtsystems

Modellbildung

- Auf Basis von Kettenmatrizen
 - verknüpfen Ströme und Spannungen am Ende des Modellierungsabschnitts mit denen am Anfang
 - Vorteile:
 - Zusammenfassbarkeit durch Multiplikation
 - Modell ist einfach und gleichzeitig genau
 - Eine Matrix kann z.B. die gesamte Leitung abbilden
- Kurzschlussstromberechnung durch Berechnung mit Kettenmatrizen



$$\begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} \\ \underline{i}_{\text{End}}^{(v)} \end{pmatrix} = \underline{A}_v \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}}^{(v)} \\ \underline{i}_{\text{Anf}}^{(v)} \end{pmatrix} = \left(\prod_{k=(I)}^v \underline{A}_k \right) \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}}^{(I)} \\ \underline{i}_{\text{Anf}}^{(I)} \end{pmatrix}$$

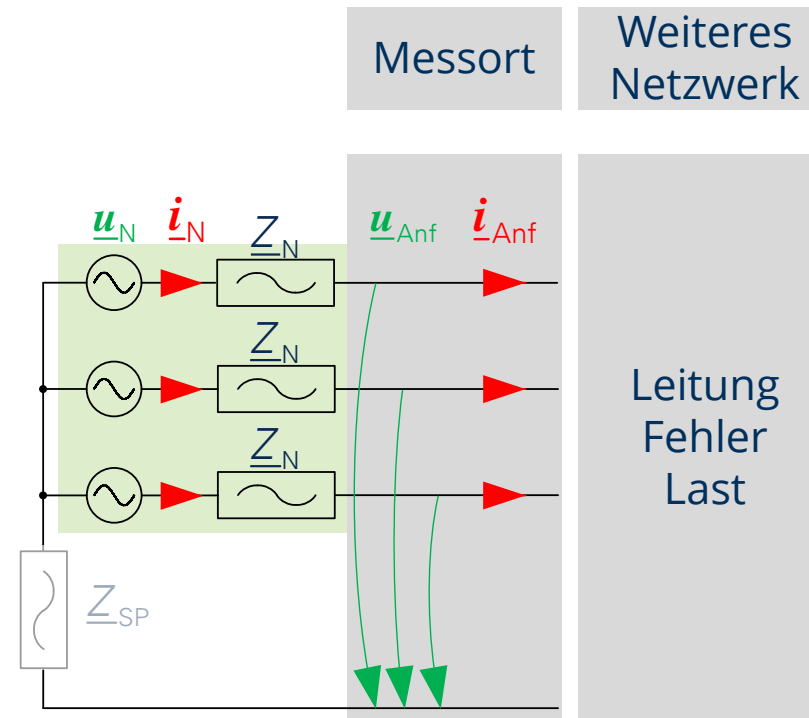
Modellierung des Gesamtsystems

Modellbildung

➤ Netzersatzschaltung

- Vernachlässigung des Sternpunktes
 - Wird bei der Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt
- Kettenmatrix \underline{A}_N durch Strom- und Spannungsbeziehungen:
 - Strom: $\underline{i}_N = \underline{i}_{Anf}$
 - Spannung: $\underline{u}_N = \underline{u}_{Anf} + \underline{Z}_N \cdot \underline{i}_A$

$$\begin{pmatrix} \underline{u}_N \\ \underline{i}_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{E} \cdot \underline{Z}_N \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{Anf} \\ \underline{i}_{Anf} \end{pmatrix} = \underline{A}_N \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{Anf} \\ \underline{i}_{Anf} \end{pmatrix}$$



Modellierung des Gesamtsystems

Modellbildung

➤ Leitung

- **Spannfeldweise** Modellierung mit Ersatzgeometrie
 - **Reduktion** um Einfluss der Erd- und LWL-Seile
 - **Permutation**, zur Berücksichtigung des Einflusses der Leiterfolge

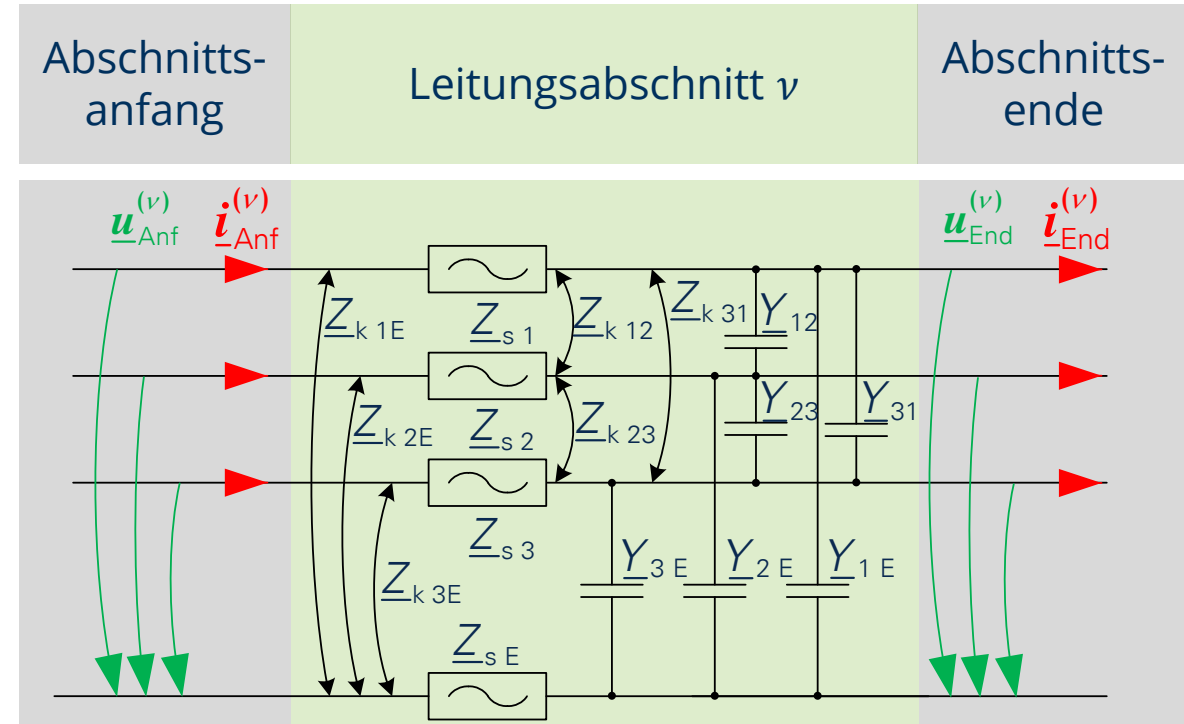
$$\underline{Z}_P^{(v)} = \underline{P}_V^{(v)} \cdot \underline{Z}^{(v)} \cdot \left(\underline{P}_V^{(v)}\right)^{-1} \rightarrow \text{Admittanzen analog}$$

- Bildung der **Kettenmatrix** durch mit konzentrierten Elementen/ verteilten Parametern

- Kettenmatrix $\underline{A}_{Ltg}^{(v)}$ durch Strom- und Spannungsbeziehungen (T- Ersatzschaltbild):

- Strom: $\underline{i}_{Anf}^{(v)} = \underline{Y}_P^{(v)} \cdot \underline{u}_{End}^{(v)} + \underline{i}_{End}^{(v)}$
- Spannung: $\underline{u}_{Anf}^{(v)} = \left(\underline{E} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{Y}_P^{(v)}\right) \underline{u}_{End}^{(v)} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{i}_{End}^{(v)}$

$$\begin{pmatrix} \underline{u}_{Anf}^{(v)} \\ \underline{i}_{Anf}^{(v)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{E} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{Y}_P^{(v)} & \underline{Z}_P^{(v)} \\ \underline{Y}_P^{(v)} & \underline{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{End}^{(v)} \\ \underline{i}_{End}^{(v)} \end{pmatrix} = \underline{A}_{Ltg}^{(v)} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{End}^{(v)} \\ \underline{i}_{End}^{(v)} \end{pmatrix}$$



Berechnung der Messabweichung

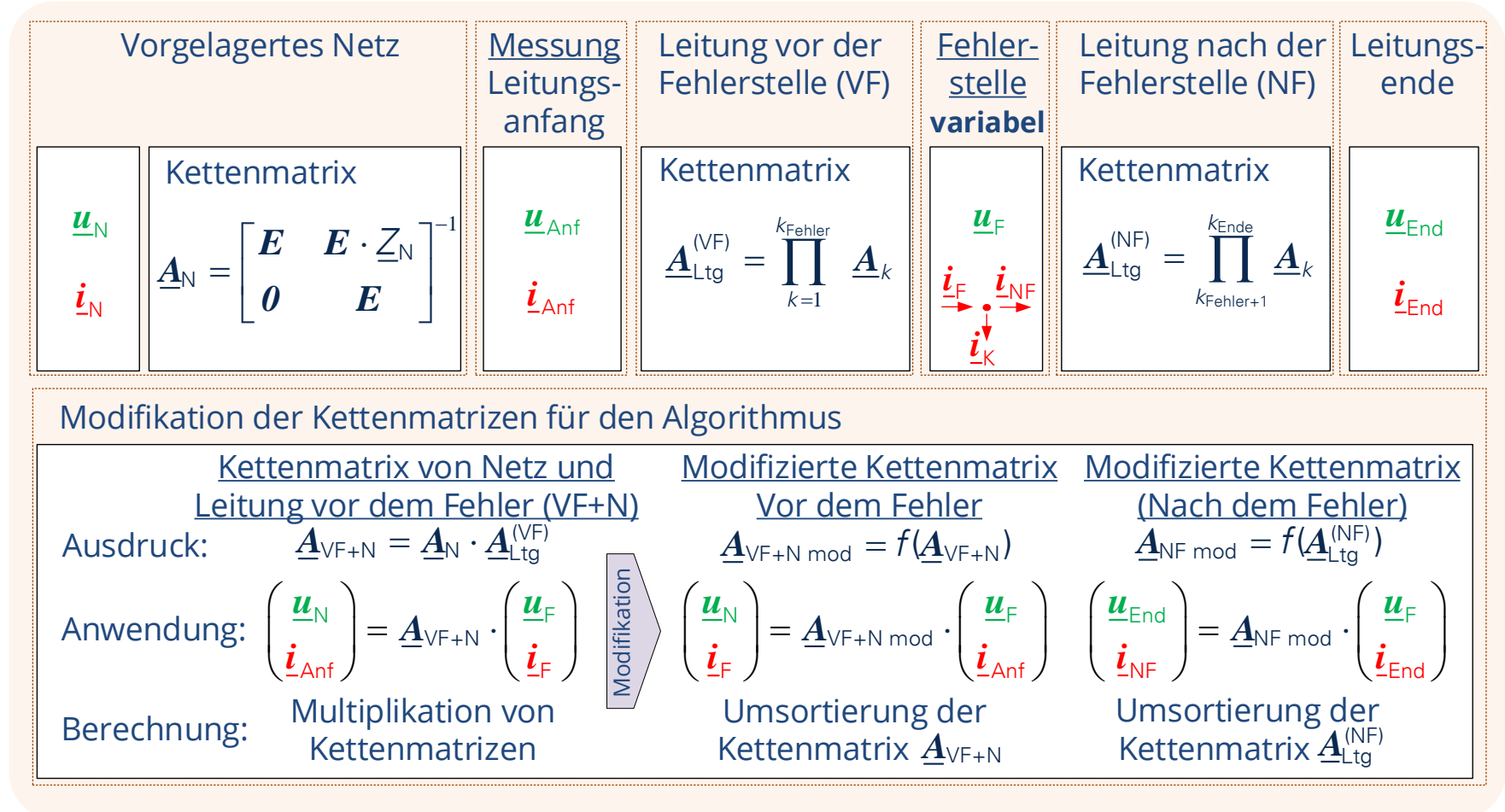
Berechnung der vom Distanzschutz gemessenen Distanz

➤ Schritt 1

- Festlegen der Fehlerstelle (k_{Fehler})

➤ Schritt 2

- Zusammenfassen vom Teilabschnitten
 - Vor Fehler (VF)
 - Nach Fehler (NF)
- Modifikation der Kettenmatrizen



Berechnung der Messabweichung

Berechnung der vom Distanzschutz gemessenen Distanz

➤ Schritt 3: Festlegen der Fehlerart

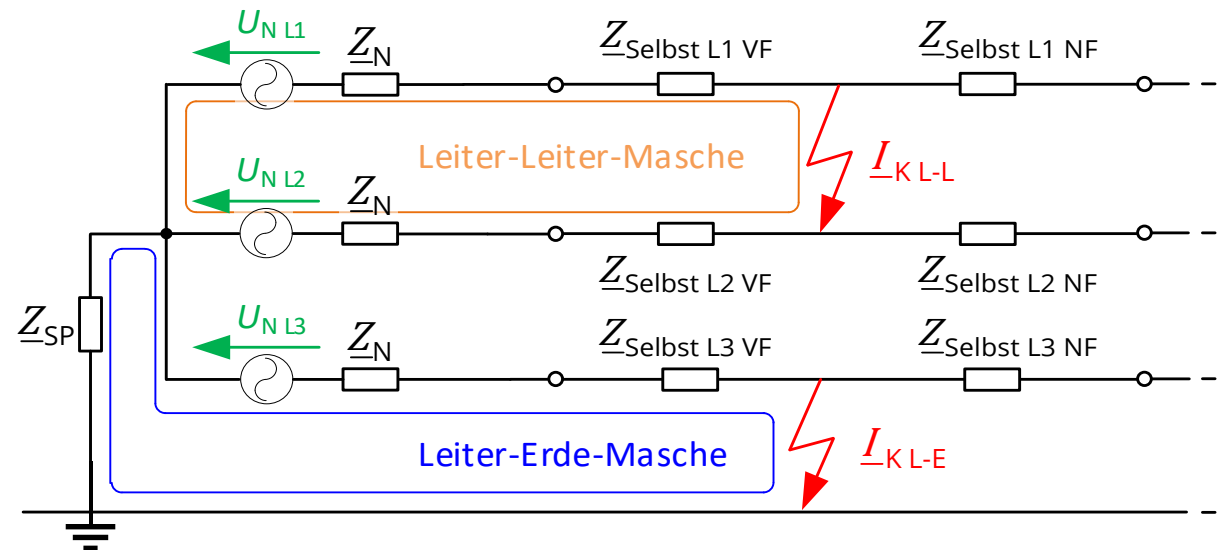
- Definition der Kurzschlussmasche

- Leiter-Erde-Schleife:

$$\underline{Z}_{KS\ Li-E} = \underline{Z}_{Selbst\ Li\ VF} + \underline{Z}_{SP} + \underline{Z}_N$$

- Leiter-Leiter-Schleife:

$$\underline{Z}_{KS\ Li-Lj} = \underline{Z}_{Selbst\ Li\ VF} + \underline{Z}_{Selbst\ Lj\ VF} - 2 \cdot \underline{Z}_{Koppel\ Li-Lj\ VF} + 2 \cdot \underline{Z}_N$$



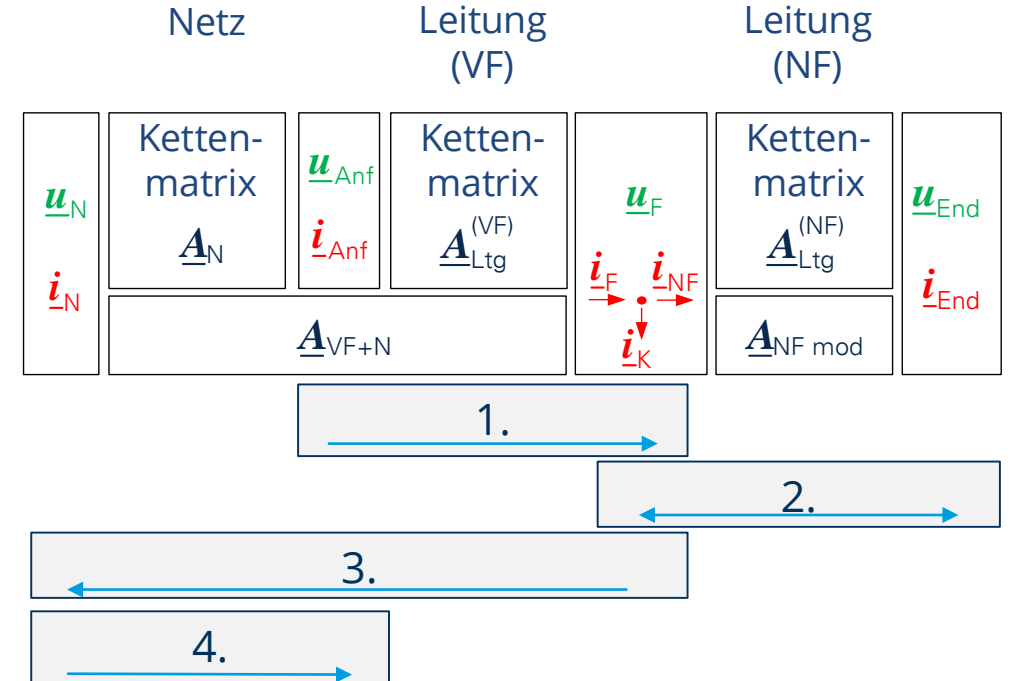
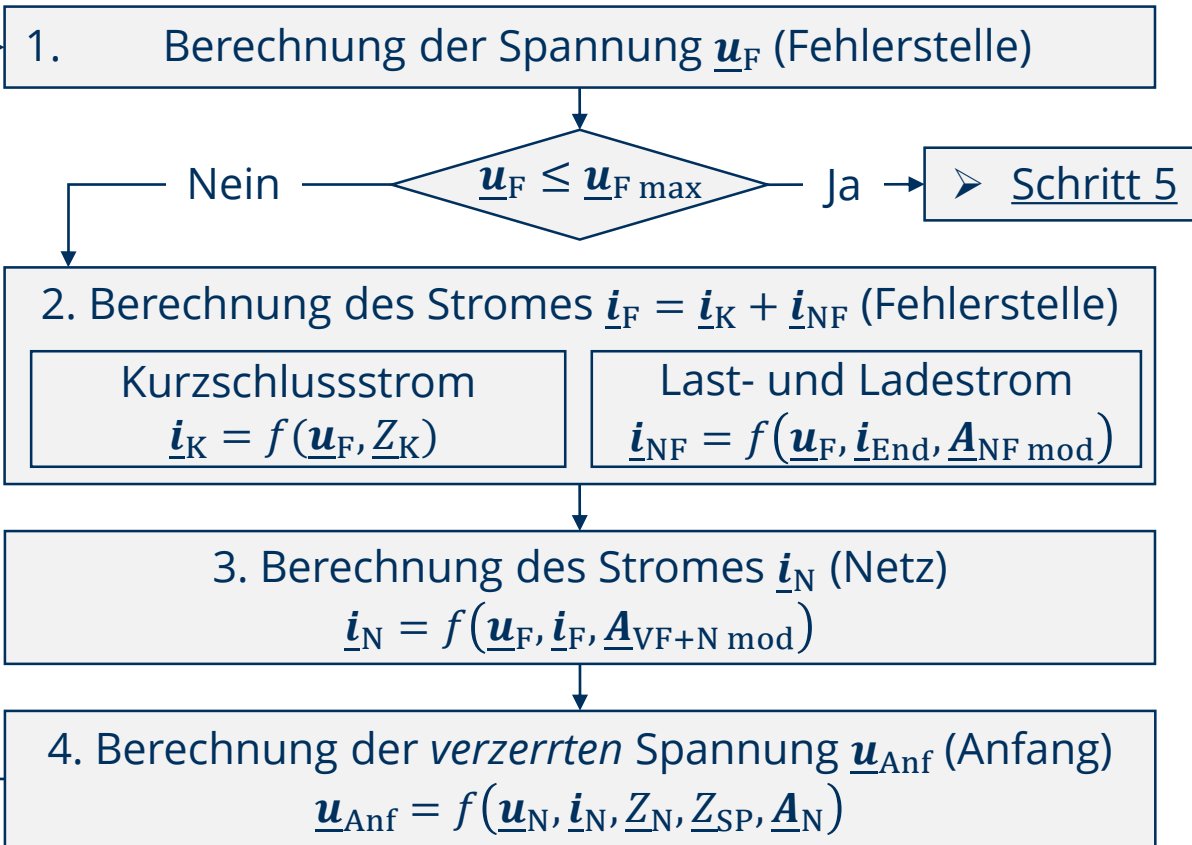
- Vereinfachung: Vernachlässigung der Kopplung benachbarter Leiter

- Wird durch iterative Berechnung im nächsten Schritt berücksichtigt

Berechnung der Messabweichung

Berechnung der vom Distanzschutz gemessenen Distanz

➤ Schritt 4: Iterative Berechnung der Messgrößen



- Ähnlich Überlagerungsverfahren
 - ✓ Natürliches System
 - ✓ Einfluss unsymmetrischer Teilabschnitte
 - ✓ Kapazitive Effekte
 - ✓ Allgemein für alle Mastbilder anwendbar

Berechnung der Messabweichung

Berechnung der vom Distanzschutz gemessenen Distanz

➤ Schritt 5: Berechnung prozentualen Abweichung zum realen Fehlerort

1. Bestimmung der vom Distanzschutz gemessene Mitimpedanz

$$\underline{Z}_{1 \text{ Mess}} = \begin{cases} \frac{\underline{U}_{Li-E}}{\underline{I}_{Li} - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E} & \text{f. Leiter-Erde-Schleifen} \\ \frac{\underline{U}_{Li-E} - \underline{U}_{Lj-E}}{\underline{I}_{Li} - \underline{I}_{Lj}} & \text{f. Leiter-Leiter-Schleifen} \end{cases}$$

2. Distanzberechnung

$$\ell_{\text{Mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{1 \text{ Mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_{1 \text{ Ref}})} \cdot \ell_{\text{Ltg}}$$

3. Berechnung der Messunschärfe

$$\frac{\Delta \ell_{\text{Mess}}}{100 \%} = \frac{\ell_{\text{Mess}} - \ell_{\text{Fehler}}}{\ell_{\text{Fehler}}}$$

➤ Schritt 6: Korrektur der Messunschärfe nach Kurzschlussabschaltung

1. Berechnung eines Unschärfe-Faktors k_{Dist}

$$\ell_{\text{Mess}} = \ell_{\text{Fehler}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta \ell_{\text{Mess}}}{100 \%} \right) = \ell_{\text{Fehler}} \cdot k_{\text{Dist}}$$

2. Korrektur, unter der Annahme, dass die korrigierte Distanz der eigentlich richtigen Distanz zur Fehlerstelle entspricht

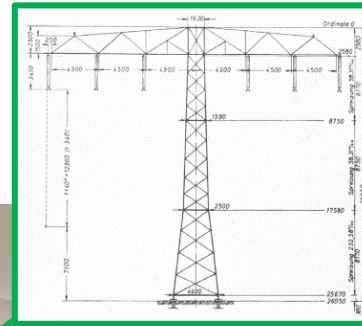
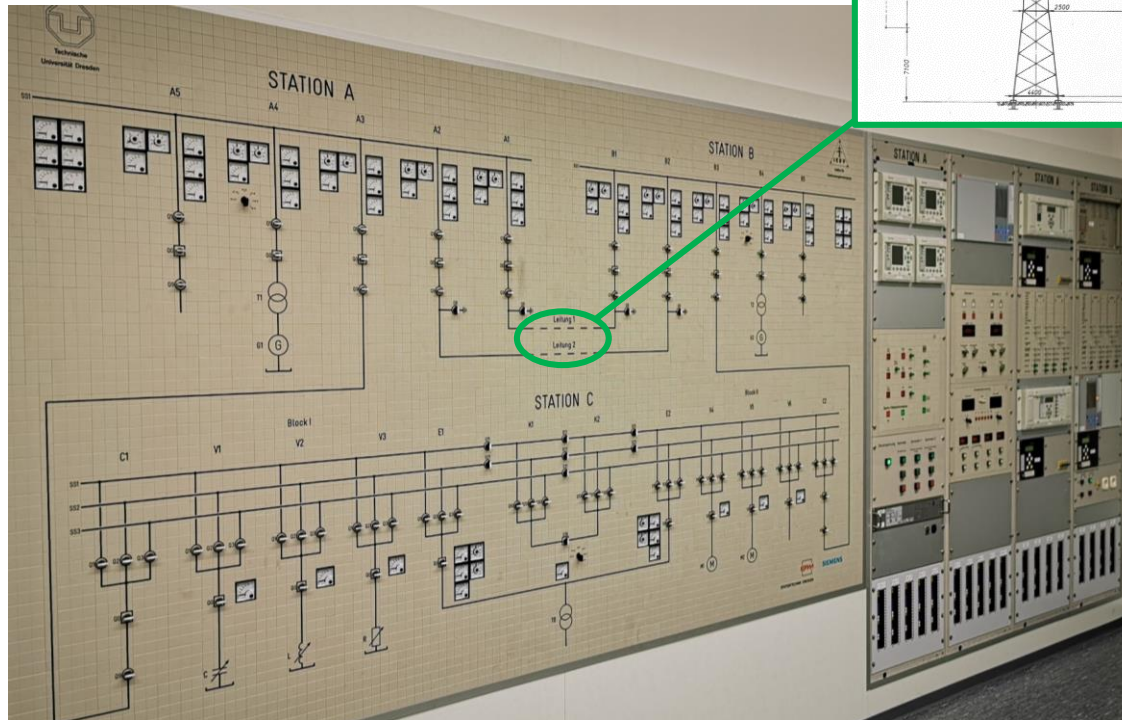
$$\ell_{\text{Fehler}} = \ell_{\text{Mess Korr}} = \frac{\ell_{\text{Mess}}}{k_{\text{Fehler}}}$$

Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Beispiel

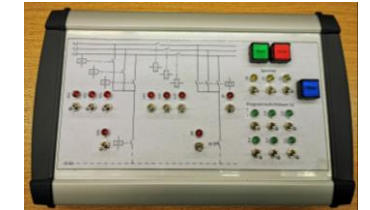
➤ Validierung im Dynamischen Netzmodell des IEEH

➤ Physikalischer 220-kV-Netz-Teilabschnitt

- Spannungsmaßstab: 500 V / 1 V
Modellspannung $U_{\text{Modell}} = 440 \text{ V}$
- Strommaßstab: 20 A / 1 A



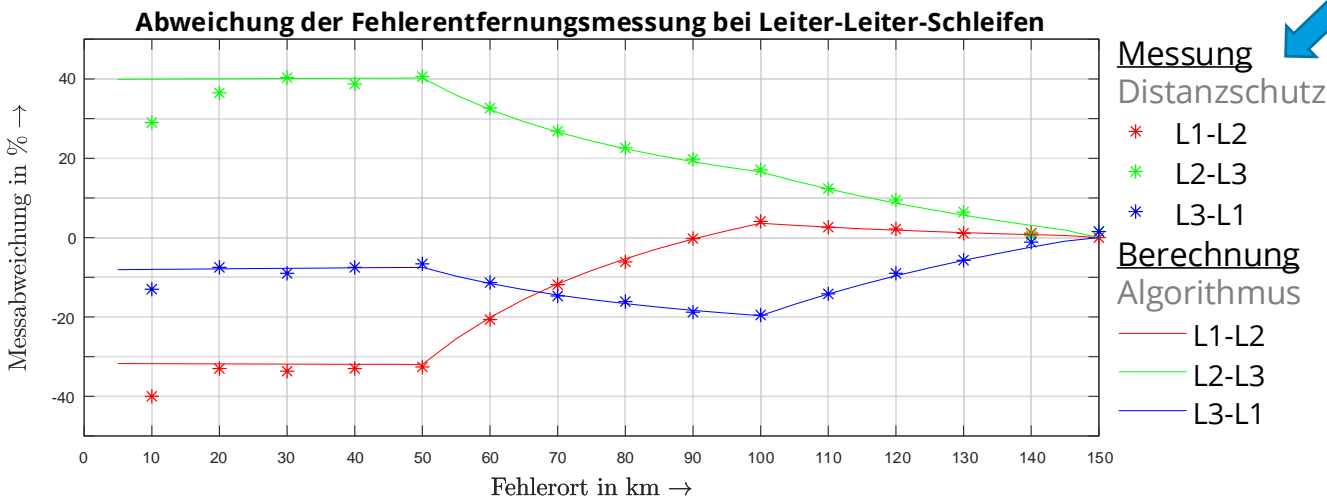
Programmierbarer Fehlerwagen



- Doppelleitung mit Einebenenmastbild
- Nachbildung der Kopplung mit 30 Stk. Π -Elementen
 - Längselemente: Luftspulen
 - Querelemente: Kapazitäten, Widerstände
 - Ein Element entspricht 5 km Leitungslänge
 - bildet 150 km Leitungslänge ab
 - Delta 1 - Verdrillung
- Fehler kann alle 5 km eingelegt werden
- Ankopplung der Sekundärtechnik an Leitung über Wandler
 - Distanzschutz sieht reale Freileitung

Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Beispiel

- Validierung im Dynamischen Netzmodell des IEEH
- Vergleich von Messung und Berechnung:

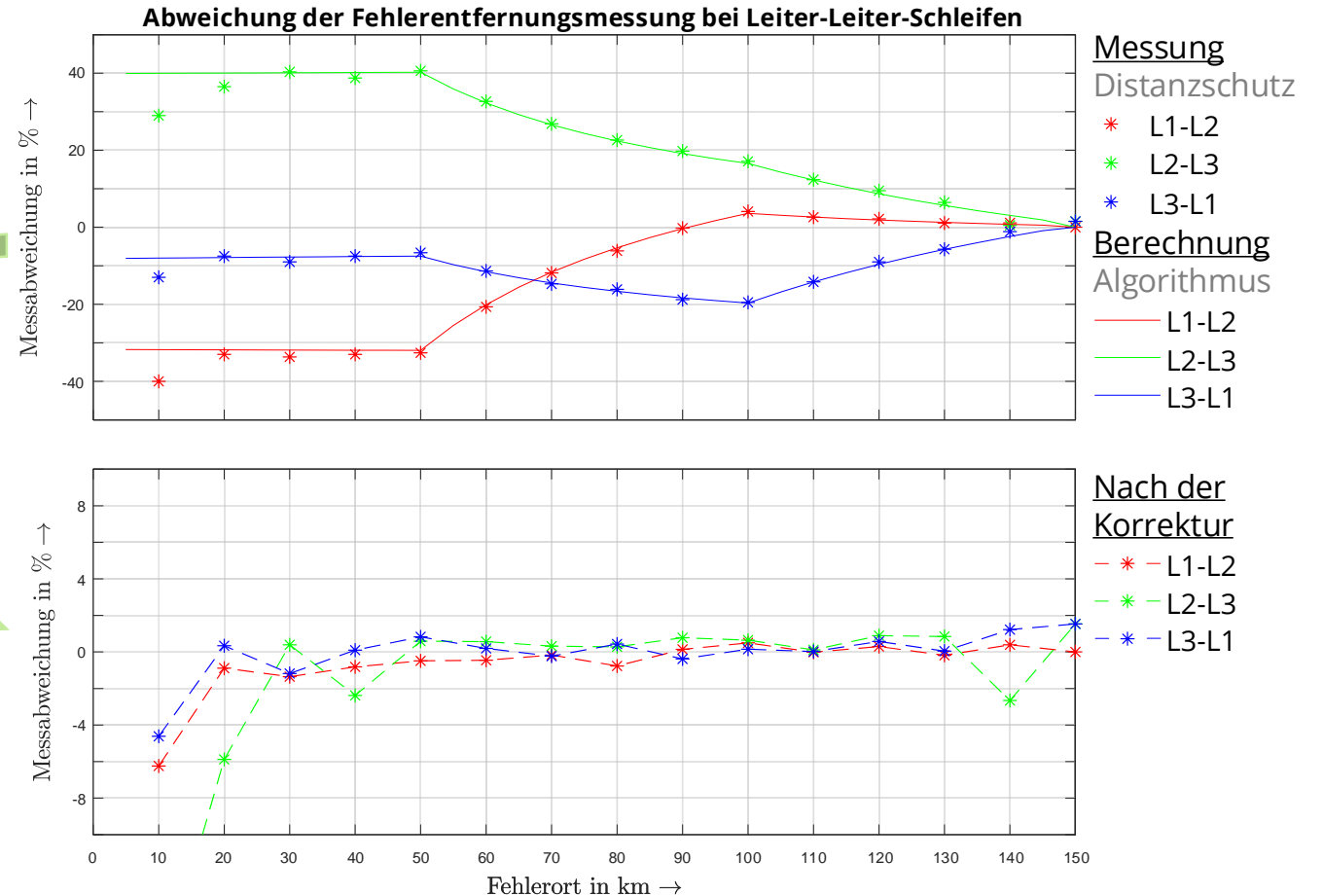


- Abweichung zum realen Fehlerort im Bereich $\pm 40\%$ im ersten Verdrillungsabschnitt
- korrekte Bestimmung der Distanz am Leitungsende (vollst. Verdrillungsumlauf)
- Algorithmus kann Messunschärfe sehr gut prognostizieren
- Messungen von Leiter-Erde-Fehlern und der Doppelleitung bestätigen Ergebnisse

Messung bestätigt Funktionalität des Algorithmus

Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Beispiel

- **Korrektur der Messunschärfe**
- ✓ Deutlich verringerte Messabweichung nach Korrektur der gemessenen Distanz
- ✓ Eingrenzung des Bereichs der Sichtprüfung nach der Kurzschlussabschaltung
- ✓ Algorithmus ist auch für Doppelleitungen geeignet (Kopplung des Nachbarsystems muss bei Iteration berücksichtigt werden)
- ✓ Universell einsetzbar für alle Leiter-Leiter- und Leiter-Erde-Fehler



Zusammenfassung und Ausblick

➤ Zusammenfassung

- Bestimmung der Distanz zum Fehlerort durch die Unsymmetrie der Leitung verfälscht
- Ursache: Parametrierung mit symmetrischen Impedanzen im Distanzschutz
 - Einzelne Teilabschnitte unsymmetrisch
 - Messfehler: können positiv und negativ sein
- Erweiterte Kurzschlussstromberechnung auf Basis von Kettenmatrizen ermöglicht Berechnung der Messabweichung
- ✓ Deutlich verringerte Messabweichung nach Korrektur der gemessenen Distanz
- ✓ Verfahren ist allgemein anwendbar und berücksichtigt die Wirkung von Verdrillung, Leiterfolge sowie kapazitive Effekte
- ✓ Messtechnischer Nachweis der Funktionsweise

➤ Ausblick

- Einfluss von:
 - Mastbildern
 - Leiterfolgen
 - Verdrillungsvarianten
 - ...
- online- Korrektur?
 - Stark vereinfachte Parametrierung im Distanzschutz
 - Mastbild
 - Leiterfolge
 - Verdrillung
 - Prüfung auf Sensitivität durch Vergleich mit realen Leitungsdaten
 - Fehleranfällig

Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Kontakt Daten:

Dipl.-Ing. Carlo Liebermann

Technische Universität Dresden
Institut für Elektrische
Energieversorgung und
Hochspannungstechnik (IEEH)
01062 Dresden

Tel.: +49 (0) 351 463 - 43204

Mobil: +49 (0) 151 53545453

E-Mail: Carlo.Liebermann@tu-dresden.de



Carlo Liebermann

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Technische Universität Dresden
Institut für Elektrische
Energieversorgung und
Hochspannungstechnik (IEEH)
01062 Dresden

Tel.: +49 (0) 351 463 - 34374

E-Mail: Peter.Schegner@tu-dresden.de