

NEUE BERECHNUNGSMETHODE FÜR DEN DISTANZSCHUTZ ZUR ANWENDUNG BEI ZWISCHENSYSTEMFEHLERN AUF DOPPELLEITUNGEN

Jakob Francesco Leide(*)¹², Carlo Liebermann¹³, Jörg Meyer⁴, Peter Schegner¹³

¹Technische Universität Dresden, Professur für Elektroenergieversorgung,
MommSENstraße 12, 01069 Dresden, [Webauftritt](#)

²+49 6151 16-24666, jakob.leide@tu-darmstadt.de

³+49 351 463-33202, carlo.liebermann@tu-dresden.de, peter.schegner@tu-dresden.de

⁴Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden,
+49 351 4622642, joerg.meyer@htw-dresden.de, [Webauftritt](#)

Kurzfassung: Kurzfassungstext

Keywords: Zwischensystemfehler, Distanzschutz, Doppelleitung, Fehlerschleifenimpedanz, Mitsystemkopplung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die wachsende Einspeisung regenerativer Erzeugerleistung stößt das heutige Energieversorgungsnetz zunehmend an seine Belastungsgrenze. Daraus resultiert die Notwendigkeit das Hoch- und Höchstspannungsnetz an die künftig zu erwartende Leistungsauslegung anzupassen. Da lange Planungs- und Genehmigungsverfahren die Errichtung neuer Freileitungstrassen verzögern, wird für das schnellere Umsetzen auf bestehende Trassen zurückgegriffen. Dabei werden mehrere Stromkreise auf gemeinsamen Mastgestängen geführt. Infolgedessen steigt die Wahrscheinlichkeit von Zwischensystemfehlern, welche durch Leiterberührungen oder Leiterseilrisse hervorgerufen werden können. Beim einsystemigen Distanzschutz wird diese Fehlerart nicht ausgewertet, weshalb eine detaillierte Analyse zum Schutzverhalten und zur selektiven Fehlerklärung notwendig wird.

1.2 Stand der Technik

Das Verhalten des einsystemigen Distanzschutzes für die Bestimmung der Fehlerdistanz bei Fehlern auf Einfachleitungen ist aus [1] bekannt. Der Autor geht dabei auch auf Fehler innerhalb eines Stromkreises auf Doppelleitungen ein. Über den Umgang mit Zwischensystemfehlern auf Doppelleitungen sind in der Literatur jedoch kaum Aussagen zu finden. Lediglich in [2] wird eine Berechnungsmethode für Zwischensystemfehler auf Doppelleitungen vorgestellt, welche die Nullsystemkopplung der beiden Stromkreise der Doppelleitung berücksichtigt. Auf Grund der Annahmen ist die Anwendbarkeit aber auf Doppelleitungen mit identischen Stromkreisen beschränkt. Die in diesem Beitrag vorgestellte Berechnungsmethode verbessert die Genauigkeit der Distanzberechnung und ist allgemein für Doppelleitungen anwendbar.

1.3 Ziele

Die korrekte Berechnung der Fehlerschleifenreaktanz ist die Grundvoraussetzung für die korrekte Berechnung der Distanz zum Fehlerort und den damit verbundenen Zonenentscheid, welcher ausschlaggebend für die Abschaltung der Leitung ist. Bei zu groß berechneten Reaktanzen (Überschätzung der Fehlerdistanz) kommt es zu einer Unterreichweite des Distanzschutzes, was eine verzögerte Fehlerklärung zur Folge hat und folglich die Selektivität des Distanzschutzes reduziert. Die Güte der Reaktanzberechnung ist damit ein geeignetes Maß zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und Selektivität des Zonenentscheids. Ziel dieses Beitrags ist die Verbesserung der Distanzberechnung durch den Distanzschutz bei Zwischensystemfehlern auf einer Doppelleitung.

2 Systematisierung von Zwischensystemfehlern

Aufbauend auf [3] wird in diesem Beitrag eine allgemeine Systematisierung von Zwischensystemfehlern vorgestellt, die drei Kategorien umfasst.

Kategorie 1 umfasst alle Fehler, an denen ausschließlich Leiter aus Stromkreisen eines Drehstromsystems mit der Bemessungsfrequenz von 50 Hz beteiligt sind.

Kategorie 1-1 lässt eine galvanische Verbindung der am Fehler beteiligten Stromkreise im Normalbetrieb zu, während **Kategorie 1-2** die galvanische Trennung der am Fehler beteiligten Stromkreise im Normalbetrieb fordert.

Kategorie 2 umfasst alle Fehler, an denen sowohl Leiter aus Stromkreisen eines Drehstromsystems mit der Bemessungsfrequenz von 50 Hz beteiligt sind, als auch Leiter aus Stromkreisen, die nicht Teil eines Drehstromsystems sind oder eine andere Bemessungsfrequenz haben.

Kategorie 3 umfasst alle Fehler, an denen ausschließlich Leiter aus Stromkreisen beteiligt sind, die keinem Drehstromsystem zuzuordnen sind oder mit einer Frequenz von $\neq 50$ Hz betrieben werden.

Im Folgenden werden Zwischensystemfehler auf einer Doppelleitung, also nach Kategorie 1-1 betrachtet. Die beiden Stromkreise auf der Doppelleitung werden als Stromkreis I mit den Leitern a, b und c bzw. allgemein j und k mit $j \neq k$ sowie mit Stromkreis II mit den Leitern A, B und C bzw. allgemein J und K mit $J \neq K$ bezeichnet.

Es wird davon ausgegangen, dass die am Zwischensystemfehler beteiligten Leiter unterschiedlichen Phasen zugeordnet werden. Allgemein entspricht dies einem Fehler zwischen dem Leiter j aus Stromkreis I und Leiter K aus Stromkreis II ($j - K$ - Fehler, vgl. Bild 1).

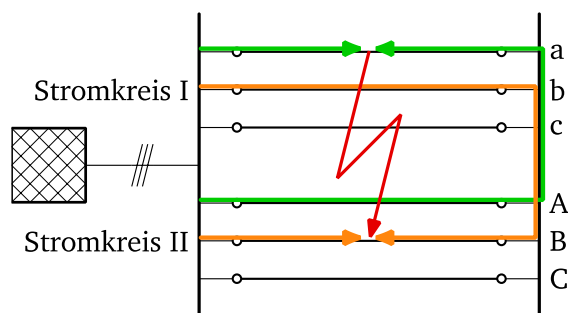


Bild 1: Fehlerstrompfade für den Zwischensystemfehler a-B.

3 Distanzschutz

Der Distanzschutz ist wichtiger Bestandteil des Netzschutzes in Übertragungs- und Verteilnetzen. Er wird primär als Hauptschutz für Freileitungen und Kabel eingesetzt und übernimmt häufig die Funktion des ortsfernen Reserveschutzes. [1]

3.1 Einsystemiger Distanzschutz

Bei einem Fehler auf einer Leitung erfolgt anhand der Kriterien Stromanstieg, Spannungseinbruch und Impedanzveränderung ein leiterselektiver Anregeentscheid des Distanzschutzes. Bei einer Erdberührung kommt es zur Erdanregung. Aus den am Einbauort gemessenen Strom- und Spannungswerten der fehlerbehafteten Leiter erfolgt die Berechnung der gemessenen Fehlerschleifenimpedanz $\underline{Z}_{\text{mess}}$ für Leiter j -Leiter k -Schleife(n) \underline{Z}_{jk} (bei Anregung mehrerer Leiter) nach (1) und für Leiter j -Erde-Schleife(n) \underline{Z}_{jE} (bei Erdanregung) nach (2). Dabei wird der Erdstrom-Kompensationsfaktor \underline{k}_E in (3) und der Erdstrom \underline{I}_E in (4) genutzt. [1]

$$\text{Leiter-Leiter-Fehler: } \underline{Z}_{\text{mess}} = \underline{Z}_{jk} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_k}{\underline{I}_j - \underline{I}_k} \quad (1)$$

$$\text{Leiter-Erde-Fehler: } \underline{Z}_{\text{mess}} = \underline{Z}_{jE} = \frac{\underline{U}_j}{\underline{I}_j - \underline{k}_E \underline{I}_E} \quad (2)$$

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}'_0 - \underline{Z}'_1}{3 \cdot \underline{Z}'_1} \quad (3)$$

$$\underline{I}_E = -(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) \quad (4)$$

Für einen impedanzlosen Fehler am Leitungsende entspricht die gemessene Schleifenimpedanz $\underline{Z}_{\text{mess}}$ der Mitsystemimpedanz \underline{Z}_1 der Leitung. Aus dem Verhältnis der gemessenen Impedanz zur Mitsystemimpedanz lässt sich die gemessene Distanz zum Fehlerort ℓ_{mess} bestimmen. Um Verfälschungen durch überwiegend resistive Fehlerwiderstände (bspw. Lichtbögen) zu vermeiden, wird im Distanzschutz anstatt des Impedanzverhältnisses das Reaktanzverhältnis nach (5) mit der Länge der Leitung ℓ_L verwendet. [1]

$$\ell_{\text{mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\text{mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_1)} \cdot \ell_L \quad (5)$$

3.2 Einfluss paralleler Leitungen

Die induktive Kopplung paralleler Stromkreise, beispielsweise bei Doppelleitungen, führt zu einer Spannungsinduktion in der Fehlerschleife und infolgedessen zu einer Abweichung der gemessenen Schleifenimpedanz. Für Leiter-Erde-Fehler wird dies mit der Parallelleitungs-kompensation berücksichtigt. Die Schleifenimpedanz wird dann mit (6) unter Nutzung des Parallelleitungs-Kompensationsfaktors \underline{k}_{EM} in (7) berechnet. [1]

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \underline{Z}_{jE} = \frac{\underline{U}_j}{\underline{I}_j - \underline{k}_E \underline{I}_E - \underline{k}_{EM} \underline{I}_E} \quad (6)$$

$$\underline{k}_{EM} = \frac{\underline{Z}'_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}'_1} \quad (7)$$

3.3 Staffelung

Ist die gemessene Fehlerdistanz größer als die Leitungslänge, kann davon ausgegangen werden, dass der Fehler auf einer nachfolgenden Leitung liegt. Durch eine zeitlich verzögerte Auslösung des Leistungsschalters (Auslösung in der zweiten Zone des Distanzschutzes) agiert der Distanzschutz dann als ortsferner Reserveschutz. Diese Funktion kann auch für mehrere nachfolgende Leitungen gestaffelt in Abhängigkeit der gemessenen Fehlerdistanz eingestellt werden. Die Grenze zwischen zwei Zonen wird üblicherweise auf 85% der Leitungslängen eingestellt, um durch Ungenauigkeiten bei der Fehlerdistanzberechnung die Selektivität nicht zu reduzieren. [1]

4 Symmetrische Komponenten von Doppelleitungen

Für die Distanzbestimmung im Distanzschutz werden üblicherweise die Impedanzen im Modalsystem der Symmetrischen Komponenten der Leitung verwendet. Bei verdrehten Leitungen hat dies den Vorteil, dass Fehler am Leitungsende mit der richtigen Distanz zum Fehlerort gemessen werden. Bei einer Doppelleitung hat die Wahl des Verdrillungsschemas zusätzlich Einfluss auf die Kopplung der beiden Stromkreise. [4], [5]

4.1 Verdrillung

Durch die Verdrillung einer Freileitung wird erreicht, dass die Stromkreise nach einem vollständigen Verdrillungsumlauf in sich symmetrisch sind [4]. Für Doppelleitungen werden die β -Verdrillung (Bild 2) und die γ -Verdrillung (Bild 3) verwendet [4], [5], wobei die γ -Verdrillung mit gleichlaufender Leiteranordnung auch δ -Verdrillung genannt wird. Bei der β -Verdrillung erfolgt innerhalb jedes Verdrillungsabschnitts von Stromkreis I ein vollständiger Verdrillungsumlauf von Stromkreis II. Diese Verdrillungsart ist sehr aufwändig und wird daher heute kaum noch eingesetzt [4].

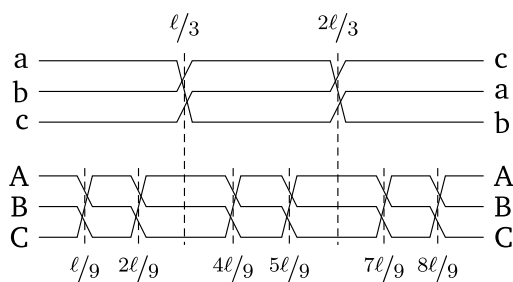


Bild 2: β -Verdrillung.

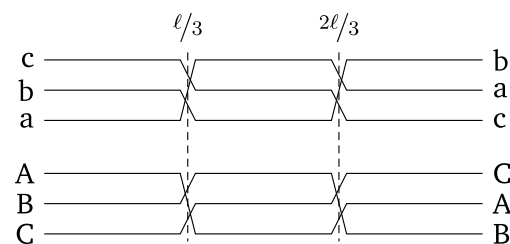


Bild 3: γ -Verdrillung.

4.2 Impedanzen in Symmetrischen Komponenten

Die Impedanzmatrix einer Doppelleitung im natürlichen System \underline{Z}_{abc}^{DL} ist allgemein mit (8) als 6x6-Matrix gegeben, sofern der Einfluss des Erdseils mit in die Impedanzen eingerechnet ist. Die Untermatrizen \underline{Z}_{abc}^I , \underline{Z}_{abc}^{II} , $\underline{Z}_{abc}^{I-II}$ und $\underline{Z}_{abc}^{II-I}$ sind 3x3-Matrizen, die jeweils die Impedanzmatrix des Stromkreises I, des Stromkreises II, der Kopplung von Stromkreis I zu II und der Kopplung von Stromkreis II zu I beschreiben. [4]

$$\underline{z}_{abc}^{DL} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{abc}^I & \underline{z}_{abc}^{I-II} \\ \underline{z}_{abc}^{II-I} & \underline{z}_{abc}^{II} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Die Untermatrizen werden jeweils einzeln in das Modalsystem der Symmetrischen Komponenten transformiert [5]. Die Kopplung der Komponentensysteme beider Stromkreise entspricht in Symmetrischen Komponenten dann den Einträgen auf der Hauptdiagonalen von $\underline{z}_{120}^{I-II}$ und $\underline{z}_{120}^{II-I}$. [5]

Bei Anwendung der β -Verdrillung ist nur das Nullsystem der beiden Stromkreise gekoppelt. Diese Verdrillungsart ist jedoch sehr aufwendig, weshalb bei Doppelleitungen hauptsächlich die γ - oder δ -Verdrillung angewendet wird [4]. Bei diesen Verdrillungsarten gilt $\underline{z}_{abc}^{I-II} = \underline{z}_{abc}^{II-I}$ nach (9) mit den Koppelimpedanzen zwischen den beiden Stromkreisen von Leitern der gleichen Phase \underline{z}_{nN} und Leitern unterschiedlicher Phasen \underline{z}_{nM} . Transformiert in das Modalsystem der Symmetrischen Komponenten führt dies zu (10). [4]

$$\underline{z}_{abc}^{I-II} = \underline{z}_{abc}^{II-I} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{nN} & \underline{z}_{nM} & \underline{z}_{nM} \\ \underline{z}_{nM} & \underline{z}_{nN} & \underline{z}_{nM} \\ \underline{z}_{nM} & \underline{z}_{nM} & \underline{z}_{nN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\underline{z}_{120}^{I-II} = \underline{z}_{120}^{II-I} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{1M} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{2M} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{0M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{nN} - \underline{z}_{nM} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{nN} - \underline{z}_{nM} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{nN} + 2\underline{z}_{nM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

5 Berechnung der Impedanz bei Zwischensystemfehlern

5.1 Festlegung der untersuchten Fehler

Zur Fehlerortung bei mehrpoligen Fehlern mit Erdberührung werden im Distanzschutz bevorzugt Leiter-Leiter-Schleifen ausgewertet. Im Vergleich zu Leiter-Erde-Schleifen sind diese unabhängig von Unsicherheiten bei der Bestimmung der Erdimpedanz (Vgl. (1)). [1]

Bei Zwischensystemfehlern ist stets mindestens eine Leiter-Leiter-Schleife beteiligt. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich daher auf die Optimierung der Schleifenimpedanzberechnung von Leiter-Leiter-Schleifen bei Zwischensystemfehlern.

5.2 Erweiterung der Distanzberechnung

5.2.1 Auswertung der tatsächlichen Fehlerschleife

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, kann der einsystemige Distanzschutz einen Zwischensystemfehler nicht auswerten. Dennoch wird ein Zwischensystemfehler vom Distanzschutz als Fehler innerhalb eines Stromkreises erkannt und die Impedanz der entsprechenden Leiter-Leiter-Schleife berechnet. Diese entspricht bei Zwischensystemfehlern jedoch nicht der kleinsten Schleifenimpedanz, was zu Abweichungen führt. Eine naheliegende Anpassung ist daher die Nutzung der tatsächlichen Fehlerschleifenimpedanz nach (11) für einen $j - K$ - Fehler.

$$\underline{z}_{\text{mess}} = \frac{U_j - U_K}{I_j - I_K} \quad (11)$$

Da nun die Fehlerschleife nicht mehr innerhalb eines Stromkreises, sondern über die gesamte Doppelleitung gebildet wird, ist es notwendig die Berechnung der gemessenen Distanz zum Fehlerort unter Verwendung der Mitsystemreaktanz der Doppelleitung $\text{Im}(\underline{Z}_{1\text{DL}})$ zu (12) anzupassen.

$$\ell_{\text{mess}} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\text{mess}})}{\text{Im}(\underline{Z}_{1\text{DL}})} \cdot \ell_{\text{L}} \quad (12)$$

5.2.2 Berücksichtigung der Nullsystemkopplung

Erdströme nach (4) treten bei Fehlern innerhalb eines Stromkreises nur bei Leiter-Erde-Fehlern auf. Bei Zwischensystemfehlern fließt ein Teil des Stromes jedoch über die Gegenstation zum Fehlerort (vgl. Bild 1). Die Stromsumme der drei Leiter eines Stromkreises kann damit von Null abweichen, was zu einem Nullstrom in diesem Stromkreis führt. Dies erfordert auch bei Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlern die Berücksichtigung der Nullsystemkopplung. Eine Berechnungsvorschrift hierfür wird von Bachmatiuk und Izykowski in [2] für eine Doppelleitung mit identischen Stromkreisen angegeben (also mit $\underline{Z}_1^{\text{I}} = \underline{Z}_1^{\text{II}} = \underline{Z}_1$ und $\underline{Z}_0^{\text{I}} = \underline{Z}_0^{\text{II}} = \underline{Z}_0$). Diese kann in die Form in (13) mit dem Koeffizienten $\underline{k}_{\text{EOM}}$ in (14) überführt werden. Die Berechnung der Fehlerdistanz erfolgt nach (5) [2].

$$\underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{I_j - I_K - \underline{k}_{\text{EOM}}(I_{\text{E}}^{\text{I}} - I_{\text{E}}^{\text{II}})} \quad (13)$$

$$\underline{k}_{\text{EOM}} = \frac{\underline{Z}'_0 - \underline{Z}'_{0\text{M}} - \underline{Z}'_1}{3 \cdot \underline{Z}'_1} \quad (14)$$

Um vergleichbar zu den Berechnungsgleichungen (1) und (2) zu bleiben, wird für (13), anstatt wie in [2] der Nullstrom, der Erdstrom als Rechengröße nach (15) verwendet.

$$\underline{I}_{\text{E}} = -3\underline{I}_0 \quad (15)$$

5.2.3 Berücksichtigung der Mitsystemkopplung

Die Mitsystemkopplung wird bei der Distanzberechnung üblicherweise vernachlässigt, da diese in der Regel kleiner als 5 % der Selbstimpedanz ist [1]. Die Mitsystemkopplung der beiden Stromkreise einer Doppelleitung ist jedoch unter anderem von der Geometrie der Leiterseilanordnung, der Beseilung sowie dem Verdrillungsschema abhängig [4]. In Abhängigkeit dieser Größen, kann die Vernachlässigung der Mitsystemkopplung, wie später gezeigt wird, zu signifikanten Fehlern bei der Distanzberechnung führen (Vgl. Abschnitt 6.4).

Es wird angenommen, dass die Parallelleitung nach dem γ - oder δ -Schema verdrillt ist. Sie ist daher symmetrisch. Die Stromkreise müssen aber nicht identisch sein, so dass $\underline{Z}_1^{\text{I}} \neq \underline{Z}_1^{\text{II}}$ gelten kann. Dies gilt beispielsweise bei unterschiedlicher Beseilung der beiden Stromkreise [4], [6].

Zur Anpassung des Distanzschutzes auf die Verwendung der Nullsystem- und Mitsystemkopplung wird im Folgenden eine neue Berechnungsmethode für die Fehlerschleifenimpedanz hergeleitet. Dafür wird die Maschengleichung eines Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlers aufgestellt. Das entsprechende Ersatzschaltbild zeigt in Bild 4 einen Fehler der Leiter a-B. Dabei ist $\underline{Z}_{\text{nn}}$ die Selbstimpedanz eines Leiters aus Stromkreis I und $\underline{Z}_{\text{NN}}$ die Selbstimpedanz eines Leiters aus Stromkreis II.

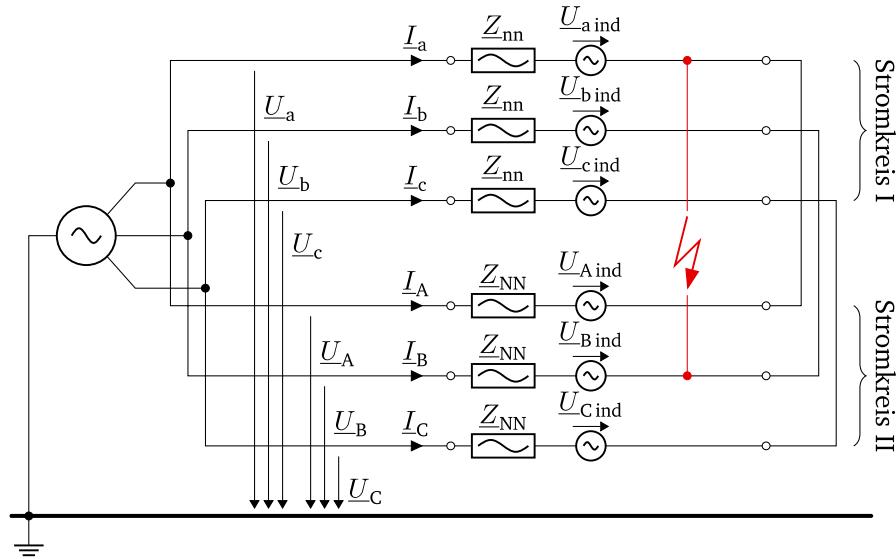


Bild 4: Ersatzschaltbild des Zwischensystemfehlers a-B auf einer Doppelleitung im natürlichen System.

Die für die Berechnung der Fehlerschleifenimpedanz wirksamen Impedanzen Z_i sind abhängig von der Distanz zum Fehlerort ℓ_F und durch (16) gegeben. Die Herleitung erfolgt vereinfacht für einen Fehler am Leitungsende, also für $\ell_F = \ell_L$ bzw. $Z_i = Z'_i \cdot \ell_L$.

$$Z_i = Z'_i \cdot \ell_F = Z_i \cdot \frac{\ell_F}{\ell_L} \quad (16)$$

Die in der Folge des in den benachbarten Leitern fließenden Stromflusses induzierte Spannung berechnet sich für Leiter a nach (17) mit der Koppelimpedanz Z_{nm} der Leiter aus Stromkreis I.

$$\underline{U}_{a \text{ ind}} = Z_{nm}(I_b + I_c) + Z_{nN}I_A + Z_{nM}(I_B + I_C) \quad (17)$$

Somit kann die Maschengleichung des Fehlers a-B durch (18) aufgestellt werden. Dabei ist Z_{NM} die Koppelimpedanz der Leiter aus Stromkreis II.

$$\begin{aligned} \underline{U}_a - \underline{U}_B &= Z_{nn}I_a + Z_{nm}(I_b + I_c) + Z_{nN}(I_A - I_b) + Z_{nM}(I_B + I_C - I_a - I_c) \\ &\quad - Z_{NN}I_B - Z_{NM}(I_A + I_C) \end{aligned} \quad (18)$$

Durch das mehrfache Addieren einer Null in Form der Terme $\pm Z_{nm}I_a = 0$, $\pm Z_{NM}I_B = 0$, $\pm Z_{nM}I_A = 0$ und $\pm Z_{nM}I_b = 0$ sowie unter Beachtung von (4) wird (18) wie folgt umgestellt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a - \underline{U}_B &= (Z_{nn} - Z_{nm})I_a - Z_{nm}I_E^I + (Z_{nN} - Z_{nM}) \cdot (I_A - I_b) + Z_{nM}(I_E^I - I_E^{II}) \\ &\quad - (Z_{NN} - Z_{NM})I_B + Z_{NM}I_E^{II} \end{aligned} \quad (19)$$

Mit dem erneuten Addieren der Terme $\pm (Z_{nn} + Z_{nN}) \cdot I_E^I/3 = 0$ und $\pm (Z_{NN} + Z_{nN}) \cdot I_E^{II}/3 = 0$ sowie unter Beachtung von (10) und der Umformung der Impedanzen der Stromkreise in Symmetrische Komponenten wird (19) zu folgendem Ausdruck:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a - \underline{U}_B &= Z_1^I I_a - Z_1^{II} I_B + Z_{1M}(I_A - I_b) - (Z_0^I - Z_{0M} - Z_1^I + Z_{1M}) \frac{I_E^I}{3} \\ &\quad + (Z_0^{II} - Z_{0M} - Z_1^{II} + Z_{1M}) \frac{I_E^{II}}{3} \end{aligned} \quad (20)$$

Um auch Fehler im Leitungsverlauf zu berücksichtigen, wird für die in (20) geschriebenen Impedanzen der wirksame Anteil verwendet (Vgl. (16)). Mit dem Ausklammern von \underline{Z}_1^I sowie dem Einführen der Koeffizienten in (22) bis (25) lässt sich die Berechnungsgleichung für einen Leiter j -Leiter K -Zwischensystemfehler mit (21) ableiten.

$$\underline{Z}_1^I \cdot \frac{\ell_F}{\ell_L} = \underline{Z}_{\text{mess}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{U}_K}{\underline{I}_j - \underline{k}_1 \underline{I}_K - \underline{k}_{1M} (\underline{I}_K - \underline{I}_j) - \underline{k}_E^I \underline{I}_E^I + \underline{k}_E^{II} \underline{I}_E^{II}} \quad (21)$$

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{Z}_1^{II}}{\underline{Z}_1^I} \quad (22)$$

$$\underline{k}_{1M} = \frac{\underline{Z}_{1M}}{\underline{Z}_1^I} \quad (23)$$

$$\underline{k}_E^I = \frac{\underline{Z}_0^I - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1^I + \underline{Z}_{1M}}{3 \cdot \underline{Z}_1^I} \quad (24)$$

$$\underline{k}_E^{II} = \frac{\underline{Z}_0^{II} - \underline{Z}_{0M} - \underline{Z}_1^{II} + \underline{Z}_{1M}}{3 \cdot \underline{Z}_1^I} \quad (25)$$

Mit dieser neuen Berechnungsmethode wird die Fehlerdistanz nach (5) bestimmt, wobei $\underline{Z}_{\text{mess}}$ aus den am Einbauort gemessenen Strom- und Spannungswerten berechnet wird.

5.3 Relative Abweichung der Distanzberechnung

Bei bekannter Fehlerdistanz ℓ_F wird die relative Abweichung $\Delta \ell_F$ der gemessenen Fehlerdistanz ℓ_{mess} nach (26) berechnet.

$$\Delta \ell_F = \frac{\ell_{\text{mess}} - \ell_F}{\ell_F} \cdot 100 \% \quad (26)$$

Nach Abschnitt 3.3 wird die Grenze der ersten Distanzschutzzone ℓ_{Z1} auf $\ell_{\text{mess}} = 0,85 \cdot \ell_L$ festgelegt. Da die gemessene Fehlerdistanz ℓ_{mess} unter anderem auf Grund vereinfachter Annahmen und geometrischer Unsymmetrie innerhalb der einzelnen Verdrillungsabschnitte [7] fehlerbehaftet ist, ergibt sich eine Abweichung bei der Berechnung der Grenze der ersten Distanzschutzzone $\Delta \ell_{Z1}$ wie folgt:

$$\Delta \ell_{Z1} = \frac{0,85 \cdot \ell_L - \ell_F}{\ell_F} \cdot 100 \% \quad (27)$$

6 Anwendung der Berechnungsmethoden

Wichtige Kriterien für die Bewertung der Genauigkeit der Berechnungsmethoden sind die maximale Abweichung der Distanzberechnung, die Abweichung nach einem vollständigen Verdrillungsumlauf, also für Fehler am Leitungsende, sowie der korrekte Zonenentscheid.

Zur Anwendung der Berechnungsmethoden wird das Dynamische Netzmodell (DNM) des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der TU Dresden (IEEH) verwendet. Anhand der Strom- und Spannungswerte von simulierten Zwischensystemfehlern am digitalen Zwillings des DNM werden die Schleifenimpedanzen nach den jeweiligen Berechnungsmethoden ausgewertet und daraus nach (5) bzw. (12) die Fehlerdistanzen abgeleitet.

Da die reale Distanz zum Fehlerort ℓ_F bekannt ist, wird die Abweichung der Distanzberechnung nach (26) und die Abweichung der Grenze des Zonenentscheids nach (27) bestimmt.

6.1 Dynamisches Netzmodell

Das DNM besteht aus einer parametergetreuen physikalischen Nachbildung eines 220 kV-Teilnetzabschnitts, mit einer 150 km langen Doppelleitung im Einebenenmastbild. Diese bildet das Übertragungsverhalten der Leitung im natürlichen System mit 30 konzentrierten Π -Elementen ab, wobei ein Element 5 km Leitungslänge emuliert. Durch die konzentrische Verschachtelung der Spulen sind die Leiter innerhalb eines Π -Elements induktiv verkoppelt. [8]

Die Doppelleitung des DNM ist mit dem Schema der δ -Verdrillung verdrillt. Ein Verdrillungsabschnitt enthält 50 km Leitungslänge, was zehn Π -Elementen entspricht. Ein vollständiger Verdrillungsumlauf wird am Ende der Leitung bei 150 km erreicht. Nach Abschnitt 3.3 liegt hierfür die Grenze der ersten Distanzschutzzone bei einer gemessenen Fehlerdistanz von 127,5 km.

6.2 Distanzschutz ohne Anpassung

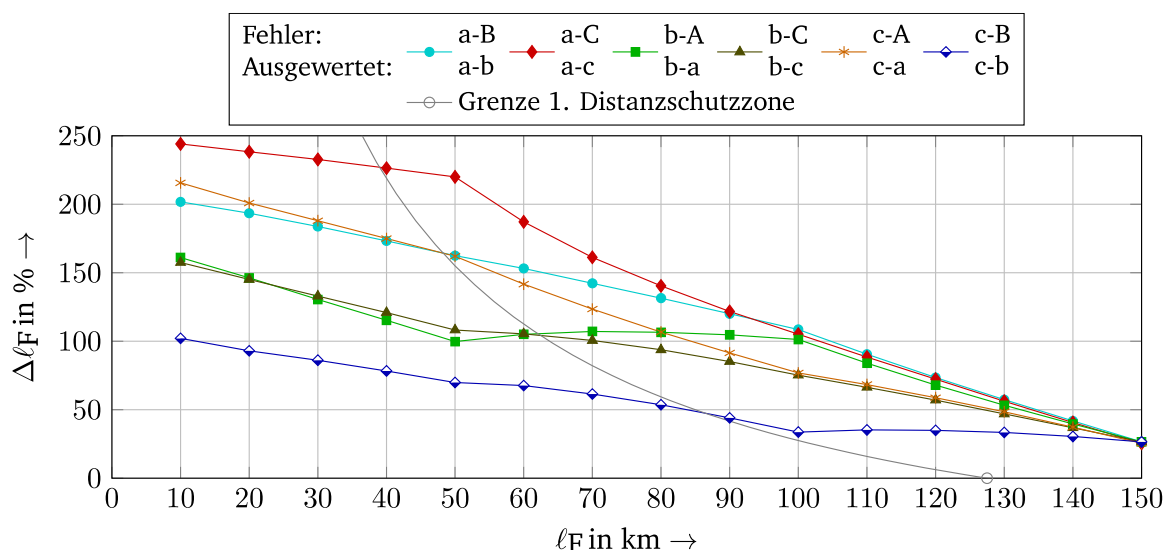


Bild 5: Abweichung $\Delta\ell_F$ der Distanzberechnung bei Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlern in Abhängigkeit des Fehlerorts ℓ_F beim einsystemigen Distanzschutz.

Ohne Anpassung des Distanzschutzes wird die Distanz zum Fehlerort nach (5) mit der Fehlerschleifenimpedanz in einem Stromkreis nach (1) berechnet. Anstatt der Schleife $j - K$ wird also im Distanzschutz von Stromkreis I die Schleife $j - k$ ausgewertet. Dies führt zu großen Abweichungen von bis zu 250%, wie in Bild 5 zu erkennen ist. Am Leitungsende wird die Fehlerdistanz mit einer Abweichung von mehr als 25% berechnet, was einer Unschärfe von etwa 40 km entspricht. Besonders auffällig ist die Ungenauigkeit der Zonengrenze. Erste nah entfernte Fehler werden in Abhängigkeit der Fehlerschleife bereits ab einer realen Fehlerdistanz von 40 km in der zweiten Distanzschutzzone eingemessen. Bei einer Fehlerdistanz von 90 km liegen alle zweipoligen Zwischensystemfehler in der zweiten Distanzschutzzone. Dies entspricht einer Unterreichweite des Distanzschutzes, was zu einer verzögerten Abschaltung von Zwischensystemfehlern führen würde.

6.3 Distanzschutz mit Berücksichtigung der tatsächlichen Fehlerschleife

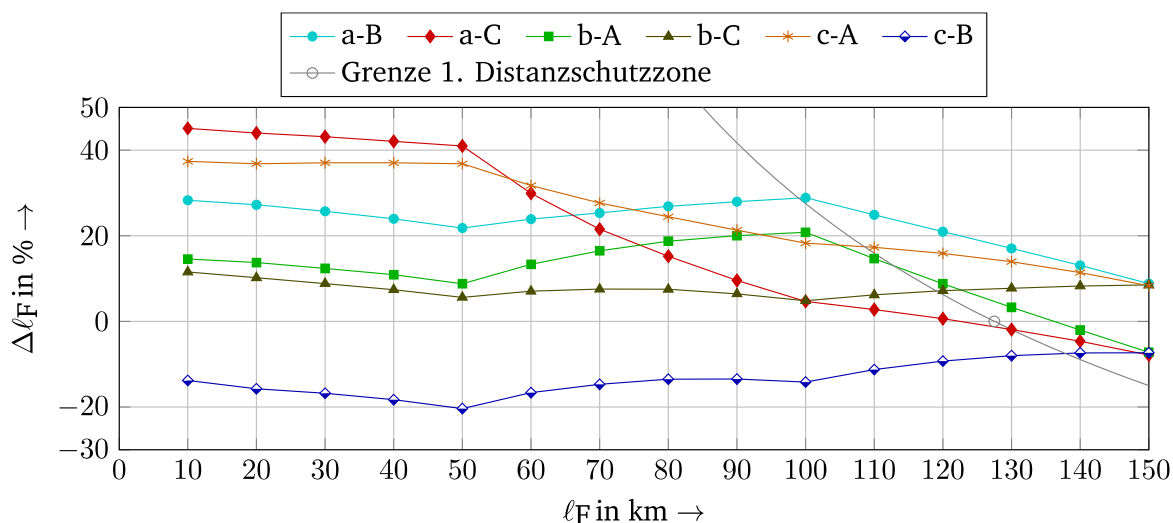


Bild 6: Abweichung $\Delta\ell_F$ der Distanzberechnung bei Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlern in Abhängigkeit des Fehlerorts ℓ_F bei Verwendung der korrekten Fehlerschleife nach (11) mit (12).

Die Genauigkeit der Distanzberechnung wird bei Verwendung der tatsächlichen Fehlerschleife deutlich verbessert, wie aus Bild 6 erkennbar ist. Die maximale Abweichung wird auf unter 50% reduziert. Am Leitungsende liegt sie im Bereich $\pm 9\%$. Die Unterreichweite der ersten Distanzschutzzone wird verringert. Erst ab einer Fehlerdistanz von 100km werden Fehler in der zweiten Distanzschutzzone eingemessen.

Dennoch liegt die Genauigkeit noch unter der des einsystemigen Distanzschutzes bei Einfachleitungen, wie beispielsweise [8] entnommen werden kann.

6.4 Distanzschutz mit Berücksichtigung der Nullsystemkopplung

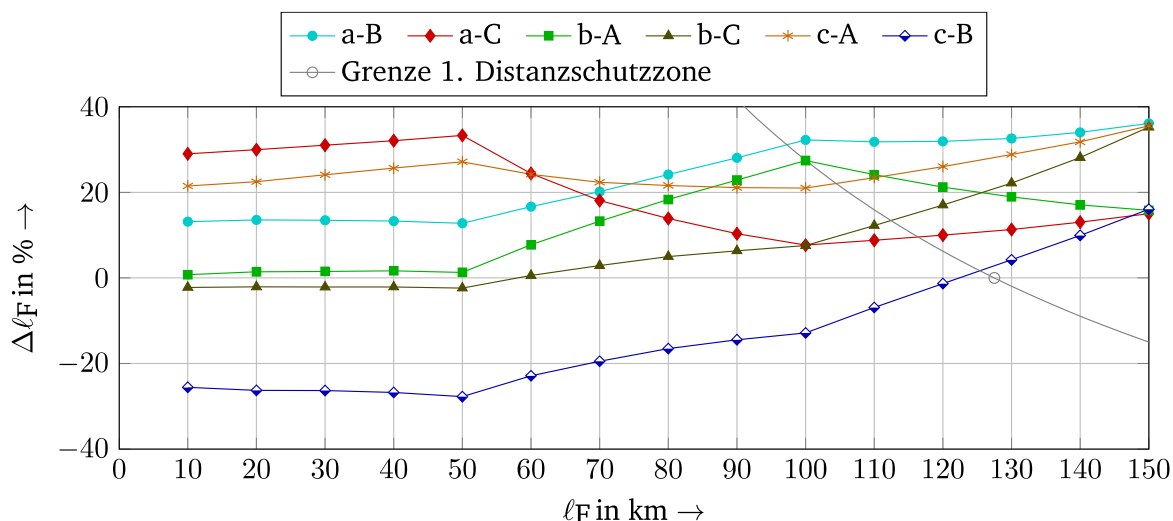


Bild 7: Abweichung $\Delta\ell_F$ der Distanzberechnung bei Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlern in Abhängigkeit des Fehlerorts ℓ_F bei Berücksichtigung der Nullsystemkopplung nach (13) aus [2] mit (5).

Die Ergebnisse für die Anwendung der Berechnung nach Bachmatiuk und Izykowski aus [2] mit Berücksichtigung der Nullsystemkopplung ist in Bild 7 gezeigt. Hierbei sinkt die maximale

Abweichung der berechneten Fehlerdistanz auf unter 40%. Allerdings sind nun die Abweichungen am Leitungsende mit bis zu 36% deutlich höher. Insbesondere die hohen Abweichungen für Fehler am Leitungsende führen zu einer Unterreichweite des Distanzschutzes. Ab einer Entfernung von 100km werden Fehler in der zweiten Distanzschutzzone eingemessen.

Die großen Abweichungen am Leitungsende sind hier auf die Vernachlässigung der Mitsystemkopplung zurückzuführen. Werden die Parameter des digitalen Zwillings des DNM so geändert, dass $\underline{Z}_{1M} = 0$ wird, reduzieren sich auch die Abweichungen der Distanzberechnung am Leitungsende deutlich.

6.5 Distanzschutz mit Berücksichtigung der Mitsystemkopplung

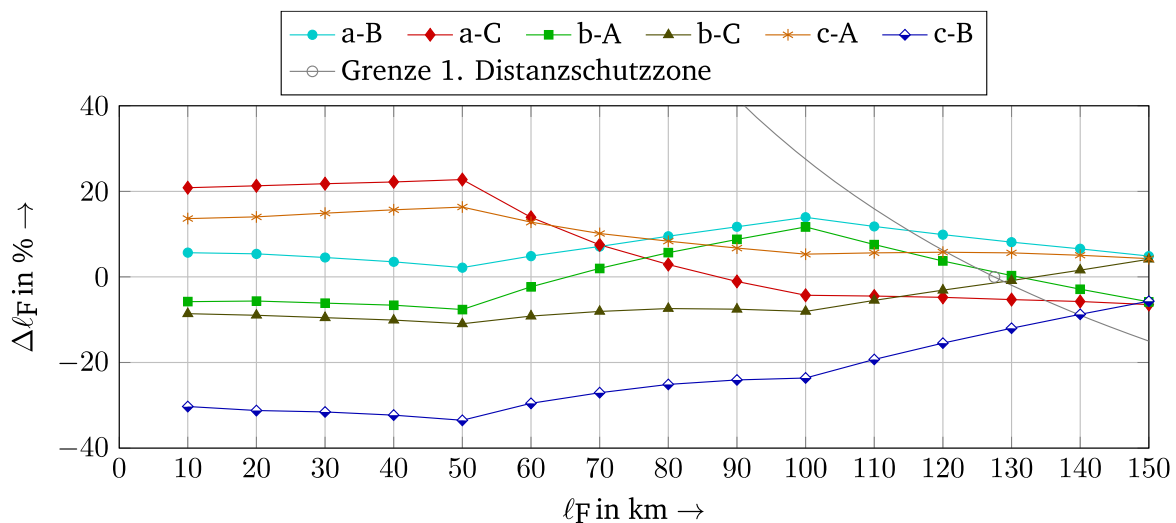


Bild 8: Abweichung $\Delta\ell_F$ der Distanzberechnung bei Leiter-Leiter-Zwischensystemfehlern in Abhängigkeit des Fehlerorts ℓ_F bei Berücksichtigung der Mitsystemkopplung mit der neuen Berechnungsmethode nach (21) mit (5).

Die Ergebnisse für die in Abschnitt 5.2 vorgestellte Berechnungsmethode mit Berücksichtigung der Mitsystemkopplung nach (21) zeigt Bild 8. Die Abweichung der Distanzberechnung ist kleiner als 35% und liegt für Fehler am Leitungsende im Bereich von $\pm 6,5\%$. Die Grenze der ersten Distanzschutzzone liegt bei einer Fehlerdistanz zwischen 115km und 140km. Die Genauigkeit der Impedanzberechnung ist somit deutlich höher als bei den bisher vorgestellten Berechnungsmethoden, was sich positiv auf einen selektiven Zonenentscheid auswirkt.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin keinen signifikanten Unterschied der Genauigkeit dieser Berechnungsmethode für Leiter-Leiter- oder Leiter-Leiter-Erde-Zwischensystemfehler.

Der Distanzschutz weist mit dieser Berechnungsmethode eine geringe Rest-Unterreichweite auf. Obwohl die Fehlerdistanz für einige Fehlerfälle am Leitungsende auch leicht unterschätzt wird, werden trotzdem alle Fehler richtigerweise in der zweiten Distanzschutzzone eingemessen. Die vorgestellte Berechnungsmethode weist somit eine sehr gute Genauigkeit auf und zeichnet sich im Vergleich mit bekannten Berechnungsmethoden durch eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Messunschärfe aus.

Die verbleibenden Abweichungen sind auf die geometrische Unsymmetrie innerhalb der Verdrehungsabschnitte zurückzuführen. Eine Korrektur dieser Abweichungen kann beispielsweise durch das von Liebermann und Schegner in [7] vorgestellte Verfahren erfolgen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt, dass auch Zwischensystemfehler auf Doppelleitungen selektiv durch den Distanzschutz geklärt werden können. Ursachen für Ungenauigkeiten der bekannten Berechnungsmethoden sind auf die Fehlerschleifenbildung innerhalb eines Stromkreises (einsystemiger Distanzschutz) sowie die Annahme von Symmetriebedingungen, die zur Vernachlässigung der Mitsystemkopplung führen, wie in [2] dargestellt, zurückzuführen.

Es wurde eine allgemeine Berechnungsmethode für den Distanzschutz zur Fehlerdistanzberechnung bei Zwischensystemfehlern auf Doppelleitungen entwickelt. Dafür wurden die Strom- und Spannungsmesswerte beider am Fehler beteiligter Stromkreise sowie die Null- und Mitsystemkopplung einbezogen. Untersuchungen am digitalen Zwilling des DNM des IEEH der TU Dresden zeigen, dass die Berechnungsmethode die Abweichung der Distanzberechnung auf die geometrische Unsymmetrie innerhalb der Verdrillungsabschnitte signifikant reduziert. Deren Korrektur ist aus der Literatur bekannt.

Erste weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Berechnungsmethode auch für Zwischensystemfehler mit galvanischer Trennung der am Fehler beteiligten Stromkreise anwendbar ist. Damit erscheint die vorgestellte Berechnungsmethode grundsätzlich geeignet für den Einsatz bei Leitungen mit Stromkreisen unterschiedlicher Spannungsebenen, die gemeinsam auf einer Trasse geführt werden. Erste Ergebnisse weisen auf jedoch auf leicht erhöhte Abweichungen der Distanzberechnung im Vergleich zu einer echten Doppelleitung mit Parallelschaltung der beiden Stromkreise am Anfang und Ende hin, deren Ursachen noch zu untersuchen sind. Darüber hinaus sind weiterführende Analysen, beispielsweise zur Berücksichtigung unterschiedlicher Sternpunktbehandlungen der beteiligten Stromkreise, notwendig.

8 Literatur

- [1] G. Ziegler, *Digitaler Distanzschutz: Grundlagen und Anwendung*, 2. Aufl. Erlangen: Publis Corp. Publ, 2008.
- [2] A. Bachmatiuk und J. Iżykowski, „Distance protection performance under inter-circuit faults on double-circuit transmission line“, *Przegląd Elektrotechniczny*, Bd. 89, Nr. 1a, S. 7–11, Okt. 2013.
- [3] M. Schilbach, „Grundlegende Untersuchungen zu Zwischensystemfehlern“. 29. August 2016.
- [4] G. Herold, *Elektrische Energieversorgung. 2: Parameter elektrischer Stromkreise, Leitungen, Transformatoren*, 2., Überarb. und Stark erw. Aufl. Wilburgstetten: Schlembach, 2008.
- [5] 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.
- [6] H. Koettnitz und H. Pundt, *Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*, 1. Aufl., Bd. 1, 3 Bde. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968.
- [7] 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.
- [8] C. Liebermann und P. Schegner, „Kompensation der Messunschärfe durch Leiungssymmetrien bei der Distanzberechnung“, gehalten auf der 18. Symposium Energieinnovation, Graz, Feb. 2024.