

# Kompensation der Messunschärfe durch Leitungssymmetrien bei der Distanzberechnung

Carlo Liebermann, Peter Schegner

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH),  
Technische Universität Dresden, Mommsenstraße 10 01062 Dresden,  
+49 (0) 351 463 43204 [www.tu-dresden.de/etieeh](http://www.tu-dresden.de/etieeh)

**Kurzfassung:** Durch den Einsatz von Distanzschutzeinrichtungen wird die Messung der Distanz zwischen Mess- zum Fehlerort nach einer Kurzschlussabschaltung möglich. Dabei werden symmetrische Impedanzen der zu schützenden Leitung vorausgesetzt. Eine symmetrische Verkopplung bzw. eine symmetrische Leitung kann bei einer vollständigen Verdrillung nur am Leitungsende erreicht werden. In diesem Fall kann die Distanzberechnung auch nur bei einem Fehler am Leitungsende korrekte Ergebnisse liefern. Der Beitrag zeigt, wie die Messunschärfe leiterselektiv für alle Fehlerschleifen in Abhängigkeit des Schaltzustands der Drehstromsysteme berechnet wird. Der entwickelte Algorithmus ist allgemeingültig und für alle Leitungen und Mastbilder einsetzbar. Die Berechnung erfolgt im natürlichen System, es können auch unverdrillte, ungünstig verdrillte oder speziell verdrillte Leitungen berechnet werden. Als Ergebnis wird gezeigt, wie die Erkenntnisse genutzt werden, damit die Messunschärfe ausgeglichen und die Genauigkeit der einseitigen Fehlerortung verbessert werden kann.

**Keywords:** Fehlerortung, Distanzschutz, Unsymmetrie, Verdrillung, Freileitung

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Dreiphasen-Freileitungen wurden erstmals 1891 zur Übertragung elektrischer Energie eingesetzt [1]. Dies macht Freileitungen zu einer der ältesten Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung, welche sich auch im langjährigen Einsatz bewährt haben. Freileitungen sind zur Übertragung elektrischer Energie über lange Distanzen hinweg heutzutage unerlässlich. Damit auch im Fehlerfall die Versorgungszuverlässigkeit aufrechterhalten werden kann, müssen vom Fehler betroffene Leitungen selektiv vom Netz getrennt werden. Hierfür werden bei Freileitungen häufig Distanzschutzeinrichtungen eingesetzt. Diese setzen symmetrische Impedanzen der zu schützenden Leitung voraus. Eine symmetrische Verkopplung bzw. eine symmetrische Leitung wird bei einer vollständigen Verdrillung nur am Leitungsende erreicht, wenn die Verdrillung in Abhängigkeit der Leiterfolge korrekt ausgewählt wurde (vorzugsweise Verdrillung) [2]. Damit wird bei einer ideal verdrillten Leitung die Distanzberechnung auch nur bei einem Fehler am Leitungsende korrekte Ergebnisse liefern. Fehler treten jedoch zufällig an verschiedenen Orten der Leitung auf. In diesem Fall weist der Leitungsabschnitt von der Messstelle bis zum Fehlerort keinen vollständigen Verdrillungsumlauf auf, ist also unsymmetrisch. In der Distanzberechnung werden die mit den gemessenen Spannungen und Ströme berechneten Impedanzen der unsymmetrischen Leitung, mit den eingestellten Leitungsparametern der symmetrischen Leitung verglichen. Es kommt folglich zu einer Unschärfe bei der Distanzberechnung, welche in Abhängigkeit der Fehlerart sowohl positiv als auch negativ ausfällt [3].

## 1.2 Stand der Technik

In [3] wird weiterhin abgeschätzt, wie groß die maximal auftretende Messunschärfe bei unverdrillten Leitungen sein kann. Es wird vorgeschlagen, dass die Messunschärfe schon während der Berechnung korrigiert werden kann, indem eine schleifenspezifische Einstellung vorgenommen wird und die gemessenen Leiterströme zur Korrektur verwendet werden. Dies hätte allerdings den Nachteil, dass für jeden Leiter eine Mitimpedanz im Relais zu parametrieren ist, was den Distanzschutz weitaus komplizierter macht und letztendlich hinsichtlich der Praktikabilität nicht umsetzbar ist. Diese Möglichkeit hat sich deshalb auch in der Praxis nicht etabliert. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Möglichkeit, zur Korrektur der maximalen Unschärfe, allein bei unverdrillten Leitungen anwendbar ist und das Problem bei verdrillten Leitungen nicht lösen kann. Im Ausblick zum Thema schreibt der Autor, dass eine offline-Korrektur denkbar ist. Eine konkrete Möglichkeit wird jedoch nicht aufgezeigt und ist auch in der Literatur nicht final publiziert und geklärt. Mit diesem Beitrag wird eine Möglichkeit zur Korrektur vorgestellt, welche dieses Thema behandelt und diese Wissenslücke schließen soll.

## 1.3 Ziele

Das Verfahren zielt darauf ab, die Messunschärfe leiterselektiv für alle Fehlerschleifen in Abhängigkeit des Schaltzustands der Drehstromsysteme zu berechnen. Die Berechnung erfolgt im natürlichen System, es können auch unverdrillte, ungünstig verdrillte oder speziell verdrillte Leitungen berechnet werden. Zudem soll der Einfluss der kapazitiven Verkopplung bei der Berechnung berücksichtigt werden, um eine genauere Prognose der Messunschärfe zu ermöglichen. Als Ergebnis wird gezeigt, wie eine Offline-Korrektur nach der Kurzschlussabschaltung angewendet werden kann, indem die berechneten Unschärfe-Kurven bei der Korrektur der Distanz, die vom Relais zur Fehlerstelle bestimmt wurde, herangezogen werden. Darüber hinaus soll dieses Verfahren dazu beitragen, den Bereich der Sichtprüfung an der Leitung nach erfolgloser Automatischer Wiedereinschaltung (AWE) gezielt einzugrenzen und damit die Effizienz und Genauigkeit der Inspektionsmaßnahmen zu verbessern.

## 1.4 Struktur der Arbeit

Abschnitt 2 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau des Modells. Es werden die Netzersatzschaltung, die Leitung und die Beschreibung des Gesamtsystems thematisiert. In Abschnitt 3 wird das Vorgehen bei der Berechnung der Messabweichung bis hin zur Korrektur der Messunschärfe bei der Distanzberechnung schrittweise beschrieben. Eine Validierung des Verfahrens durch den Vergleich mit messtechnisch bestimmten Unschärfekurven mit den Ergebnissen der Berechnung zeigt Abschnitt 4. Im letzten Abschnitt 5 werden die Ergebnisse zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben.

## 2 Berechnungsmodell

Ausgangspunkt zur Bestimmung der zu erwartenden Unschärfe-Kurven ist eine Netzersatzschaltung sowie ein Leitungsmodell, welches das Übertragungsverhalten der Leitung in Abhängigkeit geometrischer Parameter (Mastbild-Geometrie, Spannfeldlänge, Durchhang, Leiterfolge bzw. der Verdrillung) sowie elektrischer Parameter, wie beispielsweise die elektrischen Seilparameter, abbilden kann. Für eine an ein vorgelagertes Netz angeschlossene Leitung mit einem Drehstromsystem und Alpha-Verdrillung enthält das Modell folgende Komponenten:

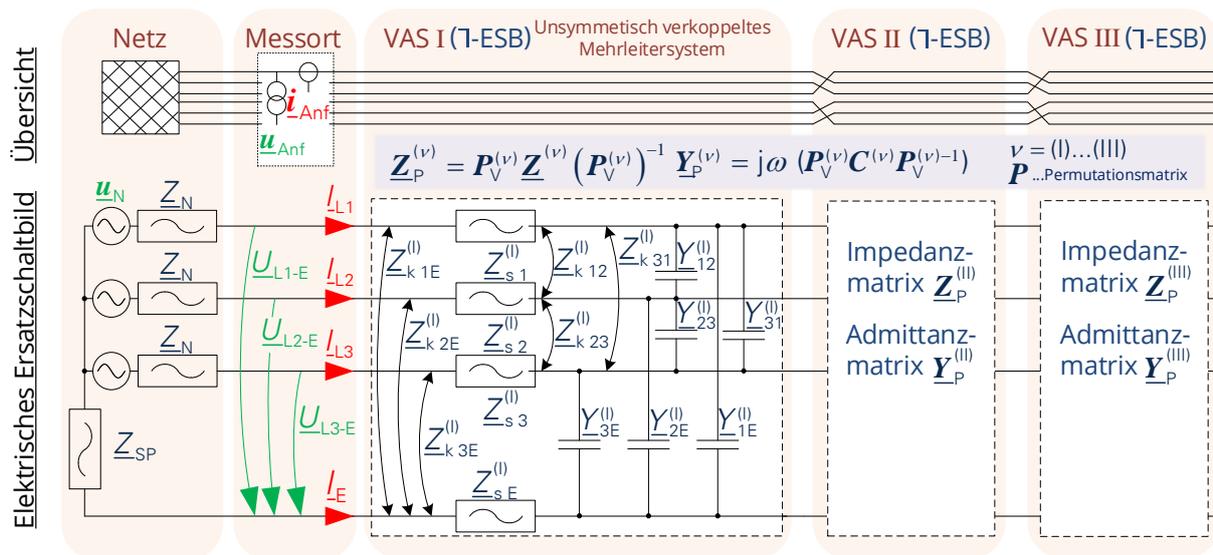


Bild 1: Modellübersicht und elektrische Ersatzschaltung (Ein Drehstromsystem)

### 2.1 Netzersatzschaltung

Das vorgelagerte Netz wird mit einer Ersatzschaltung, bestehend aus einer starren Netzspannung sowie einer symmetrischen Netzimpedanz und einer Sternpunktimpedanz nachgebildet. Die Netzmodellparameter müssen direkt vorgegeben oder berechnet werden. Für die Berechnung ist die Angabe von minimaler und maximaler Kurzschlussleistung  $S_{k \min}$  und  $S_{k \max}$  sowie die Angabe des Stoßfaktors  $\kappa$  notwendig. Der Stoßfaktor steht in Zusammenhang mit der Netzzeitkonstante bzw. dem  $\frac{X_N}{R_N}$ -Verhältnis [4]

$$\frac{X_N}{R_N} = -\frac{3}{\ln\left(\frac{\kappa - 1,02}{0,98}\right)} \quad (2-1)$$

Die Netzimpedanz lässt sich aus der maximalen Kurzschlussleistung berechnen.

$$\underline{Z}_N = \frac{U_N^2}{S_{k \max}} \cdot e^{j \arctan\left(\frac{X_N}{R_N}\right)} \quad (2-2)$$

Für die Berechnung der Sternpunktimpedanz wird die minimale Kurzschlussleistung herangezogen. Dabei muss beachtet werden, dass bei Leiter-Erde-Fehlern die Summe aus Netzimpedanz und Sternpunktimpedanz den Kurzschlussstrom begrenzen.

$$\underline{Z}_{SP} = \frac{U_N^2}{S_{k \min}} \cdot e^{j \arctan\left(\frac{X_N}{R_N}\right)} - \underline{Z}_N \quad (2-3)$$

## 2.2 Leitung

Grundlage zur Beschreibung des Systemverhaltens sind die Koppelmatrizen, welche in Abhängigkeit der Parameter bestimmt werden müssen. Prinzipiell können diese Matrizen abschnittsweise berechnet werden. Eine grobe Einteilung der Abschnitte ist in Bild 2 ersichtlich.

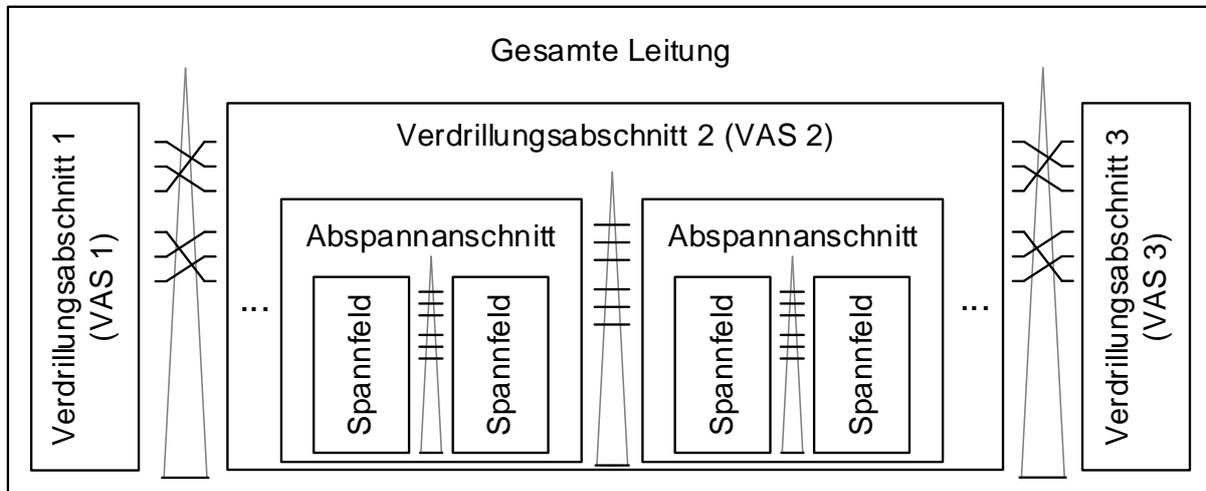


Bild 2: Abschnitte einer Freileitung

Der Detailgrad wird generell erhöht, je feiner die Abschnitte der Leitung gewählt werden. Allgemein kann die Leitung in infinitesimal kleine Abschnitte geteilt werden. In konventionellen Modellierungsansätzen wird die Geometrie der Leiter- und Erdseile auf geradlinige Linienleiter zurückgeführt. Einzelne Spannfelder unterscheiden sich sowohl in der Spannfeldlänge, im Durchhang und auch durch die Geometrie der Maste am Anfang und Ende des Spannfeldes. Es ist deshalb sinnvoll diese Parameter bei der Modellbildung zu berücksichtigen, was eine spannfeldweise Modellierung begründet. Eine feinere Teilung der Leitungsabschnitte verbessert bei technischen Frequenzen in der elektrischen Energieübertragung ( $f_N = 50 \text{ Hz}$ ) die Genauigkeit des Modells nicht. Die resultierende Spannfeldgeometrie kann aus dem Mittel der Abstände, welche durch die Mastkopfbilder des jeweils am Anfang und Ende des betrachteten Spannfeldes stehenden Mastes vorgegeben sind, berechnet werden.

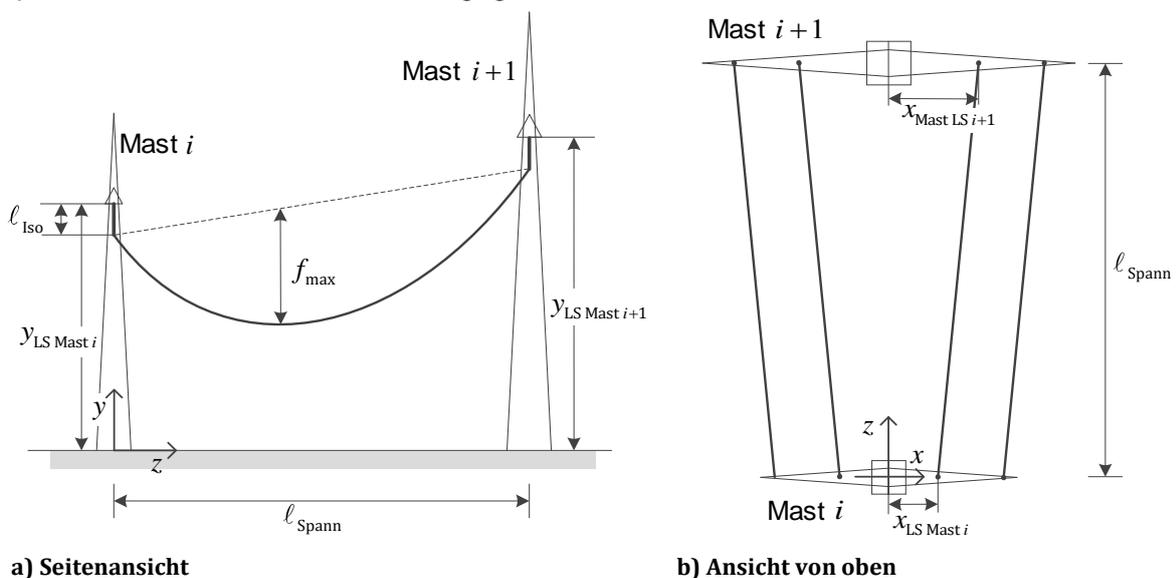


Bild 3: Darstellung eines Spannfeldes

Die Koordinaten der Ersatzgeometrie werden wie folgt berechnet:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{\text{LS Mast } i} + x_{\text{LS Mast } i+1}}{2} \quad (2-4)$$

$$\bar{y}_i = \frac{y_{\text{LS Mast } i} + y_{\text{LS Mast } i+1}}{2} - \ell_{\text{Iso}} \quad (2-5)$$

Der maximale Durchhang  $f_{\text{max}}$  ist aus den Trassierungsdaten bekannt. Damit kann die mittlere Aufhängehöhe  $\bar{h}$  berechnet werden.

$$\bar{h}_i = \bar{y}_i - 0,7 \cdot f_{\text{max}} \quad (2-6)$$

Mit der spannfeldweise erstellten Ersatzgeometrie können die Koppelmatrizen (Impedanzen und Admittanzen) im natürlichen System berechnet werden [4] [5].

### 2.3 Modellierung des Gesamtsystems

Die Modellbildung erfolgt auf Basis von Kettenmatrizen. Diese verknüpfen immer die Zustandsgrößen (ZG) Ströme und Spannungen am Ende des Modellierungsabschnitts mit denen am Anfang. Die Ausgangsgrößen eines Abschnitts entsprechen den Eingangsgrößen des angrenzenden Abschnittes. Auch eine inverse Verknüpfung der ZG ist möglich.

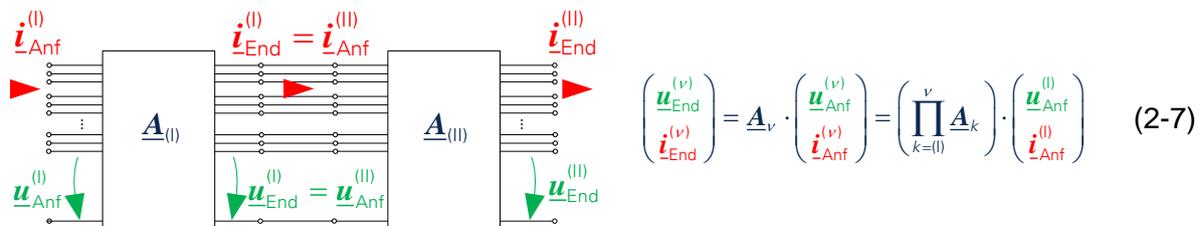


Bild 4: Allgemeine Darstellung von Kettenmatrizen

Die Modellierung bietet den Vorteil, dass einzelne Teilabschnitte, wie detailliert modellierte Spannungsfelder, zu neuen Abschnitten zusammengefasst werden können (Vgl. Gl.(2-7)). Damit sind auch in zusammengefassten Abschnitten die Einflüsse der einzelnen Teilabschnitte enthalten, wodurch das Modell einfach und gleichzeitig genau ist. So kann das gesamte Übertragungsverhalten einer Leitung mit einer Kettenmatrix beschrieben werden. Grundlage für die weitere Berechnung ist die Beschreibung der Netzersatzschaltung sowie der Spannungsfelder.

#### 2.3.1 Netzersatzschaltung

Die Netzersatzschaltung nach Bild 1 verknüpft die starre Netzspannung mit der Spannung an der Messstelle nach der Netzersatzimpedanz. Da die Netznachbildung im Modell nicht verkoppelt ist und auch keine kapazitiven Effekte berücksichtigt, entspricht der Strom an der Messstelle auch dem Strom aus dem Netz. Die Ersatzschaltung bildet demnach den Spannungsfall über der Netzimpedanz ab. Dabei wird vorerst der Einfluss der Sternpunktimpedanz vernachlässigt. Dieder wird dann konkret bei der Berechnung spezieller Fehlerschleifen herangezogen (Vgl. Abschnitt 3.4). Es lassen sich folgende Strom- und Spannungsbeziehungen aufstellen:

Strom:  $\underline{i}_N = \underline{i}_{\text{Anf}}$  (2-8)

Spannung:  $\underline{u}_N = \underline{u}_{\text{Anf}} + \underline{Z}_N \cdot \underline{i}_A$  (2-9)

Daraus wird die Kettenmatrix für das Netz abgeleitet:

$$\begin{pmatrix} \underline{u}_N \\ \underline{i}_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{E} \cdot \underline{Z}_N \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}} \\ \underline{i}_{\text{Anf}} \end{pmatrix} = \underline{A}_N \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}} \\ \underline{i}_{\text{Anf}} \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

### 2.3.2 Leitung

Die um den Erdseileinfluss reduzierten Koppelimpedanz- und Admittanzmatrizen werden verwendet, um das elektrische Betriebsverhalten der Leitung abzubilden. Zur Aufstellung einer Kettenmatrix für einen Abschnitt werden die entsprechende Matrix der Längselemente zur Beschreibung von Induktionseffekten (Impedanzen) sowie die Matrix der Querelemente zur Beschreibung von Influenzeffekten (Admittanzen) benutzt. Dabei muss allgemein der Tausch der Außenleiterposition durch Verdrillung in der Matrix berücksichtigt werden. Bei der Verwendung von Kettenmatrizen ist es sinnvoll die Koppelmatrizen, welche zur Bildung der Kettenmatrix benutzt werden, vorab zu permutieren, damit die Multiplikation nach Gl. (2-7) unabhängig von der Leiterfolge erfolgen kann. Allgemein wird die permutierte Impedanzmatrix  $\underline{Z}_P^{(v)}$  eines Abschnitts  $v$  mit der Permutationsmatrix  $\underline{P}_V^{(v)}$  des jeweiligen Abschnitts berechnet:

$$\underline{Z}_P^{(v)} = \underline{P}_V^{(v)} \cdot \underline{Z}^{(v)} \cdot (\underline{P}_V^{(v)})^{-1} \quad (2-11)$$

Permutationsmatrizen sind dann so zu bestimmen, dass sie die Matrix immer auf die Phasenfolge am Leitungsanfang permutieren, vorzugsweise in der Phasenfolgefolge: L1-L2-L3. Admittanzen werden äquivalent permutiert. Anschließend lassen sich dann die Kettenmatrizen der Teilabschnitte bestimmen. Allgemein kann hierfür die Berechnung mit konzentrierten Elementen, durch Einbeziehung eines  $\Gamma$ -,  $\tau$ -,  $T$ - oder  $\Pi$ - Ersatzschaltbildes, oder mit verteilten Parametern, durch das Aufstellen von Leitungsgleichungen, erfolgen. Für ein  $\tau$ - Ersatzschaltbild (Vgl. Bild 1) lassen sich die folgenden Strom- und Spannungsbeziehungen eines Teilabschnittes  $v$  aufstellen:

$$\text{Strom: } \underline{i}_{\text{Anf}}^{(v)} = \underline{Y}_P^{(v)} \cdot \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} + \underline{i}_{\text{End}}^{(v)} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \text{Spannung: } \underline{u}_{\text{Anf}}^{(v)} &= \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{i}_{\text{Anf}}^{(v)} = \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot (\underline{i}_{\text{End}}^{(v)} + \underline{Y}_P^{(v)} \cdot \underline{u}_{\text{End}}^{(v)}) \\ &= (\underline{E} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{Y}_P^{(v)}) \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{i}_{\text{End}}^{(v)} \end{aligned} \quad (2-13)$$

Daraus wird die Kettenmatrix für den Leitungsteilabschnitt abgeleitet:

$$\begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}}^{(v)} \\ \underline{i}_{\text{Anf}}^{(v)} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{E} + \underline{Z}_P^{(v)} \cdot \underline{Y}_P^{(v)} & \underline{Z}_P^{(v)} \\ \underline{Y}_P^{(v)} & \underline{E} \end{bmatrix}}_{\underline{A}_{\text{Ltg}}^{(v)}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{End}}^{(v)} \\ \underline{i}_{\text{End}}^{(v)} \end{pmatrix} \quad (2-14)$$

Mit den Kettenmatrizen für die Netzersatzschaltung sowie der Leitung kann ein allgemeines Modell zu Bestimmung der Messabweichung generiert werden.

### 3 Allgemeine Berechnung der Messabweichung

Die Messabweichung erfolgt in der Reihenfolge der nachfolgenden Abschnitte bestimmt.

#### 3.1 Festlegen des Fehlerortes

Der Fehlerort ist allgemein variabel. Zweckmäßig sollte dieser bei der Berechnung an einem Mast bzw. am Ende eines Spannungsfeldes liegen. Dies ermöglicht bei einer spannungsfeldweisen Modellierung nach Abschnitt 2.3.2 eine einfache Angabe durch die Anzahl der Spannungsfelder. Hierfür ist es zweckmäßig das Gesamtmodell nach Bild 1 in zwei Teile zu separieren. Der erste Teil repräsentiert alle Abschnitte der Leitung bis zur Fehlerstelle (Vorfehler, VF), der zweite Teil beinhaltet alle Abschnitte nach dem Fehler bis zum Leitungsende (Nachfehler, NF).

$$\text{Leitungsanfang bis Fehlerstelle: } \underline{\mathbf{A}}_{\text{Ltg}}^{(\text{VF})} = \prod_{k=1}^{k_{\text{Fehler}}} \underline{\mathbf{A}}_k \quad (3-1)$$

$$\text{Fehlerstelle bis Leitungsende: } \underline{\mathbf{A}}_{\text{Ltg}}^{(\text{NF})} = \prod_{k_{\text{Fehler}+1}}^{k_{\text{Ende}}} \underline{\mathbf{A}}_k \quad (3-2)$$

Weiter zusammengefasst werden können die Netzersatzschaltung und der Teil der Leitung bis zur Fehlerstelle.

$$\underline{\mathbf{A}}_{\text{VF+N}} = \underline{\mathbf{A}}_{\text{N}} \cdot \underline{\mathbf{A}}_{\text{Ltg}}^{(\text{VF})} \quad (3-3)$$

#### 3.2 Modifikation der Kettenmatrizen

Mit Gl. (3-3) wird der starre Netzspannungsvektor sowie der Strom  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{N}}$ , welcher aus dem Netz in die Leitung fließt mit den ZG an der Fehlerstelle (Spannungsvektor  $\underline{\mathbf{u}}_{\text{F}}$  und Stromvektor  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{F}}$ ) verknüpft. Dabei ist allgemein zu beachten, dass an der Fehlerstelle durch den Kurzschluss ein Knotenpunkt entsteht, an welchem der Kurzschlussstrom als Differenzstrom abfließt. Der Stromvektor  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{F}}$ , welcher an der Fehlerstelle in den Fehlerknoten fließt, setzt sich dann aus dem Kurzschlussstromvektor  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{K}}$  sowie dem Stromvektor  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{NF}}$  nach der Fehlerstelle bis zum Leitungsende zusammen.

$$\underline{\mathbf{i}}_{\text{F}} = \underline{\mathbf{i}}_{\text{K}} + \underline{\mathbf{i}}_{\text{NF}} \quad (3-4)$$

Für die weitere Berechnung ist es sinnvoll die Kettenmatrix  $\underline{\mathbf{A}}_{\text{VF+N}}$  nach Gl. (3-3) so zu modifizieren, damit die starre Netzspannung und der Strom an der Fehlerstelle  $\underline{\mathbf{i}}_{\text{F}}$ , mit der Spannung an der Fehlerstelle sowie dem Strom aus der Netzersatzschaltung verknüpft sind:

$$\begin{pmatrix} \underline{\mathbf{u}}_{\text{N}} \\ \underline{\mathbf{i}}_{\text{F}} \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{\text{VF+N mod}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{u}}_{\text{F}} \\ \underline{\mathbf{i}}_{\text{N}} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{\mathbf{A}}_{\text{VF+N mod}} = f(\underline{\mathbf{A}}_{\text{VF+N}}) \quad (3-5)$$

Weiterhin wird die zusammengefasste Kettenmatrix nach der Fehlerstelle bis zum Leitungsende  $\underline{\mathbf{A}}_{\text{Ltg}}^{(\text{NF})}$  nach Gl. (3-2) in gleicher Weise modifiziert:

$$\begin{pmatrix} \underline{\mathbf{u}}_{\text{End}} \\ \underline{\mathbf{i}}_{\text{NF}} \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{\text{NF mod}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{u}}_{\text{F}} \\ \underline{\mathbf{i}}_{\text{End}} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{\mathbf{A}}_{\text{NF mod}} = f(\underline{\mathbf{A}}_{\text{Ltg}}^{(\text{NF})}) \quad (3-6)$$

### 3.3 Festlegen der Fehlerart

In Abhängigkeit der Fehlerart werden die Impedanzen in der Kurzschlussmasche definiert. Es wird zwischen Leiter-Erde- und Leiter-Leiter-Fehler unterscheiden.

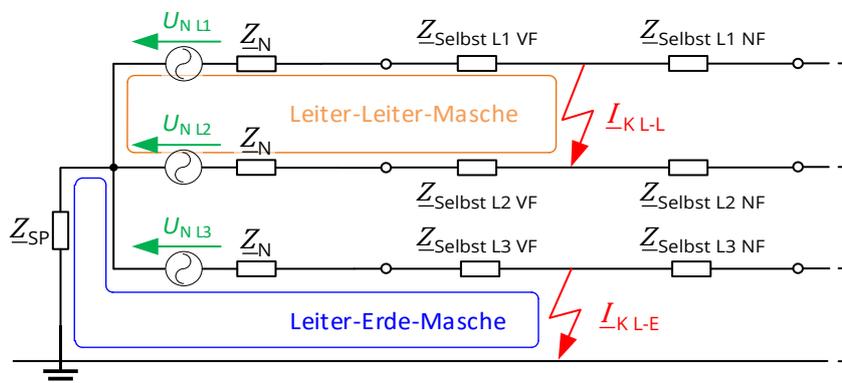


Bild 5: Kurzschlussmaschen bei Leiter-Leiter- und Leiter-Erde-Fehlern (ohne Kopplungen)

Bei Leiter-Erde-Fehlern müssen die Netzimpedanz und Impedanz des Sternpunkts berücksichtigt werden. Da der Kurzschlussstrom im Wesentlichen durch die Impedanz der Kurzschlussmaschen begrenzt wird, kann die Kopplung zwischen benachbarten Leitern vorerst vernachlässigt werden. Im allgemeinen Fall gilt für einen Leiter-Erde-Fehler des Leiters  $i$  folgende Kurzschlussmaschenimpedanz:

$$\underline{Z}_{KS\ Li-E} = \underline{Z}_{Selbst\ Li\ VF} + \underline{Z}_{SP} + \underline{Z}_N \quad (3-7)$$

Für Leiter-Leiter-Fehler liegt die Netzimpedanz im Hin- und Rückzweig der Kurzschlussmasche und ist somit doppelt wirksam. Durch den Kurzschlussstrom wird im Rückzweig eine Spannung induziert, weshalb in der Maschenimpedanz die Kopplung zwischen Hin- und Rückzweig berücksichtigt werden muss. Im allgemeinen Fall gilt für einen Leiter-Leiter-Fehler zwischen Leiter  $i$  und Leiter  $j$  folgende Kurzschlussmaschenimpedanz:

$$\underline{Z}_{KS\ Li-Lj} = \underline{Z}_{Selbst\ Li\ VF} + \underline{Z}_{Selbst\ Lj\ VF} - 2 \cdot \underline{Z}_{Koppel\ Li-Lj\ VF} + 2 \cdot \underline{Z}_N \quad (3-8)$$

### 3.4 Berechnung der Spannungen und Ströme am Leitungsanfang

Wesentlicher Unterschied zur konventionellen Kurzschlussstromberechnung in symmetrischen Komponenten, welche eine symmetrisch verkoppelte Leitung voraussetzt, ist die Berechnung im natürlichen System. Dadurch wird der Einfluss einzelner nicht symmetrisch verkoppelter Teilabschnitte bei der Berechnung berücksichtigt. Zusätzlich ist durch die Berechnung mit Kettenmatrizen auch die kapazitive Verkopplung enthalten. Weiterhin wird die Auslastung im Vorfehlerzustand bestimmt und, unter der Annahme, dass sich die am Leitungsende befindlichen Ersatzspannungsquellen während des Fehlers starr verhalten, als weitere Kurzschlussstromquelle überlagert. Damit lässt sich die Grundidee als Erweiterung des Überlagerungsverfahrens [4], in welchem die Spannung im Vorfehlerzustand an der Fehlerstelle bestimmt und bei der Berechnung des Kurzschlussstromes durch Superposition verwendet werden [4], beschreiben.

Die Berechnung erfolgt iterativ und wird mit folgenden Schritten durchgeführt:

1. Bestimmung des Stromes  $\underline{i}_{NF}$  nach der Fehlerstelle mit Gl. (3-6)
  - Dafür wird die Spannung am Leitungsanfang an der Fehlerstelle angenommen
  - Es kann ein Laststrom (Vorlastzustand) vorgegeben werden
2. Berechnung des Stromes an der Messstelle mit Gl. (3-1)
3. Berechnung der Sternpunktverlagerungsspannung
  - Mit dem Summenstrom aus Schritt 2
  - Mit der Sternpunktimpedanz nach Gl. (2-3)
4. Berechnung einer neuen Spannung am Leitungsanfang unter Berücksichtigung der Sternpunktverlagerungsspannung aus Schritt 3
5. Berechnung der Spannung an der Fehlerstelle nach Gl. (3-3)
6. Prüfen, ob die Spannung aus Schritt 5 kleiner als eine maximale Spannung  $\Delta U_{F \max}$  ist
  - Wenn Ja: Berechnung abgeschlossen, weiter nach Abschnitt 3.5
  - Wenn Nein: Weiter mit Schritt 7
7. Berechnung des Kurzschlussstromes in Abhängigkeit der Impedanz der Fehlermasche nach Gl. (3-7) bzw. (3-8)
8. Berechnung der Stromes  $\underline{i}_{NF}$  entsprechend Schritt 1
9. Berechnung des Stromes  $\underline{i}_F$  nach Gl. (3-4) mit den Ergebnissen aus Schritt 7 und 8.
10. Berechnung des Stromes an der Messstelle nach Schritt 2
11. Weiter mit Schritt 3

Die Iteration ist abgeschlossen, wenn Schritt 6 erfüllt ist.

### 3.5 Berechnung prozentualen Abweichung zum realen Fehlerort

Nach Abschluss der Iteration nach Abschnitt 3.4 stehen die Ströme und Spannungen vor der Netzimpedanz zur Verfügung. Zur Berechnung Mitimpedanz werden die ZG an der Messstelle benötigt. Diese werden mit der inversen Kettenmatrix des Netzes nach Gl. (2-10) bestimmt.

$$\begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Mess}} \\ \underline{i}_{\text{Mess}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{u}_{\text{Anf}} \\ \underline{i}_{\text{Anf}} \end{pmatrix} = \underline{A}_N^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{u}_N \\ \underline{i}_N \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

Mit den ZG an der Messstelle wird die vom Distanzschutz gemessene Mitimpedanz bestimmt.

$$\underline{Z}_{1 \text{ Mess}} = \begin{cases} \frac{\underline{U}_{Li-E}}{\underline{I}_{Li} - k_E \cdot \underline{I}_E} & \text{für Leiter } i - \text{Erde} - \text{Schleifen} \\ \frac{\underline{U}_{Li-E} - \underline{U}_{Lj-E}}{\underline{I}_{Li} - \underline{I}_{Lj}} & \text{für Leiter } i - \text{Leiter } j - \text{Schleifen} \end{cases} \quad (3-10)$$

Dabei wird bei Leiter-Erde-Fehlern der Erstromkompensationsfaktor  $k_E$  aus der Mit- und schaltzustandsabhängigem Nullimpedanz der Leitung verwendet, damit die gemessene Impedanz der Fehlerschleife auf die Mitimpedanz bezogen wird. Für die eigentliche Distanzberechnung wird die Reaktanz der gemessenen Impedanz in das Verhältnis zur Reaktanz der Mitimpedanz der gesamten Leitung gesetzt und mit der Länge der Leitung multipliziert.

$$\ell_{\text{Mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{1 \text{ Mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_{1 \text{ Ref}})} \cdot \ell_{\text{Ltg}} \quad (3-11)$$

Damit lässt sich der prozentuale Messfehler bestimmen (Fehlerort  $\ell_{\text{Fehler}}$  ist bekannt).

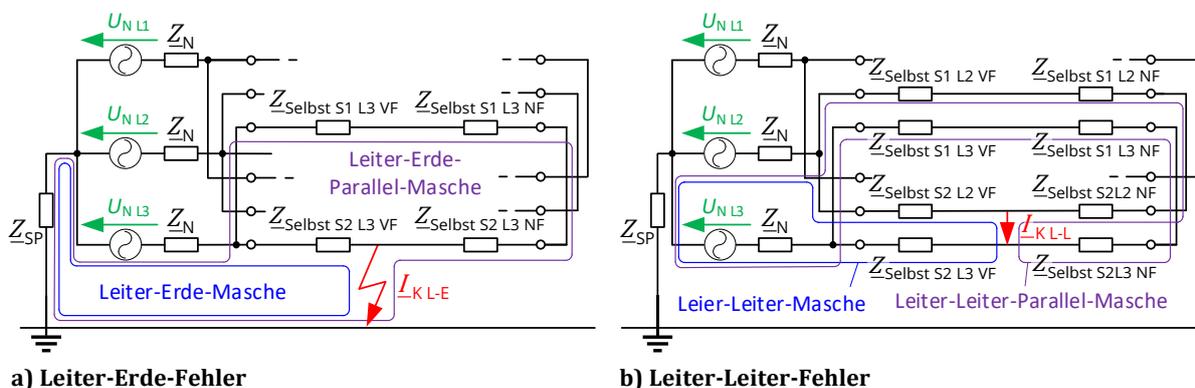
$$\frac{\Delta \ell_{\text{Mess}}}{100 \%} = \frac{\ell_{\text{Mess}} - \ell_{\text{Fehler}}}{\ell_{\text{Fehler}}} \quad (3-12)$$

### 3.6 Erweiterung des Verfahrens auf weitere Schaltzustände

Das beschriebene Vorgehen ist für den Blockbetrieb, wie oben beschrieben, allgemeingültig und kann auch auf den Schaltzustand der „Echten Doppelleitung“ (beide Stromkreise in Betrieb) erweitert werden. Für die Berechnung der ZG wird in diesem Fall eine Kombination der Berechnung nach Abschnitt 3.4 und einer weiteren Berechnung zur Berücksichtigung der Spannungsgleichheit der Leiter beider Drehstromsysteme an der Sammelschiene notwendig. Dabei wird die Berechnung zweistufig durchgeführt.

1. Innere Iteration: Zur Berechnung des Kurzschlussstroms im fehlerbetroffenen Leiter des fehlerbehafteten Drehstromsystems entsprechend Abschnitt 3.4
2. Äußere Iteration: Zur Berechnung des Kurzschlussstroms im parallelen (gesunden) Drehstromsystem durch Einbeziehung der Maschenimpedanz des Parallelsystems.

Durch die äußere Iteration wird ein Kreisstrom berechnet, welcher dem Kurzschlussstrom im Parallelsystem entspricht. Dafür wird in jedem Fall die Maschenimpedanz der parallelen Kurzschlussmasche benötigt, welche sich je nach Fehlerfall unterscheidet. Es wird von folgenden Ersatzschaltbildern ausgegangen:



a) Leiter-Erde-Fehler

b) Leiter-Leiter-Fehler

**Bild 6: Kurzschlussmaschen bei einem parallel in Betrieb befindlichen Stromkreis (ohne Kopplungen)**

Ausgehend von den Ersatzschaltbildern lassen sich die Impedanzen der Fehlermasche des fehlerbetroffenen sowie des parallelen (gesunden) Drehstromsystems berechnen. Die Maschenimpedanzen der Leiter des fehlerbetroffenen Drehstromsystems sind äquivalent zu denen, wenn ein Drehstromsystem in Betrieb ist (vgl. Gl. (3-7) für Leiter-Erde-Fehler bzw. Gl. (3-8) für Leiter-Leiter-Fehler). Für die über das Parallelsystem kurzgeschlossenen Leiter gelten allgemein für die fehlerbetroffene Phase  $L_i$  die Maschenimpedanzen:

$$\underline{Z}_{\text{Par } Li-E} = \underline{Z}_{\text{Selbst par } Li \text{ VF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst par } Li \text{ NF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst } Li \text{ NF}} - 2\underline{Z}_{\text{Koppel } Li-\text{par } Li} + \underline{Z}_{\text{SP}} + \underline{Z}_{\text{N}} \quad (3-13)$$

$$\underline{Z}_{\text{Par } Li-L_j} = \underline{Z}_{\text{Selbst par } Li \text{ VF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst par } Li \text{ NF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst } Li \text{ NF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst par } L_j \text{ VF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst par } L_j \text{ NF}} + \underline{Z}_{\text{Selbst } L_j \text{ NF}} - 2(\underline{Z}_{\text{Koppel par } Li \text{ VF-par } L_j \text{ VF}} + \underline{Z}_{\text{Koppel par } Li \text{ NF-par } L_j \text{ NF}} + \underline{Z}_{\text{Koppel } Li \text{ NF-L}_j \text{ NF}}) \quad (3-14)$$

Die Äußere Iterationsschleife kann mit dem Vorgehen nach Abschnitt 3.4 beschrieben werden. Bedingung für den Abbruch der Iteration ist in diesem Fall, dass die Differenzspannung der Leiter von linkem und rechtem Drehstromsystem am Leitungsende, durch die Verbindung der Sammelschiene, rechnerisch unterhalb einer maximalen Differenzspannung liegt.

### 3.7 Korrektur der Messunschärfe nach Kurzschlussabschaltung

Mit der Kenntnis über die zu erwartende Messunschärfe lässt sich die Distanzbestimmung offline korrigieren. Allgemein lässt sich die vom Distanzschutz gemessene Entfernung zur Fehlerstelle  $\ell_{\text{Mess}}$  von der realen Distanz bis zum Fehlerort  $\ell_{\text{Fehler}}$  und einem Unschärfefaktor  $k_{\text{Fehler}}$  beschreiben.

$$\ell_{\text{Mess}} = \ell_{\text{Fehler}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta \ell_{\text{Mess}}}{100 \%}\right) = \ell_{\text{Fehler}} \cdot k_{\text{Fehler}} \quad (3-15)$$

Der Faktor  $k_{\text{Fehler}}$  wird mit den Ergebnissen der Berechnung nach Abschnitt 3.5 bestimmt. Dabei ist der Faktor allgemein abhängig von der Fehlerschleife und dem Schaltzustand der Drehstromsysteme.

$$k_{\text{Fehler}} = 1 + \frac{\Delta \ell_{\text{Mess}}}{100 \%} \quad (3-16)$$

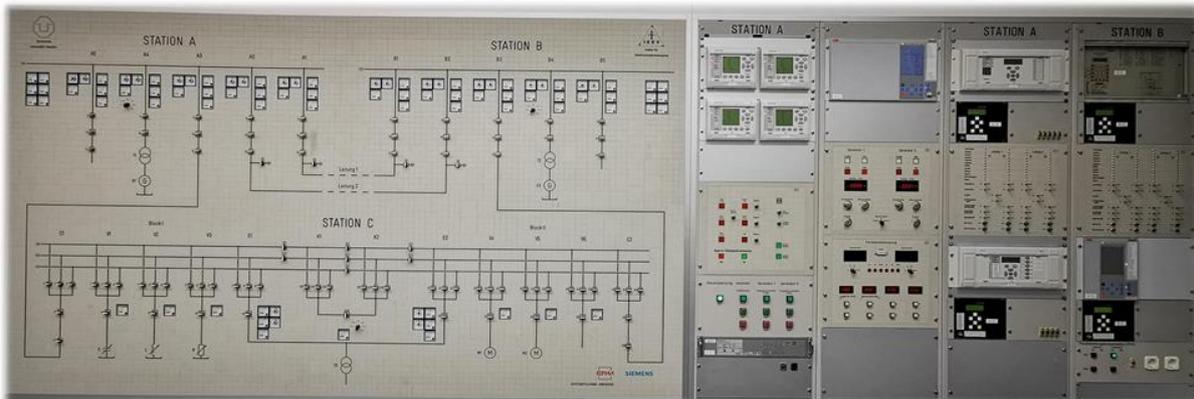
Die korrigierte Distanz  $\ell_{\text{Mess Korr}}$  soll nach der Korrektur der realen Distanz bis zum Fehlerort  $\ell_{\text{Fehler}}$  entsprechen ( $\ell_{\text{Fehler}} = \ell_{\text{Mess Korr}}$ ). Damit lässt sich diese wie folgt bestimmen:

$$\ell_{\text{Mess Korr}} = \frac{\ell_{\text{Mess}}}{k_{\text{Fehler}}} \quad (3-17)$$

## 4 Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Beispiel

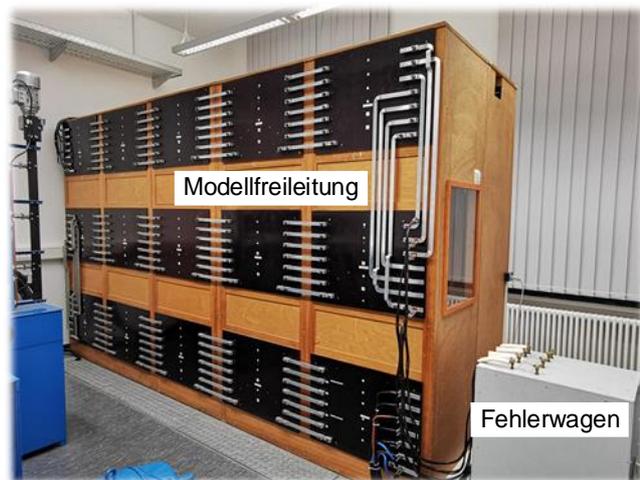
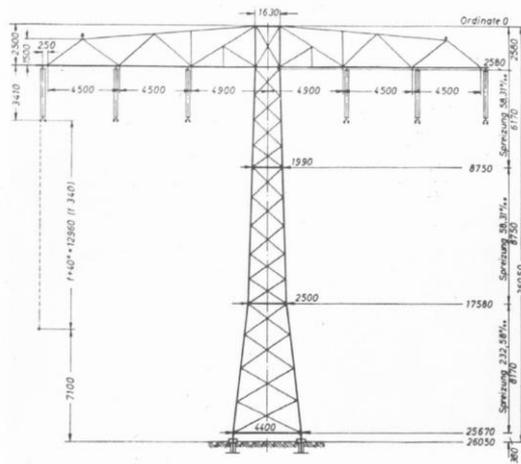
### 4.1 Validierung im Dynamischen Netzmodell der TU Dresden

Das Verfahren wurde an dem dynamischen Netzmodell (DNM) der Professur für elektrische Energieversorgung der TU Dresden überprüft. Das DNM bildet einen 220-kV-Netz-Teilabschnitt mit drei Stationen nach, wobei die Stationen A und B über eine physikalische Leitungsnachbildung verbunden sind.



**Bild 7: Dynamisches Netzmodell: Schalttafel (links), Sekundärtechnik (rechts)**

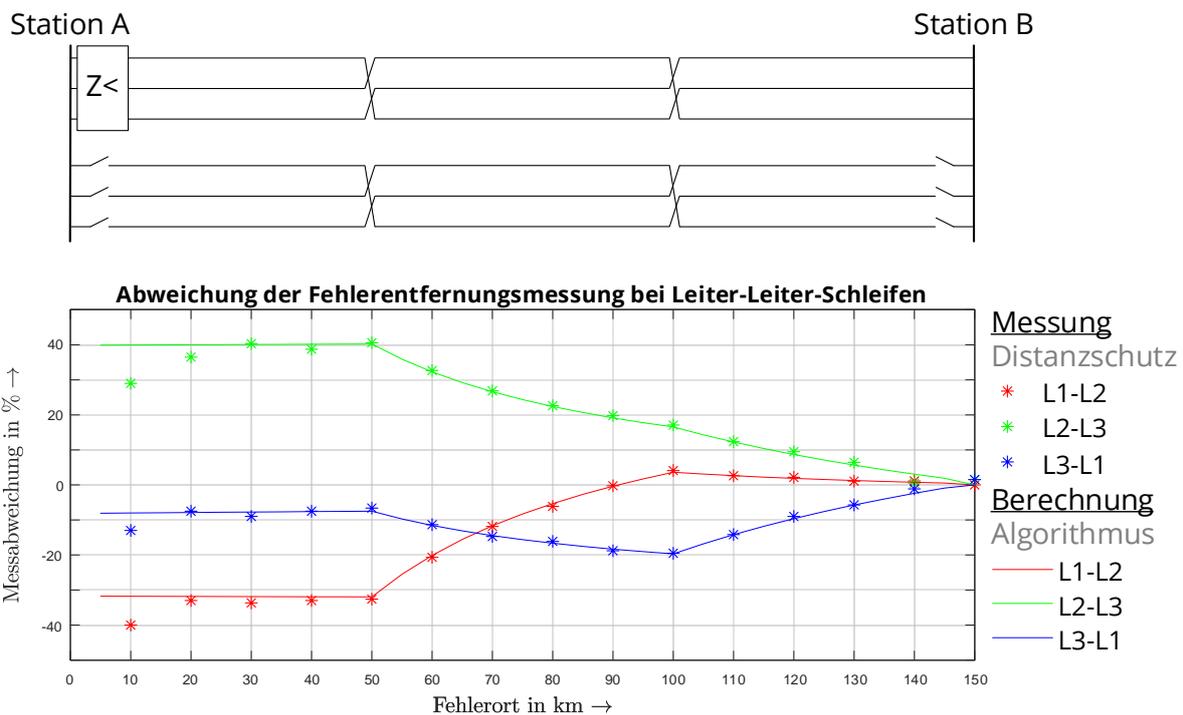
Das Leitungsmodell bildet das Verhalten einer Doppelleitung mit Einebenenmastbild (Vgl. Bild 8) nach. Die Kopplung der Leiterseile wird im natürlichen System mit  $\Pi$ -Elementen nachgebildet, wobei ein  $\Pi$ -Element fünf Kilometer Leitungslänge modelliert. Der programmierbare Fehlerwagen kann nach jedem  $\Pi$ -Element an die Leitung angeschlossen werden. Folglich können Fehler an 30 Fehlerorten der Leitung (alle 5 km) eingelegt werden. Die Leitung selbst wird in den Stationen A und B durch redundante Distanzschutzrelais geschützt.



**Bild 8: Geometrie der Modellfreileitung**

**Bild 9: Physikalische Leitungsnachbildung, Fehlerwagen**

Bei der messtechnischen Validierung werden Fehler äquidistant alle 10 Kilometer eingelegt. Da der Fehlerort bekannt ist, kann die vom Distanzschutz gemessene Entfernung zur Fehlerstelle in mit diesem verglichen werden, wodurch sich die relative Abweichung nach Gl. (2-8) berechnen lässt. Diese kann dann mit den prognostizierten Abweichungen des in Abschnitt 3 beschriebenen Algorithmus verglichen werden. Bild 11 zeigt den Vergleich der prozentualen Abweichung zum realen Fehlerort für Leiter-Leiter-Schleifen bei Betrieb eines Drehstromsystems.

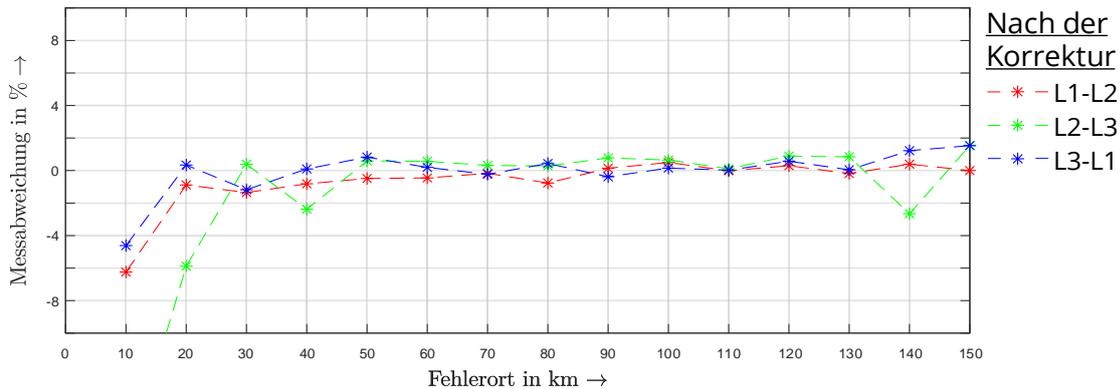


**Bild 10: Messung und Berechnung der prozentualen Abweichung bei der Distanzmessung**

Die Messung zeigt eine fehlerschleifenabhängige Abweichung zum realen Fehlerort im Bereich  $\pm 40\%$  im ersten Verdrillungsabschnitt. Der Einfluss der Verdrillung ist deutlich erkennbar, eine korrekte Bestimmung der Distanz ist dabei nach einem vollständigen Verdrillungsumlauf allein am Leitungsende möglich. Der entwickelte Algorithmus kann diese Messunschärfe sehr gut prognostizieren. Der Vergleich der Messunschärfe bei Leiter-Erde-Fehlern sowie bei Parallelschaltung des Nachbarsystems bestätigt ebenfalls die Funktionalität des Algorithmus.

## 4.2 Korrektur der Messunschärfe

Mit den in Abschnitt 3.7 beschriebenen Korrektur wird die Messunschärfe korrigiert.



**Bild 11: Verbleibender Fehler nach der Korrektur der Messunschärfe**

Der direkte Vergleich mit Bild 10 zeigt, dass durch die Korrektur die verbleibende Unschärfe deutlich reduziert wird. Die Messunschärfe von maximal  $\pm 40\%$  im ersten Verdrillungsabschnitt wird durch die Korrektur auf wenige Prozent verringert. Damit wird die Güte der Distanzbestimmung signifikant verbessert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Bestimmung der Distanz zum Fehlerort durch die Unsymmetrie der Leitung verfälscht ist. Die Ursache für die Messunschärfe liegt in der Art der Distanzberechnung. Hierfür setzt der Distanzschutz eine symmetrische Impedanz der Leitung voraus. Obwohl die Verdrillung zu einer symmetrischen Leitung am Leitungsende führt, bleiben einzelne Abschnitte der Leitung weiterhin unsymmetrisch. Dadurch kann die Distanz allein am Leitungsende genau bestimmt werden.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Unschärfe leiterselektiv unter Berücksichtigung der Messschleife berechnen kann. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden genutzt, um die Distanzbestimmung der realen Messung zu korrigieren. Das entwickelte Verfahren ist allgemein anwendbar und berücksichtigt die Wirkung der Verdrillung, Leiterfolge und kapazitive Effekte. Messungen am dynamischen Netzmodell (DNM) der Professur für elektrische Energieversorgung der TU Dresden, welches eine 220-kV-Leitung mit Einebenenmastbild abbildet, haben die Funktionsweise des Verfahrens validiert. Zukünftige Untersuchungen sollten Erkenntnisse über den Einfluss des Mastbildes liefern. Auch eine online-Korrektur ist denkbar, dafür sollte zunächst geprüft werden, wie sensitiv die Berechnung durch stark vereinfachte Geometrieangaben reagiert, da eine komplette Abbildung der Leitungsgeometrie im Distanzschutz praktisch nicht umsetzbar ist.

## 6 Literatur

- [1] H. A. Wessel, Geschichte der Elektrotechnik, Bd. 11, Berlin: VDE Verlag, 1991.
- [2] C. Liebermann, „Auswirkungen ungünstig verdrillter Leitungen - Optimierung der Verdrillung während der Planung,“ *23. Dresdner Kreis Elektroenergieversorgung Begleitband zum Workshop 2022 in Magdeburg*, pp. 1 - 6, Juni 2023.
- [3] G. Ziegler, Digitaler Distanzschutz Grundlagen und Anwendungen, Nürnberg: Publicis Corporate Publishing Erlangen, 2008.
- [4] D. Oeding und B. R. Oswald, Elektrische Kraftwerke und Netze, Springer-Verlag Berlin, 2011.
- [5] F. Pollaczek, „Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung,“ *Elektroische Nachrichtentechnik*, pp. 339-359, 1926.