
Ein Verfahren zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung

**Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation
von**

**Dipl.-Ing. Markus Mayer
geb. in Mayen**

D 386

Tag der mündlichen Prüfung: 23.02.2015

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten

**Vorsitzender der
Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Wellßow**

1. Berichterstatter: Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. Christian Tuttas

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer externen Promotion am Lehrgebiet Elektrische Energieversorgung der TU Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr.-Ing. habil. Christian Tuttas für seine hervorragende und kompetente Unterstützung. Seine vielen wertvollen Ratschläge und Anregungen während der gesamten Entstehungszeit der Arbeit verdienen besondere Anerkennung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steven Liu danke ich sehr für seine Bereitschaft, die Promotion als Lehrstuhlinhaber zu begleiten. Die Zusammenarbeit mit ihm war stets konstruktiv und sehr angenehm.

Zu großem Dank bin ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner verpflichtet, der als anerkannter Experte für das Korreferat gewonnen werden konnte. Mit seinen vielen kompetenten Hinweisen hat er sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Wellßow danke ich für sein Engagement als Vorsitzender der Promotionskommission.

Meinen Dank aussprechen möchte ich auch allen Studenten, die mit großem Einsatz im Rahmen ihrer Diplom- oder Studienarbeit Untersuchungen zum Thema durchgeführt haben, namentlich Michel Bultgen, Christian Bott und vor allem Vladislav Averyanov.

Besonders dankbar bin ich meiner Lebensgefährtin Karin Welsch. Ohne ihr Verständnis für viele arbeitsintensive Stunden hätte das Promotionsvorhaben nicht realisiert werden können.

Kurzfassung

Vorgestellt wird ein Verfahren zur Bestimmung der Erdschlusentfernung in hochohmig geerdeten Netzen. Nach Abklingen der transienten Vorgänge im Fehlerfall stellt sich ein stationärer Zustand ein, in dem das Netz zunächst weiter betrieben werden kann.

Ausgehend von diesem stationären Fehlerfall wird auf der Basis eines Π -Glieds das Leitungsmodell des einseitig gespeisten Stichtabgangs mit einer Last in der Vier-Leiter-Darstellung entwickelt. Die Schaltungsanalyse erfolgt mit Hilfe komplexer Rechnung und der Kirchhoffschen Gesetze. Grundlage der Betrachtungen bildet das Netz mit isoliertem Sternpunkt.

Das entstehende Gleichungssystem ist in seiner Grundform nichtlinear, lässt sich jedoch auf eine elementar lösbare kubische Gleichung im gesuchten Fehlerentfernungsparemeter zurückführen. Eine weitere Lösungsmöglichkeit bietet das Newton-Raphson-Verfahren.

Durch Verlegen der lastseitigen Leiter-Erd-Kapazitäten an den Abgangsanzfang kann das vollständige, nichtlineare System in ein lineares System überführt werden. Hierbei sind die beiden Ausprägungen „direkte Lösung mit unsymmetrischer Last“ oder „Ausgleichsrechnung mit symmetrischer Last“ möglich.

Eine MATLAB[®]-Implementierung dieser vier Rechenalgorithmen bildet die Basis der weiteren Analysen.

Alle messtechnischen Untersuchungen erfolgten am Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern. Hier wurden verschiedene Fehlerszenarien hinsichtlich Fehlerentfernung, -widerstand und Größe des gesunden Restnetzes hergestellt, in 480 Einzelmessungen erfasst und mit den Algorithmen ausgewertet. Dabei wurden auch Messungen an fehlerfreien Abgängen erhoben, um das Detektionsvermögen der Algorithmen zu testen.

Neben Grundschwingungsbetrachtungen ist die Auswertung aller Datensätze mit der 5. und der 7. Harmonischen ein zentrales Thema. Im Fokus steht die Verwendbarkeit dieser Oberschwingungen zur Erdschlusentfernungsmessung bzw. -detektion mit den o.g. Algorithmen.

Besondere Bedeutung kommt der Fragestellung zu, inwieweit die für ein Netz mit isoliertem Sternpunkt konzipierten Algorithmen unter Benutzung der höheren Harmonischen zur Erdschlusentfernungsmessung in einem gelöschten Netz geeignet sind.

Schließlich wird das Verfahren auf Abgänge mit inhomogenem Leitermaterial erweitert, da auch diese Konstellation von praktischer Bedeutung ist.

Abstract

A method for determining the earth fault distance in high impedance grounded networks is presented here. With the transient processes having decayed in case of an earth fault, the grid tunes into a steady state error condition in which it can be operated initially.

Starting out from the stationary earth fault condition a line model of a unilaterally powered feeder with one load based on a PI-element is developed using a for-wire-representation. The circuit analysis is performed using complex AC calculation and Kirchhoff's laws. The examinations are based on a network with isolated neutral point.

The resulting system of equations is non-linear in its basic form. However, it can be lead back to an elementary solvable cubic equation in the unknown fault distance parameter. Another solution is offered by the Newton-Raphson method.

The non-linear system of equations can be transformed into a linear equation system by transferring the phase-to-earth capacitances placed at the load to the front of the feeder. Here two kinds of solutions are possible: „a direct solution with an unbalanced load“ or „a least squares solution using a symmetrical load“.

MATLAB[®] implementations of these four algorithms form the basis of further analyses.

All metrological investigations were carried out at the grid and power plant model of the Kaiserslautern University. Here, various error scenarios were established concerning fault distance, -resistance and the size of the remaining healthy network. A total of 480 single measurements were recorded and analysed with the algorithms. In order to test the earth fault detection capability of the algorithms also measurements on error-free feeders were carried out.

In addition to fundamental frequency considerations, the evaluation of all data sets using the 5th and the 7th harmonics is a central topic. The focus is on the usability of these higher harmonics for earth fault distance calculation and -detection with the algorithms mentioned above.

Of particular importance is the question of to what extent the algorithms originally designed for the use in a network with isolated neutral point are also suitable for earth fault distance calculation using the higher harmonics in a resonant grounded network.

Finally, the presented method is extended to feeders consisting of inhomogeneous conductor material, since this constellation is of practical importance.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	12
1 Einleitung	15
1.1 Einordnung und Zielsetzung der Arbeit	15
1.2 Stand der Technik	17
1.2.1 Entfernungsbestimmung im stationären Erdschlussfall	17
1.2.1.1 Distanzschutzalgorithmus in klassischer und erweiterter Form [1], [32]	17
1.2.1.2 Deltaverfahren zur Berechnung der Erdschlussdistanz [67]	20
1.2.1.3 Entfernungsmessung im Ring [23], [24], [25]	22
1.2.2 Entfernungsbestimmung mittels Transienten [49]	22
2 Eigenschaften hochohmig geerdeter Netze	24
2.1 Verschiebung der Leiter-Erd-Spannungen im Erdschlussfall	24
2.2 Strominjektion am Erdschlussfußpunkt	25
3 Entwicklung eines Leitungsmodells des homogenen Stichabgangs	26
3.1 Modell des fehlerfreien Stichabgangs	26
3.2 Modell des erdschlussbehafteten Stichabgangs	27
3.3 Modell des erdschlussbehafteten Stichabgangs in vollständiger Beschaltung	27
3.3.1 Die Messgrößen am Abgangsanfang	27
3.3.2 Der Fehlerentfernungsparameter α	28
3.3.3 Die Strominjektion des fehlerfreien Restnetzes am Erdschlussfußpunkt.....	28
3.3.4 Die unsymmetrische Lastmodellierung	29
4 Mathematische Beschreibung des Stichabgangsmodells im Netz mit isoliertem Sternpunkt	31
4.1 Analyse des vollständigen Stichabgangsmodells	31
4.1.1 Grundsatzbetrachtungen	31
4.1.2 Vereinfachung des vollständigen Stichabgangsmodells.....	32
4.1.3 Diskussion des Gleichungssystems und seiner Lösungsmöglichkeiten	34
4.1.3.1 Lösung mit dem Newton-Raphson-Verfahren	35
4.1.3.2 Lösung durch sukzessive Elimination der Variablen	35
4.1.4 Abschließende Betrachtungen zur Analyse des vollständigen Stichabgangsmodells	36

4.2	Analyse eines vereinfachten Stichabgangsmodells [9], [10]	38
4.2.1	Grundsatzbetrachtungen	38
4.2.2	Vereinfachtes Stichabgangsmodell mit unsymmetrischer Last.....	39
4.2.3	Vereinfachtes Stichabgangsmodell mit symmetrischer Last.....	39
4.2.4	Übersicht der Gleichungssysteme des vereinfachten Stichabgangsmodells.....	40
4.3	Zusammenfassung zur mathematischen Beschreibung des Stichabgangsmodells	41
5	Aufbau des Messplatzes und Versuchsdurchführung	43
5.1	Das Netz-Kraftwerksmodell [85]	43
5.2	Physikalische Realisierung des homogenen Stichabgangs und seiner Beschaltung	44
5.2.1	Die erdschlussbehaftete Leitung.....	44
5.2.2	Der Fehlerwiderstand R_F	45
5.2.3	Die Last	45
5.2.4	Die externe Strominjektion	45
5.3	Aufbau des Messplatzes	46
5.3.1	Transientenrekorder [16].....	46
5.3.2	GPIB-Adapter [16]	46
5.3.3	Spannungsmessungen [16].....	47
5.3.4	Strommessungen [16].....	47
5.3.5	Auswertung mit dem Laptop	47
5.4	Zeigerbildung und Ordnungszahl k der betrachteten Harmonischen	48
5.4.1	Bildung der komplexen Zeiger.....	48
5.4.2	Ordnungszahl k der zu untersuchenden Harmonischen.....	48
5.4.2.1	Die Europanorm EN 50160	48
5.4.2.2	Spannungsanalyse am Netz-Kraftwerksmodell.....	50
6	Anwendung der Algorithmen im Netz mit isoliertem Sternpunkt und Analyse der Ergebnisse	51
6.1	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standard- topologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt	51
6.1.1	Messreihe 1: niedrige Strominjektion ($p = 2$)	52
6.1.1.1	Fehlerentfernungparameter α	52
6.1.1.2	Fehlerwiderstand R_F	54
6.1.1.3	Lastimpedanz Z_l (unsymmetrisch) bzw. Z (symmetrisch)	56
6.1.2	Messreihe 1: hohe Strominjektion ($p = 36$).....	57
6.1.2.1	Fehlerentfernungparameter α	57
6.1.2.2	Fehlerwiderstand R_F	59
6.1.2.3	Lastimpedanz Z_l (unsymmetrisch) bzw. Z (symmetrisch)	61
6.2	Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standard- topologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt	62
6.2.1	Messreihe 2: niedrige Strominjektion ($p = 2$)	62
6.2.1.1	Fehlerentfernungparameter α	62
6.2.1.2	Fehlerwiderstand R_F	63

6.2.2	Messreihe 2: hohe Strominjektion ($p = 36$).....	63
6.2.2.1	Fehlerentfernungsparameter α	63
6.2.2.2	Fehlerwiderstand R_F	64
6.3	Zusammenfassung zur Fehlerentfernungsmessung bei Standardtopologie	65
6.4	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	66
6.4.1	Betrachtung des erdschlussbehafteten Abgangs.....	67
6.4.2	Betrachtung des erdschlussfreien Abgangs	68
6.4.3	Zusammenfassung zur Erdschlussrichtungsbestimmung bei Standardtopologie....	69
6.5	Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standard- topologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	70
6.5.1	Betrachtung der Grundswingungsauswertung	70
6.5.2	Betrachtung der Oberswingungsauswertung	71
6.5.3	Zusammenfassung zur Erdschlussentfernungsbestimmung bei Standard- topologie mit B6R-Last	71
6.5.3.1	Fehlerentfernungsparameter α	71
6.5.3.2	Fehlerwiderstand R_F	71
6.5.3.3	Algorithmenvergleich.....	72
6.6	Messreihen 5, 6: Betrachtung einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt	73
6.6.1	Messreihen 5, 6: Prüfung einer Ringleitung auf Erdschlussbetroffenheit zwischen Messstelle und erster Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	73
6.6.2	Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	76
6.6.2.1	Messreihe 5: niedrige Strominjektion ($p = 1$)	76
6.6.2.1.1	Fehlerentfernungsparameter α	76
6.6.2.1.2	Fehlerwiderstand R_F	77
6.6.2.2	Messreihe 5: hohe Strominjektion ($p = 36$).....	77
6.6.2.2.1	Fehlerentfernungsparameter α	78
6.6.2.2.2	Fehlerwiderstand R_F	79
6.6.3	Zusammenfassende Betrachtung zur Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt	80
6.7	Betrachtung des 5. und 7. Oberswingungsverhältnisses des Erdschluss- stroms im Netz mit isoliertem Sternpunkt	80
6.7.1	Standardtopologie mit Standardlast bei hoher und niedriger Strominjektion	80
6.7.1.1	Strominjektion niedrig ($p = 2$).....	81
6.7.1.2	Strominjektion hoch ($p = 36$)	81
6.7.2	Standardtopologie mit B6R-Last bei hoher und niedriger Strominjektion.....	82
6.7.3	Zusammenfassende Betrachtung der Oberswingungsverhältnisse im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	83
6.8	Einfluss von Fehlern der Eingangsdaten auf die Ergebnisgrößen α und R_F...	85
6.8.1	Zusammenfassende Betrachtung des Einflusses von Eingangsdatenfehlern.....	87
6.9	Bestimmung der Fehlergrenzen der verwendeten Wandler.....	88
6.9.1	Spannungswandler.....	88
6.9.2	Phasenstromwandler.....	89

7	Anwendung der Algorithmen im erdschlusskompensierten Netz ..	91
7.1	Das Netz mit isoliertem Sternpunkt als Ersatzmodell des gelöschten Netzes für höhere Harmonische bei Erdschluss	91
7.2	Gegenüberstellung beider Netzformen auf Basis eines gleichen Erdschlusszenarios	93
7.3	Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion ($p = 2$) im gelöschten Netz.....	94
7.3.1	Fehlerentfernungsparameter α	95
7.3.2	Fehlerwiderstand R_F	96
7.4	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz als Funktion der Strominjektion.....	97
7.5	Betrachtung des 5. und 7. Oberschwingungsverhältnisses des Erdschlussstroms im gelöschten Netz.....	100
7.5.1	Betrachtung der 5. Harmonischen	100
7.5.2	Betrachtung der 7. Harmonischen	100
7.5.3	Betrachtung des Abgangssummenstroms.....	101
7.6	Zusammenfassung zur Fehlerentfernungsmessung im erdschlusskompensierten Netz	101
8	Anwendung der Algorithmen bei inhomogenen Leitungsabgängen.....	103
8.1	Modell des inhomogenen Stichabgangs.....	103
8.2	Transformationsmatrix eines Π -Gliedes	104
8.3	Modellerweiterung des vollständig beschalteten Stichabgangs	104
8.4	Anwendung des erweiterten Abgangsmodells	105
8.5	Praktischer Einsatz des erweiterten Abgangsmodells auf Basis von Messdatensätzen	106
8.5.1	Fehlerszenario 1: Erdschluss auf dem ersten Π -Glied	107
8.5.1.1	Angenommener Fehlerort auf dem ersten Π -Glied (Eingangsgrößen: Pos. 1).....	107
8.5.1.2	Angenommener Fehlerort auf dem zweiten Π -Glied (Eingangsgrößen: Pos. 2)...	108
8.5.2	Fehlerszenario 2: Erdschluss zwischen den beiden Π -Gliedern.....	108
8.5.3	Fehlerszenario 3: Erdschluss auf dem zweiten Π -Glied.....	109
9	Zusammenfassung.....	111
Anhang.....		114
A.1	Berechnung der Transformationsmatrizen dreier Übertragungsglieder mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze.....	114
A.1.1	Analyse des Übertragungsgliedes 1	114
A.1.2	Analyse des Übertragungsgliedes 2.....	116
A.1.3	Analyse des vollständigen Π -Übertragungsgliedes	117

A.2	Geschlossene Lösung des vollständigen Gleichungssystems	118
A.2.1	Rückführung des vollständigen Gleichungssystems auf eine kubische Gleichung im Fehlerentfernungsparemeter α	118
A.2.2	Lösung des Restsystems bei bekanntem α	122
A.2.3	Ablaufdiagramm zur Lösung des vollständigen Systems (Algorithmus: KUB_U).....	124
A.3	Lösung des vollständigen Gleichungssystems nach Newton-Raphson	125
A.3.1	Aufstellen eines reellen Ersatzsystems.....	125
A.3.2	Aufstellen der Jacobi-Matrix J des reellen Ersatzsystems	126
A.3.3	Festlegung des Startvektors	127
A.3.4	Iterative Lösung des Gleichungssystems	127
A.3.5	Berechnung der Lastströme	127
A.3.6	Ablaufdiagramm zum Newton-Raphson-Verfahren	128
A.4	Analyse des linearen Näherungsmodells mit den Kirchhoffschen Gesetzen; hier: Lösung mit unsymmetrischer Last	129
A.4.1	Ablaufdiagramm zur Analyse des fehlerbehafteten Stichabgangs mit dem linearen Näherungsmodell und unsymmetrischer Last (Algorithmus: LGS_U)	131
A.5	Analyse des linearen Näherungsmodells mit den Kirchhoffschen Gesetzen; hier: Lösung mit symmetrischer Last	132
A.5.1	Ablaufdiagramm zur Analyse des fehlerbehafteten Stichabgangs mit dem linearen Näherungsmodell und symmetrischer Last (Algorithmus: LGS_S).....	134
A.6	Messwerttabellen	135
A.7	Quelltexte der Algorithmen	155
A.7.1	MATLAB [®] -Code zum Algorithmus KUB_U	155
A.7.2	MATLAB [®] -Code zum Newton-Raphson-Verfahren	158
 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis		162
 Literaturverzeichnis		170
 Lebenslauf		175

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Komplexe Größen sind unterstrichen, Vektoren und Matrizen in Fettschrift dargestellt.

α	Fehlerentfernungsparameter; α ist reell; $0 \leq \alpha \leq 1$
B6R-Last	belastete 6-Puls-Brückenschaltung
C	allgemeine Kapazität
C_0	Kapazität des Nullsystems einer Leitung
C_B	Betriebskapazität einer Leitung
C_E	Leiter-Erd-Kapazität
C_K	Koppelkapazität in Dreieckschaltung
C_{Restnetz}	Leiter-Erd-Kapazität des gesunden Restnetzes
$\Delta\alpha$	absolute Abweichung von α : Istwert – Sollwert
$\Delta\mathbf{F}$	Vektor der Abweichungen im Newton-Raphson-Verfahren
$\Delta\varphi_Z$	absolute Abweichung von φ_Z : Istwert – Sollwert
ΔR_F	absolute Abweichung von R_F : Istwert – Sollwert
$\Delta\mathbf{X}$	Verbesserung des Lösungsvektors zwischen zwei Iterationsschritten des Newton-Raphson-Verfahrens
ΔZ	absolute Abweichung von Z oder Z_1 : Istwert – Sollwert
ΔZ_{max}	maximale absolute Abweichung von Z
DFT	Diskrete Fourier Transformation
f	Frequenz
f_N	Nennfrequenz des jeweiligen Stromwandlers
f_T	Abtastfrequenz
$\underline{H}_1, \underline{H}_2, \underline{H}_3, \underline{H}_4, \underline{H}_5$	komplexe Hilfsgrößen des homogenen Abgangsmodells
$\underline{H}'_1, \underline{H}'_2, \underline{H}'_3, \underline{H}'_4, \underline{H}'_5$	komplexe Hilfsgrößen des inhomogenen Abgangsmodells
$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$	Phasenströme
\underline{I}_4	Zweigstrom; entspricht dem Löschstrom \underline{I}_L
$\underline{I}_5 \dots \underline{I}_9$	Zweigströme
\underline{I}_{10}	Zweigstrom; entspricht dem negativen Fehlerstrom $-\underline{I}_F$
$\underline{I}_{11} \dots \underline{I}_{20}$	Zweigströme
\underline{I}_{21}	Rechengröße für den gemessenen Abgangssummenstrom; es ist: $\underline{I}_{21} = -\underline{I}_S$
\underline{I}_{22}	Rechengröße für den Erdschlussstrom \underline{I}_E des gesunden Restnetzes
$\underline{I}_{23} \dots \underline{I}_{28}$	Zweigströme
$\underline{I}_1^{(P1)}, \underline{I}_2^{(P1)}, \underline{I}_3^{(P1)}, \underline{I}_4^{(P1)}$	Strom an Pos. 1 eines Übertragungsgliedes
$\underline{I}_1^{(P2)}, \underline{I}_2^{(P2)}, \underline{I}_3^{(P2)}, \underline{I}_4^{(P2)}$	Strom an Pos. 2 eines Übertragungsgliedes
$\underline{I}_1^A, \underline{I}_2^A, \underline{I}_3^A, \underline{I}_4^A$	Ströme am Ausgang eines Übertragungsgliedes
\underline{I}_{CE}	kapazitiver Strom durch eine Leiter-Erd-Kapazität
$\underline{I}_{CE1}, \underline{I}_{CE2}, \underline{I}_{CE3}$	kapazitiver Strom durch die indizierte Leiter-Erd-Kapazität
$\underline{I}_{CK1}, \underline{I}_{CK2}, \underline{I}_{CK3}$	kapazitiver Strom durch die indizierte Koppelkapazität
\underline{I}_E	Erdschlussstrom; entspricht der Rechengröße \underline{I}_{22}
$\underline{I}_E^{(k)}$	k . Harmonische des Erdschlussstroms

\underline{I}_F	Fehlerstrom; entspricht dem Zweigstrom $-\underline{I}_{10}$
$\underline{I}_{G2}, \underline{I}_{G3}$	Außenleiterstrom der indizierten Phase eines gesunden Abgangs
$\underline{I}_{K2}, \underline{I}_{K3}$	Außenleiterstrom der indizierten Phase eines erdschlussbehafteten Abgangs
\underline{I}_L	Löschstrom; entspricht dem Zweigstrom \underline{I}_4
$\underline{I}_L^{(k)}$	k . Harmonische des Löschstroms
I_{\max}	maximal zulässiger Strom des jeweiligen Messshunts
I_n	Nennstrom der Phasenstromwandler
$\underline{I}_{\text{Restnetz}}$	Erdschlussstrom des erdschlussfreien Restnetzes
$\underline{I}_{\text{Restnetz}}^{(k)}$	k . Harmonische des Erdschlussstroms des erdschlussfreien Restnetzes
\underline{I}_S	Abgangssummenstrom
j	imaginäre Einheit
\mathbf{J}	Jacobi-Matrix
k	Ordnungszahl einer Harmonischen
KUB_U	Algorithmus zur vollständigen Lösung mittels kubischer Gleichung nach 4.1.3.2
LGS_S	linearer Näherungsalgorithmus mit symmetrischer Last und Ausgleichsrechnung nach 4.2.3
LGS_U	linearer Näherungsalgorithmus mit unsymmetrischer Last nach 4.2.2
L_p	Induktivität der Petersen-Spule
n	Laufvariable der diskreten Abtastzeitpunkte
N	Anzahl der Abtastwerte pro Periode
ω	Kreisfrequenz
$\omega_{50\text{Hz}}$	Kreisfrequenz bei $f = 50$ Hz
p	Anzahl paralleler Leiter im Netz-Kraftwerksmodell
$\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}$	Phasenwinkel des indizierten Phasenstroms
φ_S	Phasenwinkel des Abgangssummenstroms
$\varphi_{U1E}, \varphi_{U2E}, \varphi_{U3E}$	Phasenwinkel der indizierten Leiter-Erd-Spannung
φ_Z	Phasenwinkel der Last \underline{Z} oder \underline{Z}_1
R	Betriebswert des jeweiligen Messshunts
R_0	Realteil der Nullimpedanz \underline{Z}_0
R_F	ohmscher Fehlerwiderstand
R_L	ohmscher Lastwiderstand
R_M	Realteil der Mitimpedanz \underline{Z}_M
R_N	Nennbürde des jeweiligen Stromwandlers
σ	Standardabweichung
$\Sigma \underline{I}_G$	Summenstrom eines gesunden Abgangs
$\Sigma \underline{I}_K$	Summenstrom eines erdschlussbehafteten Abgangs
S_N	Nennscheinleistung
T_{1a}	Transformationsmatrix Übertragungsglied 1 mit C_E, C_K (A1.14a)
T_{1b}	Transformationsmatrix Übertragungsglied 1 mit $C_E/2, C_K/2$ (A1.14b)
T_2	Transformationsmatrix Übertragungsglied 2 (A1.22)

T_3	Transformationsmatrix des vollständigen Π -Gliedes (A1.23)
THD	Total Harmonic Distortion
Θ	Abtastwinkel
$\underline{U}_{1E}, \underline{U}_{2E}, \underline{U}_{3E}$	Leiter-Erd-Spannungen im Drehstromsystem
$\underline{U}_{1E}^{(P1)}, \underline{U}_{2E}^{(P1)}, \underline{U}_{3E}^{(P1)}$	Leiter-Erd-Spannungen an Position 1 eines Übertragungsgliedes
$\underline{U}_{1E}^{(P2)}, \underline{U}_{2E}^{(P2)}, \underline{U}_{3E}^{(P2)}$	Leiter-Erd-Spannungen an Position 2 eines Übertragungsgliedes
$\underline{U}_{1E}^A, \underline{U}_{2E}^A, \underline{U}_{3E}^A$	Leiter-Erd-Spannungen am Ausgang eines Übertragungsgliedes
$\underline{U}_{1N}, \underline{U}_{2N}, \underline{U}_{3N}$	Strangspannungen im Drehstromsystem
$\underline{U}_{13}, \underline{U}_{21}, \underline{U}_{32}$	Außenleiterspannungen im Drehstromsystem
$\underline{U}_{31}^{(k)}, \underline{U}_{21}^{(k)}, \underline{U}_{32}^{(k)}$	k . Harmonische der Außenleiterspannungen im Drehstromsystem
\underline{U}_F	Fehlerspannung
U_{\max}	maximal zulässige Spannung des jeweiligen Stromwandlers
\underline{U}_{NE}	Verlagerungsspannung
U_{prim}	zulässiges Primärspannungsband des jeweiligen Spannungswandlers
U_{sek}	Sekundärspannungsband des jeweiligen Spannungswandlers
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis des Wandlers; Herstellerangabe
$\ddot{u}_{\text{gemessen}}$	Übersetzungsverhältnis des Wandlers; ausgemessener Wert
X	aktueller Lösungsvektor beim Newton-Raphson-Verfahren
X_0	Imaginärteil der Nullimpedanz \underline{Z}_0
\underline{X}_k	komplexer Zeiger der k . Harmonischen
X_M	Imaginärteil der Mitimpedanz \underline{Z}_M
Y	allgemeine Admittanz
$\underline{Y}_{1\Delta}, \underline{Y}_{2\Delta}$	Admittanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents in Dreieckschaltung
\underline{Y}_{CE}	Leiter-Erd-Admittanz
\underline{Y}_{CK}	Admittanz der Koppelkapazität
$\underline{Y}_{K1}, \underline{Y}_{K2}$	Admittanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents mit Koppelkapazitäten in Sternschaltung
$\underline{Y}_{K1\Delta}, \underline{Y}_{K2\Delta}$	Admittanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents mit Koppelkapazitäten in Dreieckschaltung
\underline{Z}	symmetrische Lastimpedanz in Sternschaltung
\underline{Z}_0	Nullimpedanz einer Leitung
$\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$	Impedanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents in Sternschaltung
$\underline{Z}_{1\Delta}, \underline{Z}_{2\Delta}$	Impedanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents in Dreieckschaltung
\underline{Z}_A	symmetrische Lastimpedanz in Dreieckschaltung
\underline{Z}_{CE}	Leiter-Erd-Impedanz
\underline{Z}_{CK}	Impedanz der Koppelkapazität
\underline{Z}_E	Erdimpedanz
\underline{Z}_{E1}	Erdimpedanz des erdschlussbehafteten Teilstücks einer Leitung
\underline{Z}_{E2}	Erdimpedanz des fehlerfreien Teilstücks einer Leitung
$\underline{Z}_{K1}, \underline{Z}_{K2}$	Impedanzen des unsymmetrischen Lastäquivalents mit Koppelkapazitäten in Sternschaltung
\underline{Z}_L	Leiterimpedanz (Mitimpedanz) der fehlerbehafteten Leitung
\underline{Z}_{L1}	Leiterimpedanz des erdschlussbehafteten Teilstücks einer Leitung
\underline{Z}_{L2}	Leiterimpedanz des fehlerfreien Teilstücks einer Leitung
\underline{Z}_M	Mitimpedanz einer Leitung
\underline{Z}_P	Impedanz der Petersen-Spule

1 Einleitung

1.1 Einordnung und Zielsetzung der Arbeit

Die hochohmige Sternpunktterdung umfasst sowohl Netze mit isoliertem Sternpunkt als auch erdschlusskompensierte Netze. Beiden Netzformen ist die Eigenschaft gemeinsam, dass man sie im Fall einpoliger Fehler ohne Versorgungsunterbrechung weiter betreiben kann. Dennoch muss die Fehlersuche zügig beginnen, um die Ausweitung zu einem Doppelerdschluss zu verhindern. Statistisch gesehen [18] stellen Erdschlüsse eine häufige Fehlerursache dar, so dass die hochohmige Sternpunktterdung eine erhöhte Versorgungssicherheit gewährleistet.

Zum Auffinden des erdschlussbehafteten Abgangs stehen seit langem verschiedene Verfahren wie die Kurzzeiterdung oder die Pulsortung [5], [46], [68] zur Verfügung. Darüber hinaus setzt man seit Jahrzehnten Erdschlussrichtungsrelais erfolgreich zur Erdschlussortung ein.

Aus praktischer Sicht ist auch die Bestimmung der Erdschlussentfernung von großem Interesse und seit langem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Speziell vor dem Hintergrund zunehmender Verkabelung im Mittelspannungsbereich bekommt dieses Problem eine neue Dimension, da im Erdreich verlegte Kabel von außen nicht einsehbar sind und keine Möglichkeit besteht, den Fehler augenscheinlich zu erkennen.

Zur Bestimmung der Erdschlussentfernung sind bereits einige Verfahren bekannt. Diese arbeiten entweder auf Basis der 50-Hz-Grundschiwingung und einer Änderung der Erdschlusskompensation oder sie werten die transienten Vorgänge bei Erdschlusseintritt aus (siehe 1.2).

In der vorliegenden Arbeit wird ausgehend vom stationären Erdschlussfall ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Erdschlussentfernung vorgestellt, der ohne Verstimmung der Petersen-Spule auskommt. Auf den Einsatz symmetrischer Komponenten wird verzichtet; dies hat den Vorteil, dass die Messgrößen keiner zusätzlichen Transformation unterzogen werden müssen.

Unter diesen Prämissen wird in Kapitel 3 das Modell eines homogenen Stichabgangs mit einer Last auf Basis eines II-Gliedes in Vier-Leiter-Darstellung [54] entwickelt. Grundlage dieser Betrachtungen bildet das Netz mit isoliertem Sternpunkt. Die mathematische Modellbeschreibung erfolgt in Kapitel 4 mit Hilfe komplexer Rechnung und Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze. Es entsteht ein komplexes, nichtlineares Gleichungssystem, zu dessen Lösung zwei Verfahren untersucht werden; zum einen die Ableitung einer geschlossenen Lösungsformel, zum anderen das Newton-Raphson-Verfahren. Die beiden daraus resultierenden Lösungsalgorithmen sind in MATLAB[®] als M-Files implementiert und kommen in den weiteren Untersuchungen zum Einsatz. Es ist zu klären, ob beide Algorithmen dieselben Lösungen liefern.

Das beschriebene Modell eines homogenen Stichabgangs vereinfacht sich massiv durch Verlegen aller Leitungsquerglieder an den Abgangsanzang [9], [10]. Dies führt auch zu einer deutlich einfacheren mathematischen Beschreibung durch ein nunmehr lineares Gleichungssystem. Die Lastmodellierung ermöglicht dabei zwei Berechnungsmethoden. Die Annahme einer *symmetrischen* Last führt auf ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem, das mittels einer Ausgleichsrechnung gelöst wird. Die Prämisse einer *unsymmetrischen* Last ergibt ein elementar lösbares lineares Gleichungssystem. Die beiden Algorithmen zur Lösung des linearen Systems mit symmetrischer oder unsymmetrischer Last wurden bereits in [9], [10] als M-File unter MATLAB[®] implementiert und getestet.

Ein wesentlicher Aspekt dieser Dissertation ist ein Ergebnisvergleich der vier abgeleiteten Algorithmen zur Bestimmung der Erdschlussentfernung. Hierbei werden verschiedene Fehlerkonstellationen untersucht. Es soll geklärt werden, ob das vereinfachte Stichabgangsmodell auch praktisch verwendet werden kann und welcher Algorithmus bei welcher Fehlerkonstellation am sinnvollsten anzuwenden ist.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Beantwortung der Frage, ob Harmonische höherer Ordnung zur Bestimmung der Erdschlussentfernung erfolgreich einsetzbar sind. Die zunehmende Verzerrung von Netzspannung und -strom durch Oberschwingungen ist seit langem bekannt. Ursache sind vor allem Schaltungen der Leistungselektronik. Aus diesem Grund werden bei allen Untersuchungen neben der Grundschwingung auch die 5. und die 7. Harmonische betrachtet.

Die messtechnischen Untersuchungen erfolgten im Rahmen der Diplomarbeiten [10], [16] und der Studienarbeit [9] am Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern. Dieses bietet neben diversen Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik auch das Modell einer 24 km langen 20-kV-Freileitung, in die verschiedene Fehlerwiderstände an fünf unterschiedlichen Stellen eingebaut wurden. Als Messgrößen dienten die drei am Abgangsanzang auftretenden Leiter-Erdspannungen und Phasenströme sowie der Abgangssummenstrom, der separat erfasst wurde. Die Messgrößen wurden über Wandler einem 8-Kanal-Transientenrekorder zugeführt, der von einem Laptop direkt angesteuert und ausgelesen wurde. In den aufgebauten Fehlerszenarien kamen verschiedene Fehlerorte, -widerstände und Restnetzgrößen sowohl im Netz mit isoliertem Sternpunkt als auch im gelöschten Netz zum Tragen.

Ferner wurden auch Fehlerkonstellationen auf Ringleitungen hergestellt und mit den Algorithmen ausgewertet. Der Vorteil gegenüber den gängigen, auf zweiseitigen Messungen basierenden Verfahren (siehe 1.2), wäre das Ausreichen einer einseitigen Messung.

Insgesamt wurden 480 Datensätze erhoben, denen jeweils ein Fehlerszenario entspricht.

Für Harmonische höherer Ordnung kann das gelöschte Netz in sehr guter Näherung als Netz mit isoliertem Sternpunkt betrachtet werden [6], [23]. Dieser bekannte Aspekt wird theoretisch

untersucht. Praktisch wird geprüft, ob die vorgestellten Algorithmen unter Benutzung der Oberschwingungen in beiden Netzformen zur Bestimmung der Erdschlussentfernung einsetzbar sind.

Die Erdschlussrichtungsbestimmung wird mit den derzeit bekannten Relais und Verfahren bereits sehr gut gelöst. Die Anwendung der abgeleiteten Algorithmen auf dieses Thema ist dennoch Gegenstand der Untersuchungen, um gegebenenfalls auf eine Vorortung verzichten zu können. Neben Messdaten erdschlussbehafteter Abgänge werden daher auch Messdaten erdschlussfreier Abgänge mit den Algorithmen ausgewertet. Es soll geklärt werden, ob basierend auf den Rechenergebnissen die eindeutige Identifikation eines Abgangs als erdschlussbehaftet oder erdschlussfrei möglich ist.

Im Mittelspannungsbereich sind auch gemischte Leitungen vorhanden. Aus diesem Grund wird das Verfahren theoretisch für den Einsatz auf inhomogenen Abgängen erweitert und seine praktische Brauchbarkeit durch die Auswertung von Messdaten untersucht.

1.2 Stand der Technik

Bekanntere Verfahren zur Bestimmung der Erdschlussentfernung betrachten entweder den stationären Erdschlussfall oder aber den von transienten Vorgängen begleiteten Erdschlusseintritt.

Im stationären Erdschlussfall wertet man die 50-Hz-Grundschiwingung aus, wobei meist weitere Maßnahmen wie Änderung der Erdschlusskompensation bzw. Wattreststromerhöhung zum Einsatz kommen. In [11] wird beispielsweise eine Methode beschrieben, wie sich durch das gezielte Herbeiführen eines Doppelerdschlusses die Fehlerentfernung ermitteln lässt.

Einige wesentliche Verfahren zur Bestimmung der Erdschlussentfernung werden kurz vorgestellt; gute Übersichten bieten [1], [23], [40].

1.2.1 Entfernungsbestimmung im stationären Erdschlussfall

1.2.1.1 Distanzschutzalgorithmus in klassischer und erweiterter Form [1], [32]

Die folgenden Ausführungen stammen aus [1], [32].

Das Verfahren basiert auf der Darstellung in symmetrischen Komponenten nach **Abb. 1.1**. Die Zuschaltung der Impedanz Z_{add} am Transformatorsternpunkt erhöht den Strom über die Fehlerstelle, so dass sich die Qualität der Ergebnisse verbessert. Das Verfahren lässt sich einfach implementieren, da es in seiner Grundform in handelsüblichen Distanzschutzgeräten bereits eingesetzt wird.

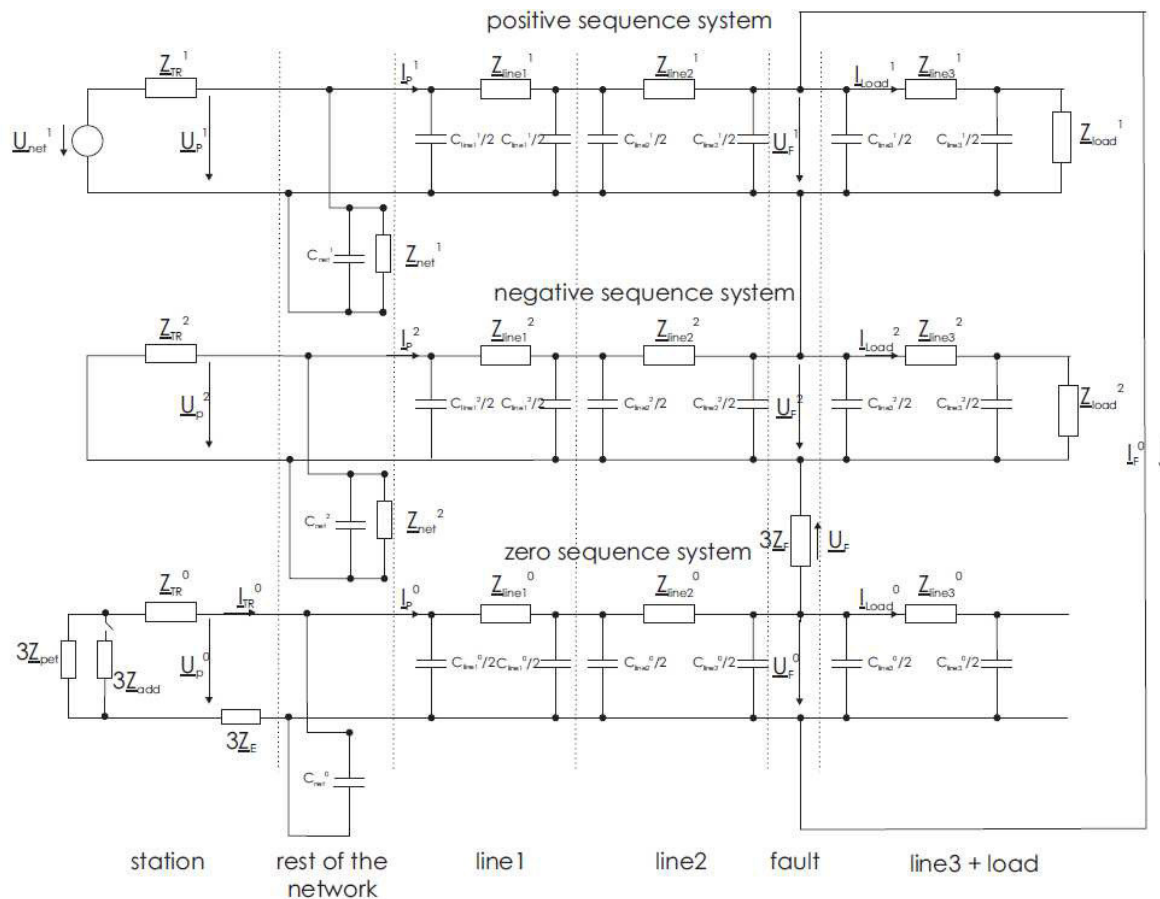


Abb. 1.1 Netzmodell in symmetrischen Komponenten [1]

$C_{\text{net}}^1, C_{\text{net}}^2, C_{\text{net}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkapazität des Restnetzes
$C_{\text{line1}}^1, C_{\text{line1}}^2, C_{\text{line1}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkapazität Leitung 1
$Z_{\text{line1}}^1, Z_{\text{line1}}^2, Z_{\text{line1}}^0$	Mit-, Gegen und Nullimpedanz Leitung 1
$Z_{\text{TR}}^1, Z_{\text{TR}}^2, Z_{\text{TR}}^0$	Mit-, Gegen und Nullimpedanz des Transformators
$I_{\text{P}}^1, I_{\text{P}}^2, I_{\text{P}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkomponente des Stromes am Messpunkt
$U_{\text{P}}^1, U_{\text{P}}^2, U_{\text{P}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkomponente der Spannung am Messpunkt
$U_{\text{F}}^1, U_{\text{F}}^2, U_{\text{F}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkomponente der Fehlerspannung
$I_{\text{load}}^1, I_{\text{load}}^2, I_{\text{load}}^0$	Mit-, Gegen und Nullkomponente des Laststromes
I_{TR}	Gemessener Strom am Transformatorsternpunkt
I_{F}	Fehlerstrom
Z_{add}	zuschaltbare Impedanz parallel zur Petersenspule
Z_{pet}	Impedanz der Petersenspule
Z_{F}	Fehlerimpedanz
Z_{E}	Erdimpedanz in der Messstation

Basierend auf **Abb. 1.1** wird in [1], [32] die Arbeitsgleichung (1.1) des verbesserten Distanzschutzalgorithmus für einen angenommenen Fehler im Leiter L1 abgeleitet:

$$\underline{Z}_{\text{line}}^1 = \frac{\underline{U}_{\text{L1}} - \underline{I}_{\text{F}} \cdot \underline{Z}_{\text{F}} - \underline{I}_{\text{TR}} \cdot \underline{Z}_{\text{E}}}{\underline{I}_{\text{L1}} + \underline{I}_{\Sigma} \cdot \underline{k}_0} = z^1 \cdot l \quad (1.1)$$

$\underline{U}_{\text{L1}}$ gemessene Leiter-Erd-Spannung der Phase L1

$\underline{I}_{\text{L1}}$ gemessener Strom in der Phase L1

\underline{z}^1 längenbezogene Mitimpedanz der Leitung

l Entfernung zur Fehlerstelle

\underline{I}_{Σ} Summenstrom am Messpunkt $\underline{I}_{\Sigma} = 3 \cdot \underline{I}_{\text{P}}^0$

\underline{k}_0 k-Faktor $\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{\text{Line}}^0}{\underline{Z}_{\text{Line}}^1} - 1 \right)$

Die in (1.1) unbekannte Fehlerimpedanz \underline{Z}_{F} wird als näherungsweise ohmsch angenommen und nach [1] mit (1.2) bestimmt

$$R_{\text{F}} = \text{real} \left(\frac{\underline{U}_{\text{L1}}}{\underline{I}_{\Sigma}} \right) \quad (1.2)$$

Die Bestimmung des in (1.1) unbekanntes Fehlerstroms \underline{I}_{F} erfolgt nach [1] aus (1.3).

$$\underline{I}_{\text{F}} = \underline{I}_{\Sigma} + \underline{I}_{\text{cap1}} \quad (1.3)$$

$\underline{I}_{\text{cap1}}$ kapazitiver Erdschlussstrom des erdschlussbetroffenen Abgangs

$\underline{I}_{\text{cap1}}$ ist im Summenstrom \underline{I}_{Σ} nicht enthalten und kann nach [1] z.B. Tabellen entnommen werden. Anmerkung: $\underline{I}_{\text{cap1}}$ ist in **Abb. 1.1** nicht dargestellt.

Der klassische Distanzschutzalgorithmus (1.4) ergibt sich aus (1.1) unter den Prämissen sehr geringer Erdungswiderstände $\underline{Z}_{\text{E}} \approx 0 \Omega$ und niederohmiger Fehlerwiderstände $\underline{Z}_{\text{F}} \approx 0 \Omega$.

$$\underline{Z}_{\text{line}}^1 = \frac{\underline{U}_{\text{L1}}}{\underline{I}_{\text{L1}} + \underline{I}_{\Sigma} \cdot \underline{k}_0} = z^1 \cdot l \quad (1.4)$$

1.2.1.2 Deltaverfahren zur Berechnung der Erdschlussdistanz [67]

Alle folgenden Ausführungen stammen aus [67].

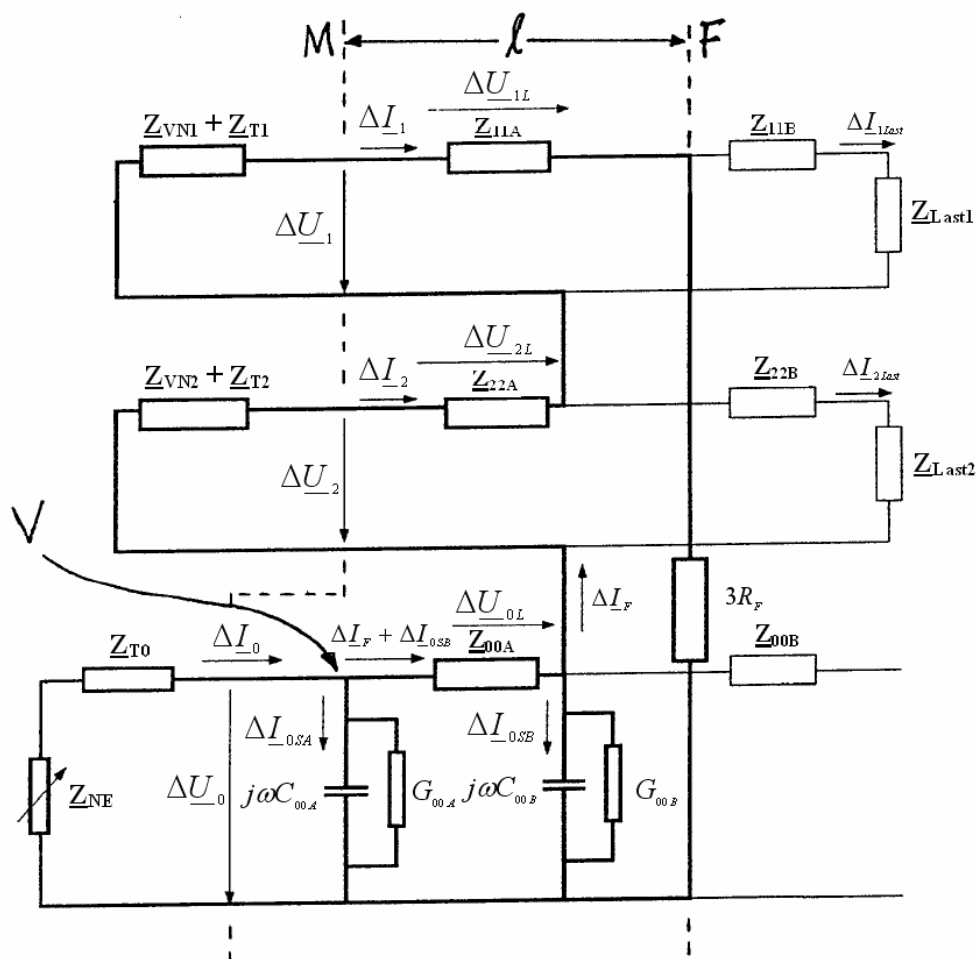


Abb. 1.2 Netzmodell in symmetrischen Komponenten [67]

Ausgangspunkt ist eine Darstellung der erdschlussbehafteten Leitung in symmetrischen Komponenten nach **Abb. 1.2** mit:

Z_{T1}, Z_{T2}, Z_{T0}	Transformatorvorimpedanzen
Z_{VN1}, Z_{VN2}	Netzvorimpedanzen
Z_{NE}	variable Impedanz der Petersen-Spule
$Z_{11A}, Z_{22A}, Z_{00A}$	Leitungsimpedanzen des Mit-, Gegen-, Nullsystems links vom Fehler
$Z_{11B}, Z_{22B}, Z_{00B}$	Leitungsimpedanzen des Mit-, Gegen-, Nullsystems rechts vom Fehler
Z_{Last1}, Z_{Last2}	Lastimpedanzen des Mit- und Gegensystems
G_{00A}, G_{00B}	Leitwerte des Nullsystems links bzw. rechts vom Fehler
C_{00A}, C_{00B}	Kapazität des Nullsystems links bzw. rechts vom Fehler
$\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$	Mit-, Gegen-, Nullkomponente der Spannungen an der Messstelle
$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$	Mit-, Gegen-, Nullkomponente der Ströme an der Messstelle
l	Distanz zwischen Messstelle und Fehlerort

Gemessen werden die drei Leiter-Erd-Spannungen und die drei Phasenströme, die in ihre symmetrischen Komponenten zerlegt werden. Die Messung von Nullspannung und -strom ist optional möglich. Das Verfahren basiert auf der Verwendung von Deltawerten, die durch Differenzbildung der Messwerte vor und nach einer Änderung der Erdschlusskompensation entstehen.

Aus **Abb. 1.2** entnimmt man folgende Maschengleichung:

$$\Delta \underline{U}_1 - \Delta \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{22A} + \Delta \underline{U}_2 - (\Delta \underline{I}_F + \Delta \underline{I}_{0SB}) \cdot \underline{Z}_{00A} + \Delta \underline{U}_0 - 3 \cdot R_F \cdot \Delta \underline{I}_F - \Delta \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{11A} = 0 \quad (1.5)$$

An der Verzweigung V gilt:

$$\Delta \underline{I}_0 = \Delta \underline{I}_F + \Delta \underline{I}_{0S} \quad (1.6)$$

mit

$$\Delta \underline{I}_{0S} = \Delta \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_{00\text{-Leitung}}$$

und der Annahme (1.7)

$$\Delta \underline{I}_{0SA} = \Delta \underline{I}_{0SB} = \frac{1}{2} \cdot \Delta \underline{I}_{0S} \quad (1.7)$$

ergibt sich:

$$\Delta \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_0 = (\Delta \underline{I}_1 + \Delta \underline{I}_2) \cdot \underline{z}_{11}' \cdot l + \left(\Delta \underline{I}_F + \frac{1}{2} \Delta \underline{I}_{0S} \right) \cdot \underline{z}_{00}' \cdot l + 3 \cdot R_F \cdot \Delta \underline{I}_F \quad (1.8)$$

Hierbei wurde noch verwendet:

$$\underline{Z}_{11A} = \underline{Z}_{22A} = \underline{z}_{11}' \cdot l$$

$$\underline{Z}_{00A} = \underline{z}_{00}' \cdot l$$

Division von (1.8) durch $\Delta \underline{I}_F$ und anschließende Bildung von Real- und Imaginärteil liefert die Berechnungsformeln für Fehlerdistanz und -widerstand.

$$l = \frac{\operatorname{Im} \left\{ \frac{\Delta \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_0}{\Delta \underline{I}_F} \right\}}{\operatorname{Im} \left\{ \frac{\Delta \underline{I}_1 + \Delta \underline{I}_2}{\Delta \underline{I}_F} \cdot \underline{z}_{11}' \right\} + \operatorname{Im} \left\{ \left(\frac{\Delta \underline{I}_{0S}}{2 \cdot \Delta \underline{I}_F} \right) \cdot \underline{z}_{00}' \right\}}$$

$$R_F = \frac{1}{3} \cdot \left(\operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_0}{\Delta \underline{I}_F} \right\} - \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta \underline{I}_1 + \Delta \underline{I}_2}{\Delta \underline{I}_F} \cdot \underline{z}_{11}' \right\} - \operatorname{Re} \left\{ \left(\frac{\Delta \underline{I}_{0S}}{2 \cdot \Delta \underline{I}_F} \right) \cdot \underline{z}_{00}' \right\} \right)$$

Da in die Berechnungsformeln für Fehlerdistanz und -widerstand ausschließlich Delta-Werte eingehen, werden Wandlerfehler stark unterdrückt. Aus diesem Grund ist auch der Einfluss verteilter Lasten relativ gering und das Verfahren funktioniert bei hochohmigen Fehlern gut. Nachteilig ist die Prämisse eines festen Fehlerwiderstandes im Zeitintervall zwischen den beiden Messwertentnahmen.

1.2.1.3 Entfernungsmessung im Ring [23], [24], [25]

Die Darstellungen stammen aus [23], [24], [25].

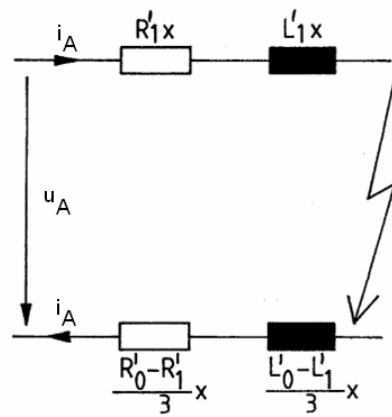
Das Verfahren basiert auf einer zusätzlichen Nullstrominjektion im Erdschlussfall. In seiner Grundform [23], [24] vernachlässigt es die Leitungsquerglieder und geht von einem niederohmigen Fehlerwiderstand aus. Unter diesen Voraussetzungen teilt sich im Erdschlussfall der Fehlerstrom proportional zu den Nulladmittanzen der beiden am Ring beteiligten Leitungsstücke auf. Durch Messung dieser beiden Teilströme an derselben Sammelschiene kann aus der bekannten Nullimpedanz der Ringleitung die Fehlerentfernung bestimmt werden. Das Verfahren ist relativ einfach umsetzbar und funktioniert sehr zuverlässig.

In [23], [25] wird eine Erweiterung dieses Verfahrens beschrieben, die auch Leitungsquerelemente und abgehende Stichleitungen berücksichtigt. Ferner entfallen die Voraussetzungen eines niederohmigen Erdschlusses und die zwingende Messung an der gleichen Sammelschiene.

1.2.2 Entfernungsbestimmung mittels Transienten [49]

Die Ausführungen stammen aus [49]; ein ähnliches Verfahren wird in [41] beschrieben.

Der Erdschlusseintritt wird von mittelfrequenten Ausgleichsvorgängen zwischen 75 Hz bis 5 kHz begleitet, die nach etwa einer viertel Periode abgeklungen sind. Diese Ausgleichsschwingungen sind Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen. Berechnungsgrundlage ist ein Leitungsmodell erster Ordnung, welches durch die Differentialgleichung (1.9) beschrieben wird.



Index A: Ausgleichsschwingung
 Index M: Messwert
 Index GL: Gleichanteil

Abb. 1.3 Leitungmodell erster Ordnung [49]

$$u_A = L \cdot \frac{di_A}{dt} + R \cdot i_A \tag{1.9}$$

Berücksichtigung eventueller Gleichanteile im Messsignal führt auf

$$u_M - u_{GL} = u_A = L \cdot \frac{di_A}{dt} + R \cdot (i_M - i_{GL}) \tag{1.10}$$

Integration von (1.10) über vier äquidistante Zeitintervalle liefert vier Integralgleichungen, von denen jeweils zwei voneinander subtrahiert werden. Wegen der äquidistanten Abtastung heben sich die Gleichanteile dabei auf.

$$\int_{t_1}^{t_2} u_M dt - \int_{t_3}^{t_4} u_M dt = L(i_2 - i_1 - i_4 + i_3) + R \int_{t_1}^{t_2} i_M dt - R \int_{t_3}^{t_4} i_M dt \tag{1.11}$$

$$\int_{t_2}^{t_3} u_M dt - \int_{t_4}^{t_5} u_M dt = L(i_3 - i_2 - i_5 + i_4) + R \int_{t_2}^{t_3} i_M dt - R \int_{t_4}^{t_5} i_M dt$$

Die in (1.11) auftretenden Integrale werden mit der Trapezregel gelöst. Es verbleibt ein lineares 2x2-System in den Unbekannten R und L der Fehlerschleife, das elementar gelöst werden kann.

2 Eigenschaften hochohmig geerdeter Netze

Bereits in der Einleitung wurde hervorgehoben, dass in gelöschten Netzen und in Netzen mit isoliertem Sternpunkt der einpolige Fehler nicht zur sofortigen Abschaltung führt und trotz anstehendem Erdschluss der Weiterbetrieb möglich ist. Aus diesem Grund ist das Problem der Fehlerentfernungsmessung nicht zeitkritisch im Bereich von Sekunden oder Minuten. Dies ist einer der grundlegenden Unterschiede zum Distanzschutz, der als Kurzschlusschutz im Millisekundenbereich Aussagen über die Fehlerentfernung liefern muss.

Im Folgenden werden zwei für das weitere Vorgehen wesentliche Eigenschaften hochohmig geerdeter Netze genauer beleuchtet. Sehr gute Darstellungen - auch über die transienten Vorgänge beim Erdschlusseintritt - findet man in [23], [26].

2.1 Verschiebung der Leiter-Erd-Spannungen im Erdschlussfall

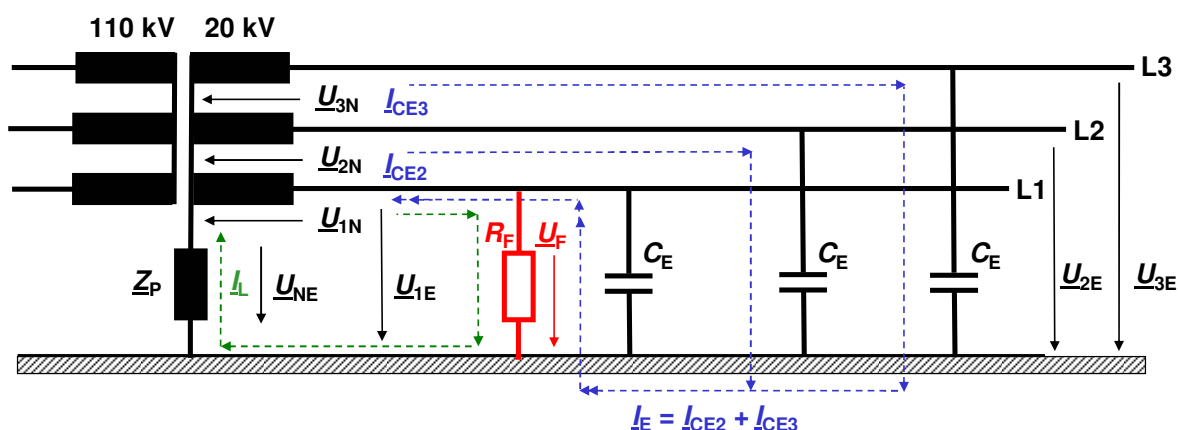


Abb. 2.1 Gelöschtes Netz im Erdschlussfall

Den Sachverhalt verdeutlicht **Abb. 2.1** genauer. Durch den in der Phase L1 angenommenen satten Erdschluss mit dem Fehlerwiderstand $R_F \approx 0 \Omega$ bricht die Leiter-Erd-Spannung \underline{U}_{1E} nahezu völlig zusammen. Der Transformatorsternpunkt - und damit die Verlagerungsspannung \underline{U}_{NE} - nimmt das Strangpotential $-\underline{U}_{1N}$ gegen Erde an. Infolgedessen steigen auch die Leiter-Erd-Spannungen \underline{U}_{2E} , \underline{U}_{3E} der beiden gesunden Phasen auf den Wert der verketteten Spannung. Diese Spannungserhöhung birgt die Gefahr eines Doppel- oder Mehrfacherdschlusses, wenn weitere vorgeschädigte Anlagenteile durchschlagen.

Im Erdschlussfall sind der Zusammenbruch von \underline{U}_{1E} einerseits und der Anstieg der Leiter-Erd-Spannungen \underline{U}_{2E} , \underline{U}_{3E} andererseits jedoch auch von der Fehlerspannung $\underline{U}_F = R_F \cdot I_F$ abhängig. Beide Effekte werden daher bei nicht satten Erdschlüssen mit $R_F \gg 0 \Omega$ sowohl von R_F als auch vom Fehlerstrom I_F bestimmt. Insbesondere führt ein großer Fehlerwiderstand nicht mehr zu merklichen Spannungsverlagerungen, wodurch Erdschlusserkennung und -ortung deutlich erschwert werden.

2.2 Strominjektion am Erdschlussfußpunkt

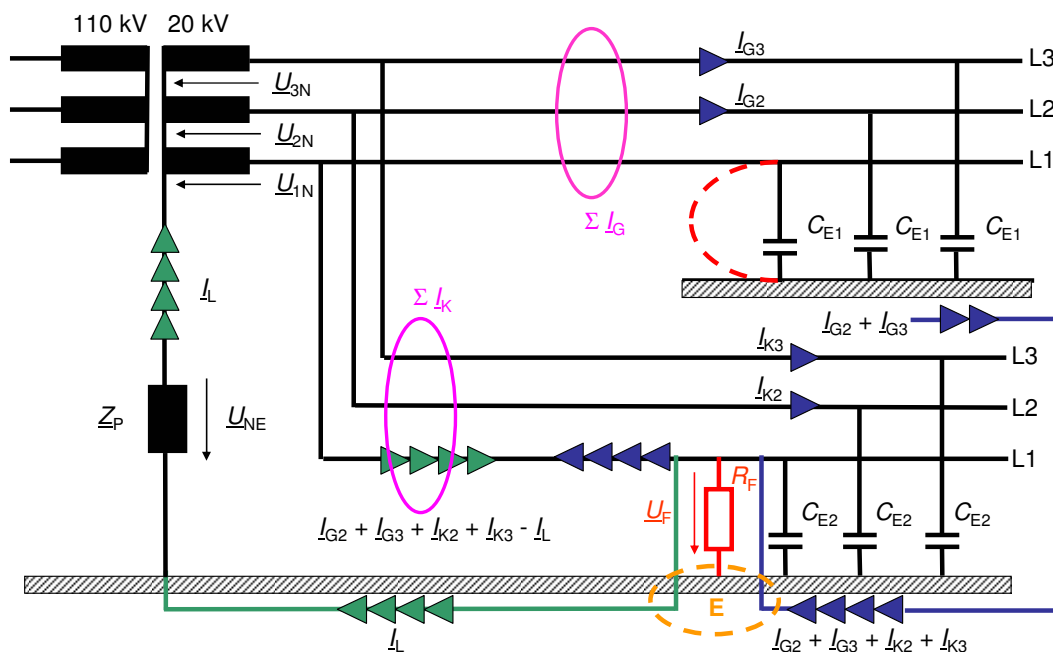


Abb. 2.2 Gelöstes Netz mit zwei Abgängen im Erdschlussfall

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in **Abb. 2.2** das fehlerfreie Restnetz im oberen Stichabgang konzentriert. Am Erdschlussfußpunkt E kommt es zu einer Strominjektion in die fehlerbehaftete Phase L1. Diese Strominjektion setzt sich wie folgt zusammen:

- (1) dem Erdschlussstrom $\Sigma I_G = I_{G2} + I_{G3}$ des gesunden Restnetzes. Dessen Leiter-Erd-Kapazitäten und die Spannungsebene bestimmen die Größe dieses Stroms.
- (2) dem Erdschlussstromanteil $I_{K2} + I_{K3}$ des erdschlussbehafteten Abgangs selber. Dieser Eigenanteil ist vernachlässigbar, wenn die Leiter-Erd-Kapazitäten des gesunden Restnetzes deutlich größer sind als die des fehlerbetroffenen Abgangs. Im umgekehrten Fall eines großen Eigenanteils bei kleinem Restnetz ist eine Erdschlussortung sehr problematisch.
- (3) dem Löschstrom I_L im gelöschten Netz. Im Netz mit isoliertem Sternpunkt ist $I_L = 0$.

Für die Summenstrommessung ΣI_K am Anfang des fehlerbehafteten Abgangs gilt nach **Abb. 2.2**

- (1) der Eigenanteil $I_{K2} + I_{K3}$ des erdschlussbetroffenen Abgangs am Erdschlussstrom wird *nicht* erfasst. Beide Teilströme passieren den Summenstrommesser zweimal in entgegengesetzter Richtung, so dass sie sich bei der Summation herausheben.
- (2) gemessen wird die externe Strominjektion $I_{G2} + I_{G3} - I_L$ also die Summe aus Erdschlussstrom des gesunden Restnetzes und Löschstrom. In einem Netz mit isoliertem Sternpunkt entspricht dies wegen $I_L = 0$ dem Erdschlussstrom des gesunden Restnetzes.
- (3) Vor allem (2) ist für das weitere Vorgehen von außerordentlicher Bedeutung: Die Stromsumme am erdschlussbehafteten Abgang bestimmt die externe Strominjektion eindeutig, ohne dass Topologie, konkrete Beschaffenheit des gesunden Restnetzes oder die aktuelle Höhe des Löschstroms bekannt sein müssen.

3 Entwicklung eines Leitungsmodells des homogenen Stichabgangs

Im Folgenden wird das elektrotechnische Modell als Grundtopologie für das weitere Vorgehen spezifiziert. Basis ist der mit einer Last abgeschlossene, homogene Stichabgang. Homogen bedeutet, dass zunächst einheitliches Leitermaterial vorausgesetzt wird.

3.1 Modell des fehlerfreien Stichabgangs

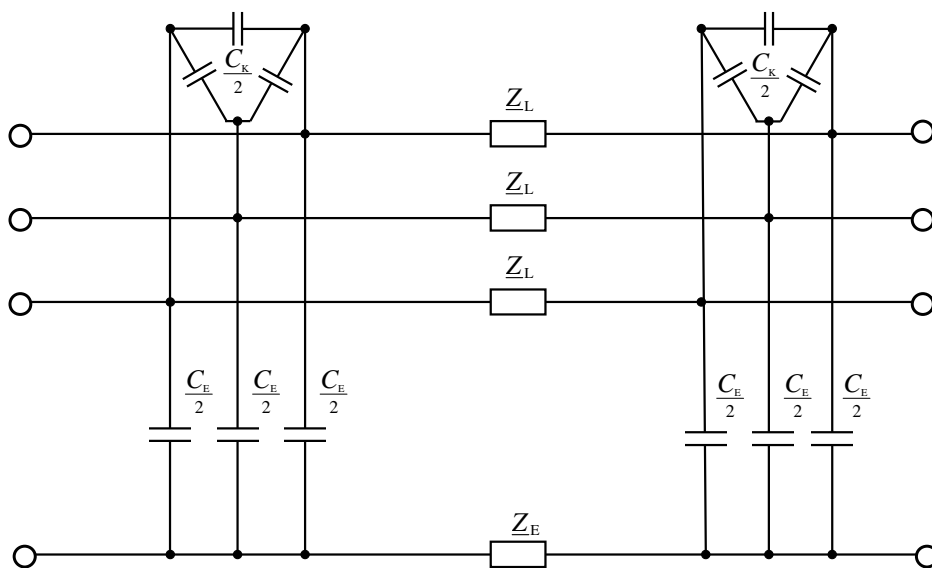


Abb. 3.1 Fehlerfreier Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung

Die Modellbasis ist in **Abb. 3.1** dargestellt. Es handelt sich um ein dreiphasiges Π -Glied, bei dem die Leiter-Erd-Kapazitäten C_E und die Koppelkapazitäten C_K hälftig auf Leitungsanfang und -ende verteilt sind. Kennzeichnend ist, dass die Koppelinduktivitäten in eine äquivalente Erdimpedanz Z_E umgerechnet werden. Da Leitungsdaten gewöhnlich in Form symmetrischer Komponenten vorliegen, sind diese zunächst gemäß **Tabelle 3.1** in die Elemente der äquivalenten Vier-Leiter-Ersatzschaltung umzurechnen. Die Umrechnungsformeln stammen aus [54], [85].

Tabelle 3.1 Zusammenhang zwischen den symmetrischen Komponenten und den Elementen des Vier-Leiter-Modells nach [54], [85]

symmetrische Komponenten		Vier-Leiter-Modell	
Mitimpedanz:	Z_M	Leiterimpedanz:	$Z_L = Z_M$
Nullimpedanz:	Z_0	Erdimpedanz:	$Z_E = \frac{Z_0 - Z_M}{3}$
Kapazität des Nullsystems:	C_0	Leiter-Erd-Kapazität:	$C_E = C_0$
Betriebskapazität:	C_B	Koppelkapazität:	$C_K = \frac{C_B - C_0}{3}$

3.2 Modell des erdschlussbehafteten Stichabgangs

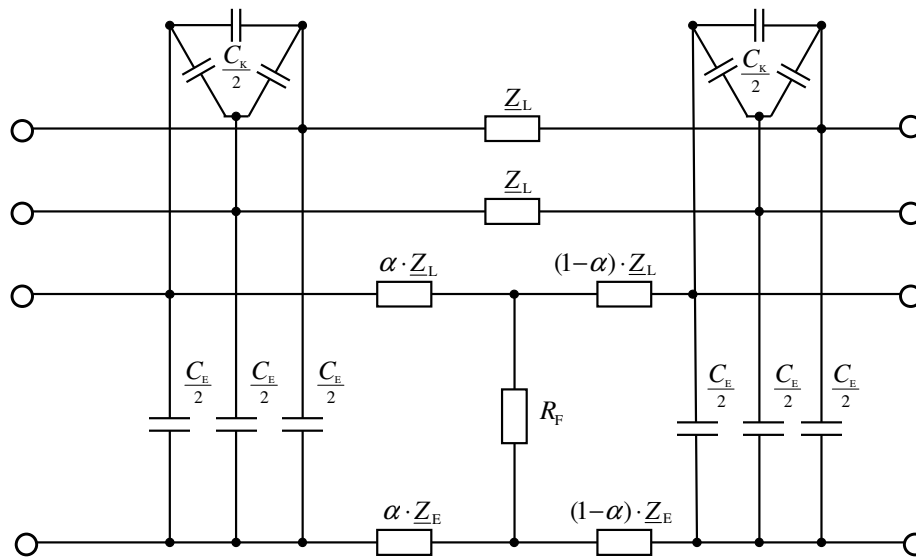


Abb. 3.2 Stichabgang mit Erdschluss als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung

In **Abb. 3.2** ist die Erweiterung des gesunden Abgangs um einen Erdschluss dargestellt, der durch den reellen Fehlerwiderstand R_F repräsentiert wird. Der Erdschlussfußpunkt teilt dabei die Erdimpedanz Z_E in zwei Anteile; analog wird auch die Längsimpedanz Z_L der Leitung entsprechend aufgeteilt. Der Fehlerentfernungsparameter α wird in 3.3.2 genauer beschrieben. Die Annahme eines reellen Fehlerwiderstandes begründet sich mit der Tatsache, dass Erd- oder Kurzschlüsse in Freileitungsnetzen häufig mit einem Lichtbogen einhergehen, dessen Widerstand nichtlinear aber reell ist. Kabel sind im stationären Erdschlussfall in der Regel bereits durchgeschlagen, so dass der Fehlerwiderstand relativ niederohmig bleibt [23].

3.3 Modell des erdschlussbehafteten Stichabgangs in vollständiger Beschaltung

In Erweiterung zu **Abb. 3.2** ist der erdschlussbehaftete Abgang in **Abb. 3.3** nunmehr vollständig beschaltet und stellt insofern die Basistopologie für die weiteren Untersuchungen dar. Die farblich hervorgehobenen Elemente werden im Folgenden kurz beleuchtet.

3.3.1 Die Messgrößen am Abgangsanfang

In **Abb. 3.3** sind die verwendeten Messgrößen grün markiert. Es handelt sich um:

- die drei Leiter-Erd-Spannungen U_{1E} , U_{2E} , U_{3E}
- die drei Phasenströme I_1 , I_2 , I_3
- den Abgangssummenstrom I_S

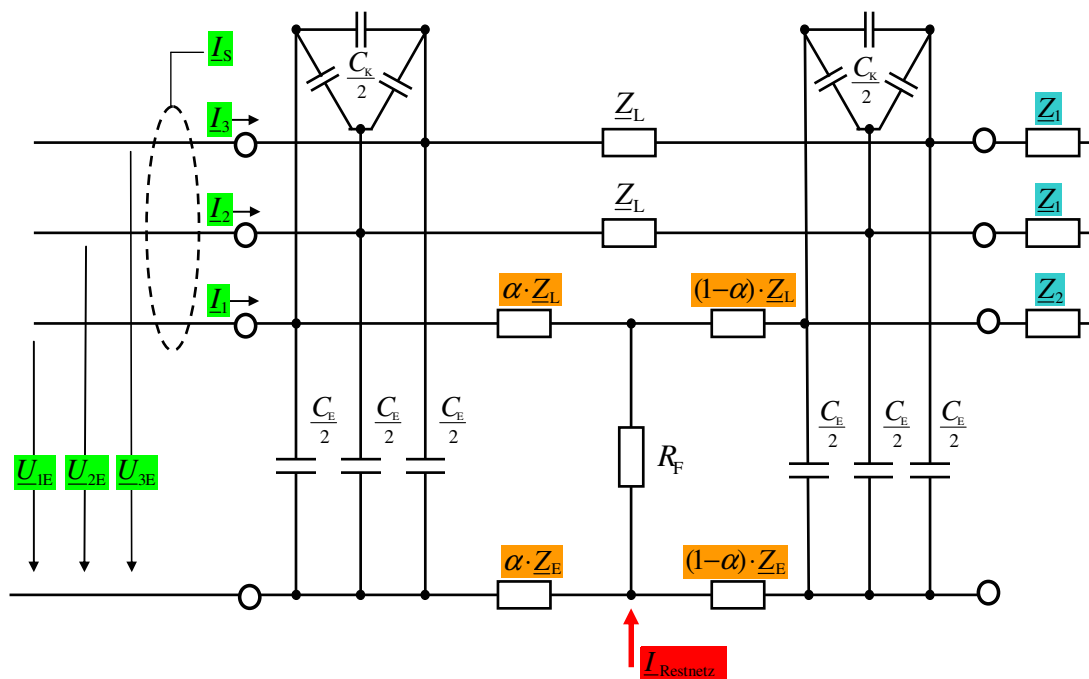


Abb. 3.3 Stichabgang mit Erdschluss in vollständiger Beschaltung

Der Abgangssummenstrom I_S lässt sich theoretisch aus der Summe der Phasenströme berechnen. Da die beteiligten Wandler jedoch nie exakt baugleich sind, fällt der Fehler in der berechneten Stromsumme deutlicher aus als bei ihrer echten Messung mittels Kabelumbauwandler. Der Phasenwinkel des Summenstroms hat nach 6.8 Einfluss auf die Ergebnisse der Erdschlussentfernungsbestimmung. Auch namhafte Hersteller von Erdschlussrichtungsrelais [6], [77] empfehlen zur winkelgetreuen Summenstromerfassung die Verwendung eines Kabelumbauwandlers, der an einem optionalen, hochempfindlichen Erdstromeingang des Schutzgerätes anzuschließen ist.

3.3.2 Der Fehlerentfernungsparameter α

Der in **Abb. 3.3** dargestellte Fehlerentfernungsparameter α dient dazu, den Fehlerwiderstand R_F entlang der betrachteten Leitung zu verschieben. Dabei muss α eine reelle Zahl sein, die der Nebenbedingung $0 \leq \alpha \leq 1$ gehorcht, wobei $\alpha = 0$ einem Fehler direkt am Abgangsbeginn links und $\alpha = 1$ einem Fehler am Abgangsende rechts entspricht. Die Bestimmung dieses Fehlerentfernungsparameters α ist letztlich das Ziel.

3.3.3 Die Strominjektion des fehlerfreien Restnetzes am Erdschlussfußpunkt

Diese Strominjektion I_{Restnetz} ist in **Abb. 3.3** rot eingetragen. Ihr Zustandekommen wurde bereits in 2.2 diskutiert.

3.3.4 Die unsymmetrische Lastmodellierung

Prinzipiell ist es zunächst möglich, die Drehstromlast (blau in **Abb. 3.3**) symmetrisch oder unsymmetrisch zu modellieren. In [9], [10], [16] wurden auf beiden Lastmodellen basierende Ansätze zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung messtechnisch am Netz-Kraftwerksmodell (5.1) untersucht. Diese linearen Ansätze beruhen auf den Kirchhoffschen Gesetzen und liefern jeweils sechs komplexe Gleichungen. Aus diesen lassen sich neben drei nicht tabellierten Zweigströmen die unbekannt GröÙen jedes Verfahrens der **Tabelle 3.2** bestimmen. Während in den Verfahren 1 und 2 die Anzahl der Unbekannten mit der Anzahl der Gleichungen übereinstimmt, ist das lineare Gleichungssystem in 3 überbestimmt und nur durch eine Ausgleichsrechnung zu lösen.

Tabelle 3.2 Untersuchte Verfahren zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung basierend auf symmetrischer bzw. unsymmetrischer Lastmodellierung

	Verfahren zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung	unbekannte GröÙen	Ergebnisse für α
1	Ansatz aus [16] mit symmetrischer Last \underline{Z}	$\alpha, R_F, \underline{Z}$	unbrauchbar
2	Verfahren aus Kap. 4.2.2 mit unsymmetrischer Last $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$	$\alpha, R_F, \underline{Z}_1, \underline{Z}_2$	gut
3	Verfahren aus Kap. 4.2.3 mit symmetrischer Last und Ausgleichsrechnung	$\alpha, R_F, \underline{Z}$	teilweise gut

Aus **Tabelle 3.2** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Die *unsymmetrische* Lastmodellierung in Verbindung mit dem eindeutig lösbaren linearen Gleichungssystem (Verfahren 2) führt zu guten Ergebnissen.
- (2) Die *symmetrische* Lastmodellierung führt nur im Rahmen einer Ausgleichsrechnung (Verfahren 3) zu brauchbaren Ergebnissen. Sie ist in einem eindeutig lösbaren linearen Gleichungssystem (Ansatz 1) unbrauchbar.

Ansatz 1 zeigt deutlich, dass nicht jedes plausibel erscheinende elektrotechnische Modell, das mathematisch beschreibbar und lösbar ist, auch praktisch eingesetzt werden kann.

Die experimentell begründete Notwendigkeit einer *unsymmetrischen* Lastmodellierung im Basismodell der **Abb. 3.3** wird im Folgenden auch theoretisch untermauert. Der erdschlussfreie Normalbetrieb mit symmetrischer Drehstromlast \underline{Z}_A und symmetrischen Leiter-Erd-Kapazitäten C_E ist in **Abb. 3.4** dargestellt. Aufgrund der Symmetrie lässt sich nach einer Dreieck-Stern-Umwandlung von \underline{Z}_A eine symmetrische Last \underline{Z} angeben, die zum ursprünglichen Lastmodell äquivalent ist und die Leiter-Erd-Kapazitäten enthält.

Im Erdschlussfall nach **Abb. 3.5** wird die Leiter-Erd-Kapazität der fehlerbehafteten Phase kurzgeschlossen, so dass eine Asymmetrie eintritt. Die Drehstromlast \underline{Z}_A bleibt auch im Erdschlussfall symmetrisch und kann mittels Dreieck-Stern-Transformation in eine ebenfalls symmetrische Sternschaltung überführt werden. Die Verrechnung der symmetrischen Lastimpedanzen mit den unsymmetrischen Leiter-Erd-Kapazitäten führt zu einer insgesamt unsymmetrischen Last entsprechend **Abb. 3.5** bzw. **Abb. 3.3**.

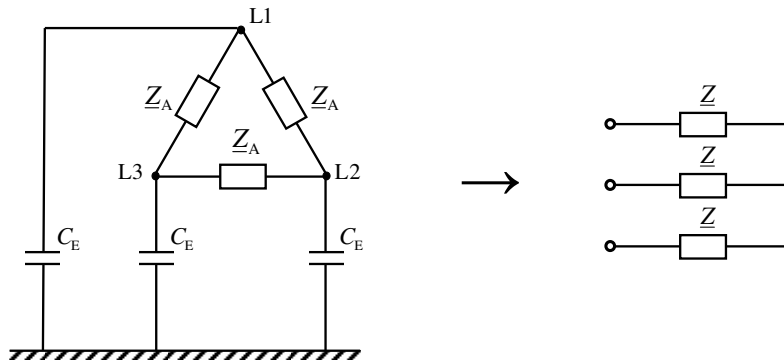


Abb. 3.4 Symmetrische Last im fehlerfreien Normalbetrieb;
links: symmetrische Lastimpedanz \underline{Z}_A in Dreieckschaltung
und symmetrische Leiter-Erd-Kapazitäten C_E ;
rechts: äquivalente symmetrische Last \underline{Z} in Sternschaltung

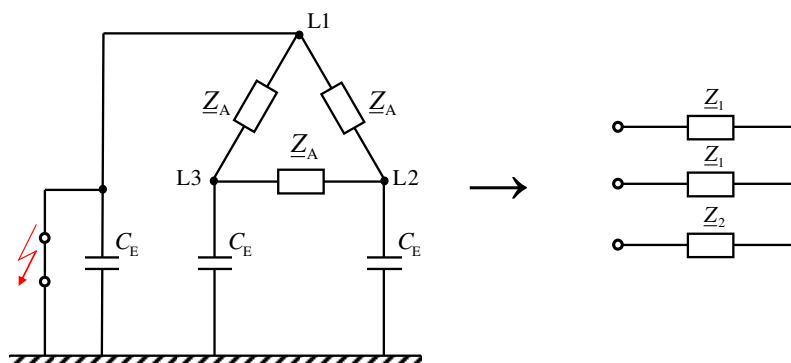


Abb. 3.5 Symmetrische Last im Erdschlussfall;
links: symmetrische Lastimpedanz \underline{Z}_A in Dreieckschaltung;
Kurzschluss der Leiter-Erd-Kapazität C_E der Phase L1
rechts: äquivalente unsymmetrische Last mit \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 in Sternschaltung

4 Mathematische Beschreibung des Stichabgangsmodells im Netz mit isoliertem Sternpunkt

Das in Kapitel 3 spezifizierte elektrotechnische Stichabgangsmodell benötigt eine mathematische Beschreibung. Mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze und unter Benutzung der komplexen Rechnung wird das zugehörige Gleichungssystem aufgestellt und gelöst. Dabei zeigt sich, dass dieses vollständige System nichtlinear ist. Die Einführung eines vereinfachten Stichabgangsmodells, das über ein lineares Gleichungssystem beschrieben wird, ermöglicht die Bestimmung der Erdschlussentfernung mit reduziertem Lösungsaufwand.

4.1 Analyse des vollständigen Stichabgangsmodells

4.1.1 Grundsatzbetrachtungen

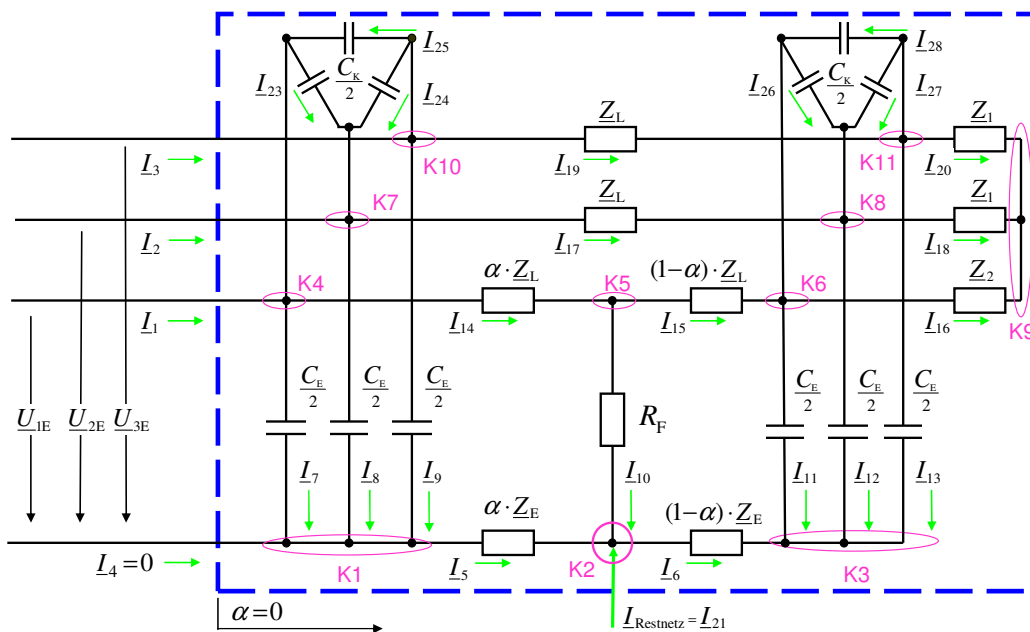


Abb. 4.1 Fehlerbehafteter Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung mit Festlegung aller Knoten und Zweigströme in vollständiger Darstellung

Die vollständige Modellbasis ist in **Abb. 4.1** dargestellt. In Vorbereitung auf die Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze sind alle Schaltungsknoten durchnummeriert und die Bezugsrichtungen der Spannungen und Zweigströme festgelegt. Eine Analyse der Schaltung ergibt folgendes Bild:

▪ **bekannte Größen:**

- drei Leiter-Erd-Spannungen \underline{U}_{1E} , \underline{U}_{2E} , \underline{U}_{3E} durch Messung
- drei Phasenströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 durch Messung
- der Abgangssummenstrom \underline{I}_S durch Messung oder Summation der Phasenströme
- die Leitungsparameter C_E , C_K , \underline{Z}_L , \underline{Z}_E bzw. die zugehörigen Beläge durch Berechnung aus den symmetrischen Komponenten nach **Tabelle 3.1**

- **unbekannte Größen:**
 - 23 komplexe Zweigströme ($I_5 \dots I_{21}, I_{23} \dots I_{28}$)
 - 2 komplexe Lastimpedanzen (Z_1, Z_2)
 - der reelle Entfernungsparmeter α
 - der reelle Fehlerwiderstand R_F
 - *insgesamt:* 25 komplexe und 2 reelle Unbekannte

- **Systemgleichungen nach Abb. 4.1:**
 - 11 Knotengleichungen für die Knoten K1 ... K11
 - 1 Knotengleichung ist systembedingt redundant und entfällt
 - 1 Knotengleichung kommt hinzu, da die Gesamtschaltung einen Knoten bildet¹
 - 15 Maschengleichungen; 3 Maschen aus der jeweils bekannten Leiter-Erd-Spannung und der zugeordneten Leiter-Erd-Kapazität werden mitgezählt, z. B. $\underline{U}_{1E} = I_7 * 2/j\omega C_E$
 - *insgesamt:* 26 komplexe Gleichungen

Da sich eine komplexe Größe stets in zwei reelle Anteile zerlegen lässt, stehen den 52 reellen Unbekannten auch 52 reelle Gleichungen gegenüber, so dass eine notwendige Bedingung zur eindeutigen Lösbarkeit erfüllt ist. Das aus **Abb. 4.1** resultierende Gleichungssystem wird im Rahmen dieser Grundsatzbetrachtungen *nicht* aufgestellt. Vielmehr wird im nächsten Abschnitt 4.1.2 das Basismodell nach **Abb. 4.1** diversen Vereinfachungen unterworfen, die mit einem erheblich einfacheren Gleichungssystem einhergehen.

4.1.2 Vereinfachung des vollständigen Stichabgangsmodells

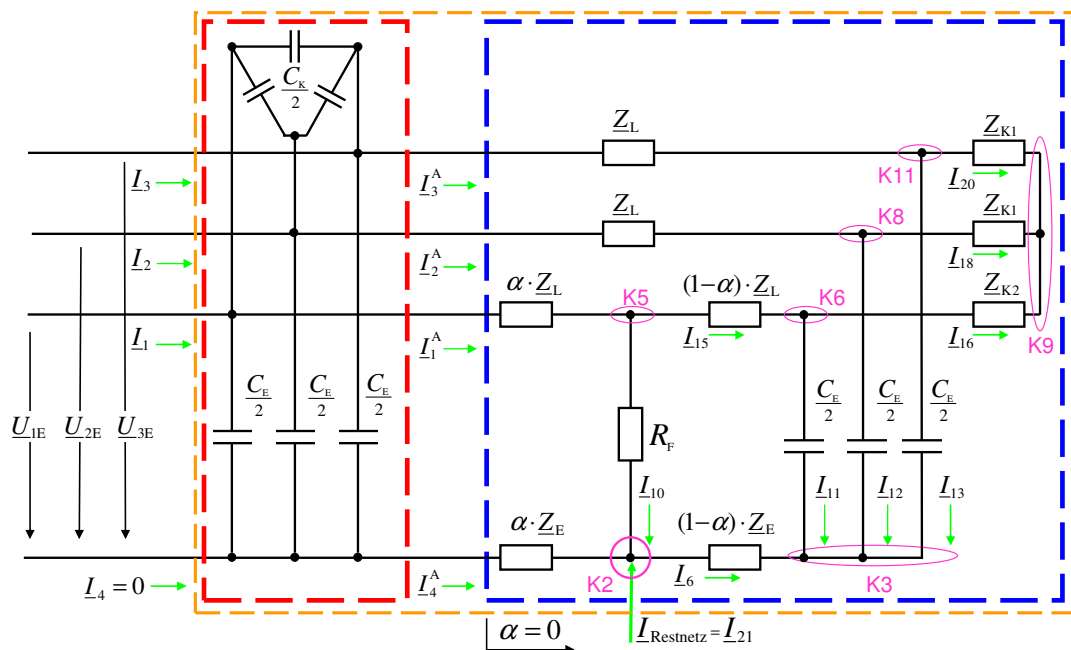


Abb. 4.2 Fehlerbehafteter Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung; Zerlegung der Gesamtschaltung (orange) in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk (rot) und zu analysierender Restschaltung (blau)

¹ Diese Knotengleichung dient nach 2.2 zur Berechnung der externen Strominjektion $I_{21} = -I_S$. Da I_{21} als unbekannte Größe zählt, muss auch diese Knotengleichung mitgezählt werden.

Die Vorüberlegungen in 4.1.1 führen zwangsläufig zu der Frage, wie man den Lösungsaufwand des vollständigen Systems verringern kann. Die Rückführung der Ausgangsschaltung in **Abb. 4.1** auf die völlig äquivalente reduzierte Darstellung in **Abb. 4.2** vollzieht sich in zwei Schritten:

Schritt 1: Ausgangspunkt ist das aus $\frac{1}{2} \cdot C_K$ und $\frac{1}{2} \cdot C_E$ bestehende Reaktanznetzwerk im rot eingerahmten Schaltungsteil der **Abb. 4.2**. Dieses Reaktanznetzwerk wird nach Anhang A1.1 durch die Transformationsmatrix T_{1b} beschrieben, die die Berechnung seiner Ausgangsgrößen aus den gemessenen Eingangsgrößen erlaubt. Aus A1.1 wird der Zusammenhang (A1.14b) übernommen

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^A \\ \underline{I}_2^A \\ \underline{I}_3^A \\ \underline{I}_4^A \\ \underline{U}_{1E}^A \\ \underline{U}_{2E}^A \\ \underline{U}_{3E}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{Y_{CK} + \frac{Y_{CE}}{2}}{2}\right) & \frac{Y_{CK}}{2} & \frac{Y_{CK}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{Y_{CK}}{2} & -\left(\frac{Y_{CK} + \frac{Y_{CE}}{2}}{2}\right) & \frac{Y_{CK}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{Y_{CK}}{2} & \frac{Y_{CK}}{2} & -\left(\frac{Y_{CK} + \frac{Y_{CE}}{2}}{2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{Y_{CE}}{2} & \frac{Y_{CE}}{2} & \frac{Y_{CE}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{U}_{1E} \\ \underline{U}_{2E} \\ \underline{U}_{3E} \end{pmatrix}$$

Vektor der Ausgangsgrößen
Systemmatrix T_{1b} des Übertragungsgliedes 1 mit $\frac{1}{2} \cdot C_K$ und $\frac{1}{2} \cdot C_E$
Vektor der Eingangsgrößen

(A1.14b)

Die Verwendung von (A1.14b) ermöglicht eine rechnerische Stromkorrektur, die schaltungstechnisch von dem rot eingerahmten Reaktanznetzwerk repräsentiert wird.

Schritt 2: Die lastseitigen Koppelkapazitäten werden dem unsymmetrischen Lastäquivalent zugeschlagen, dessen Impedanzen zur Kennzeichnung von $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ in $\underline{Z}_{K1}, \underline{Z}_{K2}$ umbenannt werden. Wenn das Gleichungssystem später gelöst ist, müssen die ermittelten Lastimpedanzen wieder von den Koppelkapazitäten befreit werden. Dieses Vorgehen ist im Anhang A.2.2, Schritt 15 detailliert beschrieben.

Die in den Schritten 1 und 2 dargestellten Maßnahmen reduzieren die noch zu analysierende Schaltung auf den in **Abb. 4.2** blau eingerahmten Teil; es ergibt sich das 14x14-System (4.1):

Maschengleichungen:

$$(M1) \quad \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E} = 0$$

$$(M2) \quad \underline{I}_{10} \cdot R_F + \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L = 0$$

$$(M3) \quad \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{2E} = 0$$

$$(M4) \quad \underline{I}_3^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{3E} = 0$$

$$(M5) \quad \underline{I}_{20} \cdot \underline{Z}_{K1} - \underline{I}_{18} \cdot \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} = 0$$

$$(M6) \quad \underline{I}_{18} \cdot \underline{Z}_{K1} - \underline{I}_{16} \cdot \underline{Z}_{K2} + \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} = 0$$

Knotengleichungen:

$$(K2) \quad \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6 = 0$$

$$(K3) \quad \underline{I}_6 + \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13} = 0$$

$$(K5) \quad \underline{I}_1^A - \underline{I}_{10} - \underline{I}_{15} = 0$$

$$(K6) \quad \underline{I}_{15} - \underline{I}_{11} - \underline{I}_{16} = 0$$

$$(K8) \quad \underline{I}_2^A - \underline{I}_{12} - \underline{I}_{18} = 0 \tag{4.1}$$

$$(K9) \quad \underline{I}_{16} + \underline{I}_{18} + \underline{I}_{20} = 0$$

$$(K11) \quad \underline{I}_3^A - \underline{I}_{13} - \underline{I}_{20} = 0$$

$$(K12) \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_{21} = 0$$

Die Knotengleichung (K12) kommt zustande, weil auch die orange umrahmte Gesamtschaltung in **Abb. 4.2** einen Knoten bildet. Da im sternpunktisolierten Netz kein Löschstrom fließt, gilt für den Strom im Erdrückleiter $\underline{I}_4 = 0$, so dass \underline{I}_4 in (K12) nicht auftritt.

4.1.3 Diskussion des Gleichungssystems und seiner Lösungsmöglichkeiten

Eine auf den ersten Blick nicht offensichtliche aber wesentliche Eigenschaft des Gleichungssystems (4.1) besteht in seiner Nichtlinearität. Diese rührt von den Maschengleichungen her, in denen einige Summanden Produkte unbekannter Größen sind. Beispielhaft wird (M2) angeführt:

$$(M2) \quad \underbrace{\underline{I}_{10} \cdot R_F}_1 + \underbrace{\underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E}_2 - \underbrace{\underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE}}_3 - \underbrace{\underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L}_4 = 0$$

Die Summanden 1, 2, 4 enthalten die nichtlinearen Anteile $\underline{I}_{10} \cdot R_F$ (Fehlertspannung), $\underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha)$ oder $\underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha)$; alle drei Ströme sowie α , R_F sind unbekannt.

Aufgrund der Nichtlinearität gestaltet sich die Lösung des komplexen 14x14-Systems (4.1) sehr aufwendig. Prinzipiell stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

- Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens
- Sukzessive Elimination der Variablen, indem man eine Gleichung nach einer Variablen auflöst und diese in den restlichen Gleichungen ersetzt. Im Idealfall führt dieser Eliminationsprozess auf *eine* geschlossen lösbare Gleichung mit nur *einer* Unbekannten.

4.1.3.1 Lösung mit dem Newton-Raphson-Verfahren

Das Newton-Raphson-Verfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme ist aus der Lastflussrechnung bekannt. Sehr gute Darstellungen und Beispiele finden sich in [20], [42]. Das konkrete Vorgehen bezogen auf das Gleichungssystem (4.1) ist in Anhang 3 detailliert dargestellt.

4.1.3.2 Lösung durch sukzessive Elimination der Variablen

Die Vorgehensweise ist in Anhang 2 im Detail beschrieben. Das System (4.1) wird dort auf eine kubische Gleichung im Fehlerentfernungsparameter α zurückgeführt. Aus Anhang 2, Schritt 10 und Schritt 11.3, wird die kubische Gleichung (A2.3) übernommen:

$$\alpha^3 \cdot \text{Im}\{\underline{H}_3 \cdot \underline{H}_2^*\} + \alpha^2 \cdot \text{Im}\{\underline{H}_1 \cdot \underline{H}_2^* + \underline{H}_3 \cdot \underline{H}_4^*\} + \alpha \cdot \text{Im}\{\underline{H}_1 \cdot \underline{H}_4^* + \underline{H}_2 \cdot \underline{H}_5^*\} + \text{Im}\{\underline{H}_4 \cdot \underline{H}_5^*\} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{H}_1 &= (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \cdot (\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E) + \underline{U}_{1E} \cdot (3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \\ \underline{H}_2 &= 3 \cdot \underline{I}_{21} \cdot \underline{Z}_E \\ \underline{H}_3 &= (3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \cdot (\underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L) \\ \underline{H}_4 &= -(\underline{U}_{1E} + \underline{U}_{2E} + \underline{U}_{3E}) - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \\ \underline{H}_5 &= \underline{U}_{1E} \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \end{aligned} \quad (\text{A2.3})$$

Die Größen \underline{H}_1 bis \underline{H}_5 sind bekannt, da sie sich aus Leitungsparametern, Messgrößen oder korrigierten Messgrößen zusammensetzen.

Aus der Mathematik ist der *Fundamentalsatz der Algebra* bekannt, der sinngemäß aussagt, dass ein Polynom n . Grades auch n komplexe Nullstellen hat. Übertragen auf die kubische Gleichung (A2.3) bedeutet dies, dass es für α immer exakt drei ggf. komplexe Lösungen gibt.

Speziell für Polynome mit *reellen* Koeffizienten gilt weiterhin, dass komplexe Lösungen immer als konjugiert komplexe Paare auftreten. Betrachtet man beide Aussagen zusammen, folgt ganz allgemein, dass Polynome mit reellen Koeffizienten ungeraden Grades mindestens eine reelle Nullstelle haben. Mathematisch exaktere Formulierungen und Beweise findet man in [12], [13], [59]. Der ungerade Polynomgrad von (A2.3) in Verbindung mit den reellen Polynomkoeffizienten garantiert daher die Existenz mindestens einer reellen Lösung für α .

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die drei Lösungen von (A2.3) nur in zwei Konstellationen auftreten können:

- (1) eine reelle und zwei konjugiert komplexe Wurzeln
- (2) drei reelle Wurzeln

Die späteren Auswertungen der Messdatensätze zeigen, dass Fall (2) auch praktisch auftritt, so dass sich die Frage stellt, wie man aus dem Lösungstripel die richtige Lösung für α erkennt. In Abschnitt 3.3.2 wurde für das zwingend reelle α die Nebenbedingung $0 \leq \alpha \leq 1$ angegeben. Bei den Auswertungen der Messdatensätze zeigt sich nun, dass immer die betragsmäßig kleinste, reelle Lösung die richtige ist. Die beiden anderen Lösungen, falls sie überhaupt reell sind, verletzen die Nebenbedingung $\alpha \in [0; 1]$ mit (teilweise negativen) Werten bis in den vierstelligen Bereich deutlich und sind mithin mathematisch korrekt jedoch physikalisch unsinnig. Daher bereitet die Auswahl des richtigen α aus dem Lösungstripel keine besondere Schwierigkeit.

4.1.4 Abschließende Betrachtungen zur Analyse des vollständigen Stichabgangsmodells

Obwohl zwei Lösungsmethoden im Rahmen dieser Dissertation ausgearbeitet und jeweils in einem eigenen Algorithmus umgesetzt wurden, findet im Folgenden nur noch die geschlossene Lösung der kubischen Gleichung (4.1.3.2) Verwendung.

Die Vorteile gegenüber dem Newton-Raphson-Verfahren liegen auf der Hand:

- es gibt keine potentiellen Konvergenzschwierigkeiten
- die Überlegungen zur Wahl eines geeigneten Startvektors entfallen
- man erhält alle Lösungen und eine Aussage über deren Anzahl

Hinzu kommt, dass die Lösung kubischer Gleichungen mit der Cardano-Formel geschlossen und verhältnismäßig einfach möglich ist; auch MATLAB[®] bietet hier elementare Lösungsmöglichkeiten ohne programmiertechnischen Aufwand. Aus diesen Gründen wird das Newton-Raphson-Verfahren nicht mehr weiter betrachtet. Vergleichsrechnungen (**Tabelle 4.1**) belegen, dass die betragsmäßig kleinste reelle Lösung der kubischen Gleichung und die Lösung des Newton-Raphson-Verfahrens identisch sind. Das Newton-Raphson-Verfahren kommt zum Tragen, wenn eine geschlossene Systemlösung nicht möglich oder zu aufwendig ist. Dies könnte zukünftige Modellerweiterungen betreffen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist das genaue Vorgehen zur Bestimmung der Erdschlussentfernung mit dem vollständigen Stichabgangsmodell in A.2.3 für die geschlossene Lösung und in A.3.6 für das Newton-Raphson-Verfahren jeweils in einem Flussdiagramm dargestellt.

Abschließend werden die mathematischen Aussagen des Abschnittes 4.1.3 durch einen Vergleich der geschlossenen Lösung mittels kubischer Gleichung und der iterativen Lösung nach Newton-Raphson praktisch untermauert. Zugrunde liegt ein Fehlerszenario im Netz mit isoliertem Sternpunkt, Fehlerwiderstand $R_F = 7,3 \Omega$ und Fehlerort $\alpha = 0,5$ (Leitungsmitte). Das gesunde Restnetz liefert etwa 54 A Erdschlussstrom. Hierzu zeigt **Tabelle 4.1** die mit den beiden Algorithmen

unter MATLAB[®] ermittelten Fehlerentfernungen α für die Grundschwingung sowie die 5. und 7. Harmonische. Der Newton-Raphson-Algorithmus benötigt jeweils drei Iterationen.

Tabelle 4.1 Vergleich der Lösungen mittels kubischer Gleichung und nach Newton-Raphson für das vollständige Stichabgangsmodell; Sollwert $\alpha = 0,5$

Ordnungszahl der Harmonischen	Lösungsverfahren	
	kubische Gleichung nach 4.1.3.2	Newton-Raphson nach 4.1.3.1
1	0,51945 -2.776,1 - 2.212,8i -2.776,1 + 2.212,8i	0,51945
5	0,49391 -115,64 -84,479	0,49391
7	0,47697 -59,009 -41,698	0,47699

Aus **Tabelle 4.1** ergeben sich folgende Aussagen:

- (1) Generell liefert die kubische Gleichung drei Lösungen.
- (2) Hierbei treten beide in 4.1.3.2 beschriebene Konstellationen hinsichtlich reeller und konjugiert komplexer Wurzeln auf.
- (3) Sofern die kubische Gleichung drei reelle Ergebnisse liefert, ist das betragsmäßig kleinste Ergebnis die gesuchte Lösung.
- (4) Der Newton-Raphson-Algorithmus liefert nur ein Ergebnis; dieses ist mit der betragsmäßig kleinsten reellen Lösung aus (3) identisch.

Zu Punkt (2) lässt sich hinsichtlich der Darstellung in **Tabelle 4.1** anmerken, dass Grundschwingungsauswertungen in der Regel zu einer reellen und einem konjugiert komplexen Lösungspaar führen, während sich aus Oberschwingungsauswertungen meist drei reelle Lösungen ergeben.

4.2 Analyse eines vereinfachten Stichabgangsmodells [9], [10]

Die Modelle und Rechenverfahren dieses Abschnitts wurden im Rahmen von [9], [10] an der TU Kaiserslautern entwickelt. Aus Gründen der Vollständigkeit werden das Vorgehen und die wesentlichen Ergebnisse noch einmal dargestellt. Aus den Untersuchungen resultieren zwei Rechenalgorithmen, die ab Kapitel 6 mit der vollständigen Lösung aus 4.1 verglichen werden.

4.2.1 Grundsatzbetrachtungen

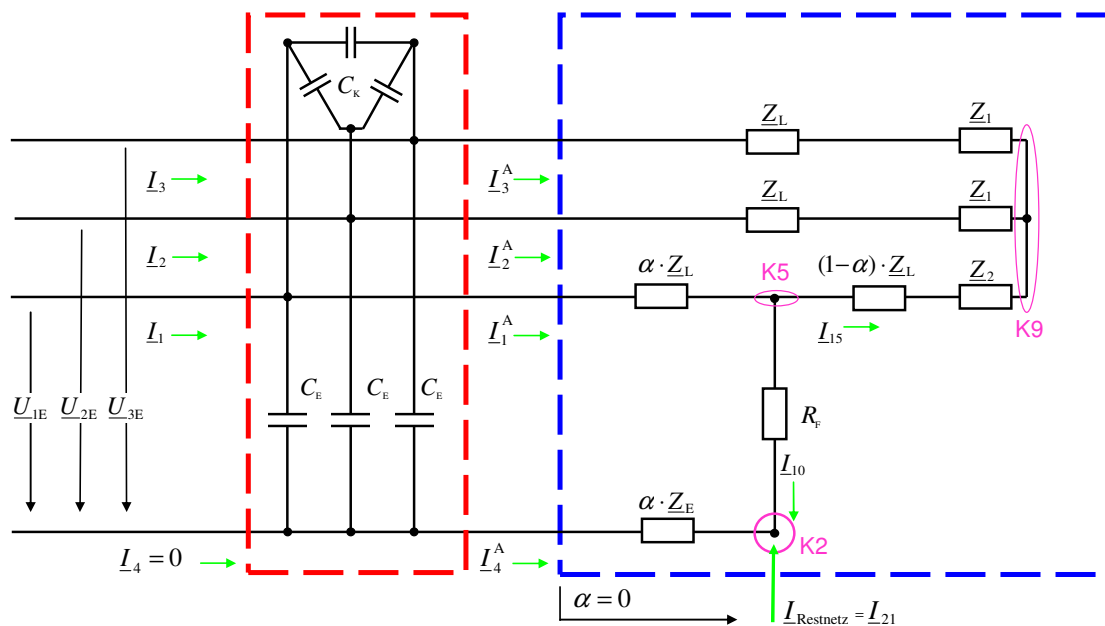


Abb. 4.3 Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit unsymmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk (rot) und zu analysierender Restschaltung (blau)

Der Grundgedanke zur Vereinfachung des vollständigen Modells nach **Abb. 4.1** basiert auf der Überlegung, dass sich in einem elektrischen Netzwerk sehr hochohmige Impedanzen entfernen oder verlegen lassen, ohne dass sich Stromflüsse oder Spannungsabfälle wesentlich ändern. Aus **Tabelle 5.2** wird ersichtlich, dass die Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten mit hohen Impedanzen des zwei- bzw. dreistelligen $k\Omega$ -Bereiches einhergehen und damit um ein vielfaches hochohmiger sind als alle anderen Schaltungselemente in **Abb. 4.1**. Eine Verlegung der Kapazitäten $\frac{1}{2} \cdot C_K$ und $\frac{1}{2} \cdot C_E$ vom lastseitigen Schaltungsteil an den Abgangsanfang verursacht daher nur einen kleinen Fehler und führt zur **Abb. 4.3**, in der die lastseitigen Querkapazitäten $\frac{1}{2} \cdot C_K$ und $\frac{1}{2} \cdot C_E$ den vorderen zugeschlagen werden. Neben der blau eingerahmten, stark vereinfachten Restschaltung, ergibt sich das rot eingerahmte Stromkorrekturglied. Seine Systemmatrix T_{1a} enthält die vollen Werte $1 \cdot C_K$ und $1 \cdot C_E$ und wird im Anhang 1 detailliert abgeleitet.

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^A \\ \underline{I}_2^A \\ \underline{I}_3^A \\ \underline{I}_4^A \\ \underline{U}_{1E}^A \\ \underline{U}_{2E}^A \\ \underline{U}_{3E}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) & \underline{Y}_{CK} & \underline{Y}_{CK} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \underline{Y}_{CK} & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) & \underline{Y}_{CK} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \underline{Y}_{CK} & \underline{Y}_{CK} & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \underline{Y}_{CE} & \underline{Y}_{CE} & \underline{Y}_{CE} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{U}_{1E} \\ \underline{U}_{2E} \\ \underline{U}_{3E} \end{pmatrix}$$

Vektor der
Ausgangsgrößen

Systemmatrix T_{1a} des
Übertragungsgliedes 1
mit C_K und C_E

Vektor der
Eingangsgrößen

(A1.14a)

Nach einer Messwertkorrektur mit (A1.14a) genügt demnach die Analyse der blau eingerahmten Restschaltung. Diese ist auf zwei verschiedene Arten möglich.

4.2.2 Vereinfachtes Stichabgangsmodell mit unsymmetrischer Last

Die Analyse der blau eingerahmten Restschaltung erfolgt detailliert in Anhang 4. Es ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\{\underline{U}_{1E}\} \\ \text{Im}\{\underline{U}_{1E}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \text{Re}\{\underline{I}_{10}\} \\ \text{Im}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \text{Im}\{\underline{I}_{10}\} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ R_F \end{pmatrix} \quad (\text{A4.3})$$

Als Lösung dieses reellen, linearen 2x2-Systems ergeben sich der Fehlerentfernungsparameter α und der Fehlerwiderstand R_F . Eine Berechnung der Lastimpedanzen ist mit (A4.4) möglich.

4.2.3 Vereinfachtes Stichabgangsmodell mit symmetrischer Last

In 3.3.4 wurde erläutert, warum dem Basismodell eine *unsymmetrische* Last zugrunde liegt. Die Überlegungen in 4.2.1 eröffnen nun die Möglichkeit einer *symmetrischen* Lastmodellierung im Rahmen einer Ausgleichsrechnung. Ausgangspunkt ist wiederum **Abb. 4.3**, welche durch die zusätzliche Nebenbedingung $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}$ eine symmetrische Last erhält (**Abb. A5.1**). Da beide Schaltungen topologisch völlig identisch sind, ändern sich auch Anzahl und Struktur der beschreibenden Knoten- und Maschengleichungen nicht. Der Wegfall einer komplexen Lastimpedanz führt mithin auf ein überbestimmtes aber lineares Gleichungssystem.

Entsprechend der Ausführungen in 4.2.1 kann auch **Abb. A5.1** als Kettenschaltung des Stromkorrekturgliedes T_{1a} und der blau eingerahmten Restschaltung verstanden werden, deren Analyse im Anhang 5 erfolgt. Es ergibt sich das 6x4-System (A5.9):

$$\begin{pmatrix} \text{Re} \left\{ \frac{U_{2E} - U_{3E}}{I_2^A - I_3^A} - Z_L \right\} \\ \text{Im} \left\{ \frac{U_{2E} - U_{3E}}{I_2^A - I_3^A} - Z_L \right\} \\ \text{Re} \left\{ \frac{U_{1E} - U_{2E}}{I_{15} - I_2^A} - Z_L \right\} \\ \text{Im} \left\{ \frac{U_{1E} - U_{2E}}{I_{15} - I_2^A} - Z_L \right\} \\ \text{Re}\{U_{1E}\} \\ \text{Im}\{U_{1E}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \text{Re} \left\{ \frac{Z_L \cdot (I_1^A - I_{15})}{I_{15} - I_2^A} \right\} & 0 & 1 & 0 \\ \text{Im} \left\{ \frac{Z_L \cdot (I_1^A - I_{15})}{I_{15} - I_2^A} \right\} & 0 & 0 & 1 \\ \text{Re}\{I_1^A \cdot Z_L - I_4^A \cdot Z_E\} & \text{Re}\{I_{10}\} & 0 & 0 \\ \text{Im}\{I_1^A \cdot Z_L - I_4^A \cdot Z_E\} & \text{Im}\{I_{10}\} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ R_F \\ \text{Re}\{Z\} \\ \text{Im}\{Z\} \end{pmatrix} \quad (\text{A5.9})$$

Die Lösung von (A5.9) ist im Rahmen einer Ausgleichsrechnung elementar möglich; auch in MATLAB[®] sind entsprechende Lösungsverfahren implementiert und direkt anwendbar. Der Lösungsvektor ist optimal im Gaußschen Sinne; seine Komponenten minimieren die Summe der quadratischen Abweichungen, die mit der Überbestimmung einhergehen.

4.2.4 Übersicht der Gleichungssysteme des vereinfachten Stichabgangsmodells

Die Dimension der Gleichungssysteme aus 4.2.2 und 4.2.3 ergibt sich aus **Tabelle 4.2**.

Tabelle 4.2 Anzahl komplexer und reeller Gleichungen und Unbekannter im linearen Näherungsmodell abhängig von der Lastmodellierung

Lastmodell	Gleichungssystem nach Netzwerkanalyse			vorgenommene Aufspaltung des Gleichungssystems				Ergebnisgrößen und Systemdimension		
	Gleichungen		Unbekannte	Gleichungen		Unbekannte		Z_1, Z_2	α, R_F	$\alpha, R_F, \text{Re}\{Z\}, \text{Im}\{Z\}$
	komplex	komplex	reell	komplex	reell	komplex	reell	komplex	reell	reell
unsymmetrisch	3	2	2	2	2	2	2	2x2 (A4.4)	2x2 (A4.3)	-
symmetrisch	3	1	2	-	6	-	4	-	-	6x4 (A5.9)

Anzumerken ist, dass im Fall unsymmetrischer Lastmodellierung nach Anhang 4, Schritt 4, bereits eine der drei komplexen Gleichungen die beiden reellen Unbekannten α und R_F eindeutig bestimmt. Dies entspricht der Lösung des reellen linearen 2x2-Systems (A4.3).

4.3 Zusammenfassung zur mathematischen Beschreibung des Stichabgangsmodells

▪ vollständiges Stichabgangsmodell

Nach 4.1.1 mündet die Analyse des fehlerbehafteten Stichabgangs basierend auf dem vollständigen II-Glied in einem nichtlinearen Gleichungssystem mit 26 komplexen Gleichungen. Um den Lösungsaufwand zu verringern, wird in 4.1.2 eine reduzierte - aber völlig äquivalente - Darstellung dieser vollständigen Beschreibung abgeleitet, die auf die Kettenschaltung des Stromkorrekturgliedes T_{1b} (A1.14b) und einer Restschaltung führt. Letztere wird durch das nichtlineare, komplexe 14x14-System (4.1) beschrieben. Das System (4.1) wird in Anhang 2, Schritt 1 und Schritt 2 auf das nichtlineare, komplexe 7x7-System (A3.1) zurückgeführt. Die Lösung von (A3.1) erfolgt entweder direkt mit dem Newton-Raphson-Algorithmus (Anhang 3) oder durch Rückführung auf die kubische Gleichung (A2.3) in α (Anhang 2), die dann ihrerseits zu lösen ist.

▪ lineares Näherungsmodell

Die Verlegung der lastseitigen Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten an den Abgangsanzfang führt auf lineare Gleichungssysteme, deren Dimension nach **Tabelle 4.2** durch die Art der Lastmodellierung bestimmt wird.

Für das lineare Näherungsmodell werden zwei Lösungsmöglichkeiten vorgestellt.

Die Annahme einer

- (1) unsymmetrischen Last führt auf das lineare 2x2-System (A4.3)
- (2) exakt symmetrischen Last führt auf das überbestimmte, lineare 6x4-System (A5.9)

Alle abgeleiteten Lösungsverfahren sind in **Abb. 4.4** nochmals zusammengestellt. Jede Berechnungsmethode kann neben der Grundschwingung auch für die höheren Harmonischen verwendet werden. Um die Rechenergebnisse der Algorithmen später tabellarisch vergleichen zu können, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit folgende Kurznamen eingeführt:

LGS_U: lineare Näherung mit *unsymmetrischer* Last nach 4.2.2

LGS_S: lineare Näherung mit *symmetrischer* Last und Ausgleichsrechnung nach 4.2.3

KUB_U: vollständige Lösung mittels kubischer Gleichung nach 4.1.3.2

Nach den Ausführungen in 4.1.4 wird der Newton-Raphson-Algorithmus nicht mehr weiter verwendet, so dass die Vergabe eines Kurznamens entbehrlich ist.

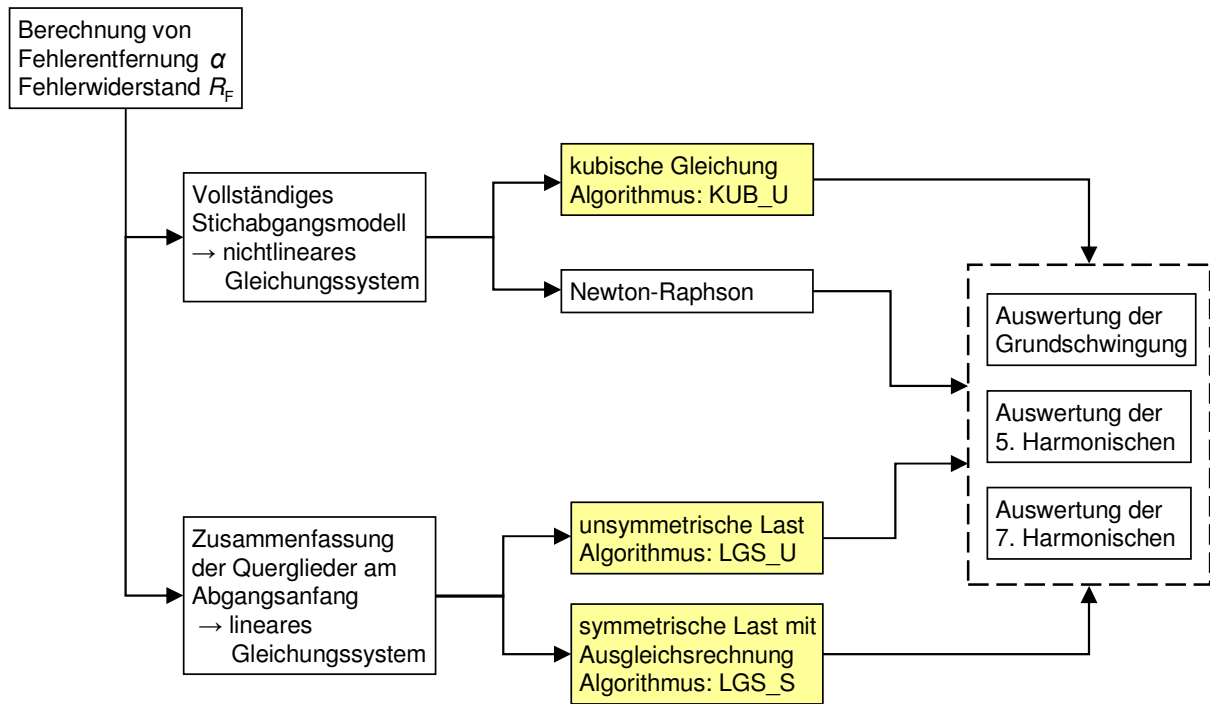


Abb. 4.4 Übersicht der Lösungsverfahren; gelb: weiter untersuchte Algorithmen

5 Aufbau des Messplatzes und Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung des Messplatzes auf Basis der Darstellungen in [9], [10], [16], [85]. Im Mittelpunkt der Versuchsreihen steht das Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern. Hier wurden im Rahmen der Diplomarbeiten [10], [16] und der Studienarbeit [9] die in den Kapiteln 6, 7 und 8 beschriebenen Fehlerszenarien hergestellt und entsprechend der Ausführungen in 3.3.1 messtechnisch erfasst.

Darüber hinaus wird in diesem Kapitel untersucht, welche Harmonische sich neben der Grundschwingung zur Versuchsdurchführung eignen.

5.1 Das Netz-Kraftwerksmodell [85]

Das Netz-Kraftwerksmodell befindet sich in einem Laborsaal der TU Kaiserslautern. Es enthält Modelle verschiedener Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik, z.B.

- Energieerzeuger (2 Generatoren, 1 Verbundnetz)
- Energieübertrager (Transformatoren, Freileitungen, Schaltanlagen)
- Energieverbraucher (Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten, Asynchronmotor)
- Netz- und Generatorschutzeinrichtungen

Nach **Abb. 5.1** sind diese Betriebsmittel in Schaltschränken untergebracht, jedoch sind die Anschlüsse von außen zugänglich, so dass sich alle erforderlichen Verschaltungen herstellen lassen.



Abb. 5.1 Das Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern

Das Netz-Kraftwerksmodell arbeitet mit der Netzspannung 220 V. Alle Spannungen, Ströme und Impedanzen werden entsprechend **Tabelle 5.1** in den 20-kV-Bereich umgerechnet. Die Messgeräte in der Anlage besitzen zwei Skalen und zeigen Spannungen und Ströme sowohl im Originalwert als auch auf den 20-kV-Mittelspannungsbereich umgerechnet an. Diese Umrechnungsfaktoren müssen bei der Bildung der Strom- und Spannungszeiger in den Algorithmen benutzt werden, da alle Rechnungen sich auf die 20-kV-Mittelspannungsebene beziehen. Besonders zu beachten ist, dass im 220-V-Bereich real eingebaute Impedanzen (Fehlerwiderstand, Lastimpedanz) im 20-kV-Mittelspannungsbereich entsprechend **Tabelle 5.1** verkleinert erscheinen.

Tabelle 5.1 Umrechnungsfaktoren des Netz-Kraftwerksmodells

	220-V-Ebene	20-kV-Ebene	Faktor 220 V → 20 kV	Faktor 20 kV → 220 V
Spannung	220 V	20 kV	90,91	0,011
Strom	1 A	100 A	100,00	0,010
Impedanz	220 Ω	200 Ω	0,91	1,100

5.2 Physikalische Realisierung des homogenen Stichabgangs und seiner Beschaltung

Im Folgenden wird die physikalische Realisierung des homogenen Stichabgangs nach 3.3 als Basis der Versuchsreihen am Netz-Kraftwerksmodell beschrieben.

5.2.1 Die erdschlussbehaftete Leitung

Als erdschlussbehaftete Leitung dient das Modell einer 24 km langen Freileitung, welche im Netz-Kraftwerksmodell enthalten ist. Anschlusstechnisch ist der Einbau des Fehlerwiderstandes R_F an fünf unterschiedlichen Stellen der Leitung möglich bei $\alpha = 0, 1/3, 1/2, 2/3, 1$ entsprechend einer Fehlerentfernung von 0 km, 8 km, 12 km, 16 km, 24 km.

Tabelle 5.2 Kennwerte der Freileitungen des Netz-Kraftwerksmodells im 20-kV-Bereich

symmetrische Komponenten [85]	Vier-Leiter-Modell [9], [10]
$Z_M = (9 + j 8,184) \Omega$	$Z_L = (9 + j 8,184) \Omega$
$Z_0 = (13,104 + j 26,904) \Omega$	$Z_E = (1,368 + j 6,240) \Omega$
$C_0 = 115,2 \text{ nF}$	$C_E = 115,2 \text{ nF}$ $Z_{CE} \approx 28 \text{ k}\Omega$
$C_B = 184,8 \text{ nF}$	$C_K = 23,2 \text{ nF}$ $Z_{CK} \approx 137 \text{ k}\Omega$

5.2.2 Der Fehlerwiderstand R_F

Tabelle 5.3 verwendete *ohmsche* Fehlerwiderstände im 220-V- und 20-kV-Bereich

R_F Bezug 220 V	0 Ω	8 Ω	50 Ω	125 Ω	616 Ω
R_F Bezug 20 kV	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω

5.2.3 Die Last

In den Versuchsreihen kommen drei verschiedene Lasten zum Einsatz:

- (1) ein symmetrischer Drehstromwiderstand (Standardlast);
 $R_L = 750 \Omega$ (220-V-Ebene) entsprechend $R_L = 681,8 \Omega$ (20-kV-Ebene)
 - Pro Strang werden dazu drei ohmsche Widerstände zu je 250 Ω in Reihe geschaltet. Jeder Widerstand hat eine Toleranz von 2% entsprechend 5 Ω . Daraus resultiert pro Strang eine maximale Abweichung vom Sollwert um $\pm 15 \Omega$.
 - Dem Lastwiderstand von $R_L = 750 \Omega$ entspricht etwa der leistungsstärkste, regulär verbaute Ortsnetztransformator 20 kV / 0,4 kV mit $S_N = 630$ kVA.
- (2) eine 6-Puls-Brückenschaltung (B6R-Last) zur Erhöhung des Oberschwingungsgehaltes
- (3) ein Leerlauf, der das Verhalten bei sehr niedriger Last nachstellt

5.2.4 Die externe Strominjektion

In den Versuchsreihen kommen verschiedene Varianten zum Einsatz:

(1) parallele Leitungen

Das Netz-Kraftwerksmodell beinhaltet neben der in 5.2.1 genannten 20-kV-Freileitung zwei weitere Freileitungen gleichen Typs, die jeweils etwa 1,3 A Erdschlussstrom liefern. Nach DIN VDE 0228 Teil 2 ist für ein 20-kV-Netz mit isoliertem Sternpunkt ein maximaler Erdschlussstrom von etwa 35 A zulässig. Daraus resultiert, dass die externe Strominjektion durch Verwendung einer Kondensatorbank deutlich erhöht werden muss, um realistische Bedingungen zu erhalten.

(2) Kondensatorbänke

Über eine der parallelen Leitungen kann eine externe Kondensatorbank zur Erhöhung des Erdschlussstroms zugeschaltet werden.

- Kondensatorbank 1 mit 0,47 μF ($\approx 6,5$ A Erdschlussstrom; $p = 5$)
- Kondensatorbank 2 mit 4 μF (≈ 55 A Erdschlussstrom; $p = 36$)

Die fiktive Größe p entspricht der Anzahl paralleler Leitungen des Netz-Kraftwerksmodells, die den gleichen Erdschlussstrom liefern würden wie die jeweilige Kondensatorbank. Eine parallele Leitung liefert nach (1) $\approx 1,3$ A Erdschlussstrom. Insofern ist p eine Maßzahl für die Größe des gesunden Restnetzes und dessen Erdschlussstrom.

(3) Petersen-Spule

Das Netz-Kraftwerksmodell beinhaltet eine Tauchkernspule mit einem maximalen Löschstrom von etwa 8 A. In Verbindung mit der Kondensatorbank 1 kann so ein gelöschtes Netz mit $\approx 10\%$ Überkompensation aufgebaut werden.

5.3 Aufbau des Messplatzes

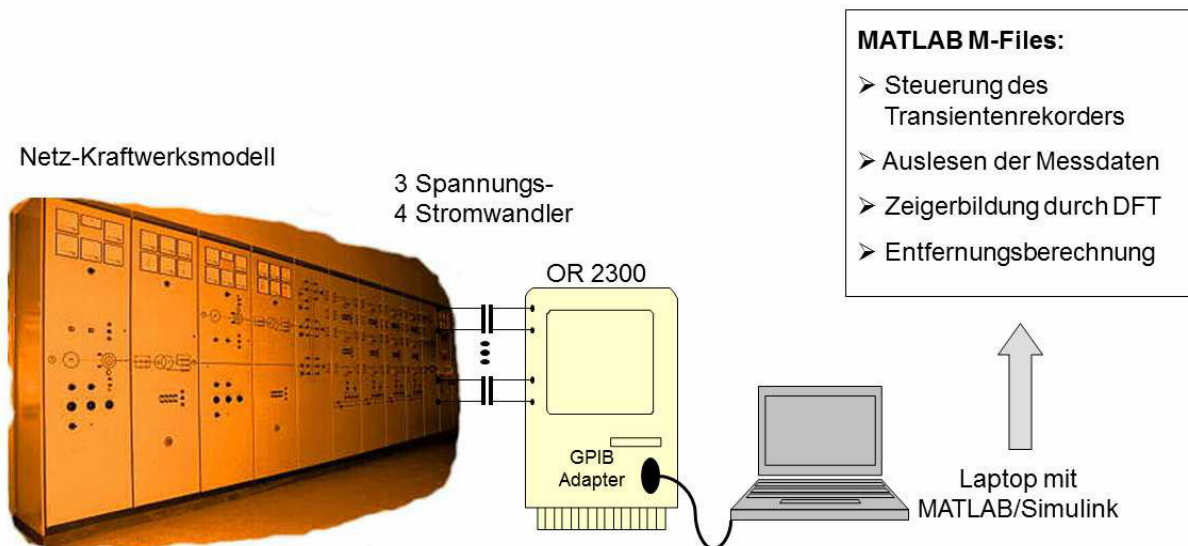


Abb. 5.2 Übersichtsbild zum Aufbau der gesamten Versuchsanordnung

5.3.1 Transientenrekorder [16]

Wie in **Abb. 5.2** dargestellt, erfolgt die messtechnische Erfassung der elektrischen Größen mit einem Transientenrekorder OR2300 der Firma Yokogawa. Das Gerät besitzt acht isolierte Eingänge, die von 14 bit A/D-Wandlern aufgelöst und synchron abgetastet werden. Die Abtastfrequenz beträgt $f_T = 50$ kHz. Zur Kommunikation mit externen Geräten, z.B. einem Laptop, verfügt der OR2300 über eine GPIB-Schnittstelle (General Purpose Interface Bus).

5.3.2 GPIB-Adapter [16]

Der OR2300 besitzt zur Kommunikation mit Peripheriegeräten lediglich eine GPIB-Schnittstelle. Um per USB von einem Laptop aus mit dem OR2300 kommunizieren zu können, wird ein USB-GPIB-Adapter der Firma PROLOGIX verwendet. Dieser setzt das GPIB-Interface des Transientenrekorders physikalisch in eine USB-Schnittstelle um, die dann wie eine virtuelle serielle Schnittstelle genutzt wird. Die Konfiguration dieses Adapters und der USB-Schnittstelle am Laptop sind im Detail kompliziert und Gegenstand der Diplomarbeit [16].

5.3.3 Spannungsmessungen [16]

Die Messungen der drei Leiter-Erd-Spannungen am Netz-Kraftwerksmodell erfolgen über selbst gebaute Spannungswandler der TU Kaiserslautern mit folgenden Kenndaten:

Tabelle 5.4 Betriebswerte Spannungswandler

U_{prim}	U_{sek}	i_{gemessen}	Klasse
0 V - 400 V	0 V - 5 V	59,56	0,5

5.3.4 Strommessungen [16]

Gemessen werden die drei Phasenströme und der Abgangssummenstrom mit Wandlern der Gosgen GmbH nach **Tabelle 5.5**. Da der Transientenrekorder nur Spannungsmessungen ermöglicht, werden die vier Stromwandler sekundärseitig mit je einem Shunt kurzgeschlossen. Der Stromfluss durch diesen bekannten Widerstand ist dem gemessenen Spannungsabfall proportional.

Tabelle 5.5 Betriebswerte Stromwandler

	U_{max}	f_N	S_N	Nennbürde R_N	i	Klasse
3 Phasenstromwandler	650 V	50 Hz	5 VA	0,2 Ω	1,0	0,2
1 Summenstromwandler	650 V	50 Hz	5 VA	0,2 Ω	2,1	0,2

Tabelle 5.6 Betriebswerte Messshunts

	I_{max}	R	Klasse
3 Phasenstromwandler	20 A	0,01 Ω	0,5
1 Summenstromwandler	20 A	2,2 Ω	1

5.3.5 Auswertung mit dem Laptop

Benutzt wird ein handelsüblicher Laptop mit dem Betriebssystem Windows[®], der über das GPIB-Interface mit dem OR2300 verbunden ist. Die Steuerung des Transientenrekorders und das Auslesen der Messdaten erfolgt direkt aus MATLAB[®] in der Version R2011b. Die dazu erforderlichen M-Files sind ebenfalls Bestandteil der Diplomarbeit [16]. Nach jeder Messung werden die zugehörigen sieben Abtastwertereihen (entsprechend den sieben Messgrößen) vom OR2300 an das Notebook übertragen und dort als binäre MATLAB[®]-Formatfiles abgelegt. Diese können jederzeit in MATLAB[®] zur Zeigerbildung importiert werden.

5.4 Zeigerbildung und Ordnungszahl k der betrachteten Harmonischen

5.4.1 Bildung der komplexen Zeiger

Die Bildung der komplexen Zeiger erfolgt am Anfang der verschiedenen Algorithmen zur Erdschlussentfernungsmessung in einem MATLAB[®]-M-File. Verwendet wird eine DFT mit Rechteckfensterung. Die mathematischen Grundlagen sind in [61], [62], [81] sehr gut beschrieben, alle aufgeführten Zusammenhänge stammen von dort.

$$X_{kC} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos(k \cdot n \cdot \Theta) \quad (5.1)$$

$$X_{kS} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin(k \cdot n \cdot \Theta) \quad (5.2)$$

$$\underline{X}_k = X_{kC} - jX_{kS} \quad (5.3)$$

Darin bezeichnen:

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$	Vielfaches der Grundfrequenz bzw. Ordnungszahl der Harmonischen
\underline{X}_k	komplexer Zeiger der k . Harmonischen
f_T	die Abtastfrequenz
n	die Laufvariable der diskreten Abtastzeitpunkte
$N = \frac{f_T}{50 \text{ Hz}}$	die Anzahl der Abtastwerte pro Periode
$\Theta = \frac{2\pi}{N}$	den Abtastwinkel

Die Indizes C und S in (5.1), (5.2), (5.3) stehen für Cosinus und Sinus; ein Hinweis darauf, dass diese Terme durch Aufspaltung der komplexen Exponentialfunktion in der DFT-Definition entstanden sind.

5.4.2 Ordnungszahl k der zu untersuchenden Harmonischen

5.4.2.1 Die Europeanorm EN 50160

Die Europeanorm EN 50160 „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“ setzt im Sinne der Spannungsqualität verschiedene Grenzwerte hinsichtlich Flicker, Spannungsschwankungen, Netzfrequenz und -unsymmetrie fest. Sie ist auch maßgebend für Amplitudengrenzwerte von höheren Harmonischen im Nieder- und Mittelspannungsnetz. Das Beurteilungskriterium im Mittelspannungsbereich ist dabei die Außenleiterspannung am Übergabepunkt des Energielieferanten zum Kunden.

Tabelle 5.7 Werte der Oberschwingungsspannungen bis zur Ordnungszahl $k = 25$ an der Übergabestelle in Nieder- und Mittelspannungsnetzen in Prozent der Grundschwingung nach EN 50160, entnommen [21], [51]

ungerade Harmonische				gerade Harmonische	
kein Vielfaches von 3		Vielfaches von 3			
Ordnungszahl k	U_k/U_n in %	Ordnungszahl k	U_k/U_n in %	Ordnungszahl k	U_k/U_n in %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 bis 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Die Amplitudenangaben der Oberschwingungen beziehen sich nach EN 61000-4-7 auf über 10 Minuten gemittelte Werte, die zu 95% einer Woche einzuhalten sind. Ferner darf zu den gleichen Bedingungen der Gesamtüberschwingungsgehalt (THD) einen Wert von 8 % nicht überschreiten [21], [51].

Nach **Tabelle 5.7** unterscheidet EN 50160 Oberschwingungen nach ihrer Ordnungszahl

(1) Harmonische mit gerader Ordnungszahl

Sie treten nur mit geringen Amplituden auf, weshalb in **Tabelle 5.7** dort relativ niedrige Grenzwerte gelten.

(2) Harmonische mit ungerader aber durch drei teilbarer Ordnungszahl

Unter der Prämisse eines symmetrischen Auftretens der Harmonischen in allen drei Leitern eines symmetrischen Drehstromsystems werden diese Oberschwingungen nach [47] transformatorisch nicht von der Nieder- in die Mittelspannungsebene übertragen. Aus diesem Grund sind ihre Amplituden im Mittelspannungsbereich eher gering. Da sie ein Nullsystem bilden [47], kann vor allem die 3. Harmonische im Niederspannungsbereich zu großen unerwünschten Strömen im Neutralleiter führen.

(3) Harmonische mit ungerader und nicht durch drei teilbarer Ordnungszahl

Nach [47] ist ihre transformatorische Übertragung zwischen den Spannungsebenen möglich. Relativ stark treten daher die 5. und die 7. Oberschwingung in der Mittelspannung auf, weshalb **Tabelle 5.7** hier verhältnismäßig hohe Grenzwerte zulässt.

Aus (1) - (3) folgt, dass nur Harmonische mit einer Ordnungszahl nach (3) für die weiteren Betrachtungen in Frage kommen. Während die Amplituden der 5. und 7. Harmonischen zur weiteren Auswertung groß genug erscheinen, sind die Amplituden der 11. und 13. Harmonischen

deutlich niedriger. Diese Oberschwingungen werden deshalb nicht mehr weiter betrachtet. Für den Hochspannungsbereich gilt die Norm IEC 61000-3-6 mit niedrigeren Grenzwerten; speziell die 5. und die 7. Harmonische dürfen hier nur noch mit jeweils 2% Amplitude bezogen auf die Nennspannung auftreten.

5.4.2.2 Spannungsanalyse am Netz-Kraftwerksmodell

In diesem Abschnitt wird die Spannung am Netz-Kraftwerksmodell hinsichtlich der Grenzwerte für die 5. und 7. Harmonische aus **Tabelle 5.7** untersucht. Dazu wird jeweils ein Szenario in einem erdschlussfreien und in einem erdschlussbehafteten Netz hergestellt. Im ersten Versuch erfolgt eine Messung an einem gesunden Abgang in einem *erdschlussfreien* Netz. Der zweite Versuch bezieht sich auf das Fehlerzenario $\alpha = 0,5$ mit $R_F = 45,5 \Omega$; die Messung erfolgt an derselben Stelle des jetzt fehlerbehafteten Abgangs. In beiden Auswertungen werden die Effektivwerte der Außenleiterspannungen von Grundschwingung, 5. und 7. Harmonischer gebildet und das Spannungsverhältnis $U_{xy}^{(k)} / U_{xy}^{(1)}$ ermittelt (**Tabelle 5.8**). Allgemein bezeichnet der Quotient aus Effektivwert der k . Harmonischen zum Effektivwert der Grundschwingung das k . Oberschwingungsverhältnis. Dies gilt analog für Ströme (6.7, 7.5).

Tabelle 5.8 Verhältnis der Außenleiterspannungen der 5. und 7. Harmonischen zur Grundschwingung (Oberschwingungsverhältnis) am Netz-Kraftwerksmodell mit und ohne Erdschluss

Ordnungszahl k	Oberschwingungsverhältnis $U_{xy}^{(k)} / U_{xy}^{(1)}$	Netz erdschlussfrei	Netz erdschlussbehaftet
5	$U_{21}^{(5)} / U_{21}^{(1)}$	1,17 %	1,28 %
5	$U_{13}^{(5)} / U_{13}^{(1)}$	0,93 %	0,82 %
5	$U_{32}^{(5)} / U_{32}^{(1)}$	0,98 %	0,92 %
7	$U_{21}^{(7)} / U_{21}^{(1)}$	0,94 %	1,03 %
7	$U_{13}^{(7)} / U_{13}^{(1)}$	0,94 %	1,22 %
7	$U_{32}^{(7)} / U_{32}^{(1)}$	0,86 %	1,19 %

Aus **Tabelle 5.8** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Im erdschlussfreien Fall liegen die Oberschwingungsverhältnisse der 5. und 7. Harmonischen mit $\approx 1\%$ deutlich unter den Grenzwerten nach EN 50160.
- (2) Der Einbau eines Fehlerwiderstandes zur Herstellung eines erdschlussbehafteten Netzes im Netz-Kraftwerksmodell ändert die Spannungsverhältnisse aus (1) nur geringfügig.
- (3) In beiden Fällen (1), (2) genügen die ermittelten Spannungsverhältnisse außerdem den strengeren 2%-Grenzwerten der Norm IEC 61000-3-6 für Hochspannungsnetze.
- (4) Aus (1)-(3) folgt, dass die jeweils ermittelten Oberschwingungsverhältnisse die Grenzwerte sowohl für den Mittelspannungsbereich als auch für die 110-kV einhalten.

6 Anwendung der Algorithmen im Netz mit isoliertem Sternpunkt und Analyse der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der Studienarbeit [9] und der Diplomarbeit [10] erhobenen Datensätze mit den drei Algorithmen LGS_U, LGS_S, KUB_U jeweils für die Grundschwingung, die 5. und die 7. Harmonische ausgewertet und hinsichtlich der folgenden Ergebnisgrößen verglichen:

- (1) Fehlerentfernungsparameter α
- (2) Fehlerwiderstand R_F
- (3) Last nach Betrag und Phase (unsymmetrisch²: \underline{Z}_1 oder symmetrisch: \underline{Z})

Die in 3.3 abgeleitete Standardtopologie „fehlerbehafteter Stich mit Last“ wird nach den Kriterien (1) bis (3) untersucht. Darüber hinaus werden auch leer laufende Stiche, Ringleitungen und fehlerfreie Stiche bezüglich (1) und (2) ausgewertet.

Die Bestimmung von (1) ist das primäre Ziel der Betrachtungen. Dabei sind die Größen (2) und (3), die sich ebenfalls als Lösung der Gleichungssysteme ergeben, nicht von Interesse. Für die erweiterte Aufgabenstellung einer Erdschlussrichtungsbestimmung mit den vorgestellten Verfahren (6.4) ist jedoch auch (2) eine unverzichtbare Größe; (3) wird in dieser Arbeit nicht weiter verwendet.

Alle erhobenen Datensätze wurden in [9], [10] bereits mit dem Algorithmus LGS_U ausgewertet sowie in [10] mit dem Algorithmus LGS_S nur für die Grundschwingung bei Standardtopologie.

6.1 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt

Die erste Messreihe findet in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt statt. Zugrunde gelegt wird die Standardtopologie „fehlerbehafteter Stich mit Last“, für deren Behandlung alle Algorithmen konzipiert sind. Ein Übersichtsbild der Anordnung ist in **Abb. 6.1** dargestellt.

Die Basis bilden 25 Messungen (fünf Fehlerwiderstände an fünf Fehlerorten) jeweils für niedrige ($p = 2$) und hohe Strominjektion ($p = 36$) mit der Standardlast von $681,8 \Omega$.

Um die große Anzahl der Auswertungsergebnisse prägnant darstellen und beurteilen zu können, werden für den Fehlerentfernungsparameter α jeweils die maximale absolute Abweichung $|\Delta\alpha|$ sowie die Standardabweichung σ angegeben. Letztere Größe beschreibt die Streuung aller Ergebniswerte um den Sollwert und lässt erkennen, ob eine Ergebnisreihe generell von schlechter Qualität ist oder lediglich ein großer absoluter Fehler eines einzelnen Ausreißers vorliegt.

² Nach 3.3.4 verwenden die Algorithmen LGS_U und KUB_U eine unsymmetrische Lastmodellierung mit den Impedanzen \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 . Aus praktischer Sicht ist die Last näherungsweise symmetrisch. Es hat sich gezeigt, dass \underline{Z}_1 diesem symmetrischen Näherungswert am nächsten kommt, so dass \underline{Z}_2 nicht weiter dargestellt wird.

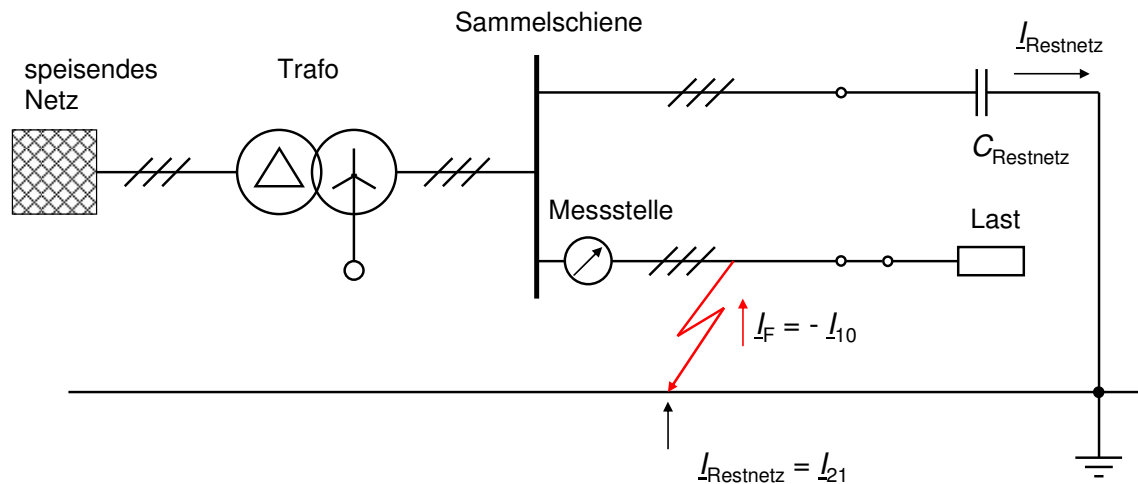


Abb. 6.1 Versuchsanordnung zu Messreihe 1; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten Stich mit Standardlast

In 3.3.2 wurde ausgeführt, dass der Fehlerentfernungsparameter der Bedingung $0 \leq \alpha \leq 1$ genügt. Bei den Auswertungen zeigt sich nun, dass die Algorithmen in den Fällen mit tatsächlichem Fehlerort $\alpha = 0$ und $\alpha = 1$ teilweise Fehlerentfernungen $\alpha < 0$ bzw. $\alpha > 1$ ermitteln. Wegen der Eindeutigkeit in diesen Fällen, wird ein $\alpha \in [-0,2; 0]$ auf $\alpha = 0$ gesetzt und $\alpha \in [1; 1,2]$ auf $\alpha = 1$. Bei der Berechnung der Standardabweichung σ werden die tatsächlich ermittelten Werte verrechnet. Die Ergebnisse für den Fehlerwiderstand R_F sind analog aufbereitet; angegeben wird die maximale absolute Abweichung $|\Delta R_F|$. Weiterhin gilt, dass $R_F \in [-5 \Omega; 0 \Omega]$ auf $R_F = 0 \Omega$ gesetzt wird.

6.1.1 Messreihe 1: niedrige Strominjektion ($p = 2$)

In diesem Fall werden die beiden verbleibenden Freileitungen des Netz-Kraftwerksmodells als gesundes Restnetz verwendet. Die externe Strominjektion beträgt $\approx 2,6$ A. Die gesamten Messergebnisse befinden sich in den **Tabellen A6.1 bis A6.4** im Anhang.

6.1.1.1 Fehlerentfernungsparameter α

Auswertung der Grundschwingung

Die beiden auf der linearen Näherung basierenden Algorithmen LGS_U und LGS_S liefern nahezu identische Ergebnisse; dies ist bereits in [9] festgestellt worden. Aus diesem Grund wird auf eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse des Algorithmus LGS_S verzichtet.

Das jeweils beste Ergebnis pro Fehlerwiderstand ist in **Tabelle 6.1** grün hervorgehoben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird $|\Delta \alpha|$ in Prozent dargestellt; es gilt: $|\Delta \alpha| = 0 \rightarrow |\Delta \alpha| = 0 \%$ bzw. $|\Delta \alpha| = 1 \rightarrow |\Delta \alpha| = 100 \%$. Diese Darstellungsform wird im Folgenden beibehalten.

Tabelle 6.1 Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 7,0\%$ $\sigma = 4,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,3\%$ $\sigma = 3,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,8\%$ $\sigma = 6,2\%$	$|\Delta\alpha| > 14,6\%$ $\sigma = 20,8\%$	$|\Delta\alpha| > 121,9\%$ $\sigma = 139,5\%$
KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 9,1\%$ $\sigma = 6,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 8,4\%$ $\sigma = 5,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,6\%$ $\sigma = 5,2\%$	$|\Delta\alpha| > 12,0\%$ $\sigma = 19,2\%$	$|\Delta\alpha| > 117,5\%$ $\sigma = 135,6\%$

Aus **Tabelle 6.1** geht hervor, dass der Algorithmus LGS_U bei Fehlerwiderständen $R_F \leq 7,3 \Omega$ die besten Ergebnisse liefert. Auch für Fehlerwiderstände $R_F \leq 45,5 \Omega$ bleibt seine maximale Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 8,0\%$. Der Algorithmus KUB_U liefert erst ab $R_F \geq 45,5 \Omega$ bessere Ergebnisse als LGS_U. Für $R_F \geq 113,6 \Omega$ sind diese mit mindestens 12% Abweichung unbrauchbar.

Fazit: Bei niedriger Injektion liefert die Entfernungsbestimmung mit der Grundschwingung bis $R_F \leq 45,5 \Omega$ gute Ergebnisse. Die Auswertung erfolgt am besten mit LGS_U.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Der Algorithmus LGS_S produziert bei Benutzung der 5. Harmonischen im Mittel eine absolute Abweichung $|\Delta\alpha| \approx 50\%$, bei der 7. Harmonischen $|\Delta\alpha| \approx 25\%$. Diese Ergebnisse sind unbrauchbar, weshalb auf eine tabellarische Darstellung verzichtet wird.

Tabelle 6.2 Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 10,0\%$ $\sigma = 11,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,4\%$ $\sigma = 4,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 3,5\%$ $\sigma = 3,1\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,3\%$ $\sigma = 5,5\%$	$|\Delta\alpha| > 19,2\%$ $\sigma = 24,6\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 18,5\%$ $\sigma = 19,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 11,7\%$ $\sigma = 11,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,2\%$ $\sigma = 6,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,2\%$ $\sigma = 6,4\%$	$|\Delta\alpha| > 16,2\%$ $\sigma = 23,4\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$ $\sigma = 10,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 9,8\%$ $\sigma = 11,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,2\%$ $\sigma = 9,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 3,4\%$ $\sigma = 6,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 8,6\%$ $\sigma = 8,5\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 18,4\%$ $\sigma = 18,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 17,5\%$ $\sigma = 19,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,0\%$ $\sigma = 16,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 9,0\%$ $\sigma = 12,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,9\%$ $\sigma = 6,9\%$

Nach **Tabelle 6.2** bringt der Algorithmus LGS_U für Fehlerwiderstände $R_F \leq 45,5 \Omega$ die besten Ergebnisse, wobei die 5. etwas besser abschneidet als die 7. Harmonische. Betrachtet man Fehlerwiderstände $R_F \geq 113,6 \Omega$, liefert die 7. Harmonische die besten Ergebnisse.

Fazit: Bei niedriger Injektion und Betrachtung der Oberschwingungen ist die Verwendung des LGS_U am sinnvollsten. Zwar erzielt die 5. Harmonische bis $R_F \leq 45,5 \Omega$ etwas bessere Ergebnisse als die 7. jedoch garantiert letztere bis $R_F = 560 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$.

Bereits in 2.1 wurde erwähnt, dass die Erkennung und Ortung hochohmiger Erdschlüsse mit gängigen Verfahren problematisch ist. Standard-Wischerrelais arbeiten z.B. nur für Fehlerwiderstände $R_F < 50 \Omega$ [23], die Pulsortung mit unsymmetrischer Taktung z.B. bis $R_F < 300 \Omega$ [23]. In den Messreihen kommt als maximaler Fehlerwiderstand $R_F = 560 \Omega$ zum Einsatz; die Verwendung größerer Fehlerwiderstände erscheint aus praktischer Sicht nicht sinnvoll.

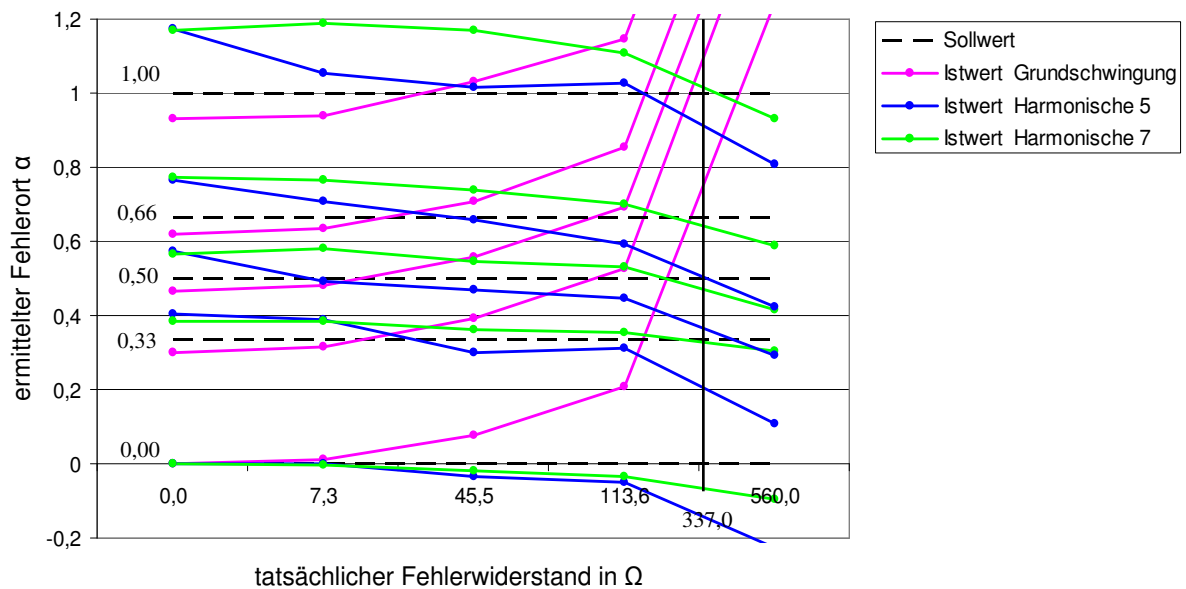


Abb. 6.2 Messreihe 1; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; Algorithmus: LGS_U; Datenbasis: **Tabelle A6.1**

6.1.1.2 Fehlerwiderstand R_F

Auswertung der Grundschiwingung

Tabelle 6.3 Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 5,5 \Omega$ $\sigma = 3,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 4,8 \Omega$ $\sigma = 2,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 7,8 \Omega$ $\sigma = 6,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 19,7 \Omega$ $\sigma = 19,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 113,7 \Omega$ $\sigma = 124,7 \Omega$
KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 6,3 \Omega$ $\sigma = 4,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,6 \Omega$ $\sigma = 3,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 7,8 \Omega$ $\sigma = 5,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 19,5 \Omega$ $\sigma = 18,6 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 111,3 \Omega$ $\sigma = 122,5 \Omega$

Fazit: Bei Betrachtung der Grundschiwingung liefern alle drei Algorithmen vergleichbare Ergebnisse, wobei LGS_U und LGS_S fast völlig übereinstimmen, so dass auf letztere Darstellung verzichtet wird. Bei $R_F \leq 7,3 \Omega$ erfolgt eine Bestimmung auf einige Ω genau, für $R_F \geq 45,5 \Omega$ beträgt der relative Fehler etwa 20%.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Der Algorithmus LGS_S produziert bei Benutzung der 5. und 7. Harmonischen Abweichungen, die jeweils ein Mehrfaches der $|\Delta R_F|$ der beiden anderen Algorithmen betragen. Daher werden die Ergebnisse von LGS_S nicht tabellarisch dargestellt.

Tabelle 6.4 Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung ($|\Delta R_F|$, σ) = f (R_F) der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 6,1 \Omega$ $\sigma = 3,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,8 \Omega$ $\sigma = 2,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 0,9 \Omega$ $\sigma = 0,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,3 \Omega$ $\sigma = 1,9 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 14,2 \Omega$ $\sigma = 11,9 \Omega$
5	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 11,1 \Omega$ $\sigma = 6,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 4,9 \Omega$ $\sigma = 3,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,1 \Omega$ $\sigma = 1,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 4,2 \Omega$ $\sigma = 3,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 14,7 \Omega$ $\sigma = 11,7 \Omega$
7	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 1,4 \Omega$ $\sigma = 1,2 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,3 \Omega$ $\sigma = 0,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,9 \Omega$ $\sigma = 1,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,9 \Omega$ $\sigma = 1,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 14,5 \Omega$ $\sigma = 11,7 \Omega$
7	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 5,4 \Omega$ $\sigma = 3,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,2 \Omega$ $\sigma = 3,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,8 \Omega$ $\sigma = 2,6 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,4 \Omega$ $\sigma = 1,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 9,3 \Omega$ $\sigma = 8,7 \Omega$

Nach **Tabelle 6.4** liefert LGS_U für $R_F \leq 113,6 \Omega$ die besten Resultate. Insgesamt ist die Verwendung der 7. Harmonischen am günstigsten.

Fazit: Die Fehlerwiderstände werden von dem Algorithmus LGS_U in Verbindung mit der 7. Harmonischen sehr genau ermittelt. Für Fehlerwiderstände $R_F \leq 113,6 \Omega$ bleibt die maximale absolute Abweichung $|\Delta R_F| \leq 1,9 \Omega$.

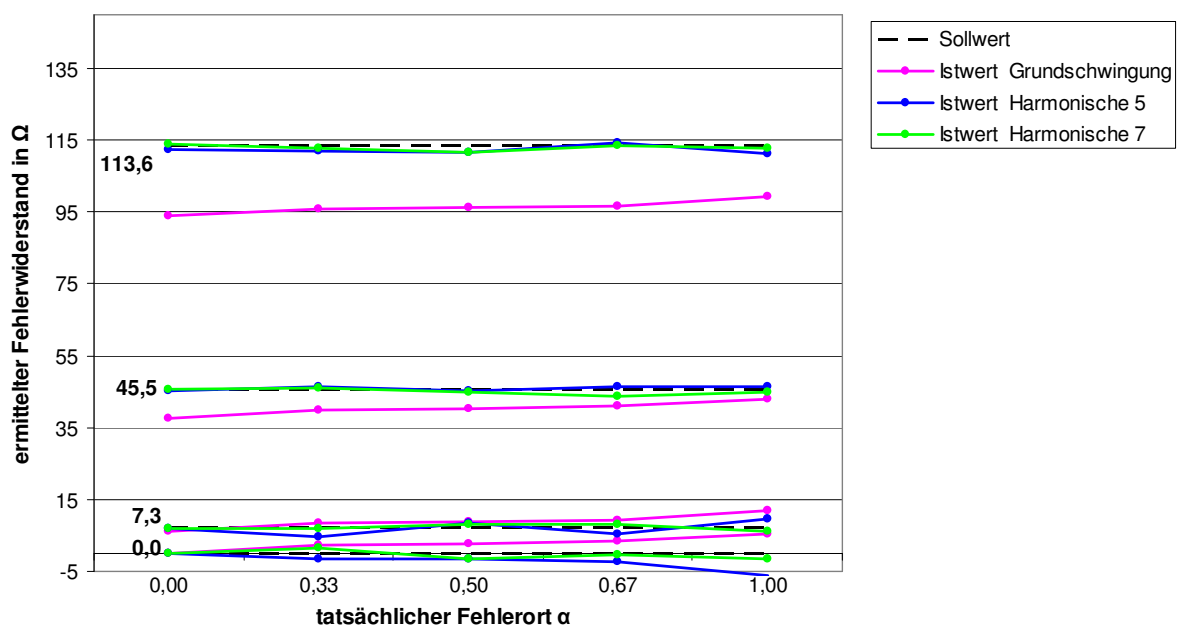


Abb. 6.3 Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; $R_F \leq 113,6 \Omega$, Algorithmus: LGS_U; Datenbasis: **Tabelle A6.2**

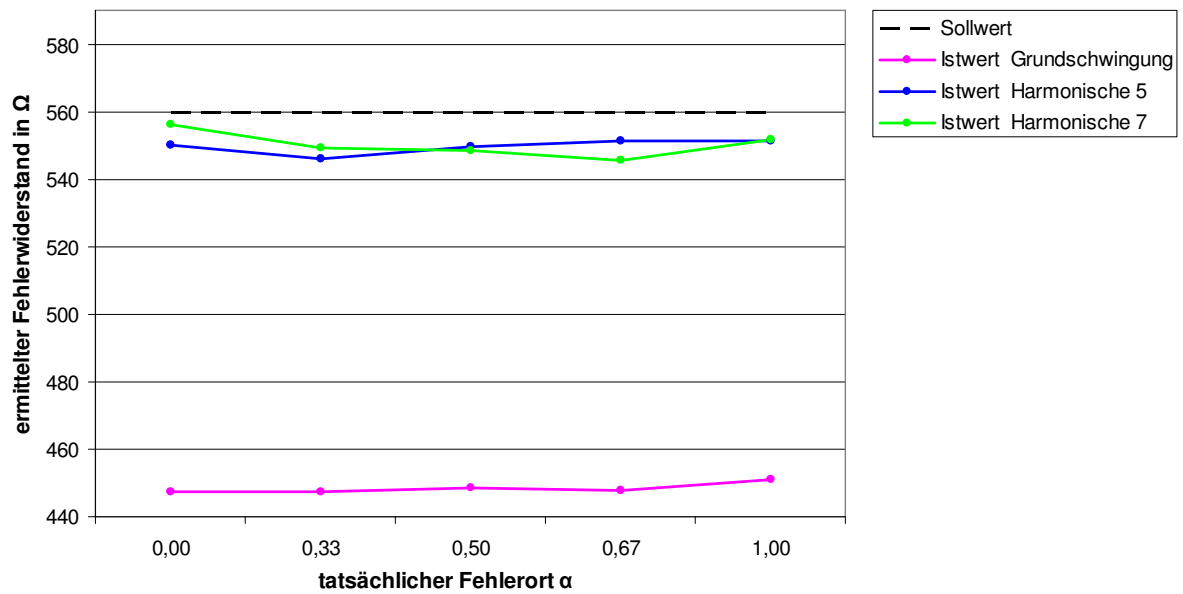


Abb. 6.4 Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; $R_F = 560 \Omega$, Algorithmus: LGS_U; Datenbasis: **Tabelle A6.2**

6.1.1.3 Lastimpedanz \underline{Z}_1 (unsymmetrisch) bzw. \underline{Z} (symmetrisch)

Die Aufschlüsselung erfolgt getrennt nach Betrag und Phase der Lastimpedanz gemittelt über alle 25 Messungen (fünf verschiedene α mit je fünf R_F) pro Algorithmus und pro Ordnungszahl.

Tabelle 6.5 Messreihe 1; $p = 2$; Auswertung ($|\Delta Z_1|$, σ_{Z_1} , $|\Delta Z|$, σ_Z , $|\Delta \varphi_{Z_1}|$, $|\Delta \varphi_Z|$, σ_φ) = $f(k)$ nach Algorithmen

Ordnungszahl k	Algorithmus	$|\Delta Z_1|$ bzw. $|\Delta Z|$		$|\Delta \varphi_{Z_1}|$ bzw. $|\Delta \varphi_Z|$	
		Istwert: 681,8 Ω		Istwert: 0°	
1	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 19,6 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 19,0 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 0,6^\circ$	$\sigma_\varphi = 0,6^\circ$
1	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 20,9 \Omega$	$\sigma_Z = 20,1 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 0,9^\circ$	$\sigma_\varphi = 0,8^\circ$
1	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 62,9 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 57,0 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 6,9^\circ$	$\sigma_\varphi = 6,2^\circ$
5	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 84,8 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 62,5 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 3,6^\circ$	$\sigma_\varphi = 2,3^\circ$
5	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 85,1 \Omega$	$\sigma_Z = 60,8 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 2,6^\circ$	$\sigma_\varphi = 1,6^\circ$
5	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 255 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 116 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 28,0^\circ$	$\sigma_\varphi = 18,0^\circ$
7	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 29,0 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 13,9 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 2,5^\circ$	$\sigma_\varphi = 1,1^\circ$
7	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 35,7 \Omega$	$\sigma_Z = 16,2 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 2,3^\circ$	$\sigma_\varphi = 1,1^\circ$
7	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 243 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 166 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 21,9^\circ$	$\sigma_\varphi = 12,8^\circ$

Die beiden Algorithmen LGS_U und LGS_S liefern unabhängig von der Ordnungszahl k gleichwertige Resultate, wobei der Algorithmus LGS_U geringfügig besser abschneidet. Die Lastbestimmung mit der vollständigen Lösung KUB_U ist generell am ungünstigsten. Die Grundschwingungsauswertung zeigt das beste Ergebnis.

Fazit: Bei niedriger Injektion gelingt die Bestimmung der Last mit dem Algorithmus LGS_U im Rahmen einer Grundschwingungsauswertung sehr gut.

6.1.2 Messreihe 1: hohe Strominjektion ($p = 36$)

In diesem Fall wird die Kondensatorbank mit $C \approx 4 \mu\text{F}$ und einem Erdschlussstrom von $\approx 55 \text{ A}$ als gesundes Restnetz zugeschaltet. Die Basisdaten befinden sich in den **Tabellen A6.5 bis A6.8**.

6.1.2.1 Fehlerentfernungsparmeter α

Auswertung der Grundschwingung

Die Ergebnisse von LGS_S und LGS_U sind identisch [9]; LGS_S wird daher nicht tabelliert.

Tabelle 6.6 Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 4,4\%$ $\sigma = 5,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 1,3\%$ $\sigma = 1,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,0\%$ $\sigma = 17,6\%$	$|\Delta\alpha| > 23,3\%$ $\sigma = 29,7\%$	$|\Delta\alpha| > 121,0\%$ $\sigma = 137,0\%$
KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 5,1\%$ $\sigma = 6,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 1,0\%$ $\sigma = 1,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 13,7\%$ $\sigma = 17,4\%$	$|\Delta\alpha| > 23,3\%$ $\sigma = 29,6\%$	$|\Delta\alpha| > 120,1\%$ $\sigma = 135,7\%$

Aus **Tabelle 6.6** geht hervor, dass der Algorithmus KUB_U bei Fehlerwiderständen $R_F \geq 7,3 \Omega$ die besten Ergebnisse liefert. Bei $R_F = 0 \Omega$ hingegen gelingt die Bestimmung von α mit LGS_U etwas besser. Die Resultate beider Algorithmen sind für $R_F \geq 45,5 \Omega$ mit Abweichungen $|\Delta\alpha|$ über 10% schlecht, für $R_F \geq 113,6 \Omega$ mit mindestens 23,3% Abweichung generell unbrauchbar.

Fazit: Bei hoher Strominjektion erfolgen Grundschwingungsauswertungen bei $R_F = 0 \Omega$ am besten mit LGS_U ($|\Delta\alpha| \leq 4,4\%$), bei $R_F = 7,3 \Omega$ am besten mit KUB_U ($|\Delta\alpha| \leq 5,1\%$). Der günstigste Algorithmus zur Bestimmung von α hängt demnach vom Fehlerwiderstand R_F ab, den beide Algorithmen nach 6.1.2.2 sehr genau bestimmen. Für Fehlerwiderstände $R_F \geq 45,5 \Omega$ wird die Grundschwingungsauswertung schlechter bis unbrauchbar.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Der Algorithmus LGS_S produziert mit beiden Harmonischen stark streuende Ergebnisse, die bis zu $|\Delta\alpha| \approx 10\%$ besser oder schlechter sind als die der beiden anderen Algorithmen. Da diesbezüglich auch keine verwertbare Tendenz erkennbar ist, werden die Ergebnisse des Algorithmus LGS_S nicht tabellarisch dargestellt.

Tabelle 6.7 Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 4,4\%$ $\sigma = 3,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 2,8\%$ $\sigma = 1,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,8\%$ $\sigma = 3,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 11,8\%$ $\sigma = 9,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,9\%$ $\sigma = 5,5\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 3,9\%$ $\sigma = 2,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 2,2\%$ $\sigma = 1,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,4\%$ $\sigma = 2,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 11,4\%$ $\sigma = 9,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,2\%$ $\sigma = 5,9\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 6,2\%$ $\sigma = 4,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,2\%$ $\sigma = 4,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,3\%$ $\sigma = 4,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,5\%$ $\sigma = 6,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 16,9\%$ $\sigma = 13,3\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 4,8\%$ $\sigma = 3,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,4\%$ $\sigma = 4,1\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,1\%$ $\sigma = 3,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$ $\sigma = 5,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 17,3\%$ $\sigma = 13,7\%$

Aus **Tabelle 6.7** geht hervor, dass der Algorithmus KUB_U bei $R_F \leq 113,6 \Omega$ bezogen auf die Ordnungszahl die besten Ergebnisse liefert. Bei $R_F = 560 \Omega$ ist für beide Harmonische der Algorithmus LGS_U um vernachlässigbare 0,3% bzw. 0,4% besser als KUB_U. Auffällig sind die etwas besseren Werte der 5. Harmonischen für $R_F \leq 7,3 \Omega$ und das eklatant bessere Abschneiden um $|\Delta\alpha| > 10\%$ bei $R_F = 560 \Omega$.

Fazit: Im Fall hoher Strominjektion und bei Betrachtung der Oberschwingungen sollte die Entfernungsbestimmung mit dem Algorithmus KUB_U erfolgen. Die größte Kontinuität in den Ergebnissen erreicht die 7. Harmonische, die bis $R_F \leq 113,6 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$ garantiert. In Einzelfällen ($R_F \leq 7,3 \Omega$ oder $R_F \gg 113,6 \Omega$) liefert allerdings die 5. Harmonische bessere Resultate. Es ist möglich, mit beiden Harmonischen eine Rechnung durchzuführen und auf Basis des ermittelten Fehlerwiderstandes R_F die Lösung zu wählen.

In **Abb. 6.5** sind die Ergebnisse für KUB_U im Fall hoher Strominjektion grafisch dargestellt.

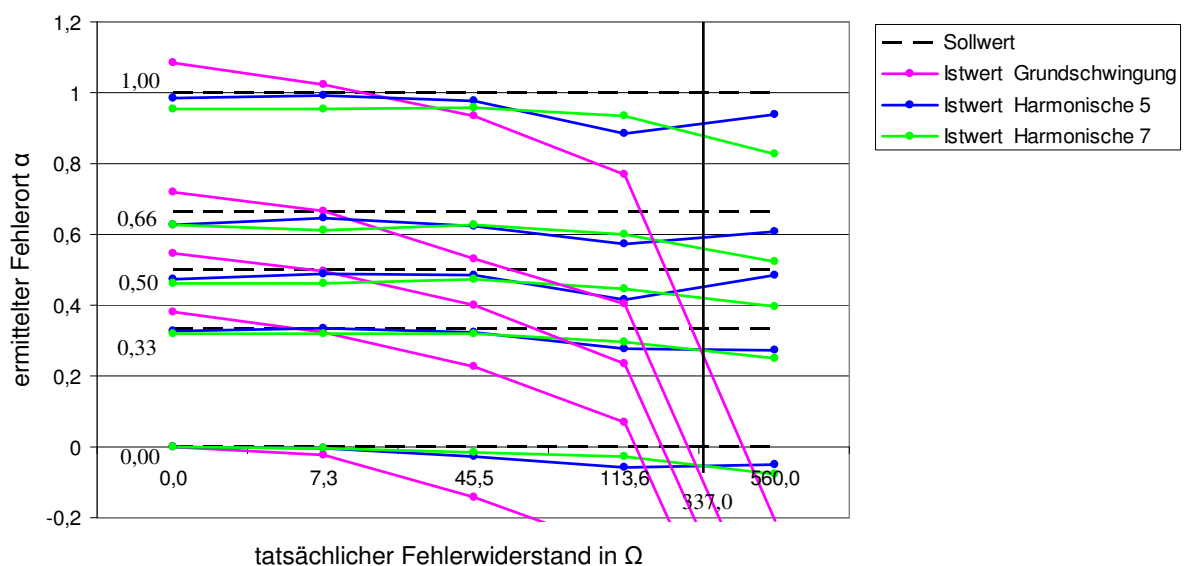


Abb. 6.5 Messreihe 1; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ bei hoher Strominjektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Datenbasis: **Tabelle A6.5**

6.1.2.2 Fehlerwiderstand R_F

Auswertung der Grundschiwingung

Tabelle 6.8 Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 0,4 \Omega$ $\sigma = 0,2 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 0,2 \Omega$ $\sigma = 0,2 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 4,0 \Omega$ $\sigma = 2,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,4 \Omega$ $\sigma = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 9,2 \Omega$ $\sigma = 10,0 \Omega$
KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 0,5 \Omega$ $\sigma = 0,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 0,2 \Omega$ $\sigma = 0,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,6 \Omega$ $\sigma = 1,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,5 \Omega$ $\sigma = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 8,8 \Omega$ $\sigma = 9,5 \Omega$

Fazit: In der Grundschiwingungsauswertung bei hoher Strominjektion ermitteln alle drei Algorithmen R_F sehr genau.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Die Ergebnisse des Algorithmus LGS_S sind im Bereich einiger Ω besser oder schlechter als die der beiden anderen Algorithmen. Da diesbezüglich keine verwertbare Tendenz erkennbar ist, wird der Algorithmus LGS_S nicht in die Tabelle aufgenommen.

Tabelle 6.9 Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 5,6 \Omega$ $\sigma = 4,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,0 \Omega$ $\sigma = 3,6 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,4 \Omega$ $\sigma = 2,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,4 \Omega$ $\sigma = 2,9 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 18,6 \Omega$ $\sigma = 19,0 \Omega$
5	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 5,6 \Omega$ $\sigma = 4,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,1 \Omega$ $\sigma = 3,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,9 \Omega$ $\sigma = 2,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,1 \Omega$ $\sigma = 2,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 16,6 \Omega$ $\sigma = 16,4 \Omega$
7	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 5,4 \Omega$ $\sigma = 3,2 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,4 \Omega$ $\sigma = 3,6 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,2 \Omega$ $\sigma = 2,9 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,7 \Omega$ $\sigma = 3,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 19,8 \Omega$ $\sigma = 18,5 \Omega$
7	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 5,5 \Omega$ $\sigma = 3,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 5,7 \Omega$ $\sigma = 3,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 6,1 \Omega$ $\sigma = 4,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 7,9 \Omega$ $\sigma = 4,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 15,1 \Omega$ $\sigma = 14,4 \Omega$

Nach **Tabelle 6.9** unterscheiden sich die ermittelten Fehlerwiderstände kaum voneinander. Für $R_F \leq 7,3 \Omega$ beträgt die Abweichung vom Istwert etwa $5,5 \Omega$, für $R_F \geq 45,5 \Omega$ ist der relative Fehler $\leq 13,4\%$ und sinkt mit wachsendem R_F stark. Das jeweils beste Ergebnis kann nicht generell einer bestimmten Harmonischen oder einem bestimmten Algorithmus zugeordnet werden.

Fazit: Beide Algorithmen ermitteln die Fehlerwiderstände mit beiden Harmonischen gut.

In **Abb. 6.6** und **Abb. 6.7** sind die ermittelten Fehlerwiderstände für KUB_U im Fall hoher Strominjektion grafisch dargestellt.

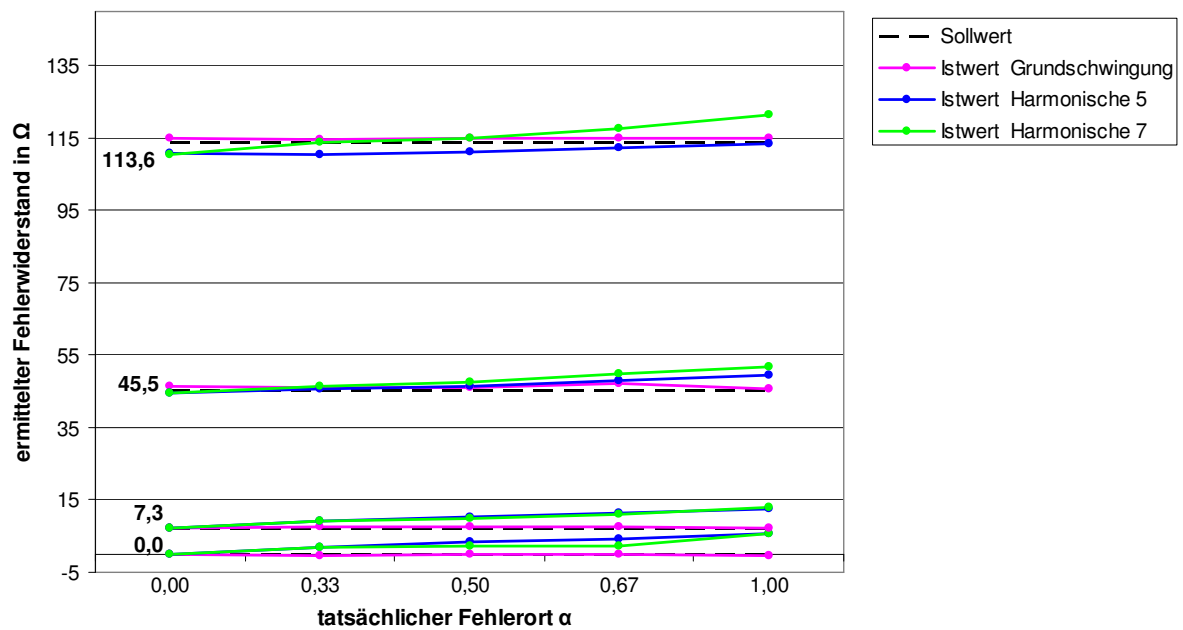


Abb. 6.6 Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei hoher Strominjektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Datenbasis: **Tabelle A6.6**

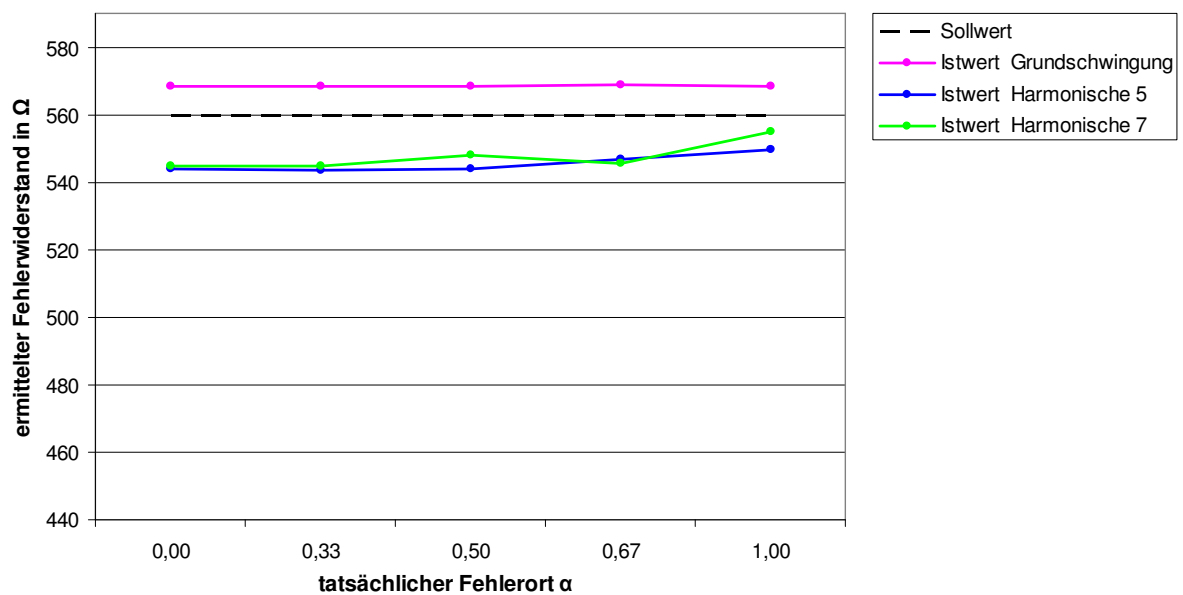


Abb. 6.7 Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei hoher Strominjektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Datenbasis: **Tabelle A6.6**

6.1.2.3 Lastimpedanz \underline{Z}_1 (unsymmetrisch) bzw. \underline{Z} (symmetrisch)

Die Aufschlüsselung erfolgt wie in 6.1.1.3 getrennt nach Betrag und Phase der Lastimpedanz gemittelt über alle 25 zugrunde liegenden Messungen pro Algorithmus und pro Ordnungszahl.

Tabelle 6.10 Messreihe 1; $p = 36$; Auswertung ($|\Delta Z_1|$, σ_{Z_1} , $|\Delta Z|$, σ_Z , $|\Delta \varphi_{Z_1}|$, $|\Delta \varphi_Z|$, σ_φ) = f (k) nach Algorithmen

Ordnungszahl k	Algorithmus	$|\Delta Z_1|$ bzw. $|\Delta Z|$ Istwert: 681,8 Ω$		|\Delta \varphi_{Z_1}|$ bzw. $|\Delta \varphi_Z|$ Istwert: 0°	
		1	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 25,9 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 17,5 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 0,6^\circ$	$\sigma_\varphi = 0,4^\circ$
1	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 50,5 \Omega$	$\sigma_Z = 31,9 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 1,2^\circ$	$\sigma_\varphi = 0,9^\circ$
1	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 25,6 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 15,9 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 3,5^\circ$	$\sigma_\varphi = 2,1^\circ$
5	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 97,5 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 63,3 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 5,0^\circ$	$\sigma_\varphi = 1,9^\circ$
5	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 90,6 \Omega$	$\sigma_Z = 60,3 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 3,5^\circ$	$\sigma_\varphi = 1,7^\circ$
5	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 255 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 139 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 27,5^\circ$	$\sigma_\varphi = 12,1^\circ$
7	LGS_U	$|\Delta Z_1| \leq 35,3 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 15,1 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 3,4^\circ$	$\sigma_\varphi = 2,3^\circ$
7	LGS_S	$|\Delta Z| \leq 50,6 \Omega$	$\sigma_Z = 22,2 \Omega$	$|\Delta \varphi_Z| \leq 5,1^\circ$	$\sigma_\varphi = 2,7^\circ$
7	KUB_U	$|\Delta Z_1| \leq 521 \Omega$	$\sigma_{Z_1} = 223 \Omega$	$|\Delta \varphi_{Z_1}| \leq 51,6^\circ$	$\sigma_\varphi = 14,4^\circ$

Im Bereich der Grundschwingung und der 7. Harmonischen bestimmt der Algorithmus LGS_U die Last nach Betrag und Phase am besten. Für die 5. Harmonische liefert der Algorithmus LGS_S die besseren Resultate. Die Grundschwingungsauswertung ist dabei mit einem relativen Fehler von 3,8% bezogen auf den Betrag und einem Winkelfehler $< 1^\circ$ deutlich günstiger als die Lastbestimmung mit den höheren Harmonischen.

Der Algorithmus KUB_U liefert im Grundschwingungsbereich ähnlich gute Ergebnisse wie LGS_U, ist jedoch im Oberschwingungsbereich unbrauchbar.

Fazit: Bei hoher Injektion ist die Lastbestimmung durch Auswertung der Grundschwingung am günstigsten. Die Algorithmen LGS_U und KUB_U liefern hier Ergebnisse vergleichbar guter Qualität.

6.2 Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt

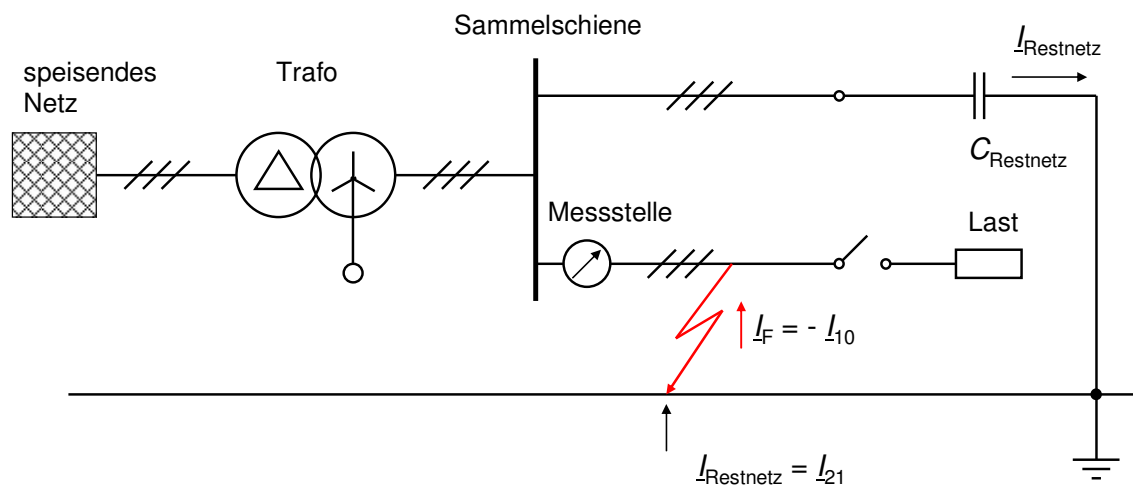


Abb. 6.8 Versuchsanordnung zu Messreihe 2; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten leer laufenden Stich

Die zweite Messreihe orientiert sich an **Abb. 6.8**; hier wird die Frage untersucht, ob es eine Abhängigkeit der bisherigen Ergebnisse von der Lastimpedanz gibt. Ein Fehler könnte beispielsweise nachts auftreten, wenn nur mit geringer Last zu rechnen ist. Der Leerlauf ist insofern eine extreme Ausprägung dieses Niedriglastfalls. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Untersuchung auf einen Fehler in der Leitungsmitte ($\alpha = 0,5$) beschränkt. Die Basisdaten befinden sich in den **Tabellen A6.9** und **A6.10**.

6.2.1 Messreihe 2: niedrige Strominjektion ($p = 2$)

6.2.1.1 Fehlerentfernungsparmeter α

LGS_S liefert mit $20\% \leq |\Delta\alpha| \leq 27.000\%$ unbrauchbare Resultate; diese werden nicht dargestellt.

Tabelle 6.11 Messreihe 2; $p = 2$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta\alpha| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
1	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 15,5\%$	$|\Delta\alpha| = 12,3\%$	$|\Delta\alpha| = 12,5\%$	$|\Delta\alpha| = 58,4\%$	$|\Delta\alpha| = 344\%$
1	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 21,8\%$	$|\Delta\alpha| = 18,2\%$	$|\Delta\alpha| = 9,0\%$	$|\Delta\alpha| = 59,1\%$	$|\Delta\alpha| = 362\%$
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 9,8\%$	$|\Delta\alpha| = 15,4\%$	$|\Delta\alpha| = 10,5\%$	$|\Delta\alpha| = 5,1\%$	$|\Delta\alpha| = 23,7\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 14,8\%$	$|\Delta\alpha| = 21,0\%$	$|\Delta\alpha| = 15,4\%$	$|\Delta\alpha| = 9,4\%$	$|\Delta\alpha| = 22,1\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 4,9\%$	$|\Delta\alpha| = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| = 4,5\%$	$|\Delta\alpha| = 3,5\%$	$|\Delta\alpha| = 0,4\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 9,9\%$	$|\Delta\alpha| = 8,2\%$	$|\Delta\alpha| = 9,2\%$	$|\Delta\alpha| = 7,9\%$	$|\Delta\alpha| = 3,6\%$

Nach **Tabelle 6.11** schneiden die Auswertungen des Algorithmus LGS_U bezogen auf die Ordnungszahl der betrachteten Harmonischen fast ausnahmslos am besten ab. Die Ergebnisse der Grundschiwungsauswertung sind mit absoluten Abweichungen von über 10% unbrauchbar. Die 7. Harmonische liefert hier generell sehr gute Ergebnisse mit $|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$.

Fazit: Bei niedriger Strominjektion und Leerlauf liefert der Algorithmus LGS_U die besten Ergebnisse für α in Verbindung mit der 7. Harmonischen.

6.2.1.2 Fehlerwiderstand R_F

Auch hier erzeugt der Algorithmus LGS_S Abweichungen $|\Delta R_F|$ von einem Mehrfachen der beiden anderen Algorithmen, so dass auf eine weitere Darstellung verzichtet wird.

Tabelle 6.12 Messreihe 2; $p = 2$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta R_F| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
1	LGS_U	$|\Delta R_F| = 0,3 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,8 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,7 \Omega$	$|\Delta R_F| = 5,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 26 \Omega$
1	KUB_U	$|\Delta R_F| = 0,8 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 3,0 \Omega$	$|\Delta R_F| = 5,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 26 \Omega$
5	LGS_U	$|\Delta R_F| = 2,6 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,8 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 26 \Omega$
5	KUB_U	$|\Delta R_F| = 2,3 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 25 \Omega$
7	LGS_U	$|\Delta R_F| = 6,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 4,9 \Omega$	$|\Delta R_F| = 3,0 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,9 \Omega$	$|\Delta R_F| = 14 \Omega$
7	KUB_U	$|\Delta R_F| = 5,9 \Omega$	$|\Delta R_F| = 4,7 \Omega$	$|\Delta R_F| = 3,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,7 \Omega$	$|\Delta R_F| = 9 \Omega$

Die Bestimmung des Fehlerwiderstandes für $R_F \leq 7,3 \Omega$ gelingt am besten mit der Grundschiwung. Bei Fehlerwiderständen ab $R_F \geq 45,5 \Omega$ sind die Ergebnisse der beiden höheren Harmonischen zwar etwas besser als die der Grundschiwung, bezogen auf den zu ermittelnden Sollwert ist der Unterschied jedoch unwesentlich. Generell liefern die Algorithmen bei gleicher Ordnungszahl vergleichbare Ergebnisse.

Fazit: Die Fehlerwiderstände werden von beiden Algorithmen sehr genau ermittelt. Bei satten Fehlern liefert die Grundschiwung die besten Ergebnisse während bei höheren Fehlerwiderständen die Ergebnisse von Grund- und Oberschiwungen vergleichbar sind.

6.2.2 Messreihe 2: hohe Strominjektion ($p = 36$)

6.2.2.1 Fehlerentfernungparameter α

LGS_S liefert mit $2\% \leq |\Delta\alpha| \leq 18.000\%$ unbrauchbare Resultate; diese werden nicht dargestellt.

Tabelle 6.13 Messreihe 2; $p = 36$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta\alpha| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = \frac{1}{2}$

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
1	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| = 2,8\%$	$|\Delta\alpha| = 7,7\%$	$|\Delta\alpha| = 22,9\%$	$|\Delta\alpha| = 177\%$
1	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 3,9\%$	$|\Delta\alpha| = 3,2\%$	$|\Delta\alpha| = 7,5\%$	$|\Delta\alpha| = 22,9\%$	$|\Delta\alpha| = 175\%$
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 2,5\%$	$|\Delta\alpha| = 1,2\%$	$|\Delta\alpha| = 0,3\%$	$|\Delta\alpha| = 9,7\%$	$|\Delta\alpha| = 8,6\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 2,1\%$	$|\Delta\alpha| = 0,8\%$	$|\Delta\alpha| = 0,6\%$	$|\Delta\alpha| = 9,6\%$	$|\Delta\alpha| = 9,3\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 3,5\%$	$|\Delta\alpha| = 3,9\%$	$|\Delta\alpha| = 3,9\%$	$|\Delta\alpha| = 6,0\%$	$|\Delta\alpha| = 15,7\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 3,0\%$	$|\Delta\alpha| = 3,5\%$	$|\Delta\alpha| = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| = 5,9\%$	$|\Delta\alpha| = 16,4\%$

Aus **Tabelle 6.13** geht hervor, dass die Grundswingungsauswertung für $R_F \leq 45,5 \Omega$ mit einer maximalen absoluten Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 7,7\%$ noch gut gelingt; bei kleineren Fehlerwiderständen ist sogar $|\Delta\alpha| \leq 3,9\%$. Für $R_F \geq 113,6 \Omega$ sind die Ergebnisse der Grundswingung mit Abweichungen von mehr als 20% unbrauchbar. Generell sind die Resultate der Algorithmen LGS_U und KUB_U bei der Grundswingungsauswertung vergleichbar.

Die höheren Harmonischen liefern mit beiden Algorithmen ähnlich gute Ergebnisse, wobei die 5. Harmonische für alle $R_F \leq 560 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 9,7\%$ einhält. Eine große Kontinuität erreicht auch die 7. Harmonische, die bis $R_F \leq 113,6 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 5,9\%$ garantiert.

Fazit: Im Fall hoher Strominjektion bei Leerlauf ist die Betrachtung der Oberschwingungen in Verbindung mit dem Algorithmus KUB_U am günstigsten.

6.2.2.2 Fehlerwiderstand R_F

Der Algorithmus LGS_S erzeugt bei der Grundswingungsauswertung deutlich größere Abweichungen $|\Delta R_F|$ als die beiden anderen Algorithmen. Da er auch im Bereich der Oberschwingungen eher schlechter als diese abschneidet, wird auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet.

Tabelle 6.14 Messreihe 2; $p = 36$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta R_F| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = \frac{1}{2}$

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
1	LGS_U	$|\Delta R_F| = 0,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,3 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,0 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,6 \Omega$
1	KUB_U	$|\Delta R_F| = 0,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,0 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,0 \Omega$
5	LGS_U	$|\Delta R_F| = 3,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,7 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,9 \Omega$	$|\Delta R_F| = 18 \Omega$
5	KUB_U	$|\Delta R_F| = 3,1 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,8 \Omega$	$|\Delta R_F| = 1,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 16 \Omega$
7	LGS_U	$|\Delta R_F| = 0,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,3 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,2 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 21 \Omega$
7	KUB_U	$|\Delta R_F| = 0,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,4 \Omega$	$|\Delta R_F| = 2,6 \Omega$	$|\Delta R_F| = 0,5 \Omega$	$|\Delta R_F| = 18 \Omega$

Fazit: Die Bestimmung des Fehlerwiderstandes gelingt unabhängig vom Algorithmus extrem genau mit der Grundschiwingung. Auch die Ergebnisse der höheren Harmonischen sind sehr gut und bezogen auf die Ordnungszahl mit beiden Algorithmen nahezu identisch.

6.3 Zusammenfassung zur Fehlerentfernungsmessung bei Standardtopologie

▪ **Der praktische Einsatz von LGS_S ist nicht sinnvoll**

Die Algorithmen LGS_U und LGS_S liefern im Grundschiwingungsbereich mit Standardlast unabhängig von der Strominjektion nahezu identische Ergebnisgrößen α und R_F .

Bei den Oberschiwingungsauswertungen mit Standardlast bleibt LGS_S mit überwiegend schlechten Ergebnissen deutlich hinter den beiden anderen Algorithmen zurück. Besonders auffällig ist dies bei Fehlerszenarien mit niedriger Strominjektion. Im Leerlauf sind die Ergebnisse von LGS_S unabhängig von der Ordnungszahl der betrachteten Harmonischen generell unbrauchbar. Aus diesen Gründen wird auf die weitere Untersuchung von LGS_S verzichtet.

▪ **Die Größe der Strominjektion bestimmt den zu verwendenden Algorithmus**

Bei niedriger Injektion ($p = 2$) ermittelt der Algorithmus LGS_U die Ergebnisgrößen α und R_F am genauesten. Im praktisch wichtigen Fall hoher Injektion ($p = 36$) ist die Verwendung von KUB_U günstiger, lediglich bei sattem Erdschluss und Auswertung der Grundschiwingung liefert LGS_U nach 6.1.2.1 hier bessere Ergebnisse.

Ändert sich durch topologische Maßnahmen die Höhe des Erdschlussstroms wesentlich, kann aus praktischer Sicht ein Umschalten auf den jeweils anderen Algorithmus erforderlich sein.

▪ **Bestimmung von α mit LGS_U bei niedriger Injektion ($p = 2$)**

Die Grundschiwingungsauswertung mit Standardlast erfolgt für $R_F \leq 45,5 \Omega$ mit einem maximalen Fehler $|\Delta\alpha| \leq 7,8\%$. Bei Leerlauf ist $|\Delta\alpha| \geq 12,3\%$ und somit unbrauchbar.

Die Auswertung der 7. Harmonischen mit Standardlast liefert bis $R_F = 560 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$. Für $R_F \leq 45,5 \Omega$ sind in Einzelfällen die Ergebnisse der 5. Harmonischen besser. Im Leerlauf ist die Verwendung der 7. Harmonischen generell am günstigsten mit $|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$.

▪ **Bestimmung von R_F mit LGS_U bei niedriger Injektion ($p = 2$)**

Unabhängig von der Last und dem tatsächlichen Fehlerwiderstand ermittelt die Oberschiwingungsauswertung R_F auf einige Ω sehr genau; gleiches gilt für die Grundschiwingungsauswertung bei Leerlauf und im Standardlastfall bei $R_F \leq 7,3 \Omega$. Nur bei Standardlast und für $R_F \geq 45,5 \Omega$ verschlechtert sich die Qualität mit einem relativen Fehler $\approx 20 \%$.

▪ **Bestimmung von α mit KUB_U bei hoher Injektion ($p = 36$)**

Die Grundschnwingungsauswertung erfolgt lastunabhängig für $R_F \leq 7,3 \Omega$ mit einem maximalen Fehler $|\Delta\alpha| \leq 5,1\%$. Bei $R_F = 45,5 \Omega$ ist die Brauchbarkeit lastabhängig; für noch größere Fehlerwiderstände sind die Ergebnisse generell unbrauchbar.

Bei der Oberschnwingungsauswertung zeigt die 7. Harmonische lastunabhängig die größte Kontinuität und liefert bis $R_F \leq 113,6 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$. In Einzelfällen, vor allem für $R_F \leq 7,3 \Omega$, können die Ergebnisse der 5. Harmonischen besser sein.

▪ **Bestimmung von R_F mit KUB_U bei hoher Injektion ($p = 36$)**

Die Grundschnwingungsauswertung ermittelt lastunabhängig den Fehlerwiderstand R_F sehr genau mit einem maximalen relativen Fehler $\leq 3,5\%$. Die Ergebnisse sind besser als die der Oberschnwingungsauswertung.

▪ **Bestimmung der Last**

Die Lastbestimmung nach Betrag und Phase erfolgt injektionsunabhängig sehr gut mit dem Algorithmus LGS_U im Rahmen der Grundschnwingungsauswertung. Die Oberschnwingungsauswertungen fallen mit allen Algorithmen meist deutlich schlechter aus, vor allem bei Benutzung von KUB_U.

6.4 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie im Netz mit isoliertem Sternpunkt

In dieser Versuchsreihe wird der Frage nachgegangen, inwiefern die beiden Algorithmen LGS_U und KUB_U zur Erdschlussrichtungsbestimmung geeignet sind. Eine Fehldetektion liegt in folgenden Fällen vor:

- (1) Der Abgang ist erdschlussbehaftet, wird aber als erdschlussfrei erkannt.
- (2) Der Abgang ist erdschlussfrei, wird aber als erdschlussbehaftet erkannt.

In 6.1 wurden die erweiterten Intervalle $\alpha \in [-0,2; 1,2]$ und $R_F \in [-5 \Omega; \infty \Omega]$ einer gültigen Fehlerentfernungsmessung festgesetzt. Demnach gilt ein Abgang als fehlerfrei, wenn eines der beiden Ergebnisse für α oder R_F diesen Bereich verlässt, wenn also $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$ oder $R_F < -5 \Omega$. Die Betrachtung von α und R_F ist unbedingt erforderlich, da einige Fehlerszenarien nach (2) gültige Werte für α erzeugen, die jedoch mit negativen Fehlerwiderständen bis in den zweistelligen k Ω -Bereich einhergehen.

Dies wird an folgendem Beispiel erläutert:

Man entnimmt den **Tabellen A6.13** und **A6.14**, dass die Konstellation $\alpha = 0,666$ mit $R_F = 45,5 \Omega$ auf dem erdschlussbehafteten Abgang bei Auswertung der Messung am gesunden Abgang mittels KUB_U für die 7. Harmonische die Werte $\alpha = 0,7901$ mit $R_F \approx -84,2 \text{ k}\Omega$ liefert. Während dem

ermittelten $\alpha \in [-0,2; 1,2]$ eine gültige Fehlerlage entspricht, zeigt der ermittelte Fehlerwiderstand R_F durch einen physikalisch unsinnigen Wert, dass ein Fehler auf dem betrachteten Abgang ausgeschlossen ist.

6.4.1 Betrachtung des erdschlussbehafteten Abgangs

Als Basis dienen die **Tabellen A6.1, A6.2, A6.5, A6.6, A6.9, A6.10**. Ungültige Werte für α , R_F sind dort in roter Schrift ausgeführt. Bei Betrachtung des erdschlussbehafteten Abgangs gilt ein Ergebnis als Fehldetektion, wenn mindestens einer der Werte α oder R_F die oben beschriebenen erweiterten Wertebereiche verlassen haben. Den zugehörigen Abgleich zeigt **Tabelle 6.15**.

Tabelle 6.15 Messreihe 3; Anzahl Fehldetektionen eines *erdschlussbehafteten Stiches* (Standardtopologie) im Netz mit isoliertem Sternpunkt;
Spalte *Standardlast*: jedem Feld liegen 25 Messungen zugrunde
Spalte *Leerlauf*: jedem Feld liegen 5 Messungen zugrunde

Ordnungszahl k	Algorithmus	Injektion hoch ($p = 36$)		Injektion niedrig ($p = 2$)	
		Standardlast	Leerlauf $\alpha = 0,5$	Standardlast	Leerlauf $\alpha = 0,5$
1	LGS_U	6	1	5	1
	KUB_U	6	1	5	1
5	LGS_U	0	0	2	0
	KUB_U	0	0	3	0
7	LGS_U	0	0	0	0
	KUB_U	0	0	4	0

Aus **Tabelle 6.15** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Die Grundschiwingungsergebnisse sind sehr schlecht. Eine Analyse der **Tabellen A6.1, A6.2, A6.5, A6.6, A6.9, A6.10** zeigt, dass alle 13 Szenarien mit Fehldetektion auf großen Fehlerwiderständen $R_F = 560 \Omega$ (12x) und $R_F = 113,6 \Omega$ (1x) basieren. Nach 6.1.1.1 und 6.1.2.1 sind die Ergebnisse für α bei $R_F \geq 113,6 \Omega$ mit einer Grundschiwingungsauswertung unbrauchbar. Da α zur Detektion benötigt wird, ist eine Betrachtung von Fehlerszenarien mit $R_F \geq 113,6 \Omega$ nicht sinnvoll. Für $R_F \leq 45,5 \Omega$ beträgt die Trefferquote 100 %.
- (2) Bezogen auf die Ordnungszahl k verhalten sich beide Algorithmen bei der Erdschlussrichtungsbestimmung für $k = 1$ gleich, während für $k = 5$ und $k = 7$ LGS_U etwas günstiger ist.
- (3) Im Oberschiwingungsbereich beträgt die Trefferquote bei hoher Injektion 100 %; Fehldetektionen treten ausschließlich bei niedriger Injektion auf. In der Praxis würde eine Erhöhung des Erdschlussstroms durch Zuschalten von Leitungen die Bedingungen für eine Erdschlussrichtungsbestimmung deutlich verbessern.
- (4) Die niedrigste Trefferquote mit 93,3% liefert KUB_U bei Auswertung der 7. Harmonischen.
- (5) Der Algorithmus LGS_U liefert bei Auswertung der 7. Harmonischen unabhängig von der Höhe der Strominjektion und der Last eine Trefferquote von 100 %.

6.4.2 Betrachtung des erdschlussfreien Abgangs

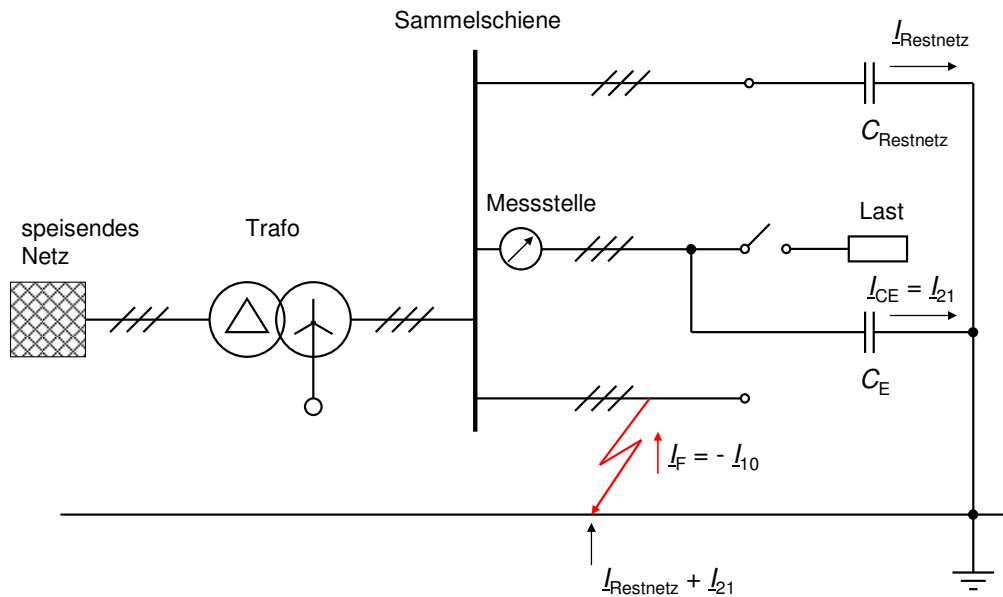


Abb. 6.9 Versuchsanordnung zu Reihe 3; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung an einem fehlerfreien Stich mit oder ohne Last

Durchgeführt werden insgesamt $5 \times 5 \times 2 \times 2 = 100$ Messungen. Diese Szenarien entstehen durch Einbau der fünf Fehlerwiderstände an fünf Fehlerorten, die jeweils für niedrige ($p=2$) und hohe Strominjektion ($p=36$) mit der Standardlast von $681,8 \Omega$ oder einem Leerlauf untersucht werden. Der fehlerbehaftete Abgang in **Abb. 6.9** stellt den Erdschluss im Netz her und kann leer laufen.

Die Auswertungsergebnisse befinden sich aufgeschlüsselt nach Algorithmen und Ordnungszahl der Harmonischen in den **Tabellen A6.11 bis A6.18**. Gültige Werte für α , R_F sind dort jeweils in roter Schrift ausgeführt. Ein fehlerfreier Abgang wird fälschlicherweise als fehlerbehaftet erkannt, wenn die Auswertung des Fehlerszenarios zu gültigen Werten für α und R_F führt. Dieser Abgleich ist in **Tabelle 6.16** dargestellt.

Tabelle 6.16 Messreihe 3; Anzahl der Fehldetektionen eines *fehlerfreien Stiches* (Standardtopologie) im Netz mit isoliertem Sternpunkt; jedes Feld beruht auf 25 Messungen

Ordnungszahl k	Algorithmus	Injektion hoch ($p = 36$)		Injektion niedrig ($p = 2$)	
		Standardlast	Leerlauf	Standardlast	Leerlauf
1	LGS_U	3	0	18	6
	KUB_U	3	0	18	5
5	LGS_U	1	0	1	0
	KUB_U	0	0	1	0
7	LGS_U	0	0	0	0
	KUB_U	1	0	0	0

Aus **Tabelle 6.16** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Bezogen auf die Ordnungszahl k verhalten sich die beiden Algorithmen gleichwertig.
- (2) Die Detektion gelingt bei Leerlauf besser als unter Last; am deutlichsten wird dies bei der Grundschwingungsauswertung.
- (3) Die Grundschwingungsauswertung ist im Bereich niedriger Injektion mit einer Trefferquote von etwa 50% unbrauchbar. Bei hoher Injektion liegt die Trefferquote bei 97%.
- (4) Die 5. und die 7. Harmonische liefern sehr gute Ergebnisse. Je nach verwendetem Algorithmus liegt die Trefferquote, mit der eine gesunde Leitung auch als solche erkannt wird, bei mindestens 98%. Der Algorithmus LGS_U liefert bei Auswertung der 7. Harmonischen unabhängig von der Höhe der Strominjektion und der Last eine Trefferquote von 100%.

6.4.3 Zusammenfassung zur Erdschlussrichtungsbestimmung bei Standardtopologie

Die Erdschlussrichtungsbestimmung bei Standardtopologie ist unter Verwendung der Grundschwingung eingeschränkt möglich. Sie gelingt nur für Fehlerwiderstände $R_F \leq 45,5 \Omega$ bei hoher Strominjektion und erzielt unter diesen Bedingungen eine Trefferquote von mindestens 97%.

Unter Verwendung der beiden höheren Harmonischen liefert die Erdschlussrichtungsbestimmung bei Standardtopologie sehr gute Ergebnisse. Ein fehlerfreier Abgang wird hier in mindestens 98% der Fälle auch als solcher erkannt; beim fehlerbehafteten Abgang liegt die Erkennungsquote bei mindestens 93,3%.

Aus praktischer Sicht interessiert jedoch die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Erdschlussrichtung an einem wahllos herausgegriffenen Stich korrekt bestimmt wird. Da die Ereignisse „Abgang fehlerfrei“ und „Abgang fehlerbehaftet“ unvereinbar sind, liegt die Wahrscheinlichkeit, das erdschlussbehaftete Feld in einer Anlage mit n Abgangsfeldern herauszugreifen bei $1/n$. Die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses (erdschlussfreies Feld) liegt bei $1-1/n$.

Bei einer Anlage mit n Abgängen wird die Erdschlussrichtung auf einem willkürlich herausgegriffenen Abgang bei Standardtopologie mit folgender Wahrscheinlichkeit richtig bestimmt:

$$98\% \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) + 93,3\% \cdot \frac{1}{n} \Rightarrow 98\% - \frac{4,7\%}{n}$$

Eine korrekte Erdschlussrichtungsbestimmung mit den beiden höheren Harmonischen bei Standardtopologie erfolgt daher in mindestens 95,7% der Fälle ($n = 2$).

Hervorzuheben ist, dass der Algorithmus LGS_U in Verbindung mit der 7. Harmonischen nach den **Tabellen 6.15** und **6.16** Trefferquoten von 100% aufweist, so dass dieser Kombination eine besondere praktische Bedeutung zukommt.

Im Oberschwingungsbereich verhalten sich die Algorithmen LGS_U und KUB_U für beide betrachtete Harmonische etwa gleichwertig. Die Erdschlussrichtungsbestimmung funktioniert un-

abhängig vom Lastzustand und der externen Strominjektion gut. Abschließend ist noch festzustellen, dass die meisten Fehldetektionen im Fall niedriger Strominjektion mit Standardlast zu verzeichnen sind. In der Praxis würde eine Erhöhung des Erdschlussstroms durch Zuschalten von Leitungen die Bedingungen für eine Erdschlussrichtungsbestimmung deutlich verbessern.

6.5 Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt

In dieser Versuchsreihe wird der Einfluss einer nichtlinearen Last auf die Ergebnisse untersucht. Diese Nichtlinearität wird durch eine belastete 6-Puls-Brückenschaltung realisiert. Durchgeführt werden insgesamt 20 Messungen an der Fehlerstelle $\alpha = 0,5$ für vier verschiedene externe Strominjektionen ($p = 0, 1, 2, 36$) jeweils mit allen fünf Fehlerwiderständen R_F . Die Auswertungsergebnisse finden sich in den **Tabellen A6.19** und **A6.20**. Ein Übersichtsbild der Versuchsanordnung zeigt **Abb. 6.10**.

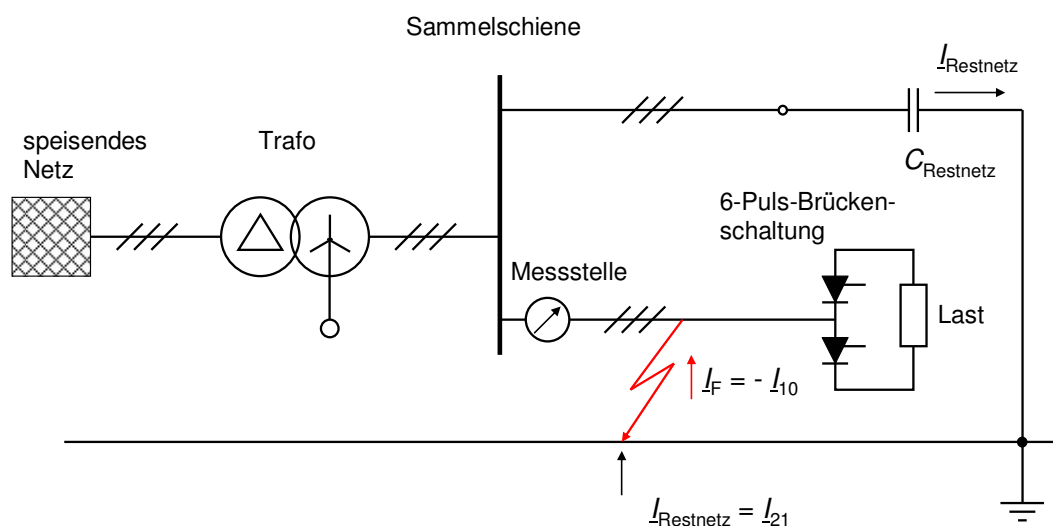


Abb. 6.10 Versuchsanordnung zu Messreihe 4; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten Stich mit B6R-Last; Fehlerstelle $\alpha = 0,5$

6.5.1 Betrachtung der Grundschwingungsauswertung

Die Auswertung der Messungen bei besonders niedriger Injektion ($p = 0, p = 1$) mit *Standardlast* für die Grundschwingung wurde bereits in [9] vorgenommen. Für $R_F \leq 45,5 \Omega$ wird die Fehlerentfernung α mit einer maximalen Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 6,5\%$ ermittelt, bei größeren Fehlerwiderständen beträgt $|\Delta\alpha| > 9,0\%$. Ein Vergleich dieser Resultate mit **Tabelle A6.19** zeigt, dass ein Einsatz der B6R-Last die Ergebnisse gegenüber [9] für $R_F \leq 45,5 \Omega$ auf $|\Delta\alpha| \leq 2,3\%$ verbessert; für $R_F = 113,6 \Omega$ verbessern sich die Werte auf $|\Delta\alpha| \leq 5,0\%$. Bei $p = 2$ ergeben sich in [9] für $R_F \leq 7,3 \Omega$ ähnliche Resultate wie in **Tabelle A6.19**; der Einsatz der B6R-Last verbessert auch

hier die Ergebnisse für höhere Fehlerwiderstände $R_F \leq 113,6 \Omega$. Bei hoher Strominjektion ($p = 36$) verschlechtern sich die Ergebnisse gegenüber [9] um etwa 6% bis 7%.

Der Fehlerwiderstand wird bei Einsatz der B6R-Last nach **Tabelle A6.20** injektionsunabhängig für $R_F \leq 7,3 \Omega$ sehr genau ermittelt, besser als mit Standardlast. Bei höheren R_F sind die Werte für $p = 1$ jetzt brauchbar, für $p = 2$ und $p = 36$ vergleichbar denen des Standardlastfalls [9].

6.5.2 Betrachtung der Oberschwingungsauswertung

Die Auswertungsergebnisse bei besonders niedriger Injektion ($p = 0, p = 1$) mit Standardlast sind unbrauchbar [10]. Nach **Tabelle A6.19** verbessert der Einsatz der B6R-Last die Ergebnisse hier eklatant; bis einschließlich $R_F = 560 \Omega$ werden die Fehlerentfernungen mit $|\Delta\alpha| \leq 6,9\%$ ermittelt. Hierbei schneidet die 7. Harmonische tendenziell am besten ab. Für Fehlerszenarien mit $p = 2$ und $R_F > 7,3 \Omega$ verbessern sich die Ergebnisse gegenüber [10] bei Auswertung mit der 5. Harmonischen deutlich, ansonsten bleiben diese - vor allem bei der 7. Harmonischen - fast identisch. Auch bei hoher Injektion ($p = 36$) weichen die ermittelten Erdschlusssentfernungen kaum vom Standardlastfall aus [10] ab.

Die teilweise verbesserte Ergebnislösung mit Einsatz der B6R-Last wird in 6.7.2 vor dem Hintergrund der Oberschwingungsverhältnisse diskutiert.

Der Fehlerwiderstand wird nach **Tabelle A6.20** in den Fällen ($p = 0, 1, 2$) für $R_F \leq 113,6 \Omega$ mit einem erheblichen Fehler - vor allem bei der 5. Harmonischen - bestimmt. Diese Abweichung wird mit wachsender Injektion tendenziell kleiner. Für $p = 36$ und $R_F \leq 113,6 \Omega$ sind die ermittelten Fehlerwiderstände der 7. Harmonischen denen des Standardlastfalls aus [10] vergleichbar.

6.5.3 Zusammenfassung zur Erdschlusssentfernungsbestimmung bei Standardtopologie mit B6R-Last

6.5.3.1 Fehlerentfernungsparameter α

Der Einsatz der B6R-Last verbessert die Ergebnisse für α bei Fehlerkonstellationen mit sehr niedriger Injektion ($p = 0, p = 1$) eklatant. Dies gilt sowohl für die Auswertung der Grund- als auch der Oberschwingungen. Auch Fehlerszenarien mit größeren Fehlerwiderständen führen jetzt zu guten Ergebnissen für α . Bei hoher Strominjektion ($p = 36$) ist der Einfluss der B6R-Last auf die Oberschwingungsergebnisse gering, die Grundschwingungsauswertungen verschlechtern sich.

6.5.3.2 Fehlerwiderstand R_F

Seine Bestimmung gelingt mit der Grundschwingungsauswertung und B6R-Last für $R_F \leq 7,3 \Omega$ besser als im Standardlastfall, vor allem bei sehr niedriger Injektion. Im Oberschwingungsfall mit

Einsatz der B6R-Last werden die Fehlerwiderstände bei niedriger Injektion mit einer erheblichen Abweichung - vor allem bei der 5. Harmonischen - ermittelt. Im praktisch wichtigen Fall hoher Strominjektion liefert nur die 7. Harmonische dem Standardlastfall vergleichbar gute Werte.

6.5.3.3 Algorithmenvergleich

Die beiden Algorithmen LGS_U und KUB_U verhalten sich hinsichtlich der ermittelten Werte für α , R_F in dieser Versuchsreihe ähnlich.

In **Abb. 6.11** sind die ermittelten Fehlerentfernungen bei Einsatz der B6R-Last auf dem fehlerbehafteten Stich grafisch dargestellt.

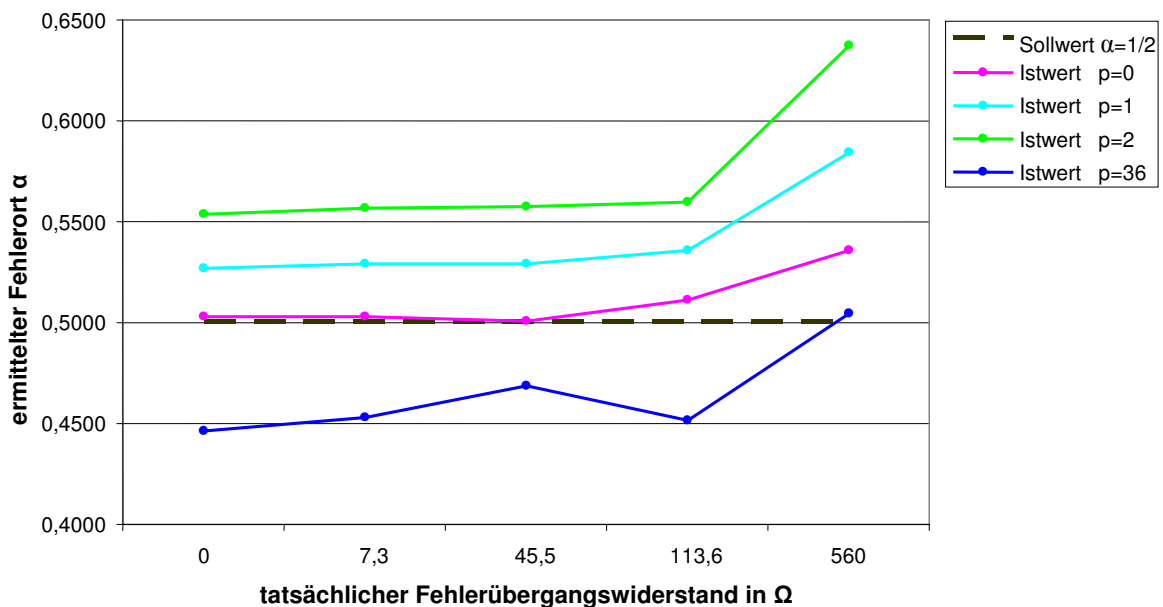


Abb. 6.11 Messreihe 4; ermittelter Fehlerort bei Standardtopologie mit B6R-Last für die 7. Harmonische, Sollwert: $\alpha = 0,5 = f(p, R_F)$; KUB_U; Datenbasis: **Tabelle A6.19**

6.6 Messreihen 5, 6: Betrachtung einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt

Gegenstand der bisherigen Untersuchungen sind ausschließlich Stickleitungen. Basierend auf dieser Standardtopologie sind die Algorithmen LGS_U und KUB_U konzipiert worden. Das Netz-Kraftwerksmodell bietet darüber hinaus die Möglichkeit, eine einfache Ringleitung mit nur einer Last herzustellen. Daher beziehen sich die nachfolgenden Untersuchungen auf den Bereich zwischen Messstelle und (erster) Last auf einem Ring. Es kommt ausschließlich die Standardlast zum Einsatz.

Gängige Verfahren zur Erdschlusssentfernungsbestimmung auf Ringleitungen (1.2.1.3) setzen zwei Messstellen voraus. In diesem Abschnitt wird untersucht, ob mit einer einseitigen Messung unter Benutzung der Algorithmen LGS_U und KUB_U akzeptable Ergebnisse erzielt werden.

Folgende Fragestellungen sind Gegenstand der Untersuchungen:

- (1) Ist feststellbar, ob sich ein Erdschluss auf dem Ring zwischen Messstelle und erster Last befindet? (6.6.1)
- (2) Ist die Fehlerentfernung auf dem in (1) genannten Leitungstück bestimmbar? (6.6.2)

Das Netz-Kraftwerksmodell verfügt nur über drei Freileitungen, von denen zum Aufbau der Ringleitung nach **Abb. 6.12** zwei benötigt werden. Aus diesem Grund kommt bei Ringleitungsuntersuchungen in Szenarien mit niedriger Strominjektion nur der verbleibende parallele Leiter ($p = 1$) zum Einsatz.

6.6.1 Messreihen 5, 6: Prüfung einer Ringleitung auf Erdschlussbetroffenheit zwischen Messstelle und erster Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt

In diesen Versuchsreihen wird der Frage nachgegangen, ob mit den beiden Algorithmen LGS_U und KUB_U ein Erdschluss eindeutig dem Ringabschnitt zwischen Messstelle und erster Last zuzuordnen ist. Eine Fehldetektion liegt analog 6.4 in folgenden Fällen vor:

- (1) Der Ringabschnitt ist erdschlussbehaftet, wird aber als erdschlussfrei erkannt. Dieser Punkt wird in Messreihe 5 nach **Abb. 6.12** untersucht. Als Datenbasis dienen die **Tabellen A6.21 bis A6.24**; ungültige Werte für α , R_F sind dort in roter Schrift ausgeführt. Eine Messung gilt als Fehldetektion, wenn mindestens einer der Werte α oder R_F den erweiterten Wertebereich verlassen hat, also $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$ oder $R_F < -5 \Omega$.

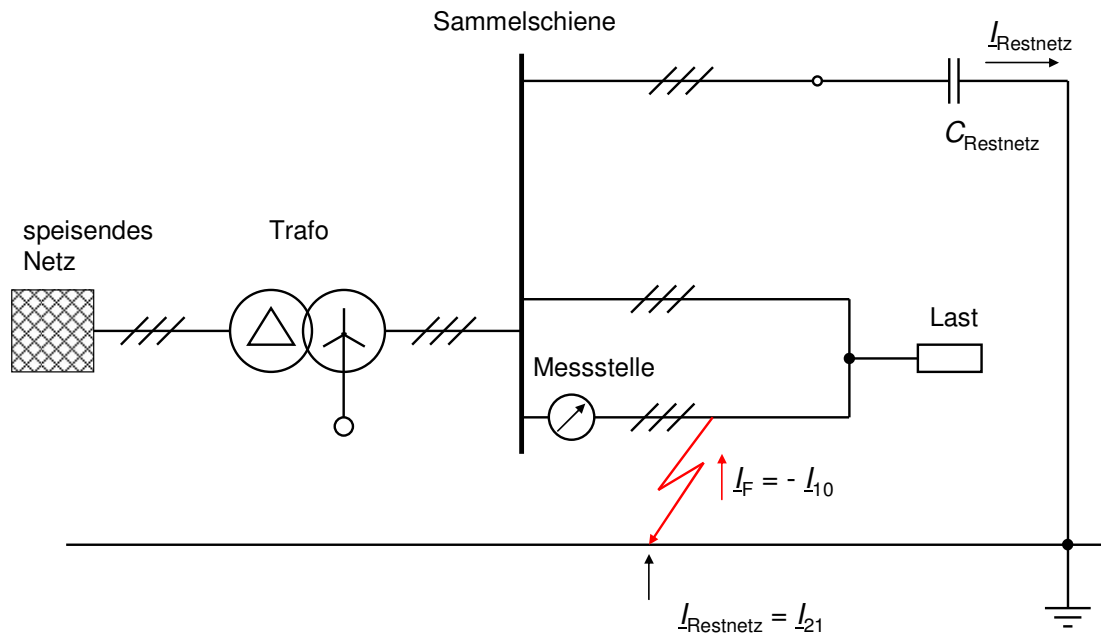


Abb. 6.12 Versuchsanordnung zu Messreihe 5; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Erdschluss zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung

- (2) Der Ringabschnitt ist erdschlussfrei, wird aber als erdschlussbehaftet erkannt. Dieser Punkt wird in Messreihe 6 nach **Abb. 6.13** untersucht. Die **Tabellen A6.25 bis A6.28** dienen als Basis. Felder, die dort gültige Werte für α , R_F enthalten, sind gelb hinterlegt. Eine Fehldetektion liegt vor, wenn beide Werte α und R_F im erweiterten Wertebereich liegen, also wenn $\alpha \in [-0,2; 1,2]$ und $R_F \in [-5 \Omega; \infty \Omega]$.

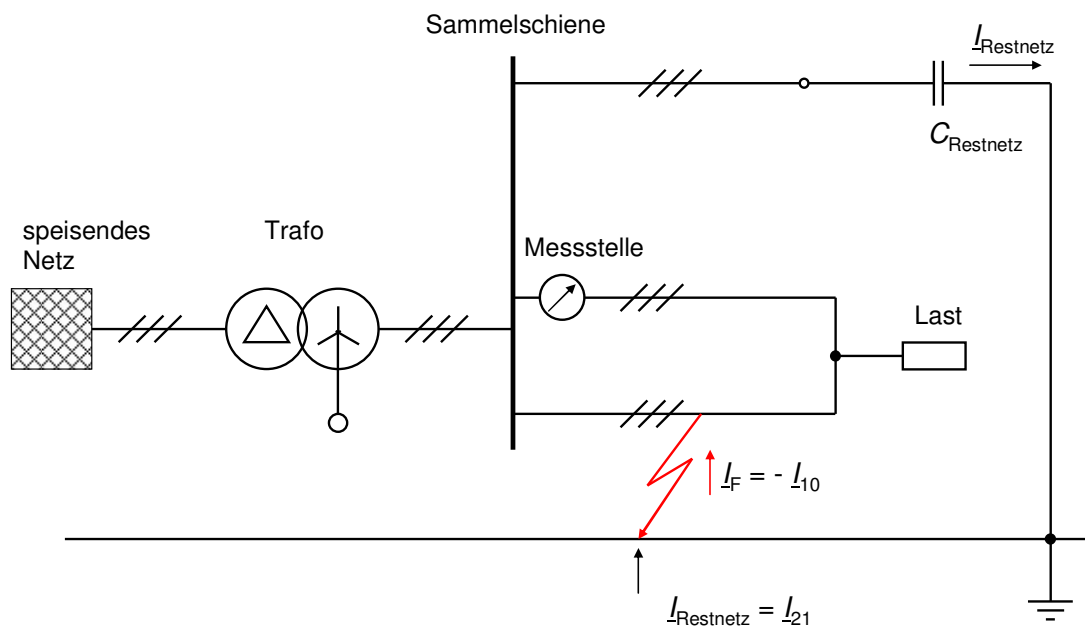


Abb. 6.13 Versuchsanordnung zu Messreihe 6; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Erdschluss außerhalb Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung

Beide Messreihen basieren auf jeweils $5 \times 5 \times 2 = 50$ Messungen, so dass die Auftretswahrscheinlichkeit eines erdschlussbehafteten und eines erdschlussfreien Ringleitungsabschnitts mit je 50 % gleich ist. Die Szenarien entstehen durch Einbau der fünf Fehlerwiderstände an fünf Fehlerorten, die jeweils für niedrige ($p = 1$) und hohe Strominjektion ($p = 36$) mit der Standardlast von $681,8 \Omega$ untersucht werden. Die Anzahl der Fehldetektionen beider Messreihen ist für ($p = 1$) in **Tabelle 6.17**, für ($p = 36$) in **Tabelle 6.18** dargestellt.

Tabelle 6.17 Messreihen 5, 6; Anzahl Fehldetektionen nach (1) und (2); Strominjektion niedrig; $p = 1$; Netz mit isoliertem Sternpunkt

Ordnungszahl k	Algorithmus	Fehldetektionen / Anzahl Messungen		Fehldetektionen gesamt	
		Ringabschnitt erdschlussbehaftet	Ringabschnitt erdschlussfrei		
1	LGS_U	9 / 25	14 / 25	23 / 50	46 %
	KUB_U	9 / 25	14 / 25	23 / 50	46 %
5	LGS_U	3 / 25	6 / 25	9 / 50	18 %
	KUB_U	5 / 25	4 / 25	9 / 50	18 %
7	LGS_U	4 / 25	6 / 25	10 / 50	20 %
	KUB_U	5 / 25	3 / 25	8 / 50	16 %

Aus **Tabelle 6.17** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Die Grundschwingungsauswertung ist mit 46% Fehldetektionen unbrauchbar.
- (2) Die Auswertungen der 5. und 7. Harmonischen gelingen mit 16 % bis 20 % Fehldetektionen am besten.
- (3) Hinsichtlich des verwendeten Algorithmus und der verwendeten höheren Harmonischen unterscheiden sich die Ergebnisse kaum.

Tabelle 6.18 Messreihen 5, 6; Anzahl Fehldetektionen nach (1) und (2); Strominjektion hoch; $p = 36$; Netz mit isoliertem Sternpunkt

Ordnungszahl k	Algorithmus	Fehldetektionen / Anzahl Messungen		Fehldetektionen gesamt	
		Ringabschnitt erdschlussbehaftet	Ringabschnitt erdschlussfrei		
1	LGS_U	11 / 25	3 / 25	14 / 50	28 %
	KUB_U	11 / 25	3 / 25	14 / 50	28 %
5	LGS_U	0 / 25	11 / 25	11 / 50	22 %
	KUB_U	0 / 25	10 / 25	10 / 50	20 %
7	LGS_U	0 / 25	16 / 25	16 / 50	32 %
	KUB_U	0 / 25	13 / 25	13 / 50	26 %

Aus **Tabelle 6.18** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Auswertungen der 5. Harmonischen gelingen mit 20 % und 22 % Fehldetektionen am besten.
- (2) Bezüglich des verwendeten Algorithmus unterscheiden sich die Ergebnisse nicht wesentlich.

Fazit: Die Entscheidung über eine Fehlerlage auf dem Ringabschnitt zwischen Messstelle und (erster) Last, trifft die Auswertung der 5. Harmonischen mit KUB_U injektionsunabhängig meist korrekt. Die Fehldetektionsrate liegt zwischen 18 % ($p = 1$) und 20 % ($p = 36$).

6.6.2 Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt

Die Versuchsanordnung entspricht **Abb. 6.12**. Es werden dieselben 50 Messungen aus 6.6.1, (1) benutzt. Datenbasis sind auch hier die **Tabellen A6.21** bis **A6.24**.

6.6.2.1 Messreihe 5: niedrige Strominjektion ($p = 1$)

In diesem Fall wird die verbleibende Freileitung des Netz-Kraftwerksmodells als gesundes Restnetz verwendet. Die externe Strominjektion beträgt etwa 1,3 A. Die gesamten Messergebnisse befinden sich in den **Tabellen A6.21** und **A6.22** im Anhang.

6.6.2.1.1 Fehlerentfernungsparameter α

Auswertung der Grundschwingung

Tabelle 6.19 Messreihe 5; $p = 1$; Auswertung ($|\Delta\alpha|, \sigma$) = $f(R_F)$ der Grundschwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 8,4\%$ $\sigma = 7,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$ $\sigma = 5,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 54,3\%$ $\sigma = 34,8\%$	$|\Delta\alpha| > 65,9\%$ $\sigma = 106,3\%$	$|\Delta\alpha| > 395,8\%$ $\sigma = 663,9\%$
KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 10,4\%$ $\sigma = 9,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 11,2\%$ $\sigma = 7,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 51,1\%$ $\sigma = 31,1\%$	$|\Delta\alpha| > 60,4\%$ $\sigma = 98,3\%$	$|\Delta\alpha| > 397,5\%$ $\sigma = 628,1\%$

Aus **Tabelle 6.19** geht hervor, dass der Algorithmus LGS_U bei Fehlerwiderständen $R_F \leq 7,3 \Omega$ mit einer maximalen Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 8,4\%$ noch akzeptable Ergebnisse liefert. Bei größeren Fehlerwiderständen sind die Ergebnisse unbrauchbar. Der Algorithmus KUB_U liefert in dieser Konstellation generell nur sehr schlechte bzw. unbrauchbare Resultate.

Fazit: Bei niedriger Injektion liefert die Entfernungsbestimmung mit der Grundschiwingung auf einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last bis $R_F \leq 7,3 \Omega$ ausschließlich mit LGS_U noch annehmbare Ergebnisse.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Tabelle 6.20 Messreihe 5; $p = 1$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k. Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 14,8\%$ $\sigma = 12,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 20,1\%$ $\sigma = 28,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 9,0\%$ $\sigma = 13,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,0\%$ $\sigma = 10,7\%$	$|\Delta\alpha| \geq 23,1\%$ $\sigma = 55,0\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 25,8\%$ $\sigma = 29,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 28,4\%$ $\sigma = 45,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 32,9\%$ $\sigma = 25,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$ $\sigma = 19,1\%$	$|\Delta\alpha| \geq 22,4\%$ $\sigma = 54,3\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 15,0\%$ $\sigma = 11,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,7\%$ $\sigma = 25,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 13,1\%$ $\sigma = 23,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,1\%$ $\sigma = 16,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 12,3\%$ $\sigma = 17,3\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 26,1\%$ $\sigma = 26,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 25,5\%$ $\sigma = 41,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 23,6\%$ $\sigma = 37,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,4\%$ $\sigma = 27,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 10,1\%$ $\sigma = 17,7\%$

Fazit: Unabhängig vom verwendeten Algorithmus und der ausgewerteten Harmonischen sind nahezu alle maximalen Abweichungen $|\Delta\alpha| > 10\%$. Da auch die zugehörigen Standardabweichungen $\sigma > 10\%$, handelt es sich nicht um einzelne Ausreißer, sondern um kontinuierlich unbrauchbare Werte.

6.6.2.1.2 Fehlerwiderstand R_F

Die Auswertungsergebnisse befinden sich in **Tabelle A6.22**. Generell bestimmen alle Algorithmen unabhängig von der ausgewerteten Frequenz den Fehlerwiderstand deutlich schlechter als im reinen Stichbetrieb; das gilt besonders für $R_F \geq 45,5 \Omega$.

6.6.2.2 Messreihe 5: hohe Strominjektion ($p = 36$)

Das gesunde Restnetz nach **Abb. 6.12** wird in diesem Fall durch Anschaltung der großen Kondensatorbank ($C = 4 \mu\text{F}$) an das Netz-Kraftwerksmodell realisiert. Der Erdschlussstrom beträgt etwa 55 A. Sämtliche Messergebnisse befinden sich in den **Tabellen A6.23** und **A6.24**.

6.6.2.2.1 Fehlerentfernungsparemeter α

Auswertung der Grundschiwingung

Tabelle 6.21 Messreihe 5; $p = 36$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 4,8\%$ $\sigma = 4,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,0\%$ $\sigma = 10,0\%$	$|\Delta\alpha| > 48,6\%$ $\sigma = 83,9\%$	$|\Delta\alpha| > 127\%$ $\sigma = 211\%$	$|\Delta\alpha| > 130\%$ $\sigma = 1052\%$
KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 5,5\%$ $\sigma = 5,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 12,3\%$ $\sigma = 9,2\%$	$|\Delta\alpha| > 48,9\%$ $\sigma = 84,0\%$	$|\Delta\alpha| > 127\%$ $\sigma = 211\%$	$|\Delta\alpha| > 153\%$ $\sigma = 951\%$

Fazit: Aus **Tabelle 6.21** geht hervor, dass bei Betrachtung einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last bei hoher Injektion beide Algorithmen bei satten Fehlern mit $R_F \approx 0 \Omega$ gute Ergebnisse liefern; mit einer maximalen Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 4,8\%$ liegt LGS_U tendenziell etwas besser. Bei größeren Fehlerwiderständen sind die Resultate unbrauchbar.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Tabelle 6.22 Messreihe 5; $p = 36$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 6,5\%$ $\sigma = 4,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,7\%$ $\sigma = 4,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,3\%$ $\sigma = 11,1\%$	$|\Delta\alpha| \leq 35,1\%$ $\sigma = 30,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 19,5\%$ $\sigma = 14,5\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 5,1\%$ $\sigma = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,4\%$ $\sigma = 3,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 13,5\%$ $\sigma = 10,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 35,0\%$ $\sigma = 30,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 18,5\%$ $\sigma = 14,4\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 4,1\%$ $\sigma = 2,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,4\%$ $\sigma = 2,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,1\%$ $\sigma = 4,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 20,7\%$ $\sigma = 15,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 60,8\%$ $\sigma = 40,0\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 3,6\%$ $\sigma = 2,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 3,9\%$ $\sigma = 2,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$ $\sigma = 3,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 20,3\%$ $\sigma = 15,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 61,7\%$ $\sigma = 40,5\%$

Fazit: Nach **Tabelle 6.22** zeigt der Algorithmus KUB_U bei hoher Strominjektion und Betrachtung einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last generell die besten Ergebnisse. Die Auswertungen der 7. Harmonischen fallen für Fehlerwiderstände $R_F \leq 45,5 \Omega$ mit einer maximalen absoluten Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$ deutlich besser aus als die der 5. Harmonischen.

Die Ergebnisse für die Grundschiwingung und die beiden Oberschiwingungen sind in **Abb. 6.14** im speziellen Fall $\alpha = 0,5$ grafisch dargestellt.

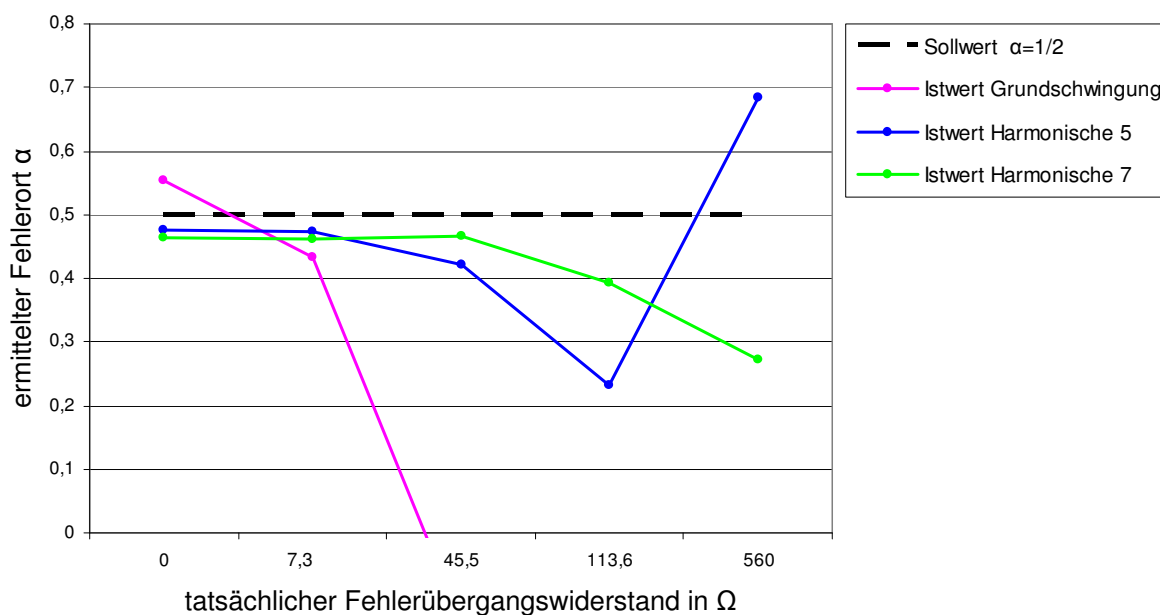


Abb. 6.14 Messreihe 5: ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ auf einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last bei hoher Strominjektion; $p = 36$; $\alpha = 0,5$; Algorithmus: KUB_U; Datenbasis: **Tabelle A6.23**

6.6.2.2.2 Fehlerwiderstand R_F

Die Auswertungsergebnisse befinden sich in **Tabelle A6.24**. Es ergibt sich ein ähnlicher Sachstand wie in 6.6.2.1.2 bei niedriger Strominjektion. Auch hier bestimmen alle Algorithmen unabhängig von der ausgewerteten Frequenz den Fehlerwiderstand deutlich schlechter als im reinen Stichbetrieb besonders für $R_F \geq 45,5 \Omega$. Auf eine genauere Darstellung wird verzichtet.

Fazit: Zur Bestimmung der Erdschlusentfernung auf dem Ringabschnitt zwischen Messstelle und erster Last sollte die Auswertung der Grundschiwingung mit dem Algorithmus LGS_U erfolgen. Bei niedriger Strominjektion ($p = 1$) und kleinen Fehlerwiderständen $R_F \leq 7,3 \Omega$ erzielt man ein $|\Delta\alpha| \leq 8,4\%$. Bei hoher Strominjektion ($p = 36$) ist nur bei näherungsweise satterm Fehler $R_F \approx 0 \Omega$ ein akzeptables $|\Delta\alpha| \leq 4,8\%$ zu verzeichnen.

Die 7. Harmonische in Verbindung mit dem Algorithmus KUB_U bleibt im praktisch wichtigen Fall hoher Strominjektion für $R_F \leq 45,5 \Omega$ bei einem $|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$. Somit erreicht sie auch bei deutlich größeren Fehlerwiderständen sehr gute Ergebnisse im Gegensatz zur Grundschiwingung.

Fehlerwiderstände werden deutlich schlechter bestimmt als im reinen Stichbetrieb und erscheinen meist zu groß.

Zusammenfassend sollte bei niedriger Strominjektion LGS_U mit der Grundschiwingung, bei hoher Injektion KUB_U mit der 7. Harmonischen eingesetzt werden.

6.6.3 Zusammenfassende Betrachtung zur Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt

Die Untersuchung von Ringleitungen beschränkt sich mit Bezug zur Standardtopologie „erdschlussbehafteter Stich mit Last“ auf den Bereich zwischen Messstelle und (erster) Last.

Eine Aussage darüber, ob dieser Ringabschnitt im konkreten Fall überhaupt erdschlussbetroffen ist, lässt sich injektionsunabhängig am besten durch Auswertung der 5. Harmonischen mit KUB_U treffen. Die Fehldetektionsrate liegt zwischen 18 % ($p = 1$) und 20 % ($p = 36$).

Die Bestimmung der Erdschlusssentfernung sollte bei niedriger Strominjektion mit LGS_U und der Grundschiwingung (für $R_F \leq 7,3 \Omega$ ist $|\Delta\alpha| \leq 8,4\%$), bei hoher Injektion mit KUB_U und der 7. Harmonischen (für $R_F \leq 45,5 \Omega$ ist $|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$) erfolgen.

Fehlerwiderstände werden deutlich schlechter bestimmt als im reinen Stichbetrieb und erscheinen meist zu groß. Für die ermittelte Abweichung ΔR_F vom Sollwert gilt injektionsunabhängig:

- Fehlerort am Leitungsanfang: $\Delta R_F \approx \text{wenige } \%$
- Fehlerort am Leitungsende: $\Delta R_F \approx 100\%$

Aus **Abb. 6.12** wird die Ursache für dieses Verhalten deutlich: An der Fehlerstelle teilt sich der Fehlerstrom entsprechend der beteiligten Leitungsimpedanzen auf. Je weiter sich der Fehler am Leitungsende befindet desto größer ist der Anteil der Strominjektion, der an der Messstelle vorbeigeführt und aufgrund der einseitigen Messung nicht mehr erfasst wird. Dieser Effekt führt zu einer scheinbaren Vergrößerung des ermittelten Fehlerwiderstandes.

6.7 Betrachtung des 5. und 7. Oberschwingungsverhältnisses des Erdschlussstroms im Netz mit isoliertem Sternpunkt

In diesem Abschnitt soll geklärt werden, ob ein Zusammenhang ableitbar ist zwischen der ermittelten Erdschlusssentfernung α im Netz mit isoliertem Sternpunkt und dem 5. bzw. 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom. Der Quotient aus Effektivwert der k . Harmonischen zum Effektivwert der Grundschiwingung bezeichnet das k . Oberschwingungsverhältnis (5.4.2.2). Das Oberschwingungsverhältnis des Erdschlussstroms $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ ist für verschiedene Fehlerzenarien in den **Tabellen A6.39, A6.40** zusammengestellt.

6.7.1 Standardtopologie mit Standardlast bei hoher und niedriger Strominjektion

Zunächst werden die Oberschwingungsverhältnisse bei Standardtopologie mit der ohmschen Standardlast untersucht, diese sind in **Tabelle A6.39** dargestellt.

Anmerkungen:

- Das Szenario $\alpha = 0$; $R_F = 0 \Omega$ in **Tabelle A6.39** wird als Fehlmessung nicht weiter betrachtet.
- Die Angaben von $|\Delta\alpha|$ basieren nach 6.3 bei niedriger Injektion ($p = 2$) auf dem Algorithmus LGS_U, bei hoher Strominjektion ($p = 36$) auf dem Algorithmus KUB_U.
- Bei ($p = 0$, $p = 1$) sind die Ergebnisse für α unbrauchbar [10], **Tabellen A6.47, A6.48**.

6.7.1.1 Strominjektion niedrig ($p = 2$)

- (1) Nach **Tabelle A6.39** ist im Erdschlussstrom keine direkte Abhängigkeit der Oberschwingungsverhältnisse $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$, $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ von α oder R_F festzustellen.
- (2) Für $R_F \leq 45,5 \Omega$ erreicht nach **Tabelle 6.2** die 5. Harmonische mit $|\Delta\alpha| \leq 10,0 \%$ etwas bessere Ergebnisse als die 7. Harmonische. In diesem Bereich liegt nach **Tabelle A6.39** der Effektivwert der 5. Harmonischen im Erdschlussstrom zwischen 4,81 % und 6,29 % der Grundschwingung. Aus **Tabelle A6.39** geht außerdem hervor, dass für $R_F \leq 45,5 \Omega$ die 7. Harmonische etwas stärker als die 5. im Erdschlussstrom auftritt.
- (3) Die 7. Harmonische erreicht nach **Tabelle 6.2** im Gegensatz zu (2) für alle Fehlerwiderstände $R_F \leq 560 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$. Es gilt: $4,38 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 9,29 \%$
- (4) In jedem Fehlerszenario mit $R_F < 560 \Omega$ ist $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} < I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$.
- (5) Nach **Tabelle 6.23** tritt in dieser Versuchsreihe die 7. Harmonische im Erdschlussstrom etwas stärker auf als die 5. Harmonische.

Tabelle 6.23 Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle A6.39** für $k = 5$ und $k = 7$ der Messreihe 1; $p = 2$; Standardtopologie mit Standardlast

k	p	Minimum	Maximum	Mittelwert
5	2	4,07%	6,29%	5,28%
7		4,38%	9,29%	7,11%

- (6) Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Ergebnissen für $|\Delta\alpha|$ nach **Tabelle 6.2** und den beiden Oberschwingungsverhältnissen der **Tabelle A6.39** ist nicht erkennbar.

6.7.1.2 Strominjektion hoch ($p = 36$)

- (1) Nach **Tabelle A6.39** nimmt bei festem α mit steigendem R_F das Oberschwingungsverhältnis beider Harmonischer im Erdschlussstrom tendenziell ab. Eine Abhängigkeit von α findet sich nicht.
- (2) Für $R_F \leq 7,3 \Omega$ erreicht nach **Tabelle 6.7** die 5. Harmonische mit $|\Delta\alpha| \leq 3,9 \%$ etwas bessere Werte als die 7. Harmonische. In diesem Bereich gilt: $3,37 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 15,65 \%$. Aus **Tabelle A6.39** geht ferner hervor, dass für $R_F \leq 7,3 \Omega$ das Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ meist größer ist als $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$.
- (3) Die 7. Harmonische erreicht nach **Tabelle 6.7** im Gegensatz zu (2) für alle Fehlerwiderstände $R_F \leq 113,6 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$. Es gilt: $2,44 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 18,74 \%$.

- (4) In allen Fehlerszenarien mit $R_F \geq 45,5 \Omega$ gilt: $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \approx I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$.
- (5) Nach **Tabelle 6.24** treten in dieser Versuchsreihe die 5. und die 7. Harmonische im Erdschlussstrom im Mittel etwa gleich stark auf.

Tabelle 6.24 Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle A6.39** für $k = 5$ und $k = 7$ der Messreihe 1; $p = 36$; Standardtopologie mit Standardlast

k	p	Minimum	Maximum	Mittelwert
5	36	1,36%	15,65%	5,72%
7		1,34%	18,74%	5,64%

6.7.2 Standardtopologie mit B6R-Last bei hoher und niedriger Strominjektion

Die B6R-Last verändert die Höhe der 5. und 7. Harmonischen im Erdschlussstrom. In diesem Abschnitt werden die 5. und 7. Oberschwingungsverhältnisse bei Standardtopologie mit B6R-Last (6.5) untersucht. Beispielhaft werden diese für die Fehlerstelle $\alpha = 0,5$ mit den Oberschwingungsverhältnissen der gleichen Fehlerszenarien bei Standardlast (6.7.1) verglichen. Die Vergleichsergebnisse zeigt **Tabelle A6.40**.

Aus **Tabelle A6.40** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) In [10] wurde festgestellt, dass bei besonders niedriger Injektion ($p = 0, p = 1$) unter Verwendung der Standardlast die Ergebnisse für α unbrauchbar sind (**Tabellen A6.47, A6.48**). Der Einsatz der B6R-Last - beispielhaft betrachtet in allen Fehlerszenarien mit $\alpha = 0,5$ - führt nach **Tabelle A6.19** zu sehr guten Ergebnissen (6.5.2). Nachfolgender Vergleich der Oberschwingungsverhältnisse in **Tabelle 6.25** zeigt, dass der Einsatz der B6R-Last diese im Erdschlussstrom deutlich erhöht, was mit den verbesserten Ergebnissen für α einhergeht.

Tabelle 6.25 Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle A6.40** für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 0, 1$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last

k	p	Last	Minimum	Maximum	Mittelwert
5	0	Standardlast	4,47 %	5,09 %	4,78 %
5		B6R-Last	12,43 %	18,85 %	16,70 %
7	0	Standardlast	6,74 %	7,39 %	6,51 %
7		B6R-Last	12,00 %	15,19 %	13,38 %
5	1	Standardlast	4,81 %	5,45 %	5,11 %
5		B6R-Last	6,50 %	7,83 %	7,39 %
7	1	Standardlast	5,51 %	7,80 %	6,93 %
7		B6R-Last	10,11 %	16,27 %	13,56 %

- (2) Bei $p = 2$ mit Standardlast sind die Ergebnisse für α nach 6.1.1.1 für beide Harmonische noch akzeptabel. Der Einsatz der B6R-Last bringt nur für Auswertungen der 5. Harmonischen und $R_F > 7,3 \Omega$ eine deutliche Verbesserung; die Ergebnisse mit der 7. Harmonischen ändern sich kaum. Nach **Tabelle A6.40** zeigt sich jedoch, dass das 5. Oberschwingungsverhältnis bei Einsatz der B6R-Last auch für $R_F \leq 7,3 \Omega$ ansteigt. Anzumerken ist, dass die B6R-Last das 7. Oberschwingungsverhältnis generell erhöht, ohne dass sich die Ergebnisse für α wesentlich ändern (**Tabellen A6.40, 6.26**).

Tabelle 6.26 Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle A6.40** für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 2$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last

k	p	Last	Minimum	Maximum	Mittelwert
5	2	Standardlast	4,70 %	5,45 %	5,15 %
5		B6R-Last	5,75 %	8,06 %	7,35 %
7	2	Standardlast	4,53 %	8,28 %	6,93 %
7		B6R-Last	8,38 %	17,12 %	14,01 %

- (3) Bei $p = 36$ mit Standardlast sind die Ergebnisse für α nach 6.1.2.1 sehr gut. Der Einsatz der B6R-Last ändert diese Verhältnisse kaum. Während nach **Tabellen A6.40, 6.27** die B6R-Last $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nur geringfügig erhöht, verdoppelt sich $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nahezu. Daraus lässt sich schließen, dass die niedrigeren Oberschwingungsverhältnisse bei Standardlast zur Bestimmung von α ausreichen. Trotz eklatanter Erhöhung von $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ durch die B6R-Last verbessern sich die Ergebnisse nicht.

Tabelle 6.27 Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle A6.40** für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 36$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last

k	p	Last	Minimum	Maximum	Mittelwert
5	36	Standardlast	1,49 %	15,65 %	6,92 %
5		B6R-Last	1,70 %	19,49 %	8,42 %
7	36	Standardlast	1,42 %	9,09 %	5,16 %
7		B6R-Last	2,37 %	19,36 %	10,35 %

6.7.3 Zusammenfassende Betrachtung der Oberschwingungsverhältnisse im Netz mit isoliertem Sternpunkt

- **Standardtopologie; Standardlast; Strominjektion niedrig ($p = 2$); Algorithmus: LGS_U**
Im Netz mit isoliertem Sternpunkt bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion erreicht die 7. Harmonische nach **Tabelle 6.2** für alle Fehlerwiderstände $R_F \leq 560 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 10,5\%$. Das ermittelte 7. Oberschwingungsverhältnis beträgt dabei: $4,38\% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 9,29\%$. In jedem Fehlerszenario mit $R_F < 560 \Omega$ ist $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} < I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$.

Eine Abhängigkeit der Oberschwingungsverhältnisse von α oder R_F ist nicht feststellbar. Ferner lässt die Höhe der Oberschwingungsverhältnisse in unterschiedlichen Fehlerszenarien keinen Rückschluss auf die Ergebnisqualität von α zu.

▪ **Standardtopologie; Standardlast; Strominjektion hoch ($p = 36$); Algorithmus: KUB_U**

In diesen Fehlerszenarien erreicht die 7. Harmonische nach **Tabelle 6.7** für $R_F \leq 113,6 \Omega$ ein $|\Delta\alpha| \leq 6,6\%$. Ermittelte 7. Oberschwingungsverhältnisse: $2,44 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 18,74 \%$.

Im Mittel gilt: $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \approx I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$

Bei festem α nimmt $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ für beide Harmonische im Erdschlussstrom mit steigendem R_F tendenziell ab. Eine Abhängigkeit der Oberschwingungsverhältnisse von α findet sich nicht.

▪ **Standardtopologie mit B6R-Last**

Die B6R-Last führt in Fehlerszenarien mit besonders niedriger Strominjektion ($p = 0, p = 1$) zu einer deutlichen Erhöhung der beiden betrachteten Oberschwingungsverhältnisse im Erdschlussstrom (**Tabelle 6.25**); die Ergebnisse für α verbessern sich gegenüber dem Standardlastfall eklatant.

Auch in den Fehlerszenarien mit ($p = 2$) erhöhen sich das 5. und 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom. Dennoch erreicht nur die 5. Harmonische für $R_F > 7,3 \Omega$ eine wesentliche Ergebnisverbesserung für α .

In den Fehlerszenarien mit hoher Strominjektion ($p = 36$) ändert der Einsatz der B6R-Last die sehr guten Ergebnisse des Standardlastfalls kaum, obwohl sich das 5. und insbesondere das 7. Oberschwingungsverhältnis erhöhen.

6.8 Einfluss von Fehlern der Eingangsdaten auf die Ergebnisgrößen α und R_F

Eingangsdaten der Algorithmen LGS_U und KUB_U sind einerseits die Messgrößen gemäß 3.3.1 und andererseits die Leitungsparameter des erdschlussbehafteten Abgangs nach **Tabelle 3.1**. Keine Messung ist absolut genau, sondern immer mit einem gewissen Fehler behaftet. Auch Angaben zu Leitungsparametern sind Ungenauigkeiten unterworfen. Dies gilt vor allem für die Nullimpedanz, die eine gewisse Temperatur- und Witterungsabhängigkeit zeigt.

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von Eingangsdatenfehlern auf die Ergebnisgrößen α , R_F genauer untersucht. Auf der Basis eines konkreten Datensatzes ($p = 36$; $\alpha = 0,5$; $R_F = 7,3 \Omega$) werden mit beiden Algorithmen in einer ersten Rechnung jeweils für die Grundschwingung und die beiden höheren Harmonischen α und R_F ermittelt. Im Anschluss wird entsprechend **Tabelle 6.28** jede Messgröße und jeder Leitungsparameter getrennt voneinander modifiziert und jeweils eine erneute Rechnung durchgeführt. Die Änderung der Ausgangsgrößen $\Delta\alpha$, ΔR_F , verursacht durch die Modifikation der jeweiligen Eingangsgröße, ist in **Tabelle 6.28** vorzeichenrichtig dargestellt. Hierbei werden Spannungen und Ströme getrennt nach Betrag und Phase, Leitungsparameter getrennt nach Real- und Imaginärteil untersucht.

Leitungsparameter werden üblicherweise in symmetrischen Komponenten angegeben. Daher bezieht sich die Fehlerbetrachtung auf deren Modifikation und nicht auf die Elemente des Vierleiter-Ersatzschaltbildes, die nach **Tabelle 3.1** berechnet werden.

In **Tabelle 6.28** bezeichnen $\Delta\alpha$, ΔR_F den Unterschied zwischen einer Rechnung mit den tatsächlichen Mess- und Leitungsdaten und einer Rechnung mit der in der ersten Spalte genannten Modifikation. Diese muss so groß gewählt werden, dass sie einerseits zu einem erkennbaren $\Delta\alpha$ bzw. ΔR_F führen kann und andererseits noch etwa in der Größenordnung möglicher Messfehler nach **Tabellen 6.29, 6.31** liegt. Es werden Betragsabweichungen von 10 % und Winkelabweichungen von 1° zugrunde gelegt. Die Ergebnisse, bei denen die jeweilige Änderung der Eingangsgröße zu $|\Delta\alpha| > 1\%$ oder $|\Delta R_F| > 0,5 \Omega$ führt, sind rot dargestellt.

Aus **Tabelle 6.28** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Bezogen auf die Ordnungszahl verhalten sich die beiden Algorithmen gleichwertig und produzieren nahezu identische Abweichungen $\Delta\alpha$, ΔR_F .
- (2) Fehlmessungen von Spannungen oder Strömen, die *nicht* in der Fehlermasche vorkommen, (\underline{U}_{2E} , \underline{I}_2 , \underline{U}_{3E} , \underline{I}_3) bleiben ohne Einfluss auf α und R_F .
- (3) Fehlmessungen von Größen mit direktem Bezug zur fehlerbehafteten Masche (\underline{U}_{1E} , \underline{I}_1 , \underline{I}_S) führen teilweise zu erheblichen Abweichungen in α und/oder R_F .
 - **U_{1E} :**
Eine Betragsänderung von 10% beeinflusst α erheblich mit $|\Delta\alpha| \approx 5\%$ und auch R_F deutlich mit $|\Delta R_F| \approx 1 \Omega$. Dies gilt für jede Ordnungszahl k der Harmonischen.
 - **φ_{U1E} :**
Die Phasenänderung von 1° wirkt sich bei der Grundschiwingung mit $|\Delta\alpha| \approx 4\%$ erheblich aus, während die Auswertung der Oberschwingungen mit $|\Delta\alpha| < 1\%$ kaum betroffen ist.
 - **I_1 :**
Die Betragsänderung führt unabhängig von der Ordnungszahl k der Harmonischen zu einer beträchtlichen Abweichung $|\Delta\alpha| \approx 4,5\%$.
 - **φ_{I1} :**
Die Grundschiwingungsauswertung ist von der Phasenänderung mit $|\Delta\alpha| \approx 2\%$ betroffen, während die Oberschwingungsauswertungen mit $|\Delta\alpha| \approx 0,2\%$ keine Abhängigkeit zeigen.
 - **I_S :**
Für alle Ordnungszahlen k der Harmonischen gibt es lediglich einen Einfluss auf den Fehlerwiderstand $|\Delta R_F| < 1 \Omega$. Der Fehlerentfernungsparameter α bleibt unbeeinflusst.
 - **φ_{IS} :**
Bei der Grundschiwingung besteht ein Einfluss mit $|\Delta\alpha| \approx 2,3\%$, während die Oberschwingungen mit $|\Delta\alpha| < 0,5\%$ kaum betroffen sind.
- (4) Von allen Änderungen der Leitungsparameter hat lediglich die Erhöhung der Mitimpedanz ($\underline{Z}_M = R_M + j X_M$) um 10% einen merklichen Einfluss auf α und R_F .
 - **R_M :**
Bei der Grundschiwingungsauswertung sind $|\Delta\alpha| \approx 2,9\%$ und $|\Delta R_F| \approx 0,8 \Omega$. Die Oberschwingungsergebnisse sind mit $|\Delta\alpha| < 0,1\%$ und $|\Delta R_F| \approx 0,4 \Omega$ kaum betroffen.
 - **X_M :**
Der Einfluss einer fehlerhaften Mitreaktanz auf α ist erheblich. Bei der Grundschiwingung ist $|\Delta\alpha| \approx 6,8\%$, bei den Oberschwingungen etwas geringer mit $|\Delta\alpha| \approx 4,4\%$. Der Einfluss auf das ermittelte R_F beträgt $|\Delta R_F| \approx 0,68 \Omega$ für die Grundschiwingung und $|\Delta R_F| \approx 0,4 \Omega$ für die beiden Oberschwingungen.

6.8.1 Zusammenfassende Betrachtung des Einflusses von Eingangsdatenfehlern

Nach (2), (3) ergeben nur Modifikationen von Größen mit direktem Bezug zur fehlerbehafteten Masche Abweichungen in α . Deutlichen Einfluss auf α haben die Messwerte von U_{1E} , I_1 sowie die Mitreaktanz X_M unabhängig von der Ordnungszahl der Harmonischen. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Winkel φ_{U1E} , φ_{I1} , φ_{IS} und der Leitungsparameter R_M den Fehlerentfernungsparameter α generell nur bei Grundschiwingungsauswertungen nennenswert beeinflussen.

6.9 Bestimmung der Fehlergrenzen der verwendeten Wandler

In diesem Abschnitt werden die Fehlergrenzen bestimmt, die sich aus der Definition der Genauigkeitsklasse der verwendeten Spannungs- bzw. Stromwandler ergeben. Dabei sind nur Messgrößen mit wesentlichem Einfluss auf den Fehlerentfernungparameter α von Interesse. Nach 6.8 sind dies die Spannung \underline{U}_{1E} und der Phasenstrom \underline{I}_1 der fehlerbetroffenen Phase. Die Spannungen \underline{U}_{2E} , \underline{U}_{3E} und die Ströme \underline{I}_2 , \underline{I}_3 sind nach 6.8 ohne Einfluss auf α , so dass in den nachfolgenden Untersuchungen die ausschließliche Betrachtung von \underline{U}_{1E} und \underline{I}_1 genügt.

Nach 5.3 wurden die verwendeten Datensätze mit Messwandlern der Genauigkeitsklassen 0,2; 0,5 bzw. 1 erhoben. Anzumerken ist, dass in der Praxis spezielle Wandler zu Schutzzwecken eingesetzt werden, für die eigene Genauigkeitsklassen definiert sind.

6.9.1 Spannungswandler

Die Fehlergrenzen für Spannungswandler sind in **Tabelle 6.29** zusammengestellt. Diese gelten für Leistungen zwischen 25% und 100% der Nennleistung - mindestens jedoch 15 VA - und einen Bürdenleistungsfaktor von 0,8. Die Schutzwandlerklassen 3P und 6P (Protection) sind in den beiden letzten Zeilen aufgeführt. Nach 5.3.3 werden in allen Versuchsreihen die drei Leiter-Erd-Spannungen mit Spannungswandlern der Klasse 0,5 gemessen.

Tabelle 6.29 Fehlergrenzen für Spannungswandler nach [8], [22]

Genauigkeitsklasse	Bereich der Primärspannung	Spannungsmessabweichung	Fehlwinkel in Minuten
0,1	80 % - 120 %	0,1 %	5
0,2		0,2 %	10
0,5		0,5 %	20
1,0		1,0 %	40
3,0		3,0 %	-
3P	5 % - 190 %	3,0 %	120
6P		6,0 %	240

Die Betrachtung der verwendeten Spannungswandler lässt folgende Schlüsse zu:

- (1) Die eingesetzten Spannungswandler haben eine Nennspannung von $220 \text{ V}/\sqrt{3}$. Dies entspricht im Netz-Kraftwerksmodell einer Spannung von $20 \text{ kV}/\sqrt{3}$ (**Tabelle 5.1**). Nach **Tabelle 6.29** gelten die Fehlergrenzen für Messwandler der Klasse 0,5 jedoch nur für Primärspannungen, die mindestens 80 % und höchstens 120 % der Nennspannung betragen. Somit muss eine Leiter-Erd-Spannung U_{1E} von mindestens $20 \text{ kV}/\sqrt{3} * 0,8 = 9.238 \text{ V}$ vorliegen, damit die Fehlergrenzen nach **Tabelle 6.29** gelten.

- (2) **Tabelle A6.45** zeigt die Leiter-Erd-Spannung U_{IE} der erdschlussbetroffenen Phase L1 in den 50 Fehlerszenarien der Messreihe 1 (Netz mit isoliertem Sternpunkt; Standardtopologie mit Standardlast) für die Grundschwingung. Es ist erkennbar, dass U_{IE} ansteigt, wenn eine der Größen: Fehlerentfernung α , Strominjektion p oder Fehlerwiderstand R_F ansteigt. Demnach treten die größten Leiter-Erd-Spannungen $U_{IE} \approx 11$ kV in den Szenarien mit $p = 36$ und $R_F = 560 \Omega$ auf.
- (3) Aus (1) und (2) folgt, dass lediglich in fünf Fehlerszenarien ($R_F = 560 \Omega$ und $p = 36$) die Leiter-Erd-Spannung U_{IE} die erforderliche Spannungsuntergrenze von 9.238 V überschreitet. Nur in diesen Szenarien werden die Anforderungen an die Definition der Wandlerklasse eingehalten, so dass die maximale Messabweichung von 0,5 % nach **Tabelle 6.29** garantiert ist. In allen anderen 45 Szenarien gilt dies nicht, da U_{IE} die erforderliche untere Spannungsuntergrenze von 9.238 V deutlich unterschreitet.

Fazit: In 45 von 50 untersuchten Fehlerszenarien wird die erforderliche Mindestspannung von $U_{IE} = 9.238$ V unterschritten. Somit sind in 90 % der Fälle die Fehlergrenzen der Genauigkeitsklasse 0,5 nach **Tabelle 6.29** nicht mehr garantiert und der Einfluss auf α nicht abschätzbar.

6.9.2 Phasenstromwandler

Die Fehlergrenzen für Stromwandler sind in **Tabelle 6.30** zusammengestellt. Diese gelten bei Nennbürde und Nennleistungsfaktor. Die Schutzwandlerklassen 5P und 10P sind in den beiden letzten Zeilen aufgeführt; für sie sind bei Strömen kleiner I_n keine Fehlergrenzen definiert. In allen Versuchsreihen werden nach 5.3.4 die drei Phasenströme mit Stromwandlern der Klasse 0,2 gemessen, die mit Messshunts der Klasse 0,5 abgeschlossen sind.

Tabelle 6.30 Fehlergrenzen für Stromwandler nach [8], [22]

Genauigkeitsklasse	Strommessabweichung in % bei I/I_n				Fehlwinkel in Minuten bei I/I_n			
	0,05	0,2	1,0	1,2	0,05	0,2	1,0	1,2
0,1	0,40	0,20	0,10	0,10	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,20	0,20	30	15	10	10
0,5	1,50	0,75	0,50	0,50	90	45	30	30
1	3,00	1,50	1,00	1,00	180	90	60	60
3				3,00				
5				5,00				
5P			1,00	5,00				60
10P			3,00	10,00				

Die Betrachtung der verwendeten Phasenstromwandler lässt folgende Schlüsse zu:

- (1) Die eingesetzten Stromwandler haben eine Nennübersetzung $\ddot{u} = 1$ bei einem Nennstrom von 5 A. Dies entspricht im Netz-Kraftwerksmodell einem Strom von $I_n = 500$ A (**Tabelle 5.1**).
- (2) Um die tatsächliche Fehlergrenze der verwendeten Stromwandler abschätzen zu können, zeigt **Tabelle 6.31** den maximalen Phasenstrom I_1 aller Fehlerszenarien bei Standardtopologie im Netz mit isoliertem Sternpunkt (Messreihe 1). Der Vergleich von I_1 / I_n (**Tabelle 6.31**) mit I / I_n (**Tabelle 6.30**) zeigt eine deutliche Vergrößerung der garantierten Strommessabweichungen und Fehlwinkel gegenüber dem Wandlernennbetrieb. Anzumerken ist, dass in einigen Fehlerszenarien wesentlich kleinere Phasenströme I_1 auftreten als der Maximalwert, so dass mit noch größeren Fehlergrenzen zu rechnen ist.

Tabelle 6.31 Maximalwerte des Phasenstroms I_1 aller Fehlerszenarien nach **Tabelle A6.46** und Verhältnis zum Wandlernennstrom I_n

	I_1	I_n	I_1 / I_n
$p = 2$	20,7 A	500 A	4,14 %
$p = 36$	61,6 A	500 A	12,32 %

Fazit: Die verwendeten Stromwandler garantieren in den beiden Erdschlusszenarien hoher und niedriger Strominjektion mit dem jeweils größten Phasenstrom I_1 *Strommessabweichungen* von 0,35 % ($p = 36$) bzw. 0,75 % ($p = 2$) und *Fehlwinkel* von 15' ($p = 36$) bzw. 30' ($p = 2$). Die Phasenströme I_1 sind in allen anderen Erdschlusszenarien kleiner, so dass mit größeren Fehlergrenzen zu rechnen ist. Generell sind die gemessenen Ströme deutlich niedriger als der Wandlernennstrom. Der *Fehlwinkel* beeinträchtigt α bei Auswertungen mit der 5. oder 7. Harmonischen nach **Tabelle 6.28** ohnehin nur äußerst gering.

7 Anwendung der Algorithmen im erdschlusskompensierten Netz

In den vorangegangenen Kapiteln bildete das Netz mit isoliertem Sternpunkt die Basis der Untersuchungen. Im Folgenden wird geprüft, inwieweit sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die praktisch wichtigen erdschlusskompensierten Netze übertragen lassen.

Ausgangspunkt ist eine Beschreibung des gelöschten Netzes im Oberschwingungsbereich als sehr gute Näherung des Netzes mit isoliertem Sternpunkt. Dieser theoretische Zusammenhang wird auch praktisch überprüft. Im Fokus steht außerdem die Fragestellung, ob sich die ursprünglich für das Netz mit isoliertem Sternpunkt konzipierten Algorithmen LGS_U und KUB_U zur Erdschlussentfernungsmessung in einem gelöschten Netz erfolgreich verwenden lassen. Hierzu werden verschiedene Versuchsreihen betrachtet. Die zugrunde liegenden Datensätze wurden im Rahmen der Diplomarbeit [10] erhoben und dort bereits mit dem Algorithmus LGS_U ausgewertet.

7.1 Das Netz mit isoliertem Sternpunkt als Ersatzmodell des gelöschten Netzes für höhere Harmonische bei Erdschluss

Zunächst wird darauf hingewiesen, dass dieser Ansatz nicht grundsätzlich neu ist, siehe [6], [23] und auch praktisch im Bereich der Erdschlussrichtungserfassung bereits konsequent ausgenutzt wird [4], [6]. So werten Oberschwingungsrichtungsrelais im stationären Erdschlussfall die 5. Harmonischen der Verlagerungsspannung und des Abgangssummenstroms aus, um einen erdschlussbehafteten Abgang zu identifizieren. Bei der so genannten Oberschwingungsrelativmessung werden zu diesem Zweck die 5. Harmonischen der Abgangssummenströme verglichen.

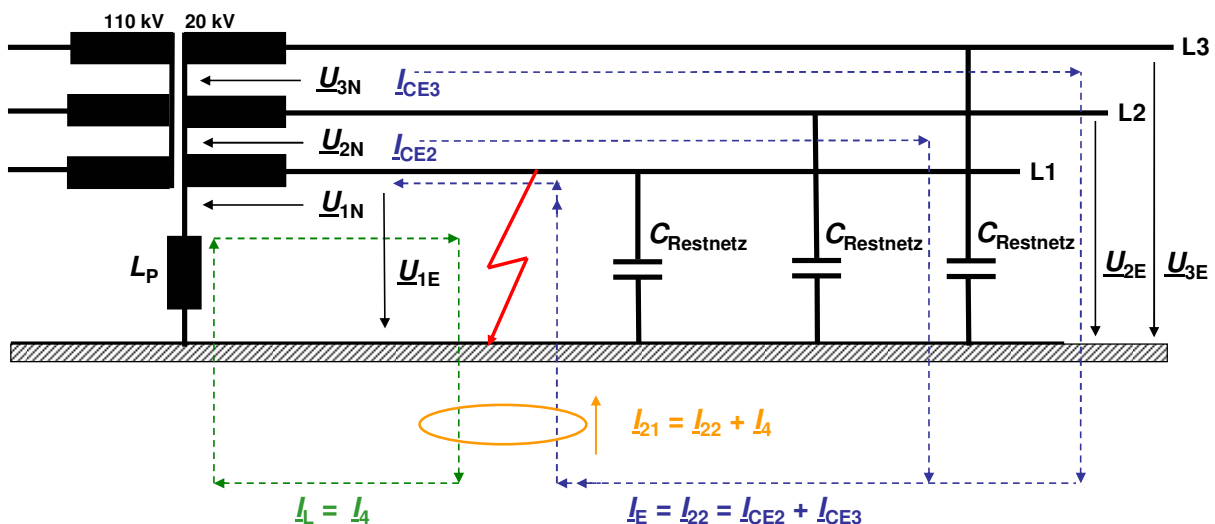


Abb. 7.1 Gelöschtes Netz im Erdschlussfall; vereinfachte Darstellung
 blau: Erdschlussstrom des gesunden Restnetzes $I_E = I_{22}$
 grün: Löschstrom $I_L = I_4$
 orange: externe Strominjektion nach Kompensation $I_{21} = -I_S$

In **Abb. 7.1** sind die Verhältnisse in einem gelöschten Netz noch einmal vereinfacht dargestellt. Im Unterschied zum Netz mit isoliertem Sternpunkt ist hier eine Petersen-Spule vorhanden. Der Erdschlussstrom ist allgemein näherungsweise durch den Ausdruck (7.1) gegeben

$$I_E^{(k)} \approx \sqrt{3} \cdot U_N^{(k)} \cdot k \cdot \omega_{50\text{Hz}} \cdot C_{\text{Restnetz}} \quad (7.1)$$

Für den Löschstrom gilt nach **Abb. 7.1** näherungsweise die folgende Beziehung

$$I_L^{(k)} \approx \frac{U_N^{(k)}}{\sqrt{3} \cdot k \cdot \omega_{50\text{Hz}} \cdot L_P} \quad (7.2)$$

Die Ordnungszahl k der betrachteten Harmonischen wird in Klammern als hochgestellter Index mitgeführt. In den Ausdrücken (7.1), (7.2) spiegelt sich der bekannte Umstand wider, dass der kapazitive Blindleitwert proportional mit der Frequenz zunimmt, während der induktive Blindleitwert antiproportional zur Frequenz fällt. Um beide Effekte gleichzeitig betrachten zu können, wird in (7.3) das Verhältnis von Löschstrom (7.2) zu Erdschlussstrom (7.1) bezogen auf die k . Harmonische gebildet:

$$\frac{I_L^{(k)}}{I_E^{(k)}} \approx \frac{1}{3 \cdot k^2 \cdot \omega_{50\text{Hz}}^2 \cdot C_{\text{Restnetz}} \cdot L_P} \quad (7.3)$$

Da außer der Ordnungszahl k alle Größen auf der rechten Seite konstant sind, gilt:

$$\frac{I_L^{(k)}}{I_E^{(k)}} \sim \frac{1}{k^2} \quad (7.4)$$

Das Verhältnis von Löschstrom zu Erdschlussstrom fällt quadratisch - also recht schnell - mit steigender Ordnungszahl k der betrachteten Harmonischen.

In einem Netz mit *isoliertem Sternpunkt* fließt kein Löschstrom, so dass die Quotienten (7.3) bzw. (7.4) immer den Wert Null haben. In *gelöschten Netzen* ist eine leicht überkompensierte Fahrweise üblich, so dass das Verhältnis von Löscho- zu Erdschlussstrom etwas größer als eins wird. Ist der Löschstrom beispielsweise 10% größer eingestellt als der Erdschlussstrom, ergibt sich ein Verhältnis von Löscho- zu Erdschlussstrom von 1,1.

Tabelle 7.1 Abhängigkeit des Quotienten $1/k^2$ von der Ordnungszahl k

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{1}{k^2}$	100%	25%	11,1%	6,25%	4%	2,78%	2,04%	1,56%	1,23%	1%	0,83%	0,69%	0,59%

Aus **Tabelle 7.1** lassen sich zwei Schlüsse ziehen:

- (1) Der Annäherungseffekt des gelöschten Netzes an den Grenzfall des Netzes mit isoliertem Sternpunkt ist für die 5. Harmonische im Wesentlichen vollzogen. Das Verhältnis von Löscherdschlussstrom zu Erdschlussstrom ist hier bereits auf 4% gesunken.
- (2) Die Betrachtung von Harmonischen deutlich höherer Ordnung verbessert den Angleichungseffekt kaum noch, da der Term $\frac{1}{k^2}$ asymptotisch immer langsamer gegen Null läuft.

7.2 Gegenüberstellung beider Netzformen auf Basis eines gleichen Erdschlusszenarios

Um die theoretischen Aussagen aus 7.1 auch praktisch zu verifizieren, wird in zwei aufeinander folgenden Versuchen am Netz-Kraftwerksmodell die jeweils gleiche Fehlerkonstellation zunächst in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt und dann in einem gelöschten Netz mit $\approx 10\%$ Überkompensation hergestellt. Die konkreten Versuchsbedingungen sind $\alpha = \frac{1}{3}$, $R_F = 7,3 \Omega$, $p = 5$, entsprechend einem Erdschlussstrom von etwa 7,2 A. Beide Versuche werden jeweils für die Grundschiwingung, die 5. und die 7. Harmonische mit den Algorithmen LGS_U und KUB_U ausgewertet. Im Falle des erdschlusskompensierten Netzes wird zusätzlich der Löscherdschlussstrom $I_L = I_4$ erfasst, so dass sich nach **Abb. 7.1** der Erdschlussstrom des gesunden Restnetzes zu $I_{22} = I_{21} - I_4$ berechnen lässt. In 2.2 wurde gezeigt, dass sich die externe Strominjektion I_{21} direkt aus der Summenstrommessung zu $I_{21} = -I_S$ ergibt.

Tabelle 7.2 Vergleich der Mess- und Ergebnisgrößen eines Netzes mit isoliertem Sternpunkt und eines gelöschten Netzes für den speziellen Fehlerfall $\alpha = \frac{1}{3}$, $R_F = 7,3 \Omega$, $p = 5$

	Netz mit isoliertem Sternpunkt						Gelöschtes Netz					
	7. Harmonische		5. Harmonische		Grundschiwingung		7. Harmonische		5. Harmonische		Grundschiwingung	
	LGS_U	KUB_U	LGS_U	KUB_U	LGS_U	KUB_U	LGS_U	KUB_U	LGS_U	KUB_U	LGS_U	KUB_U
U_{1E} [V]	15,1	15,1	11,1	11,1	132,8	132,8	14,3	14,3	13,8	13,8	99,6	99,6
U_{2E} [V]	187,1	187,1	246,5	246,5	20396	20396	178,8	178,8	307,5	307,5	20454	20454
U_{3E} [V]	192,4	192,4	207,6	207,6	20487	20487	180,2	180,2	268,5	268,5	20509	20509
I_1 [A]	0,65	0,65	0,58	0,58	18,8	18,8	0,62	0,62	0,69	0,69	19,1	19,1
I_2 [A]	0,18	0,18	0,18	0,18	18,6	18,6	0,17	0,17	0,23	0,23	18,6	18,6
I_3 [A]	0,12	0,12	0,20	0,20	17,3	17,3	0,10	0,10	0,17	0,17	17,5	17,5
I_L [A]	0	0	0	0	0	0	0,01688	0,01688	0,01482	0,01482	8,3343	8,3343
I_S [A]	-0,53	-0,53	-0,47	-0,47	-7,3	-7,3	0,50	0,49761	0,56	0,55889	2,17	2,1695
I_E [A]	0,53	0,53	0,47	0,47	7,3	7,3	0,50382	0,50382	0,55672	0,55672	7,2465	7,2465
R_F [Ω]	9,1982	8,9517	9,0305	8,7536	7,0263	7,2827	9,1903	8,9411	9,8885	9,5899	18,5851	18,0856
α	0,29154	0,30432	0,29462	0,30736	0,33141	0,32065	0,29611	0,30914	0,29655	0,30992	0,27469	0,27606
$\frac{I_L}{I_E}$	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,35%	3,35%	2,66%	2,66%	115%	115%

Tabelle 7.2 entnimmt man folgende Ergebnisse:

- (1) Grün dargestellt sind der Löschstrom I_L , der Erdschlussstrom des gesunden Restnetzes I_E und das Verhältnis I_L/I_E der beiden Größen. Die letzte Zeile zeigt, dass das grundschwingungs-basierte Verhältnis I_L/I_E von etwa 115% bei Betrachtung der beiden höheren Harmonischen auf Werte um 3% zusammenbricht. Dieses Ergebnis stimmt auch mit den theoretischen Werten der **Tabelle 7.1** gut überein. Anzumerken ist, dass das Verhältnis I_L/I_E entgegen der Erwartungen für die 7. geringfügig größer ist als für die 5. Harmonische.
- (2) Zusammengehörige Rechenergebnisse α , R_F für das gelöschte Netz und das Netz mit isoliertem Sternpunkt sind jeweils in der gleichen Farbe ausgeführt. Betrachtet man die 5. und 7. Harmonische, so sind die zwischen den beiden Netzformen ermittelten maximalen absoluten Abweichungen $|\alpha_{\text{isoliert}} - \alpha_{\text{gelöscht}}| < 5\%$ und die ermittelten $|R_{F,\text{isoliert}} - R_{F,\text{gelöscht}}| < 1 \Omega$. Die Ergebnisse sind also nahezu identisch. Bei der Grundschwingungsbetrachtung fällt der Vergleich - vor allem beim ermittelten Fehlerwiderstand - deutlich ungünstiger aus.
- (3) Im Oberschwingungsbereich zeigt der auf einer vollständigen Systemlösung basierende Algorithmus KUB_U um $\Delta\alpha \approx 1,3\%$ leicht bessere Ergebnisse als LGS_U.

7.3 Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion ($p = 2$) im gelöschten Netz

Diese Konstellation ist auch im Netz mit isoliertem Sternpunkt (6.1.1) untersucht worden, so dass ein Vergleich möglich ist. Die zwei verbleibenden Freileitungen des Netz-Kraftwerksmodells liefern zusammen $I_{22} \approx 2,4$ A Erdschlussstrom und bilden das gesunde Restnetz. Mit einem Löschstrom $I_L \approx 3,7$ A verbleibt eine tatsächliche Strominjektion von $I_{21} \approx 1,3$ A im Erdschlussfußpunkt. Die gesamten Messergebnisse befinden sich in den **Tabellen A6.29** und **A6.30**.

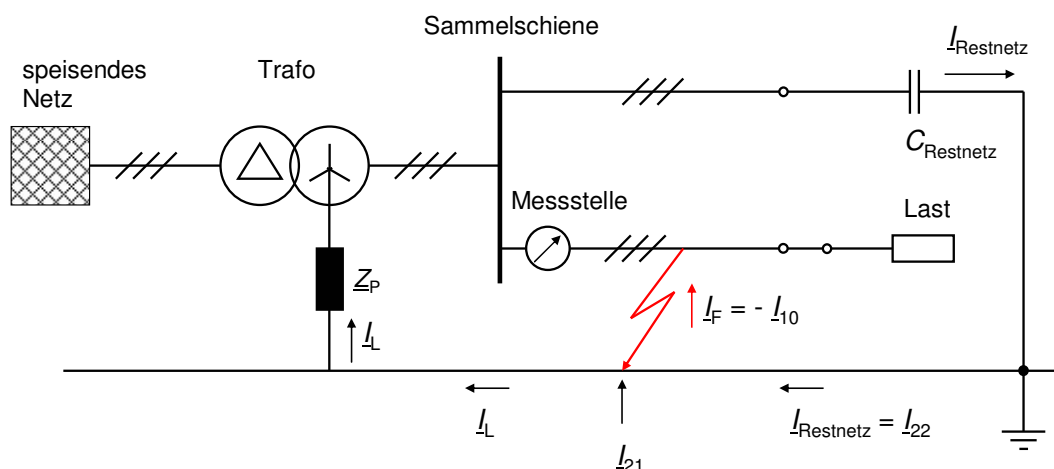


Abb. 7.2 Versuchsanordnung zu Messreihe 7; gelöschtes Netz; Messung am fehlerbehafteten Stich mit Standardlast bei $p = 2$

7.3.1 Fehlerentfernungsparameter α

Auswertung der Grundschiwingung

Tabelle 7.3 Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 1,5\%$ $\sigma = 2,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 3,0\%$ $\sigma = 2,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 12,1\%$ $\sigma = 10,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 28,2\%$ $\sigma = 28,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 121,3\%$ $\sigma = 141,0\%$
KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 1,5\%$ $\sigma = 2,4\%$	$|\Delta\alpha| \leq 3,0\%$ $\sigma = 2,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 12,1\%$ $\sigma = 10,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 28,2\%$ $\sigma = 28,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 121,5\%$ $\sigma = 141,3\%$

Aus **Tabelle 7.3** geht hervor, dass beide Algorithmen bei Fehlerwiderständen $R_F \leq 7,3 \Omega$ mit einer maximalen Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 3,0\%$ sehr gute Ergebnisse liefern, die auch qualitativ besser sind als im Netz mit isoliertem Sternpunkt (vgl. 6.1.1.1). Bei größeren Fehlerwiderständen sind die Resultate jedoch unbrauchbar, während im Netz mit isoliertem Sternpunkt die ermittelten Fehlerentfernungsparameter α auch noch für $R_F = 45,5 \Omega$ akzeptable Werte erreichen.

Fazit: Im gelöschten Netz bei niedriger Injektion liefert die Entfernungsbestimmung mit der Grundschiwingung bei Standardtopologie für $R_F \leq 7,3 \Omega$ deutlich bessere Ergebnisse als im Netz mit isoliertem Sternpunkt.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Tabelle 7.4 Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 3,4\%$ $\sigma = 4,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 24,3\%$ $\sigma = 13,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,0\%$ $\sigma = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| \leq 16,9\%$ $\sigma = 10,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 31,6\%$ $\sigma = 25,6\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 10,1\%$ $\sigma = 12,1\%$	$|\Delta\alpha| \leq 33,1\%$ $\sigma = 20,7\%$	$|\Delta\alpha| \leq 8,3\%$ $\sigma = 8,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 22,5\%$ $\sigma = 11,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 28,9\%$ $\sigma = 24,4\%$
7	LGS_U	$|\Delta\alpha| \leq 7,4\%$ $\sigma = 9,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 7,5\%$ $\sigma = 10,0\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,1\%$ $\sigma = 8,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 4,9\%$ $\sigma = 5,5\%$	$|\Delta\alpha| \leq 6,9\%$ $\sigma = 7,2\%$
7	KUB_U	$|\Delta\alpha| \leq 14,9\%$ $\sigma = 16,9\%$	$|\Delta\alpha| \leq 14,9\%$ $\sigma = 17,8\%$	$|\Delta\alpha| \leq 12,9\%$ $\sigma = 16,2\%$	$|\Delta\alpha| \leq 10,9\%$ $\sigma = 11,3\%$	$|\Delta\alpha| \leq 5,1\%$ $\sigma = 5,6\%$

Aus **Tabelle 7.4** entnimmt man, dass die Auswertung der 7. Harmonischen durch den Algorithmus LGS_U mit einem maximalen absoluten Fehler $|\Delta\alpha| \leq 7,5\%$ bis $R_F = 560 \Omega$ am günstigsten ist. In Einzelfällen werden unter Verwendung der 5. Harmonischen etwas bessere Ergebnisse erzielt. Der Vergleich mit 6.1.1.1 zeigt, dass die Bestimmung von α im gelöschten Netz genauer erfolgt als im Netz mit isoliertem Sternpunkt.

Fazit: Die Auswertung mit der 7. Harmonischen im gelöschten Netz bei niedriger Injektion liefert in Kombination mit dem Algorithmus LGS_U auch bei hohen Fehlerwiderständen bis $R_F = 560 \Omega$ noch akzeptable Ergebnisse. Mit $|\Delta\alpha| \leq 7,5\%$ sind diese besser als im Netz mit isoliertem Sternpunkt.

7.3.2 Fehlerwiderstand R_F

Auswertung der Grundschiwingung

Tabelle 7.5 Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung ($|\Delta R_F|, \sigma$) = f (R_F) der Grundschiwingung nach Algorithmen

Algorithmus	Istwert R_F				
	0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 14,0 \Omega$ $\sigma = 9,9 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 19,2 \Omega$ $\sigma = 14,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 47,2 \Omega$ $\sigma = 45,7 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 96,8 \Omega$ $\sigma = 102,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 431,3 \Omega$ $\sigma = 477,5 \Omega$
KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 10,8 \Omega$ $\sigma = 6,9 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 16,0 \Omega$ $\sigma = 11,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 43,4 \Omega$ $\sigma = 43,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 94,9 \Omega$ $\sigma = 101,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 436,6 \Omega$ $\sigma = 482,2 \Omega$

Fazit: Bei Betrachtung der Grundschiwingung im gelöschten Netz mit niedriger Strominjektion werden die Fehlerwiderstände von beiden Algorithmen grundsätzlich deutlich zu groß bestimmt. Die Ergebnisse sind unbrauchbar.

Auswertung der 5. und 7. Harmonischen

Tabelle 7.6 Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung ($|\Delta R_F|, \sigma$) = f (R_F) der k . Harmonischen nach Algorithmen

k	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
5	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 4,3 \Omega$ $\sigma = 2,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 15,0 \Omega$ $\sigma = 7,6 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 14,3 \Omega$ $\sigma = 7,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 16,1 \Omega$ $\sigma = 8,5 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 52,3 \Omega$ $\sigma = 28,7 \Omega$
5	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 6,0 \Omega$ $\sigma = 4,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 18,2 \Omega$ $\sigma = 9,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 16,5 \Omega$ $\sigma = 8,3 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 17,7 \Omega$ $\sigma = 9,1 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 51,0 \Omega$ $\sigma = 28,3 \Omega$
7	LGS_U	$|\Delta R_F| \leq 2,5 \Omega$ $\sigma = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 1,0 \Omega$ $\sigma = 0,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,6 \Omega$ $\sigma = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,8 \Omega$ $\sigma = 2,0 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 18,9 \Omega$ $\sigma = 16,5 \Omega$
7	KUB_U	$|\Delta R_F| \leq 2,0 \Omega$ $\sigma = 1,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 2,7 \Omega$ $\sigma = 1,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,7 \Omega$ $\sigma = 2,8 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 3,4 \Omega$ $\sigma = 2,4 \Omega$	$|\Delta R_F| \leq 14,0 \Omega$ $\sigma = 12,7 \Omega$

Die Auswertungsergebnisse der 7. Harmonischen fallen generell besser aus als die der 5. Harmonischen. Ein Vergleich der **Tabelle 7.6** mit den ermittelten Fehlerwiderständen im Netz mit isoliertem Sternpunkt (6.1.1.2) zeigt, dass sich die Ergebnisse bei der 5. Harmonischen im gelöschten Netz - außer bei $R_F = 0 \Omega$ - eklatant verschlechtern. Der entsprechende Vergleich für die 7. Harmonische ergibt, dass die Fehlerwiderstände nur unwesentlich schlechter bestimmt werden.

Fazit: Im gelöschten Netz werden die Fehlerwiderstände bei niedriger Injektion mit dem Algorithmus LGS_U in Verbindung mit der 7. Harmonischen sehr genau ermittelt. Für Fehlerwiderstände $R_F \leq 113,6 \Omega$ bleibt die maximale absolute Abweichung $|\Delta R_F| \leq 2,8 \Omega$.

7.4 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz als Funktion der Strominjektion

Diese Untersuchung erfolgt mit etwa 10% Überkompensation bei vier verschiedenen Restnetzgrößen ($p = 0, 1, 2, 5$). Für jede Restnetzgröße werden 25 Einzelmessungen (fünf Fehlerwiderstände an fünf Fehlerorten) durchgeführt, womit sich insgesamt $4 \times 25 = 100$ Messungen für diese Reihe ergeben. Die Datensätze werden für die Grundschwingung und die beiden höheren Harmonischen mit LGS_U [10] und KUB_U ausgewertet und die Ergebnisse verglichen. Die vollständige Übersicht der Messwerte findet sich in den **Tabellen A6.31 bis A6.38**.

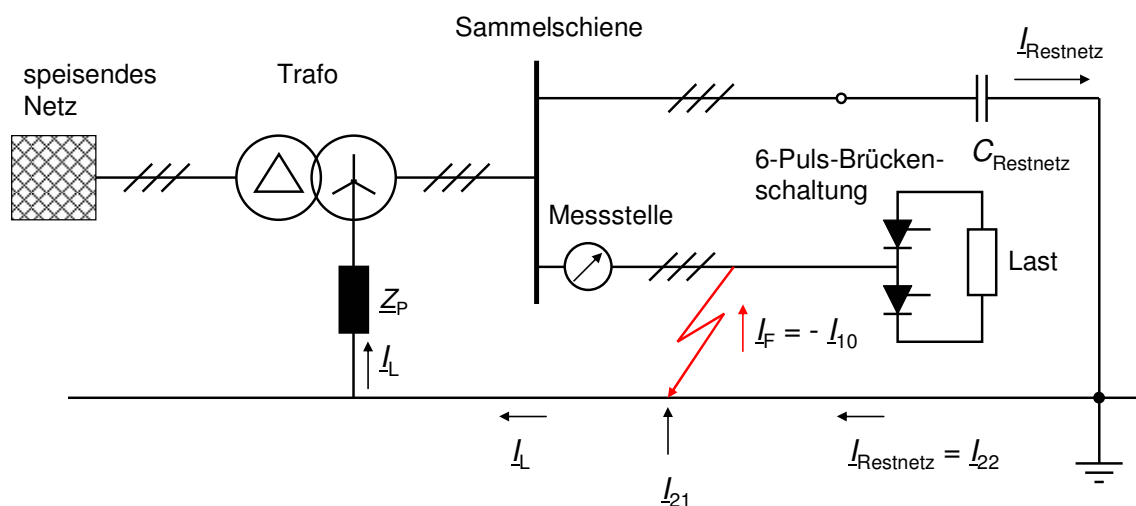


Abb. 7.3 Versuchsanordnung zu Messreihe 8; gelöschtes Netz; Messung am fehlerbehafteten Stich mit B6R-Last

Betrachtung der Grundschwingung

Auf eine genauere Darstellung in Tabellenform wird verzichtet. Tendenziell ist feststellbar, dass injektionsunabhängig für $R_F \leq 7,3 \Omega$ die Grundschwingungsauswertung mit einem $|\Delta \alpha| \leq 5,8\%$ noch gut funktioniert. Der Fehlerwiderstand R_F wird im Fall $p = 5$ deutlich besser ermittelt als mit Standardlast, dennoch sind die Werte analog 7.3.2 zu hoch. Bei niedrigeren Strominjektionen mit $p = 0, 1, 2$ sind die ermittelten Fehlerwiderstände generell unbrauchbar.

Betrachtung der 5. Harmonischen

Auch hier wird auf eine genauere Darstellung in Tabellenform verzichtet. Die Ergebnisse sind im Vergleich zur Grundschwingung und der 7. Harmonischen am schlechtesten mit maximalen Abweichungen $9,0\% \leq |\Delta\alpha| \leq 16,5\%$. Auffällig bei $p = 2$ und $p = 5$ ist das sehr gute Abschneiden für $R_F = 560 \Omega$ mit einer absoluten Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 7,2\%$. Fehlerwiderstände werden generell deutlich zu hoch ermittelt.

Betrachtung der 7. Harmonischen

Erwartungsgemäß wird α hier am genauesten ermittelt, eine Aufschlüsselung zeigt **Tabelle 7.7**.

Tabelle 7.7 Messreihe 8; Auswertung $|\Delta\alpha| = f(p, R_F)$ der 7. Harmonischen nach Algorithmen; Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz

Restnetz p	Algorithmus	Istwert R_F				
		0 Ω	7,3 Ω	45,5 Ω	113,6 Ω	560 Ω
0	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 1,7\%$	$|\Delta\alpha| = 2,2\%$	$|\Delta\alpha| = 1,6\%$	$|\Delta\alpha| = 1,1\%$	$|\Delta\alpha| = 2,0\%$
0	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 0,4\%$	$|\Delta\alpha| = 0,4\%$	$|\Delta\alpha| = 0,3\%$	$|\Delta\alpha| = 0,8\%$	$|\Delta\alpha| = 3,4\%$
1	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 1,1\%$	$|\Delta\alpha| = 1,2\%$	$|\Delta\alpha| = 1,3\%$	$|\Delta\alpha| = 1,8\%$	$|\Delta\alpha| = 4,5\%$
1	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 2,8\%$	$|\Delta\alpha| = 2,9\%$	$|\Delta\alpha| = 3,3\%$	$|\Delta\alpha| = 3,8\%$	$|\Delta\alpha| = 6,7\%$
2	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 6,1\%$	$|\Delta\alpha| = 5,6\%$	$|\Delta\alpha| = 6,1\%$	$|\Delta\alpha| = 6,1\%$	$|\Delta\alpha| = 12,4\%$
2	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 8,3\%$	$|\Delta\alpha| = 7,7\%$	$|\Delta\alpha| = 8,2\%$	$|\Delta\alpha| = 8,3\%$	$|\Delta\alpha| = 14,9\%$
5	LGS_U	$|\Delta\alpha| = 0,4\%$	$|\Delta\alpha| = 0,9\%$	$|\Delta\alpha| = 0,9\%$	$|\Delta\alpha| = 1,8\%$	$|\Delta\alpha| = 25,9\%$
5	KUB_U	$|\Delta\alpha| = 1,9\%$	$|\Delta\alpha| = 1,7\%$	$|\Delta\alpha| = 2,7\%$	$|\Delta\alpha| = 3,6\%$	$|\Delta\alpha| = 29,3\%$

Aus **Tabelle 7.7** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- (1) Besonders in den Fällen mit Beteiligung eines sehr kleinen Restnetzes ($p = 0$; $p = 1$) wird α bei Einsatz der B6R-Last von beiden Algorithmen sehr genau errechnet. Bei gleicher Konstellation und Einsatz der ohmschen Standardlast erzielt man sehr schlechte Ergebnisse [10]. Die deutliche Verbesserung durch die B6R-Last deckt sich mit den Erkenntnissen im Netz mit isoliertem Sternpunkt (6.5.3.1).
- (2) Abgesehen von der Reihe $p = 0$ ergeben sich mit dem Algorithmus LGS_U durchweg die besten Resultate.
- (3) Bei Größen des gesunden Restnetzes von $p = 2$ und $p = 5$ wird α bei einem Fehlerwiderstand $R_F = 560 \Omega$ mit $|\Delta\alpha| > 12\%$ unbrauchbar.
- (4) Für $R_F \leq 113,6 \Omega$ garantiert der Algorithmus LGS_U bei Verwendung der 7. Harmonischen unabhängig vom gesunden Restnetz eine maximale Abweichung $|\Delta\alpha| \leq 6,1\%$.

Die Ergebnisse sind in **Abb. 7.4** und **Abb. 7.5** grafisch dargestellt.

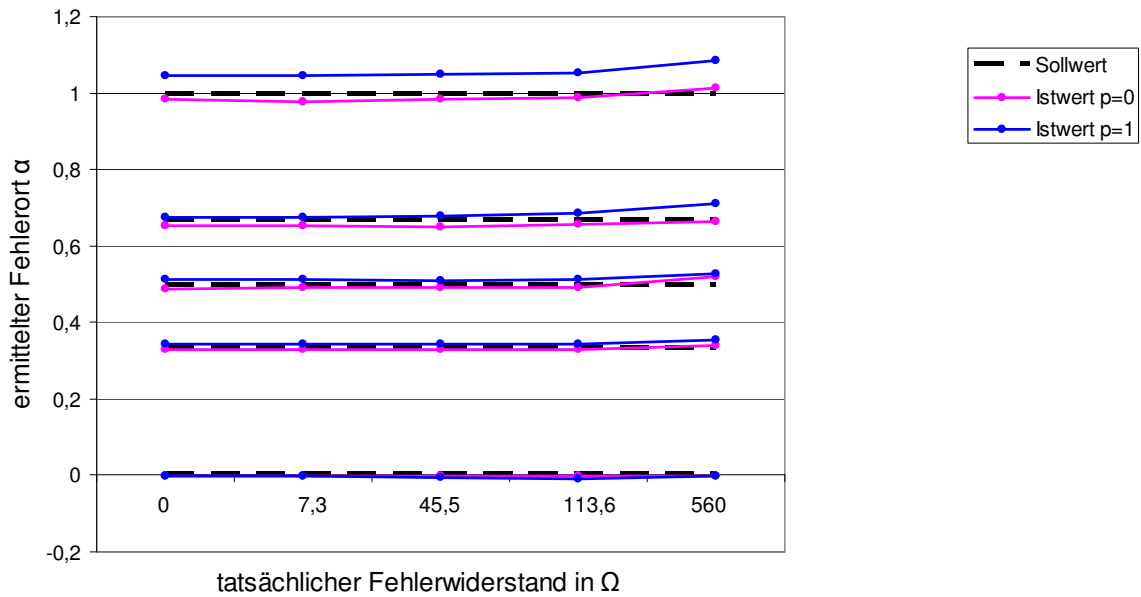


Abb. 7.4 Messreihe 8; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ für $p = 0$ und $p = 1$
 Topologie: fehlerbehafteter Stich mit B6R-Last, 10% Überkompensation,
 Algorithmus: LGS_U mit der 7. Harmonischen;
 Datenbasis: **Tabellen A6.31, A6.33**

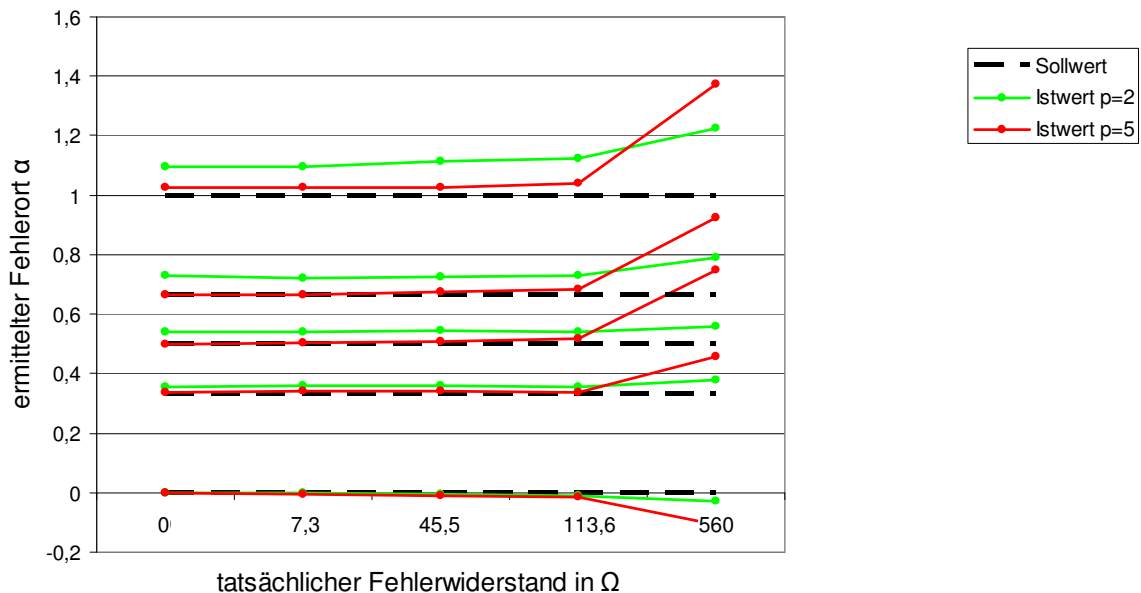


Abb. 7.5 Messreihe 8; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ für $p = 2$ und $p = 5$
 Topologie: fehlerbehafteter Stich mit B6R-Last, 10% Überkompensation,
 Algorithmus: LGS_U mit der 7. Harmonischen;
 Datenbasis: **Tabellen A6.35, A6.37**

7.5 Betrachtung des 5. und 7. Oberschwingungsverhältnisses des Erdschlussstroms im gelöschten Netz

Analog zu den Betrachtungen in 6.7 soll auch für das erdschlusskompensierte Netz geklärt werden, ob ein Zusammenhang zwischen der ermittelten Erdschlussentfernung α und dem 5. bzw. 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom besteht. Diese beiden Oberschwingungsverhältnisse sind für verschiedene Fehlerszenarien in den **Tabellen A6.41 bis A6.44** zusammengestellt.

Aus den **Tabellen A6.41, A6.42** lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

7.5.1 Betrachtung der 5. Harmonischen

- (1) Bei Betrachtung der Standardtopologie mit Standardlast im gelöschten Netz sind die Ergebnisse für α mit der 5. Harmonischen bei $p = 0, 1, 5$ generell schlecht. Im Fall $p = 2$ ergeben sich nur vereinzelt brauchbare Ergebnisse.
- (2) Mit Einsatz der B6R-Last in den Fehlerszenarien nach (1) verbessern sich die Ergebnisse für α nicht. Unabhängig von der Injektion liefert die 5. Harmonische nach 7.4 unbrauchbare Resultate mit Abweichungen $9,0\% \leq |\Delta\alpha| \leq 16,5\%$.
- (3) **Tabelle 7.8** zeigt, dass die B6R-Last gemäß (2) das 5. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom im Mittel erhöht. Dennoch verbessern sich die Ergebnisse für α nicht.

Tabelle 7.8 Kleinstes, größtes und mittleres 5. Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabellen A6.41, A6.42** für $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last im gelöschten Netz

p	Last	Minimum	Maximum	Mittelwert
0	Standardlast	1,02 %	6,41 %	3,43 %
0	B6R-Last	2,11 %	16,08 %	8,69 %
1	Standardlast	5,47 %	8,47 %	6,76 %
1	B6R-Last	6,98 %	13,04 %	8,88 %
2	Standardlast	1,52 %	8,18 %	5,96 %
2	B6R-Last	6,44 %	15,46 %	9,82 %
5	Standardlast	2,95 %	7,83 %	6,21 %
5	B6R-Last	1,09 %	15,79 %	7,15 %

7.5.2 Betrachtung der 7. Harmonischen

- (1) Bei Standardtopologie mit Standardlast im gelöschten Netz sind die Ergebnisse für α mit der 7. Harmonischen bei $p = 0, 1, 5$ generell schlecht. Nur im Fall $p = 2$ sind nach 7.3.1 die Ergebnisse $|\Delta\alpha| \leq 7,5\%$ bis $R_F = 560 \Omega$ akzeptabel. Bei dieser Strominjektion ist das 7. Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabelle 7.9** im Mittel gesehen am größten.
- (2) Bei Standardtopologie mit B6R-Last garantiert nach 7.4 die 7. Harmonische in Verbindung mit dem Algorithmus LGS_U generell sehr gute Ergebnisse $|\Delta\alpha| \leq 6,1\%$ für $R_F \leq 113,6 \Omega$. Nach **Tabelle 7.9** erhöht der Einsatz der B6R-Last das 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom im Mittel eklatant, was mit den verbesserten Ergebnissen für α einhergeht.

- (3) Anzumerken ist, dass nach **Tabellen 7.8** und **7.9** die B6R-Last das Verhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ deutlich stärker anhebt als $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$

Tabelle 7.9 Kleinstes, größtes und mittleres 7. Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach **Tabellen A6.41, A6.42** für $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last im gelöschten Netz

p	Last	Minimum	Maximum	Mittelwert
0	Standardlast	0,80 %	4,06 %	2,63 %
0	B6R-Last	1,56 %	17,83 %	9,05 %
1	Standardlast	4,49 %	7,44 %	6,01 %
1	B6R-Last	7,74 %	19,96 %	13,29 %
2	Standardlast	4,60 %	13,32 %	8,05 %
2	B6R-Last	6,25 %	23,10 %	14,55 %
5	Standardlast	2,03 %	11,13 %	6,77 %
5	B6R-Last	3,91 %	29,81 %	14,73 %

7.5.3 Betrachtung des Abgangssummenstroms

Die Oberschwingungsverhältnisse der gemessenen Abgangssummenströme I_{21} nach **Tabellen A6.43** und **A6.44** entsprechen den Fehlerszenarien aus 7.5.1 und 7.5.2.

Vergleicht man für den Standardlastfall das 5. und 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ (**Tabelle A6.41**) mit den entsprechenden Oberschwingungsverhältnissen im Abgangssummenstrom nach Kompensation $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)}$ (**Tabelle A6.43**), zeigt sich eine näherungsweise Verdopplung von $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)}$. Bei Einsatz der B6R-Last (**Tabellen A6.42, A6.44**) ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Ursache ist die kompensationsbedingte Verkleinerung des grundfrequenten Erdschlussstroms $I_{21}^{(1)}$, während höherfrequente Anteile $I_{21}^{(k)}$ nahezu unverändert bleiben. Daher ist das k . Oberschwingungsverhältnis der tatsächlichen Strominjektion $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)}$ in einem gelöschten Netz kompensationsabhängig und nimmt bei idealer Kompensation ihr Maximum an.

7.6 Zusammenfassung zur Fehlerentfernungsmessung im erdschlusskompensierten Netz

Die in diesem Kapitel zunächst theoretisch gezeigte Annäherung des gelöschten Netzes an ein Netz mit isoliertem Sternpunkt für die höheren Harmonischen wird in 7.2 auch praktisch bestätigt. Basierend auf demselben Erdschlusszenario ergeben die Auswertungen mit LGS_U und KUB_U in beiden Netzformen fast identische, gute Ergebnisse für α , R_F . Die originär zur Erdschlussentfernungsmessung in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt konzipierten Algorithmen LGS_U und KUB_U sind auch in einem gelöschten Netz mit der 5. bzw. 7. Harmonischen

erfolgreich zu verwenden. In 7.3.1 zeigt sich, dass die bereits in 6.1.1.1 für das Netz mit isoliertem Sternpunkt bei niedriger Strominjektion ($p = 2$) ermittelten Sachverhalte auch im gelöschten Netz zutreffen. Hier ist ebenfalls LGS_U in Verbindung mit der 5. oder 7. Harmonischen am günstigsten. In beiden Netzformen sind die Oberschwingungsverhältnisse $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ und $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ für $p = 2$ in den betrachteten Fehlerszenarien etwa gleich groß (**Tabelle A6.39, A6.41**).

Der Einsatz der B6R-Last in 7.4 ermöglicht im gelöschten Netz trotz Beteiligung eines sehr kleinen Restnetzes ($p = 0; p = 1$) eine genaue Bestimmung von α mit LGS_U in Verbindung mit der 7. Harmonischen. Dies deckt sich mit den bereits in 6.5 gewonnenen Erkenntnissen zum Netz mit isoliertem Sternpunkt. Die verbesserten Ergebnisse für α gehen mit dem in beiden Netzformen durch die B6R-Last drastisch erhöhten 7. Oberschwingungsverhältnis einher.

8 Anwendung der Algorithmen bei inhomogenen Leitungsabgängen

Die bisherigen Überlegungen basieren auf der Annahme einheitlichen Leitermaterials des erdschlussbehafteten Abgangs. Da im Mittelspannungsbereich der Trend erkennbar ist, bestehende Freileitungen durch Kabel zu ersetzen, treten in der Praxis Leitungszüge auf, die sowohl Kabel- als auch Freileitungsanteile enthalten. In diesem Kapitel wird gezeigt, wie sich das betrachtete Verfahren zur Erdschlussentfernungsmessung auf solche gemischten Abgänge mit inhomogenem Leitungsmaterial erweitern lässt.

8.1 Modell des inhomogenen Stichabgangs

Der inhomogene Stichabgang lässt sich als Kettenschaltung von n Π -Gliedern nach **Abb. 8.1** auffassen. Die Messung der Eingangsgrößen erfolgt links an Position 1. Das letzte (n .) Π -Glieder wird durch ein unsymmetrisches Lastäquivalent abgeschlossen. Die Leitungsdaten der n Teilleitungen und damit die elektrischen Parameter der zugehörigen n Π -Glieder werden als bekannt vorausgesetzt.

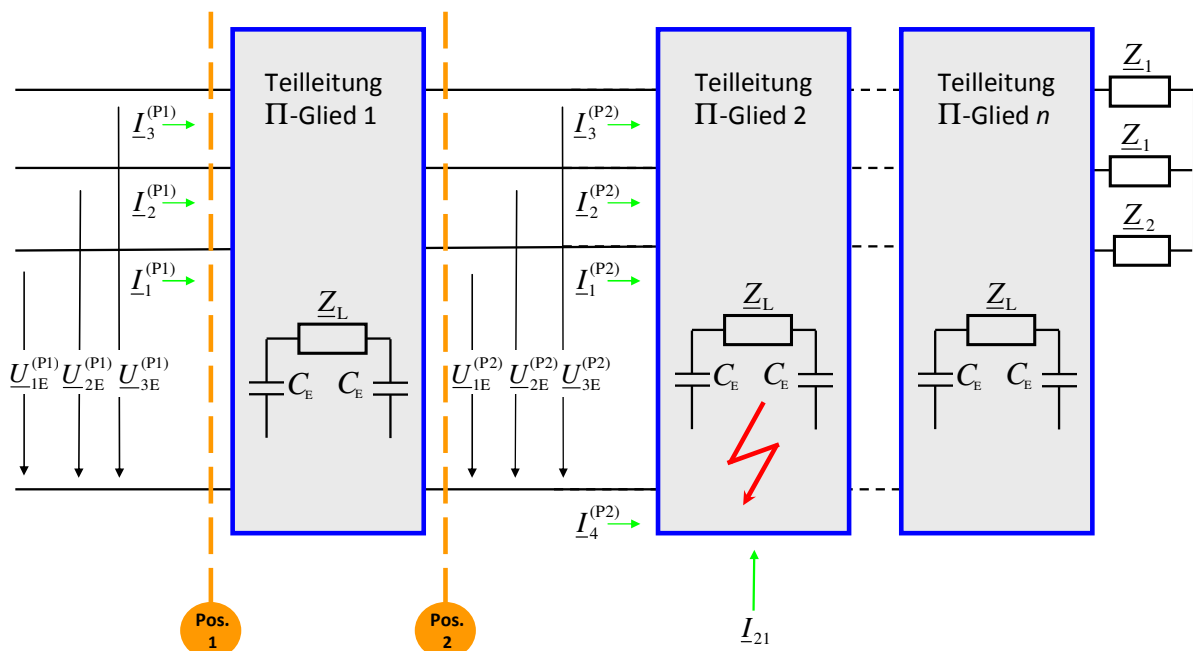


Abb. 8.1 Gemischte Leitung mit Erdschluss auf dem zweiten Leitungsteil
 Pos. 1: Messgrößen am Abgangsbeginn
 Pos. 2: korrigierte Messgrößen hinter dem ersten Π -Glieder

8.2 Transformationsmatrix eines Π -Gliedes

Nach Anhang 1 wird ein Π -Glieder durch die Transformationsmatrix T_3 beschrieben, welche ausschließlich von den bekannten Leitungsdaten des betrachteten Teilstücks abhängt. Bezogen auf **Abb. 8.1** gilt:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^{(P2)} \\ \underline{I}_2^{(P2)} \\ \underline{I}_3^{(P2)} \\ \underline{I}_4^{(P2)} \\ \underline{U}_{1E}^{(P2)} \\ \underline{U}_{2E}^{(P2)} \\ \underline{U}_{3E}^{(P2)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} T_3 \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_1^{(P1)} \\ \underline{I}_2^{(P1)} \\ \underline{I}_3^{(P1)} \\ \underline{I}_4^{(P1)} \\ \underline{U}_{1E}^{(P1)} \\ \underline{U}_{2E}^{(P1)} \\ \underline{U}_{3E}^{(P1)} \end{pmatrix} \quad (\text{A1.23})$$

Vektor der
Ausgangsgrößen

Systemmatrix T_3 des
 Π -Gliedes

Vektor der
Eingangsgrößen

Nach (A1.23) folgen die korrigierten Messgrößen an Pos. 2 aus den Eingangsgrößen an Pos. 1.

8.3 Modellerweiterung des vollständig beschalteten Stichabgangs

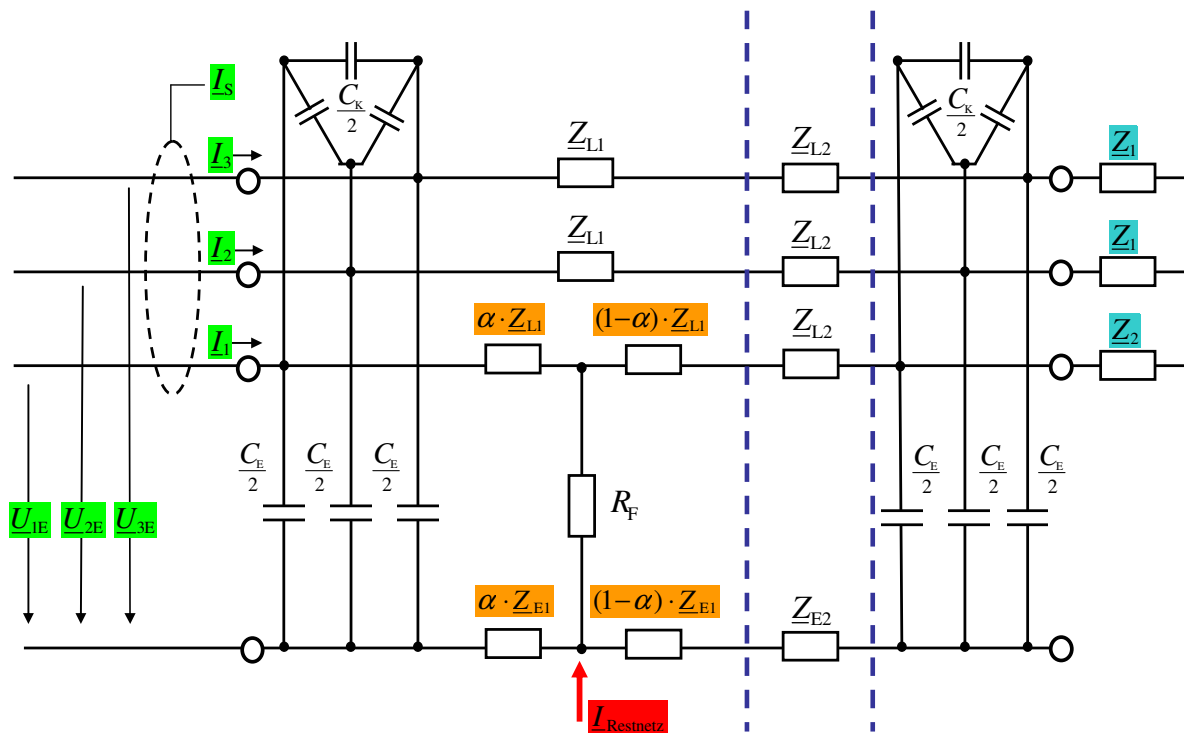


Abb. 8.2 Inhomogener Stichabgang mit zwei Leitungsteilen in vollständiger Beschaltung; fehlerbehaftet: erstes Teilstück mit \underline{Z}_{L1} , \underline{Z}_{E1}
fehlerfrei: zweites Teilstück mit \underline{Z}_{L2} , \underline{Z}_{E2} zwischen den beiden blauen Linien

Die in **Abb. 8.2** beschriebene Modellerweiterung ermöglicht die Bestimmung der Erdschlusentfernung auf einem Stichabgang, der aus zwei Abschnitten besteht. Die Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten C_E , C_K der Gesamtleitung nach **Abb. 8.2** verstehen sich als Summe der entsprechenden Kapazitäten der beiden Teilleitungen. Diese Näherung basiert auf der in 4.2.1 vorgestellten Verlegung sehr hochohmiger Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten. Das resultierende Stichabgangsmodell nach **Abb. 8.2** ermöglicht eine Lösung der Aufgabenstellung mit vertretbarem Aufwand. Der Erdschluss wird dabei auf dem *ersten* Teilstück angenommen. Jeder der beiden Abschnitte ist durch eigene Längsimpedanzen \underline{Z}_{L1} , \underline{Z}_{E1} bzw. \underline{Z}_{L2} , \underline{Z}_{E2} charakterisiert; insbesondere sind damit für beide Leitungsstücke unterschiedliche k-Faktoren zugelassen. Man kann nun zeigen³, dass das erweiterte Abgangsmodell nach **Abb. 8.2** hinsichtlich des Erdschlusentfernungsparameters α auch auf die kubische Gleichung (A2.3) führt, die bereits bei der vollständigen Lösung für den homogenen Abgang nach **Abb. 4.2** in 4.1.2 auftrat. Lediglich die Berechnungsvorschriften der komplexen Hilfsgrößen \underline{H}_1 bis \underline{H}_5 müssen entsprechend (8.1) um die neuen Größen \underline{Z}_{L2} , \underline{Z}_{E2} erweitert werden. Um Verwechslungen mit den Hilfsgrößen \underline{H}_1 bis \underline{H}_5 zur Berechnung *homogener* Abgänge zu vermeiden, werden die komplexen Hilfsgrößen zur Berechnung *inhomogener* Abgänge mit \underline{H}'_1 bis \underline{H}'_5 bezeichnet.

$$\begin{aligned}
\underline{H}'_1 &= (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot (\underline{Z}_{E1} + \underline{Z}_{E2}) + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}) \cdot (\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_{L1} - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_{E1}) + \underline{U}_{1E} \cdot (3 \cdot \underline{Z}_{E1} + \underline{Z}_{L1}) \\
\underline{H}'_2 &= 3 \cdot \underline{I}_{21} \cdot \underline{Z}_{E1} \\
\underline{H}'_3 &= (3 \cdot \underline{Z}_{E1} + \underline{Z}_{L1}) \cdot (\underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_{E1} - \underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_{L1}) \\
\underline{H}'_4 &= -(\underline{U}_{1E} + \underline{U}_{2E} + \underline{U}_{3E}) - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot (\underline{Z}_{E1} + \underline{Z}_{E2}) + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}) \\
\underline{H}'_5 &= \underline{U}_{1E} \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot (\underline{Z}_{E1} + \underline{Z}_{E2}) + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2})
\end{aligned} \tag{8.1}$$

$$\begin{aligned}
&\alpha^3 \cdot \text{Im}\{\underline{H}'_3 \cdot \underline{H}'_2^*\} + \alpha^2 \cdot \text{Im}\{\underline{H}'_1 \cdot \underline{H}'_2^* + \underline{H}'_3 \cdot \underline{H}'_4^*\} \\
&+ \alpha \cdot \text{Im}\{\underline{H}'_1 \cdot \underline{H}'_4^* + \underline{H}'_2 \cdot \underline{H}'_5^*\} + \text{Im}\{\underline{H}'_4 \cdot \underline{H}'_5^*\} = 0
\end{aligned} \tag{A2.3}$$

Die vollständige Systemanalyse ist auch hier entsprechend Anhang 2, A.2.2 möglich.

8.4 Anwendung des erweiterten Abgangsmodells

Ausgangspunkt ist die gemischte Leitung in **Abb. 8.1**, die aus n II-Gliedern besteht. Das erweiterte Modell nach **Abb. 8.2** wird sequentiell auf diese Kette abgebildet, so dass jedes II-Glied in **Abb. 8.1** die Position des fehlerbehafteten Teilstücks mit \underline{Z}_{L1} , \underline{Z}_{E1} annimmt. Für jeden der n potentiellen Fehlerorte wird mittels (8.1), (A2.3) eine Rechnung durchgeführt und α , R_F ermittelt. Die Summe aller Längselemente *hinter* dem aktuell als erdschlussbehaftet angenommenen

³ Die Herleitung von (8.1) folgt exakt dem Vorgehen in Anhang 2; auf eine weitere Darstellung wird verzichtet.

Teilstück geht als $\underline{Z}_{L2}, \underline{Z}_{E2}$ in die Rechnung ein. Π -Glieder *vor* dem aktuell als erdschlussbehaftet angenommenen Teilstück werden über ihre jeweilige Korrekturmatrix \mathbf{T}_3 (A1.23) berücksichtigt. Von den n Teilleitungen ist dasjenige Stück fehlerbehaftet, für welches die ermittelten α, R_F den Bedingungen $\alpha \in [0; 1]$ und $R_F > 0$ am ehesten genügen.

Das Vorgehen wird beispielhaft anhand von **Abb. 8.1** erläutert. Als erdschlussbehaftet wird das Π -Glieder 2 angenommen. Seine Messwertversorgung an Pos. 2 erfolgt durch Umrechnung der Messwerte am Abgangsanzug (Pos. 1) über die Transformationsmatrix \mathbf{T}_3 des Π -Glieder 1.

Die restlichen Π -Glieder 2 bis n werden nach folgenden Regeln in das erweiterte Stichabgangsmodell nach **Abb. 8.2** transferiert:

- die Längselemente des Π -Glieder 2 (erdschlussbehaftet) gehen als $\underline{Z}_{L1}, \underline{Z}_{E1}$ über
- die Summen der Längselemente der Π -Glieder 3 bis n gehen als $\underline{Z}_{L2}, \underline{Z}_{E2}$ über

$$\underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} + \dots + \underline{Z}_{Ln}$$

$$\underline{Z}_{E2} = \underline{Z}_{E3} + \underline{Z}_{E4} + \dots + \underline{Z}_{En}$$

- die Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten C_E, C_K der Gesamtleitung werden um die Werte reduziert, die Π -Glieder 1 bereits abgebaut hat

$$C_E = C_{E2} + C_{E3} + \dots + C_{En}$$

$$C_K = C_{K2} + C_{K3} + \dots + C_{Kn}$$

Mit diesen Vorgaben werden α, R_F mittels (8.1), (A2.3) für das aktuell als erdschlussbehaftet angenommene Teilstück bestimmt. Sequentiell wird jedes der n Π -Glieder als fehlerbehaftet angenommen und eine entsprechende Rechnung durchgeführt.

8.5 Praktischer Einsatz des erweiterten Abgangsmodells auf Basis von Messdatensätzen

Um die Funktion der Erweiterung praktisch zu verifizieren, wird unterstellt, die 24 km lange Freileitung des Netz-Kraftwerksmodells sei nicht aus einem, sondern aus der Kettenschaltung zweier gleicher Π -Glieder mit den halben Werten der vollständigen Leitung aufgebaut. Entsprechend 8.4 werden drei Datensätze jeweils für ein gelöschtes Netz und ein Netz mit isoliertem Sternpunkt untersucht. Im Netz mit isoliertem Sternpunkt wird das gesunde Restnetz durch die große Kondensatorbank mit $p = 36$ nachgebildet, im gelöschten Netz durch die kleine Kondensatorbank mit $p = 5$ und der B6R-Last.

8.5.1 Fehlerszenario 1: Erdschluss auf dem ersten II-Glied

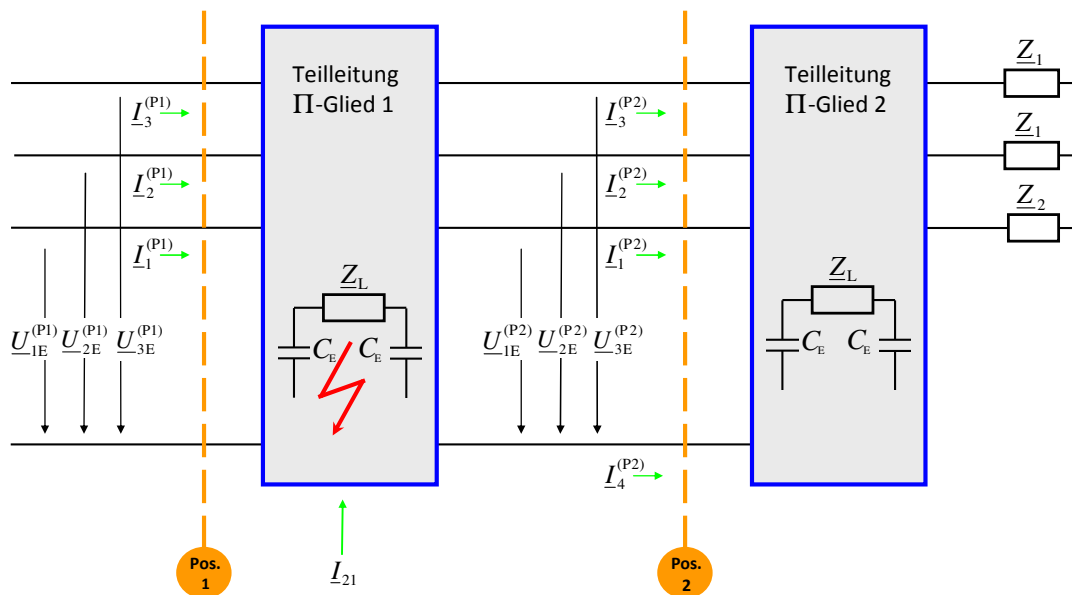


Abb. 8.3 Fehlerszenario 1; Aufspaltung der Leitung in zwei II-Glieder mit jeweils 12 km Leitungslänge; Pos. 1 bei 0 km; Pos. 2 bei 12 km Datensatz mit Fehlerentfernung: $l = 8$ km, $R_F = 7,3 \Omega$

Tabelle 8.1 Fehlerszenario 1; ermittelte Fehlerentfernung $(\alpha, R_F) = f(\text{Pos})$

Ordnungszahl k	gelöschtes Netz		Netz mit isoliertem Sternpunkt	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
1	$\alpha = 0,6707$ $R_F = 12,41 \Omega$	$\alpha = -0,3271$ $R_F = 11,77 \Omega$	$\alpha = 0,6886$ $R_F = 6,74 \Omega$	$\alpha = -0,3049$ $R_F = 6,70 \Omega$
5	$\alpha = 0,5720$ $R_F = 49,10 \Omega$	$\alpha = -0,4254$ $R_F = 48,69 \Omega$	$\alpha = 0,6776$ $R_F = 8,39 \Omega$	$\alpha = -0,3187$ $R_F = 8,40 \Omega$
7	$\alpha = 0,6978$ $R_F = 15,09 \Omega$	$\alpha = -0,2927$ $R_F = 15,40 \Omega$	$\alpha = 0,6410$ $R_F = 8,76 \Omega$	$\alpha = -0,3559$ $R_F = 8,79 \Omega$
realer Fehlerort	$\alpha = 0,6666$	$\alpha = -0,3333$	$\alpha = 0,6666$	$\alpha = -0,3333$

8.5.1.1 Angenommener Fehlerort auf dem ersten II-Glied (Eingangsgrößen: Pos. 1)

Das erweiterte Stichabgangsmodell Abb. 8.2 wird direkt auf die Kettenschaltung Abb. 8.3 angewendet. Es ist unbedingt zu beachten, dass sich der Parameter α im erweiterten Modell nur auf das erste II-Glied bezieht, zu dem eine Leitungslänge von 12 km gehört. Dem tatsächlichen Fehlerort von $l = 8$ km entspricht in diesem Modell daher $\alpha = 0,6666$. In beiden Netzformen wird dieser Sollwert nach Tabelle 8.1 in guter Näherung bestimmt.

8.5.1.2 Angenommener Fehlerort auf dem zweiten II-Glied (Eingangsgrößen: Pos. 2)

Nach (A1.23) erfolgt eine Messwertkorrektur der Eingangsgrößen (Pos. 1) mit der Systemmatrix T_3 des ersten II-Gliedes. Die korrigierten Werte an Position 2 dienen als Eingangsgrößen des zweiten II-Gliedes. Hier kann die Erdschlussentfernung entweder mit dem homogenen Modell nach 4.1.2 oder mit dem erweiterten Modell und der Bedingung $\underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{E2} = 0$ berechnet werden. Da sich der Fehler bei 8 km auf dem ersten Leitungsteil befindet, liegt er von Position 2 aus gesehen 4 km in Rückwärtsrichtung; dies entspricht dem Sollwert $\alpha = -0,3333$, der in beiden Netzformen nach **Tabelle 8.1** annähernd erreicht wird.

8.5.2 Fehlerszenario 2: Erdschluss zwischen den beiden II-Gliedern

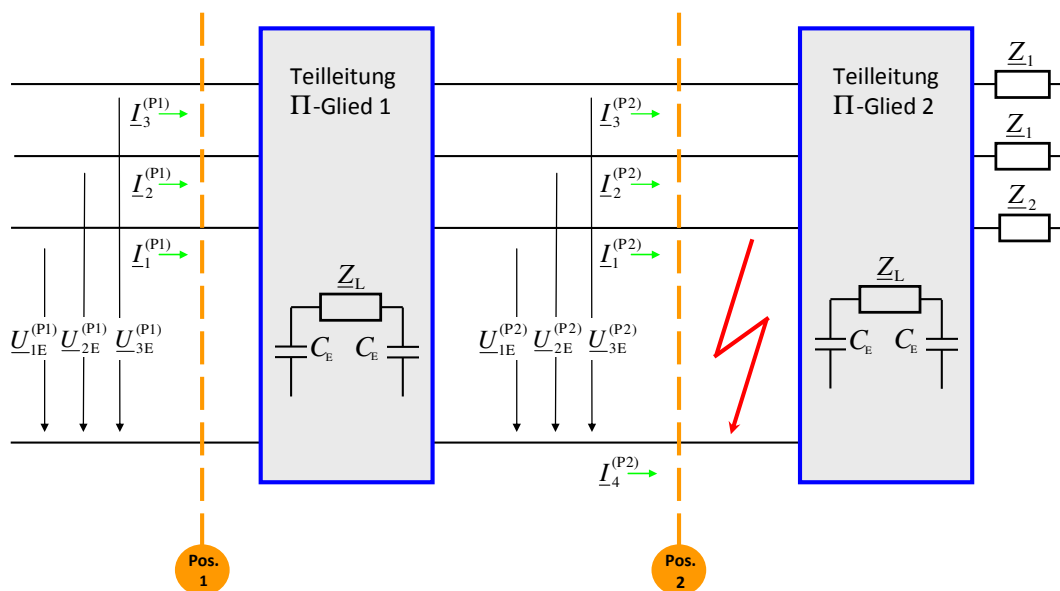


Abb. 8.4 Fehlerszenario 2; Aufspaltung der Leitung in zwei II-Glieder mit jeweils 12 km Leitungslänge; Pos. 1 bei 0 km; Pos. 2 bei 12 km
Datensatz mit Fehlerentfernung: $l = 12$ km, $R_F = 7,3 \Omega$

Die Berechnung von α erfolgt je nach angenommenem Fehlerort wie in 8.5.1.1 bzw. 8.5.1.2 beschrieben. Da sich der Fehler bei $l = 12$ km befindet, ergibt sich als Sollwert $\alpha = 1,0$ für einen angenommenen Fehlerort auf dem ersten und $\alpha = 0,0$ für einen angenommenen Fehlerort auf dem zweiten II-Glied. Diese Vorgaben werden in **Tabelle 8.2** gut erreicht.

Tabelle 8.2 Fehlerszenario 2; ermittelte Fehlerentfernung $(\alpha, R_F) = f(\text{Pos.})$

Ordnungszahl k	gelöschtes Netz		Netz mit isoliertem Sternpunkt	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
1	$\alpha = 0,9910$ $R_F = 18,08 \Omega$	$\alpha = -0,0074$ $R_F = 17,59 \Omega$	$\alpha = 1,0389$ $R_F = 6,70 \Omega$	$\alpha = 0,0435$ $R_F = 6,67 \Omega$
5	$\alpha = 0,8963$ $R_F = 55,26 \Omega$	$\alpha = -0,1007$ $R_F = 55,26 \Omega$	$\alpha = 0,9878$ $R_F = 9,27 \Omega$	$\alpha = -0,0082$ $R_F = 9,28 \Omega$
7	$\alpha = 1,0278$ $R_F = 18,42 \Omega$	$\alpha = 0,0384$ $R_F = 18,69 \Omega$	$\alpha = 0,9539$ $R_F = 10,05 \Omega$	$\alpha = -0,0413$ $R_F = 10,10 \Omega$
realer Fehlerort	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 0,0$	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 0,0$

8.5.3 Fehlerszenario 3: Erdschluss auf dem zweiten Π -Glieder

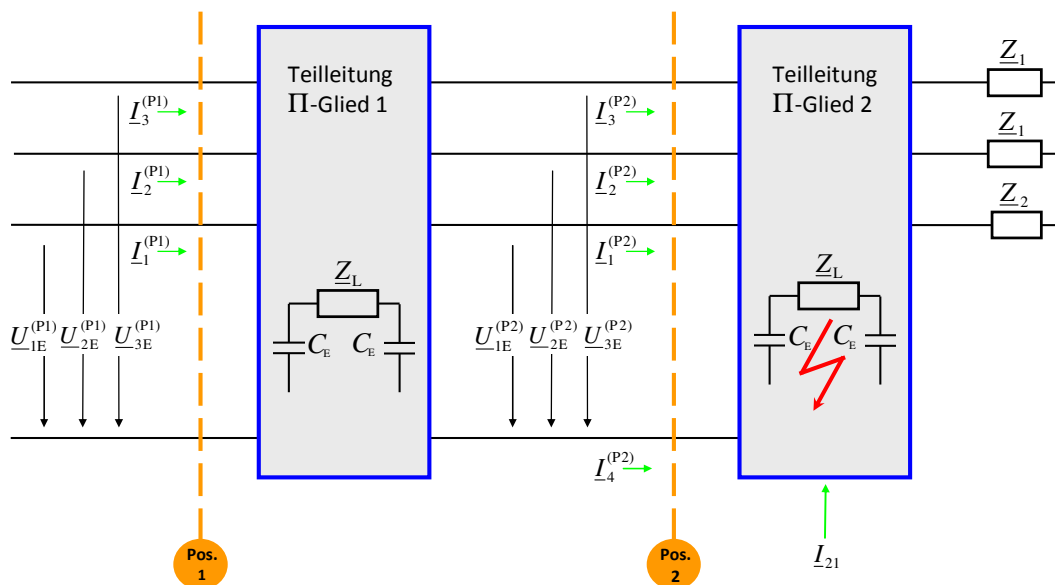


Abb. 8.5 Fehlerszenario 3; Aufspaltung der Leitung in zwei Π -Glieder mit jeweils 12 km Leitungslänge; Pos. 1 bei 0 km; Pos. 2 bei 12 km
Datensatz mit Fehlerentfernung: $l = 16 \text{ km}$, $R_F = 7,3 \Omega$

Tabelle 8.3 Fehlerszenario 3; ermittelte Fehlerentfernung (α, R_F) = f (Pos.)

Ordnungszahl k	gelöschtes Netz		Netz mit isoliertem Sternpunkt	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
1	$\alpha = 1,3139$ $R_F = 22,24 \Omega$	$\alpha = 0,3148$ $R_F = 21,93 \Omega$	$\alpha = 1,3597$ $R_F = 6,81 \Omega$	$\alpha = 0,3628$ $R_F = 6,80 \Omega$
5	$\alpha = 1,295$ $R_F = 56,17 \Omega$	$\alpha = 0,2986$ $R_F = 56,36 \Omega$	$\alpha = 1,2828$ $R_F = 9,81 \Omega$	$\alpha = 0,2870$ $R_F = 9,82 \Omega$
7	$\alpha = 1,3667$ $R_F = 20,67 \Omega$	$\alpha = 0,3775$ $R_F = 20,86 \Omega$	$\alpha = 1,2818$ $R_F = 12,13 \Omega$	$\alpha = 0,2879$ $R_F = 12,17 \Omega$
realer Fehlerort	$\alpha = 1,3333$	$\alpha = 0,3333$	$\alpha = 1,3333$	$\alpha = 0,3333$

Der vorliegende Datensatz basiert auf einer Fehlerentfernung von $l = 16$ km. Somit ergibt sich als Sollwert $\alpha = 1,3333$ (Annahme: erstes Π -Glied erdschlussbehaftet) bzw. $\alpha = 0,3333$ (Annahme: zweites Π -Glied erdschlussbehaftet). Auch hier stimmen die ermittelten Erdschlusssentfernungen in **Tabelle 8.3** gut mit den theoretisch erwarteten Werten überein.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Erdschlussentfernung in hochohmig geerdeten Netzen bei stationärem Fehler vorgestellt.

Als elektrotechnisches Modell diente der homogene Stichabgang basierend auf einem Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung. Dessen mathematische Analyse mit Hilfe komplexer Rechnung und der Kirchhoffschen Gesetze führte auf ein Polynom dritten Grades im Fehlerentfernungsparameter α . Dieses Konzept wurde in dem Algorithmus KUB_U unter MATLAB[®] implementiert.

Die Verlegung der lastseitigen Leiter-Erd- und Koppelkapazitäten des Π -Gliedes an den Abgangsanfang ergab ein vereinfachtes Leitungsmodell, zu dessen mathematischer Beschreibung lineare Gleichungssysteme ausreichten. Die direkte Lösung mit unsymmetrischer Last lieferte der Algorithmus LGS_U, während der Algorithmus LGS_S die optimale Lösung im Sinne einer Ausgleichsrechnung mit symmetrischer Last ergab. Beide Algorithmen wurden ebenfalls unter MATLAB[®] implementiert.

Obwohl die Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie im Fokus stand, wurde auch das Detektionsverhalten der Algorithmen untersucht.

Die Analysen auf Ringleitungen zwischen Messstelle und erster Last gingen über die Standardtopologie hinaus.

Auf eine Veränderung der Erdschlusskompensation im Erdschlussfall wurde verzichtet.

In den ersten sechs Messreihen wurden am Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern ausschließlich Fehlerszenarien im Netz mit isoliertem Sternpunkt untersucht. Es ergaben sich folgende Kernaussagen:

- Die Algorithmen LGS_U und KUB_U sind zur Bestimmung der Erdschlussentfernung sehr gut geeignet. Die Höhe der externen Strominjektion und damit die Größe des gesunden Restnetzes bestimmt den zu verwendenden Algorithmus. Bei niedriger Injektion ($p = 2$) ermittelt LGS_U die Ergebnisgrößen α und R_F am genauesten. Im praktisch wichtigen Fall hoher Strominjektion ($p = 36$) ist die Verwendung von KUB_U günstiger; lediglich bei sattem Erdschluss und Auswertung der Grundschwingung liefert LGS_U bessere Ergebnisse.
- Der Algorithmus LGS_S ist nicht sinnvoll einsetzbar. Er verhält sich zwar in der Grundschwingungsauswertung bei Standardtopologie wie LGS_U und ist auch zur Lastbestimmung geeignet, jedoch sind die Ergebnisse von LGS_S in allen Fehlerszenarien mit Leerläufen generell unbrauchbar. Ferner zeigt die Betrachtung der beiden höheren Harmonischen in Fehlerszenarien mit niedriger Strominjektion schlechte Ergebnisse.
- Die Oberschwingungsauswertungen bei Standardtopologie liefern bis $R_F \leq 113,6 \Omega$ gute Ergebnisse. Die Grundschwingungsauswertungen sind nur für kleinere Fehlerwiderstände $R_F \leq 45,5 \Omega$ (Injektion niedrig) bzw. $R_F \leq 7,3 \Omega$ (Injektion hoch) brauchbar.

- Die Algorithmen ermitteln Fehlerwiderstände bei Standardtopologie generell recht genau. Im praktisch wichtigen Fall hoher Strominjektion liefert die Auswertung der Grundschiwingung, bei niedriger Strominjektion die Auswertung der Oberschwingungen die besten Ergebnisse.
 - Zur Lastbestimmung nach Betrag und Phase eignet sich injektionsunabhängig der Algorithmus LGS_U im Rahmen einer Grundschiwingungsauswertung besonders gut. Die Oberschwingungsauswertungen fallen mit allen Algorithmen meist deutlich schlechter aus, vor allem bei Benutzung von KUB_U.
 - Die Bestimmung der Erdschlussrichtung ist ein Nebenprodukt der Entfernungsmessung, da α und R_F auch die Identifikation eines Abgangs als erdschlussfrei oder -behaftet implizieren. Die Detektion mit den beiden höheren Harmonischen bei Standardtopologie gelingt mit einer Trefferquote von mindestens 95,7% sehr gut. Hervorzuheben ist, dass der Algorithmus LGS_U in Verbindung mit der 7. Harmonischen eine Trefferquote von 100% aufweist, so dass dieser Kombination eine besondere praktische Bedeutung zukommt.
 - Der Einsatz der B6R-Last zur Erhöhung des Oberschwingungsgehaltes verbessert die Ergebnisse für α bei Fehlerkonstellationen mit sehr niedriger Injektion ($p = 0, p = 1$) eklatant. Dies gilt sowohl für die Auswertung der Grundschiwingung als auch der höheren Harmonischen. Daraus resultiert, dass sich in Netzen mit besonders niedrigem Erdschlussstrom, z.B. reinen Freileitungsnetzen, eine Erhöhung des Oberschwingungsgehaltes, z.B. über die Rundsteueranlage [6], günstig auf die Ergebnisse der Fehlerentfernungsbestimmung auswirkt.
 - Die Ringleitungsuntersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich mit Bezug zur Standardtopologie „erdschlussbehafteter Stich mit Last“ auf den Bereich zwischen Messstelle und (erster) Last. Eine Aussage darüber, ob dieser Ringabschnitt erdschlussbetroffen ist, lässt sich injektionsunabhängig am besten durch Auswertung der 5. Harmonischen mit KUB_U treffen. Die Fehldetektionsrate liegt dabei zwischen 18 % ($p = 1$) und 20 % ($p = 36$). Die Bestimmung der Erdschlussentfernung auf dem genannten Ringabschnitt sollte im praktisch wichtigen Fall hoher Strominjektion mit KUB_U und der 7. Harmonischen erfolgen (für $R_F \leq 45,5 \Omega$ ist $|\Delta\alpha| \leq 4,9 \%$). Bei niedriger Strominjektion ($p = 1$) ist die Entfernungsbestimmung nur bei kleinen Fehlerwiderständen im Rahmen der Grundschiwingungsauswertung mit LGS_U möglich (für $R_F \leq 7,3 \Omega$ ist $|\Delta\alpha| \leq 8,4 \%$). Fehlerwiderstände werden modellbedingt meist deutlich zu groß bestimmt.
 - Die Betrachtung des 5. und 7. Oberschwingungsverhältnisses im Erdschlussstrom lässt bei niedriger Strominjektion ($p = 2$) keinen Rückschluss auf die Ergebnisqualität von α zu. Folgende Oberschwingungsverhältnisse wurden in den einzelnen Fehlerszenarien festgestellt:

5. Oberschwingungsverhältnis: $4,07 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 6,29 \%$

7. Oberschwingungsverhältnis: $4,38 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 9,29 \%$

Bei hoher Strominjektion ($p = 36$) nehmen die Oberschwingungsverhältnisse mit steigendem R_F tendenziell ab. Es ergaben sich folgende Oberschwingungsverhältnisse:

5. Oberschwingungsverhältnis: $1,36 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 15,65 \%$

7. Oberschwingungsverhältnis: $1,34 \% \leq I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} \leq 18,74 \%$
- Der Einsatz der B6R-Last erhöht injektionsunabhängig das 5. und insbesondere das 7. Oberschwingungsverhältnis. Dies verbessert in Fehlerszenarien mit sehr niedriger Strominjektion ($p = 0, p = 1$) die Ergebnisse deutlich.

- Oberschwingungsauswertungen verhalten sich hinsichtlich Eingangsdatenfehlern robuster als Grundschwingungsauswertungen. Generell ist festzustellen, dass Fehler in den Eingangsgrößen U_{1E} , I_1 sowie der Mitreaktanz X_M die Ergebnisse der Oberschwingungsauswertungen verschlechtern. Die Grundschwingungsauswertung wird darüber hinaus noch von Eingangsgrößenfehlern in den Winkeln φ_{U1E} , φ_{I1} , φ_{IS} und dem Leitungsparameter R_M beeinflusst.

In zwei weiteren Messreihen konnte praktisch nachgewiesen werden, dass für die 5. und die 7. Harmonische das gelöschte Netz in sehr guter Näherung als Netz mit isoliertem Sternpunkt betrachtet werden kann. Unter dieser Prämisse sind in beiden Netzformen die gleichen Algorithmen (LGS_U, KUB_U) zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung erfolgreich nutzbar.

Mit Einsatz der B6R-Last erhöht sich auch im gelöschten Netz das 7. Oberschwingungsverhältnis im Erdschlussstrom drastisch. Dies geht mit den verbesserten Ergebnissen für α trotz kleinem Restnetz einher.

In einem letzten Schritt wurde das Verfahren zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung auf Abgänge mit inhomogenem Leitungsmaterial erweitert. Die praktische Verifikation an je drei Fehlerszenarien im gelöschten Netz und im Netz mit isoliertem Sternpunkt ergab, dass auch hier in beiden Netzformen der Erdschlusssentfernungparameter α gut bestimmt wird, so dass das Verfahren auch bei gemischten Leitungen zum Einsatz kommen kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die 5. und 7. Harmonische eine empfehlenswerte Basis zur Bestimmung der Erdschlusssentfernung im stationären Fehlerfall darstellen. Die Auswertung dieser beiden Oberschwingungen bietet eine sinnvolle Alternative zu grundschwingungsbasierten Verfahren. Hervorzuheben sind die generell besseren Ergebnisse bei höheren Fehlerwiderständen, eine geringere Anzahl von fehlersensitiven Eingangsgrößen und eine Trefferquote von mindestens 95,7% bei der Erdschlussrichtungsbestimmung in Standardtopologie.

Die im Rahmen dieser Arbeit abgeleiteten Algorithmen LGS_U und KUB_U sind zur Bestimmung der Ergebnisgrößen α und R_F in hochohmig geerdeten Netzen - auch bei inhomogenem Leitermaterial - sehr gut einsetzbar.

Anhang 1

A.1 Berechnung der Transformationsmatrizen dreier Übertragungsglieder mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze

A.1.1 Analyse des Übertragungsgliedes 1

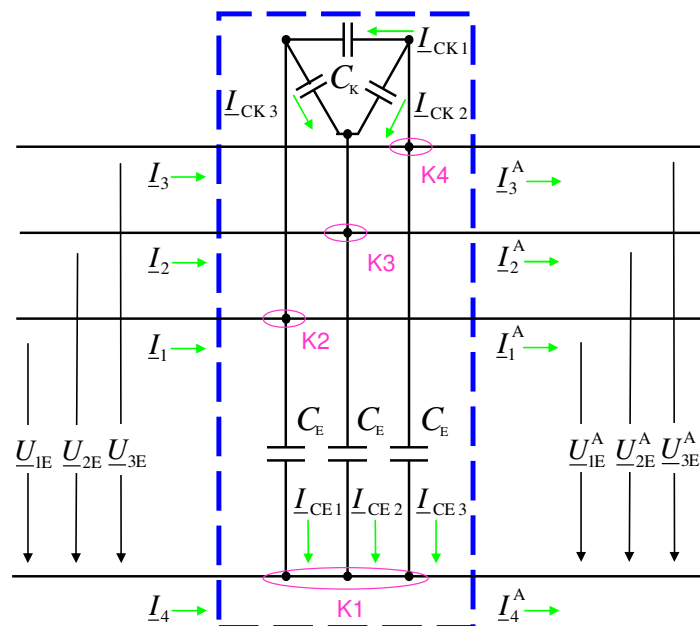


Abb. A1.1 Übertragungsglied 1 mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen

Nach **Abb. A1.1** enthält die Schaltung vier Knoten. Eine weitere Knotengleichung ergibt sich, da auch für den blau eingerahmten Teil die Knotenpunktregel gilt. Diese wird willkürlich als redundante Knotengleichung festgelegt, die bei Anwendung der Kirchhoffschen Regeln entfällt. Für die verbleibenden vier Knoten gelten (A1.1) – (A1.4):

$$\underline{I}_4^A = \underline{I}_4 + \underline{I}_{CE1} + \underline{I}_{CE2} + \underline{I}_{CE3} \quad (\text{A1.1})$$

$$\underline{I}_1^A = \underline{I}_1 - \underline{I}_{CE1} + \underline{I}_{CK1} - \underline{I}_{CK3} \quad (\text{A1.2})$$

$$\underline{I}_2^A = \underline{I}_2 - \underline{I}_{CE2} + \underline{I}_{CK2} + \underline{I}_{CK3} \quad (\text{A1.3})$$

$$\underline{I}_3^A = \underline{I}_3 - \underline{I}_{CE3} - \underline{I}_{CK1} - \underline{I}_{CK2} \quad (\text{A1.4})$$

Ferner enthält das Übertragungsglied keine Längsglieder; daraus folgt unmittelbar die Gleichheit der jeweiligen Ein- und Ausgangsspannungen.

$$\underline{U}_{1E}^A = \underline{U}_{1E} \quad (\text{A1.5})$$

$$\underline{U}_{2E}^A = \underline{U}_{2E} \quad (\text{A1.6})$$

$$\underline{U}_{3E}^A = \underline{U}_{3E} \quad (\text{A1.7})$$

Auch die folgenden sechs Gleichungen können **Abb. A1.1** unmittelbar entnommen werden:

$$\underline{I}_{CE1} = \underline{U}_{1E} \cdot \underline{Y}_{CE} \quad (\text{A1.8})$$

$$\underline{I}_{CK1} = (\underline{U}_{3E} - \underline{U}_{1E}) \cdot \underline{Y}_{CK} \quad (\text{A1.11})$$

$$\underline{I}_{CE2} = \underline{U}_{2E} \cdot \underline{Y}_{CE} \quad (\text{A1.9})$$

$$\underline{I}_{CK2} = (\underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E}) \cdot \underline{Y}_{CK} \quad (\text{A1.12})$$

$$\underline{I}_{CE3} = \underline{U}_{3E} \cdot \underline{Y}_{CE} \quad (\text{A1.10})$$

$$\underline{I}_{CK3} = (\underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E}) \cdot \underline{Y}_{CK} \quad (\text{A1.13})$$

Mittels (A1.8) bis (A1.13) werden die Ausdrücke für \underline{I}_{CK} und \underline{I}_{CE} in (A1.1) bis (A1.4) ersetzt. Für die Gleichungen (A1.1) bis (A1.7) ergibt sich die Matrix-Vektor-Form (A1.14a) mit der Systemmatrix \underline{T}_{1a} .

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^A \\ \underline{I}_2^A \\ \underline{I}_3^A \\ \underline{I}_4^A \\ \underline{U}_{1E}^A \\ \underline{U}_{2E}^A \\ \underline{U}_{3E}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) & \underline{Y}_{CK} & \underline{Y}_{CK} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \underline{Y}_{CK} & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) & \underline{Y}_{CK} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \underline{Y}_{CK} & \underline{Y}_{CK} & -(2 \cdot \underline{Y}_{CK} + \underline{Y}_{CE}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \underline{Y}_{CE} & \underline{Y}_{CE} & \underline{Y}_{CE} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{U}_{1E} \\ \underline{U}_{2E} \\ \underline{U}_{3E} \end{pmatrix}$$

Vektor der Ausgangsgrößen

Systemmatrix \underline{T}_{1a} des Übertragungsgliedes 1 mit C_K und C_E

Vektor der Eingangsgrößen

(A1.14a)

Ein wichtiger Sonderfall des Übertragungsgliedes 1 aus **Abb. A1.1** ergibt sich, wenn C_E und C_K jeweils die Hälfte ihrer Werte annehmen. Wegen $Y = \omega \cdot C$ halbieren sich dann auch die Admittanzen, so dass sich die Systemmatrix \underline{T}_{1b} ergibt.

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^A \\ \underline{I}_2^A \\ \underline{I}_3^A \\ \underline{I}_4^A \\ \underline{U}_{1E}^A \\ \underline{U}_{2E}^A \\ \underline{U}_{3E}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\left(\underline{Y}_{CK} + \frac{\underline{Y}_{CE}}{2}\right) & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} & -\left(\underline{Y}_{CK} + \frac{\underline{Y}_{CE}}{2}\right) & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} & \frac{\underline{Y}_{CK}}{2} & -\left(\underline{Y}_{CK} + \frac{\underline{Y}_{CE}}{2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} & \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} & \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{U}_{1E} \\ \underline{U}_{2E} \\ \underline{U}_{3E} \end{pmatrix}$$

Vektor der Ausgangsgrößen

Systemmatrix \underline{T}_{1b} des Übertragungsgliedes 1 mit $\frac{1}{2} \cdot C_K$ und $\frac{1}{2} \cdot C_E$

Vektor der Eingangsgrößen

(A1.14b)

A.1.2 Analyse des Übertragungsgliedes 2

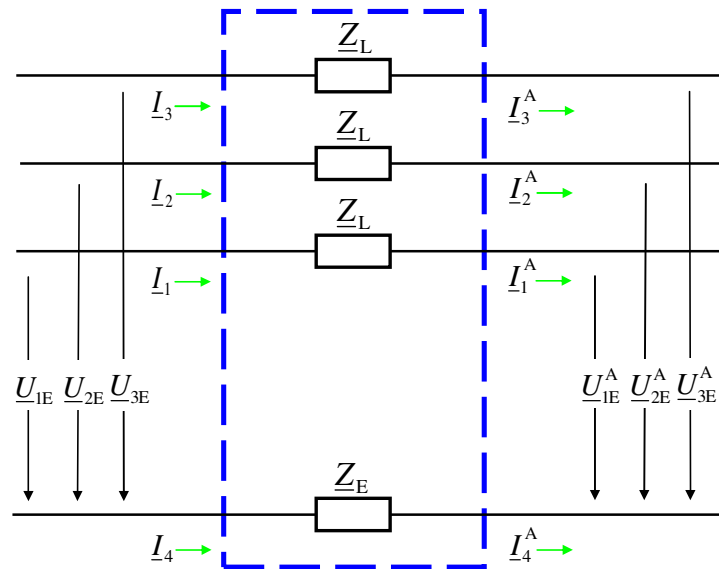


Abb. A1.2 Übertragungsglied 2 mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen

Aus **Abb. A1.2** lassen sich drei Maschengleichungen ableiten:

$$\underline{U}_{1E}^A = -\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{1E} + \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_E \quad (\text{A1.15})$$

$$\underline{U}_{2E}^A = -\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{2E} + \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_E \quad (\text{A1.16})$$

$$\underline{U}_{3E}^A = -\underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{3E} + \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_E \quad (\text{A1.17})$$

Ferner enthält das Übertragungsglied keine Querglieder; daraus folgt unmittelbar die Gleichheit der jeweiligen Ein- und Ausgangsströme.

$$\underline{I}_1^A = \underline{I}_1 \quad (\text{A1.18})$$

$$\underline{I}_2^A = \underline{I}_2 \quad (\text{A1.19})$$

$$\underline{I}_3^A = \underline{I}_3 \quad (\text{A1.20})$$

$$\underline{I}_4^A = \underline{I}_4 \quad (\text{A1.21})$$

Die Gleichungen (A1.15) – (A1.21) lauten in Matrix-Vektor-Form mit der Systemmatrix T_2 :

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1^A \\ \underline{I}_2^A \\ \underline{I}_3^A \\ \underline{I}_4^A \\ \underline{U}_{1E}^A \\ \underline{U}_{2E}^A \\ \underline{U}_{3E}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_L & 0 & 0 & \underline{Z}_E & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{Z}_L & 0 & \underline{Z}_E & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\underline{Z}_L & \underline{Z}_E & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{U}_{1E} \\ \underline{U}_{2E} \\ \underline{U}_{3E} \end{pmatrix} \quad (\text{A1.22})$$

Vektor der
Ausgangsgrößen

Systemmatrix T_2 des
Übertragungsgliedes 2

Vektor der
Eingangsgrößen

A.1.3 Analyse des vollständigen Π -Übertragungsgliedes

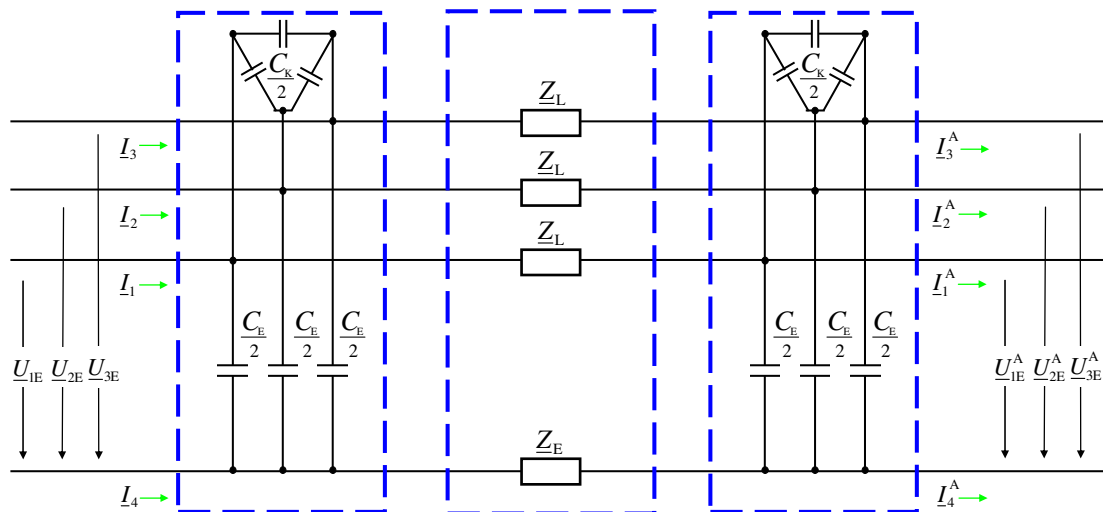


Abb. A1.3 Π -Glied mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen

Nach **Abb. A1.3** kann das vollständige Π -Glied als Kettenschaltung der Übertragungsglieder mit den Matrizen T_{1b} und T_2 modelliert werden. Seine Systemmatrix ergibt sich daher zu:

$$T_3 = T_{1b} \cdot T_2 \cdot T_{1b} \quad (\text{A1.23})$$

Auf eine explizite Darstellung von T_3 wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Anhang 2

A.2 Geschlossene Lösung des vollständigen Gleichungssystems

Zunächst wird gezeigt, dass sich das vollständige Gleichungssystem mittels Elimination der Variablen auf eine elementar lösbare kubische Gleichung im Fehlerentfernungsparameter α zurückführen lässt. Basierend auf der ermittelten Lösung für α werden in einem zweiten Abschnitt alle weiteren Systemvariablen bestimmt.

A.2.1 Rückführung des vollständigen Gleichungssystems auf eine kubische Gleichung im Fehlerentfernungsparameter α

Ausgangspunkt ist das nachfolgend aufgeführte Gleichungssystem (4.1) nach **Abb. 4.2**

Maschengleichungen:

$$\begin{aligned}
 \text{(M1)} \quad & \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E} = 0 \\
 \text{(M2)} \quad & \underline{I}_{10} \cdot R_F + \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L = 0 \\
 \text{(M3)} \quad & \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{2E} = 0 \\
 \text{(M4)} \quad & \underline{I}_3^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{3E} = 0 \\
 \text{(M5)} \quad & \underline{I}_{20} \cdot \underline{Z}_{K1} - \underline{I}_{18} \cdot \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} = 0 \\
 \text{(M6)} \quad & \underline{I}_{18} \cdot \underline{Z}_{K1} - \underline{I}_{16} \cdot \underline{Z}_{K2} + \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} = 0
 \end{aligned}$$

Knotengleichungen:

$$\begin{aligned}
 \text{(K2)} \quad & \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6 = 0 \\
 \text{(K3)} \quad & \underline{I}_6 + \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13} = 0 \\
 \text{(K5)} \quad & \underline{I}_1^A - \underline{I}_{10} - \underline{I}_{15} = 0 \\
 \text{(K6)} \quad & \underline{I}_{15} - \underline{I}_{11} - \underline{I}_{16} = 0 \\
 \text{(K8)} \quad & \underline{I}_2^A - \underline{I}_{12} - \underline{I}_{18} = 0 \\
 \text{(K9)} \quad & \underline{I}_{16} + \underline{I}_{18} + \underline{I}_{20} = 0 \\
 \text{(K11)} \quad & \underline{I}_3^A - \underline{I}_{13} - \underline{I}_{20} = 0 \\
 \text{(K12)} \quad & \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_{21} = 0
 \end{aligned}$$

(4.1)

bekannte Größen: $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{I}_1^A, \underline{I}_2^A, \underline{I}_3^A, \underline{I}_4^A, \underline{U}_{1E}, \underline{U}_{2E}, \underline{U}_{3E}, \underline{Z}_E, \underline{Z}_L, \underline{Z}_{CE}$

unbekannte Größen: $\underline{I}_6, \underline{I}_{10}, \underline{I}_{11}, \underline{I}_{12}, \underline{I}_{13}, \underline{I}_{15}, \underline{I}_{16}, \underline{I}_{18}, \underline{I}_{20}, \underline{I}_{21}, \underline{Z}_{K1}, \underline{Z}_{K2}, \alpha, R_F$

Die schrittweise Lösung des Systems (4.1) läuft folgendermaßen ab:

Schritt 1: Die Knotengleichungen (K11) und (K12) werden nicht mehr aufgeführt. (K11) ist die willkürlich gewählte, redundante Knotengleichung, die man bei Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze entfernt. (K12) wird zur Berechnung der externen Strominjektion \underline{I}_{21} benötigt.

$$\underline{I}_{21} = -(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) \quad (\text{K12.1})$$

Schritt 2: Ausschließlich die Gleichungen (M5), (M6), (K6), (K8), (K9) enthalten die Lastimpedanzen \underline{Z}_{K1} , \underline{Z}_{K2} und die Lastströme \underline{I}_{16} , \underline{I}_{18} , \underline{I}_{20} . Diese Gleichungen werden aus dem System genommen, wodurch sich seine Dimension um fünf reduziert.

Nach diesen Schritten ergibt sich das folgende komplexe 7x7-System:

$$\begin{aligned} (\text{M1}) \quad & \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E} = 0 \\ (\text{M2}) \quad & \underline{I}_{10} \cdot R_F + \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L = 0 \\ (\text{M3}) \quad & \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{2E} = 0 \\ (\text{M4}) \quad & \underline{I}_3^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{3E} = 0 \\ (\text{K2}) \quad & \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6 = 0 \\ (\text{K3}) \quad & \underline{I}_6 + \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13} = 0 \\ (\text{K5}) \quad & \underline{I}_1^A - \underline{I}_{10} - \underline{I}_{15} = 0 \end{aligned}$$

bekannte Größen: $\underline{I}_1^A, \underline{I}_2^A, \underline{I}_3^A, \underline{I}_4^A, \underline{U}_{1E}, \underline{U}_{2E}, \underline{U}_{3E}, \underline{Z}_E, \underline{Z}_L, \underline{Z}_{CE}$

unbekannte Größen: $\underline{I}_6, \underline{I}_{10}, \underline{I}_{11}, \underline{I}_{12}, \underline{I}_{13}, \underline{I}_{15}, \alpha, R_F$

Schritt 3: Ersetzen von (K5) durch (K2) + (K5) und auflösen nach \underline{I}_{15}

$$\underline{I}_{15} = \underline{I}_4^A + \underline{I}_1^A + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6 \quad (\text{K5.1})$$

Schritt 4: Ersetzen des Stromes \underline{I}_{15} in (M2) mit (K5.1) und auflösen nach \underline{I}_{11}

$$\underline{I}_{11} = (\underline{I}_{10} \cdot R_F + (1 - \alpha) \cdot (\underline{I}_6 \cdot \underline{Z}_E - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_1^A + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6) \cdot \underline{Z}_L)) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} \quad (\text{M2.1})$$

Schritt 5: Elimination des Zweigstroms \underline{I}_{15} durch Entnahme von (K5.1) aus dem System

Schritt 6: Ersetzen von (M4) durch (M4)-(M3) und auflösen nach \underline{I}_{13}

$$\underline{I}_{13} = ((\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A) \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E}) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} + \underline{I}_{12} \quad (\text{M4.1})$$

Schritt 7: Auflösen von (M3) nach dem Strom \underline{I}_{12}

$$\underline{I}_{12} = (\underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E + \underline{U}_{2E} - \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} \quad (\text{M3.1})$$

Schritt 8: Auflösen von (K2) nach dem Strom \underline{I}_6

$$\underline{I}_6 = \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21} \quad (\text{K2.1})$$

Nach diesen Schritten hat das System folgende Gestalt:

$$(\text{M1}) \quad 0 = \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E}$$

$$(\text{M2.1}) \quad \underline{I}_{11} = (\underline{I}_{10} \cdot R_F + (1 - \alpha) \cdot (\underline{I}_6 \cdot \underline{Z}_E - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_1^A + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6) \cdot \underline{Z}_L)) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2}$$

$$(\text{M3.1}) \quad \underline{I}_{12} = (\underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E + \underline{U}_{2E} - \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2}$$

$$(\text{M4.1}) \quad \underline{I}_{13} = ((\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A) \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E}) \cdot \frac{\underline{Y}_{CE}}{2} + \underline{I}_{12}$$

$$(\text{K2.1}) \quad \underline{I}_6 = \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21}$$

$$(\text{K3}) \quad 0 = \underline{I}_6 + \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13}$$

Schritt 9: Ersetzen der Ströme $\underline{I}_6, \underline{I}_{11}, \underline{I}_{12}, \underline{I}_{13}$ mittels (K2.1), (M2.1), (M3.1), (M4.1) in (K3). Nach längerer Rechnung ergibt sich der Ausdruck (K3.1). Dabei wird der aus **Abb. 4.2** unmittelbar nachprüfbarer Zusammenhang (A2.1) verwendet.

$$\underline{I}_1^A + \underline{I}_2^A + \underline{I}_3^A = -(\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \quad (\text{A2.1})$$

$$\underline{I}_{10} = \frac{\alpha \cdot [\underline{Z}_E \cdot (\underline{I}_4^A + 3 \cdot \underline{I}_{21}) - \underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L] - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) - \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E}}{2 \cdot \underline{Z}_{CE} + R_F + (1 - \alpha) \cdot (\underline{Z}_L + 3 \cdot \underline{Z}_E)} \quad (\text{K3.1})$$

Schritt 10: Mit (K3.1) wird in (M1) der Fehlerstrom I_{10} ersetzt. Nach längerer Rechnung ergibt sich die komplexe Gleichung (M1.1), die neben den reellen Variablen α und R_F die bekannten(!) komplexen Hilfsgrößen \underline{H}_1 bis \underline{H}_5 enthält.

$$\alpha \cdot \underline{H}_1 + \alpha \cdot R_F \cdot \underline{H}_2 + \alpha^2 \cdot \underline{H}_3 + R_F \cdot \underline{H}_4 - \underline{H}_5 = 0 \quad (\text{M1.1})$$

mit $\alpha, R_F \in \mathfrak{R}$; $\underline{H}_1, \underline{H}_2, \underline{H}_3, \underline{H}_4, \underline{H}_5 \in \mathbb{C}$

$$\underline{H}_1 = (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \cdot (\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E) + \underline{U}_{1E} \cdot (3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L)$$

$$\underline{H}_2 = 3 \cdot \underline{I}_{21} \cdot \underline{Z}_E$$

$$\underline{H}_3 = (3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L) \cdot (\underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L)$$

$$\underline{H}_4 = -(\underline{U}_{1E} + \underline{U}_{2E} + \underline{U}_{3E}) - (\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L)$$

$$\underline{H}_5 = \underline{U}_{1E} \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{CE} + 3 \cdot \underline{Z}_E + \underline{Z}_L)$$

Schritt 11.1: Zerlegen von (M1.1) in Real- und Imaginärteil liefert zwei reelle Gleichungen.

$$\alpha \cdot \text{Re}\{\underline{H}_1\} + \alpha \cdot R_F \cdot \text{Re}\{\underline{H}_2\} + \alpha^2 \cdot \text{Re}\{\underline{H}_3\} + R_F \cdot \text{Re}\{\underline{H}_4\} - \text{Re}\{\underline{H}_5\} = 0 \quad (\text{RE1.1})$$

$$\alpha \cdot \text{Im}\{\underline{H}_1\} + \alpha \cdot R_F \cdot \text{Im}\{\underline{H}_2\} + \alpha^2 \cdot \text{Im}\{\underline{H}_3\} + R_F \cdot \text{Im}\{\underline{H}_4\} - \text{Im}\{\underline{H}_5\} = 0 \quad (\text{IM1.1})$$

Schritt 11.2: Die Realteilgleichung (RE1.1) wird nach R_F aufgelöst.

$$R_F = \frac{\text{Re}\{\underline{H}_5\} - \alpha^2 \cdot \text{Re}\{\underline{H}_3\} - \alpha \cdot \text{Re}\{\underline{H}_1\}}{\alpha \cdot \text{Re}\{\underline{H}_2\} + \text{Re}\{\underline{H}_4\}} \quad (\text{A2.2})$$

Schritt 11.3: Ersetzen des Fehlerwiderstandes R_F über (A2.2) in (IM1.1). Sammeln nach Potenzen von α und Verwendung der unmittelbar nachprüfbaren Beziehung

$$\text{Im}\{\underline{A} \cdot \underline{B}^*\} = \text{Im}\{\underline{A}\} \cdot \text{Re}\{\underline{B}\} - \text{Re}\{\underline{A}\} \cdot \text{Im}\{\underline{B}\}$$

$$\text{mit } \underline{A} = \text{Re}\{\underline{A}\} + j \cdot \text{Im}\{\underline{A}\} \text{ und } \underline{B}^* = \text{Re}\{\underline{B}\} - j \cdot \text{Im}\{\underline{B}\}$$

ergibt die elementar lösbare kubische Gleichung (A2.3) in α

$$\begin{aligned} & \alpha^3 \cdot \text{Im}\{\underline{H}_3 \cdot \underline{H}_2^*\} + \alpha^2 \cdot \text{Im}\{\underline{H}_1 \cdot \underline{H}_2^* + \underline{H}_3 \cdot \underline{H}_4^*\} \\ & + \alpha \cdot \text{Im}\{\underline{H}_1 \cdot \underline{H}_4^* + \underline{H}_2 \cdot \underline{H}_5^*\} + \text{Im}\{\underline{H}_4 \cdot \underline{H}_5^*\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A2.3})$$

A.2.2 Lösung des Restsystems bei bekanntem α

Schritt 12: Durch Rückeinsetzen von α in (A2.2) wird der Fehlerwiderstand R_F ermittelt.

Schritt 13: Durch Rückeinsetzen der nunmehr bekannten Werte für α und R_F in (M2), (M3), (M4), (K2), (K3), (K5), (K6), (K8), (K9) entsteht das lineare Gleichungssystem (A2.4), dessen Lösung alle unbekanntenen Zweigströme liefert.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \underline{U}_{2E} - \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E \\ \underline{U}_{3E} + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_3^A \cdot \underline{Z}_L \\ -\underline{I}_4^A - \underline{I}_{21} \\ 0 \\ \underline{I}_1^A \\ 0 \\ \underline{I}_2^A \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-\alpha) \cdot \underline{Z}_E & R_F & -2 \cdot \underline{Z}_{CE} & 0 & 0 & (\alpha-1) \cdot \underline{Z}_L & 0 & 0 & 0 \\ (\alpha-1) \cdot \underline{Z}_E & 0 & 0 & 2 \cdot \underline{Z}_{CE} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\alpha-1) \cdot \underline{Z}_E & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot \underline{Z}_{CE} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_6 \\ \underline{I}_{10} \\ \underline{I}_{11} \\ \underline{I}_{12} \\ \underline{I}_{13} \\ \underline{I}_{15} \\ \underline{I}_{16} \\ \underline{I}_{18} \\ \underline{I}_{20} \end{pmatrix} \quad (A2.4)$$

Schritt 14: Aus (M5), (M6) bestimmt man mit (A2.5) die Lastimpedanzen \underline{Z}_{K1} und \underline{Z}_{K2} .

$$\begin{pmatrix} (\underline{I}_{13} - \underline{I}_{12}) \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} \\ (\underline{I}_{12} - \underline{I}_{11}) \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{20} - \underline{I}_{18} & 0 \\ \underline{I}_{18} & -\underline{I}_{16} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{Z}_{K1} \\ \underline{Z}_{K2} \end{pmatrix} \quad (A2.5)$$

Schritt 15: Befreien der Lastimpedanzen \underline{Z}_{K1} , \underline{Z}_{K2} von den bekannten Koppelkapazitäten.

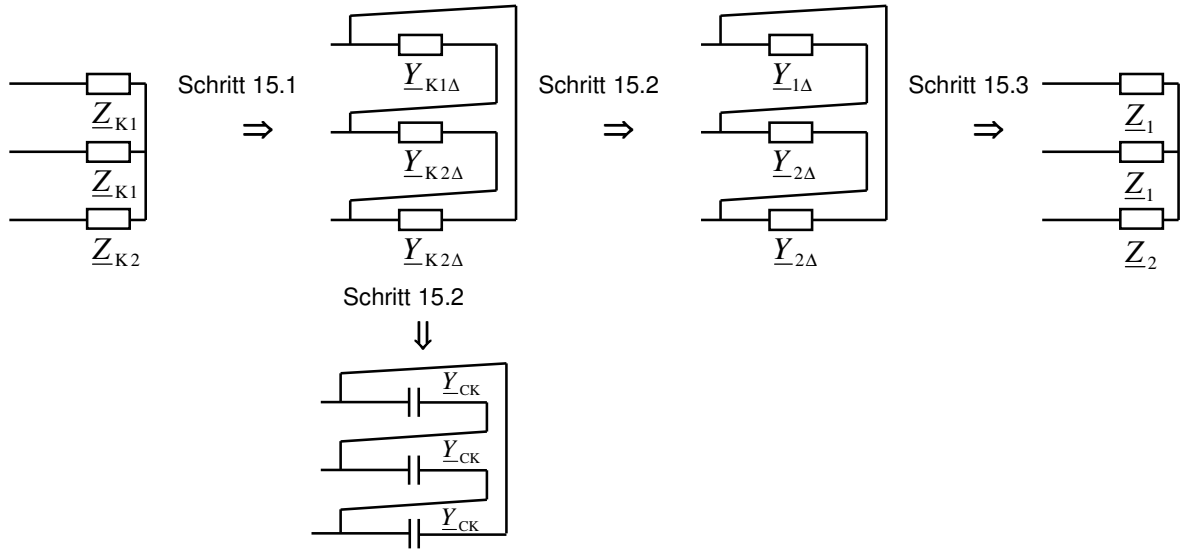


Abb. A2.1 Entfernung der Koppelkapazitäten aus der errechneten Last

Schritt 15.1: Umwandeln der mit C_k behafteten Last in eine äquivalente Dreieckschaltung.

$$\underline{Y}_{K1\Delta} = \frac{\underline{Y}_{K1}^2}{2 \cdot \underline{Y}_{K1} + \underline{Y}_{K2}} \quad \underline{Y}_{K2\Delta} = \frac{\underline{Y}_{K1} \cdot \underline{Y}_{K2}}{2 \cdot \underline{Y}_{K1} + \underline{Y}_{K2}}$$

Schritt 15.2: Befreien der Strangadmittanzen $\underline{Y}_{K1\Delta}$ und $\underline{Y}_{K2\Delta}$ von den Koppelkapazitäten.

$$\underline{Y}_{1\Delta} = \underline{Y}_{K1\Delta} - \underline{Y}_{CK} = \frac{\underline{Y}_{K1}^2}{2 \cdot \underline{Y}_{K1} + \underline{Y}_{K2}} - \underline{Y}_{CK} \quad (\text{A2.6})$$

$$\underline{Y}_{2\Delta} = \underline{Y}_{K2\Delta} - \underline{Y}_{CK} = \frac{\underline{Y}_{K1} \cdot \underline{Y}_{K2}}{2 \cdot \underline{Y}_{K1} + \underline{Y}_{K2}} - \underline{Y}_{CK} \quad (\text{A2.7})$$

Schritt 15.3: Dreieck-Stern-Transformation der von C_k befreiten Last liefert:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{1\Delta} \cdot \underline{Z}_{2\Delta}}{2 \cdot \underline{Z}_{2\Delta} + \underline{Z}_{1\Delta}} \quad \text{bzw.} \quad \underline{Z}_1 = \frac{1}{2 \cdot \underline{Y}_{1\Delta} + \underline{Y}_{2\Delta}} \quad (\text{A2.8})$$

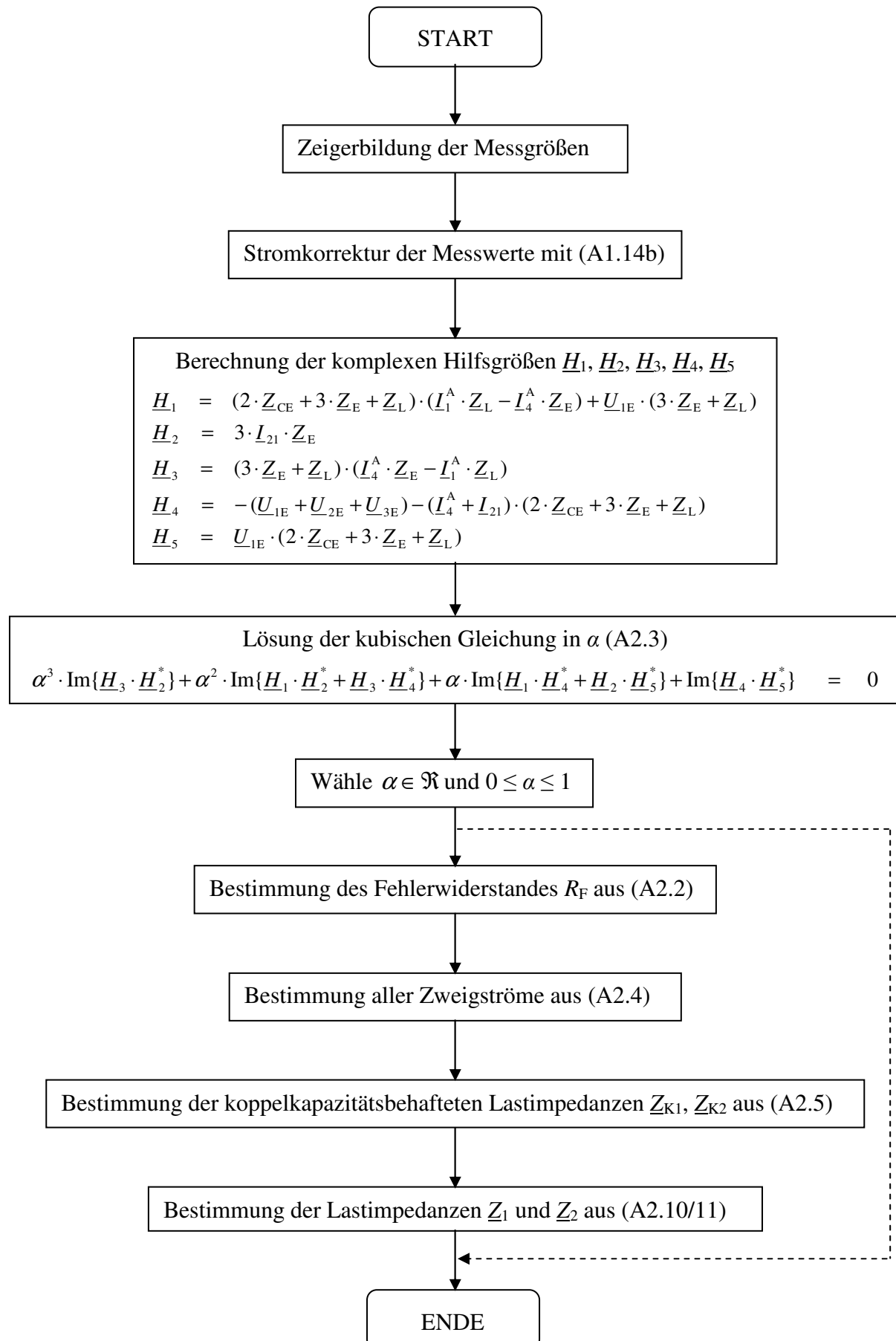
$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{2\Delta}^2}{2 \cdot \underline{Z}_{2\Delta} + \underline{Z}_{1\Delta}} \quad \text{bzw.} \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Y}_{1\Delta}}{\underline{Y}_{2\Delta}} \cdot \underline{Z}_1 \quad (\text{A2.9})$$

Schritt 15.4: Ersetzen der Ausdrücke $\underline{Y}_{1\Delta}$ und $\underline{Y}_{2\Delta}$ mittels (A2.6), (A2.7) in (A2.8), (A2.9). Nach längerer Rechnung ergibt sich:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{K1}}{1 - 3 \cdot \underline{Z}_{K1} \cdot \underline{Y}_{CK}} \quad (\text{A2.10})$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{K2} - \underline{Y}_{CK} \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{K2} + \underline{Z}_{K1}) \cdot \underline{Z}_{K1}}{\underline{Z}_{K1} \cdot (1 - \underline{Y}_{CK} \cdot (2 \cdot \underline{Z}_{K2} + \underline{Z}_{K1}))} \cdot \underline{Z}_1 \quad (\text{A2.11})$$

A.2.3 Ablaufdiagramm zur Lösung des vollständigen Systems (Algorithmus: KUB_U)



Anhang 3

A.3 Lösung des vollständigen Gleichungssystems nach Newton-Raphson

Im Anhang 2 (Schritt 2) wird gezeigt, wie sich das vollständige Gleichungssystem (4.1) auf das komplexe, nichtlineare 7x7-System (A3.1) reduzieren lässt. Seine Lösung mit Hilfe des Newton-Raphson-Verfahrens wird im Folgenden beschrieben.

$$\begin{aligned}
 \text{(M1)} \quad & \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E} = 0 \\
 \text{(M2)} \quad & \underline{I}_{10} \cdot R_F + \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{11} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_{15} \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L = 0 \\
 \text{(M3)} \quad & \underline{I}_2^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{12} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{2E} = 0 \\
 \text{(M4)} \quad & \underline{I}_3^A \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{13} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{CE} - \underline{I}_6 \cdot (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{3E} = 0 \\
 \text{(K2)} \quad & \underline{I}_4^A + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{21} - \underline{I}_6 = 0 \\
 \text{(K3)} \quad & \underline{I}_6 + \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13} = 0 \\
 \text{(K5)} \quad & \underline{I}_1^A - \underline{I}_{10} - \underline{I}_{15} = 0
 \end{aligned} \tag{A3.1}$$

bekannte Größen: $\underline{I}_1^A, \underline{I}_2^A, \underline{I}_3^A, \underline{I}_4^A, \underline{U}_{1E}, \underline{U}_{2E}, \underline{U}_{3E}, \underline{Z}_E, \underline{Z}_L, \underline{Z}_{CE}$

unbekannte Größen: $\underline{I}_6, \underline{I}_{10}, \underline{I}_{11}, \underline{I}_{12}, \underline{I}_{13}, \underline{I}_{15}, \alpha, R_F$

A.3.1 Aufstellen eines reellen Ersatzsystems

Das Newton-Raphson-Verfahren dient der Lösung *reeller*, nichtlinearer Gleichungssysteme. Das System (A3.1) ist jedoch komplex, so dass der erste Lösungsschritt im Aufstellen eines reellen Ersatzsystems besteht.

Es zeigt sich, dass die Aufspaltung von (A3.1) in Real- und Imaginärteil relativ einfach möglich ist. In jeder der sieben Systemgleichungen treten entweder nur einfache komplexe Summanden auf (Knotengleichungen) oder Summanden, die ein Produkt komplexer bzw. reeller Größen sind (Maschengleichungen). Jede komplexe Gleichung des Systems (A3.1) wird mit Hilfe der unmittelbar nachprüfbaren Gesetzmäßigkeiten (A3.2) – (A3.7) in zwei reelle Gleichungen zerlegt.

$$\operatorname{Re}\{\underline{A} \pm \underline{B}\} = \operatorname{Re}\{\underline{A}\} \pm \operatorname{Re}\{\underline{B}\} \tag{A3.2}$$

$$\operatorname{Im}\{\underline{A} \pm \underline{B}\} = \operatorname{Im}\{\underline{A}\} \pm \operatorname{Im}\{\underline{B}\} \tag{A3.3}$$

$$\operatorname{Re}\{\underline{A} \cdot \underline{B}\} = \operatorname{Re}\{\underline{A}\} \cdot \operatorname{Re}\{\underline{B}\} - \operatorname{Im}\{\underline{A}\} \cdot \operatorname{Im}\{\underline{B}\} \tag{A3.4}$$

$$\operatorname{Im}\{\underline{A} \cdot \underline{B}\} = \operatorname{Re}\{\underline{A}\} \cdot \operatorname{Im}\{\underline{B}\} + \operatorname{Im}\{\underline{A}\} \cdot \operatorname{Re}\{\underline{B}\} \tag{A3.5}$$

$$\operatorname{Re}\{k \cdot \underline{A}\} = k \cdot \operatorname{Re}\{\underline{A}\} \tag{A3.6}$$

$$\operatorname{Im}\{k \cdot \underline{A}\} = k \cdot \operatorname{Im}\{\underline{A}\} \tag{A3.7}$$

So lässt sich beispielhaft die komplexe Maschengleichung (M1) aus dem System (A3.1) in die beiden reellen Gleichungen (RE1), (IM1) aufspalten.

$$(M1) \quad \underline{I}_1^\wedge \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_4^\wedge \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{U}_{1E} = 0$$

$$(RE1) \quad \alpha \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}_1^\wedge \cdot \underline{Z}_L\} + \operatorname{Re}\{\underline{I}_{10}\} \cdot R_F - \alpha \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}_4^\wedge \cdot \underline{Z}_E\} - \operatorname{Re}\{\underline{U}_{1E}\} = 0$$

$$(IM1) \quad \alpha \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}_1^\wedge \cdot \underline{Z}_L\} + \operatorname{Im}\{\underline{I}_{10}\} \cdot R_F - \alpha \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}_4^\wedge \cdot \underline{Z}_E\} - \operatorname{Im}\{\underline{U}_{1E}\} = 0$$

Auf eine vollständige Darstellung des reellen Ersatzsystems wird verzichtet.

A.3.2 Aufstellen der Jacobi-Matrix J des reellen Ersatzsystems

Bekanntlich enthält die Jacobi-Matrix J die partiellen Ableitungen aller reellen Gleichungen nach allen reellen Variablen. Komplexe Variable werden nach Real- und Imaginärteil getrennt betrachtet. Der folgende Aufbau der Jacobi-Matrix wird willkürlich ausgewählt:

partielle Differentiation nach Variable \rightarrow

Re{ \underline{L}_6 }	Im{ \underline{L}_6 }	Re{ \underline{I}_{10} }	Im{ \underline{I}_{10} }	Re{ \underline{I}_{11} }	Im{ \underline{I}_{11} }	Re{ \underline{I}_{12} }	Im{ \underline{I}_{12} }	Re{ \underline{I}_{13} }	Im{ \underline{I}_{13} }	Re{ \underline{I}_{15} }	Im{ \underline{I}_{15} }	α	R_F
-------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------	-------

Gleichung

Re{(M1)}	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M1)\}}{\partial R_F}$
Im{(M1)}												
Re{(M2)}	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M1)\}}{\partial R_F}$
Im{(M2)}												
Re{(M3)}	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Im{(M3)}												
Re{(M4)}	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Im{(M4)}	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(M4)\}}{\partial R_F}$
Re{(K2)}												
Im{(K2)}	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(M4)\}}{\partial R_F}$
Re{(K3)}												
Im{(K3)}	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Re{(K5)}	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Im{(K5)}	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Re}\{(K5)\}}{\partial R_F}$
	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{L}_6\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{L}_6\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Re}\{\underline{I}_{12}\}}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial \operatorname{Im}\{\underline{I}_{12}\}}$	...	...	...	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \operatorname{Im}\{(K5)\}}{\partial R_F}$

Abb. A3.1 Aufbau der Jacobi-Matrix J

Nach **Abb. A3.1** besteht die Jacobi-Matrix aus $14 \times 14 = 196$ Elementen. Jede Zeile legt die zu differenzierende reelle Gleichung fest, jede Spalte die reelle Variable, nach der diese zu differenzieren ist. Die 196 partiellen Differentialquotienten führen in 136 Fällen auf Nullelemente. Für die verbleibenden 60 Nicht-Null-Elemente ist eine Berechnung von Hand relativ einfach möglich, so dass die Matrix mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden kann. Die Jacobi-Matrix J ist im Quelltext des Newton-Raphson-Algorithmus in Anhang 7 hinterlegt; auf eine explizite Auf- führung an dieser Stelle wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

A.3.3 Festlegung des Startvektors

Das Newton-Raphson-Verfahren basiert auf der iterativen Verbesserung eines vorgegeben Startvektors für die Unbekannten. Aus der numerischen Mathematik [20], [42] weiß man, dass eine geeignete Startvektorwahl wesentlichen Einfluss auf die Konvergenz des Verfahrens hat. Damit sind sowohl die Iterationsanzahl gemeint als auch die Konvergenz gegen die richtige Lösung. Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass folgende Startvektorwahl zu einer Konvergenz des Verfahrens nach drei bis vier Iterationen führt.

Tabelle A3.1 Belegung des Startvektors; oben: Variable; unten: Startwert

Re{ I_6 }	Im{ I_6 }	Re{ I_{10} }	Im{ I_{10} }	Re{ I_{11} }	Im{ I_{11} }	Re{ I_{12} }	Im{ I_{12} }	Re{ I_{13} }	Im{ I_{13} }	Re{ I_{15} }	Im{ I_{15} }	α	R_F
0	0	-Re{ I_{21} }	-Im{ I_{21} }	0	0	0	0	0	0	Re{ $I_{1A}-I_{10}$ }	Im{ $I_{1A}-I_{10}$ }	0,5	0

Die Wahl der Stromstartwerte ergibt sich unmittelbar aus (K2), (K3), (K5), wenn man unterstellt, dass die durch Querkapazitäten verursachten Ströme (I_{11} , I_{12} , I_{13}) und auch deren Summen (I_6 bzw. I_4^A) sehr klein sind und hier mit Null angesetzt werden. Während die Wahl des Startwertes für den Fehlerwiderstandes R_F willkürlich erfolgt, entspricht die Wahl $\alpha = 0,5$ dem Mittelwert.

A.3.4 Iterative Lösung des Gleichungssystems

Das Newton-Raphson-Verfahren basiert auf einer iterativen Lösung des linearen Gleichungssystems (A3.8)

$$-\Delta F = J \cdot \Delta X \quad (\text{A3.8})$$

J bezeichnet die bekannte Jacobi-Matrix. Der Vektor der Abweichungen ΔF entsteht, wenn man die Komponenten des aktuellen Lösungsvektors X in das reelle Ersatzsystem einsetzt. ΔX ist der Lösungsvektor des Systems (A3.8), um den die aktuelle Näherung X zu verbessern ist. Ausgehend von den Startwerten nach **Tabelle A3.1** für X wird das Verfahren solange durchgeführt bis alle Komponenten von ΔF einen Maximalwert unterschreiten. Anzumerken ist, dass die aktuellen Lösungswerte in die Jacobi-Matrix einspielen, weshalb sich diese mit jeder Iteration ändert.

A.3.5 Berechnung der Lastströme

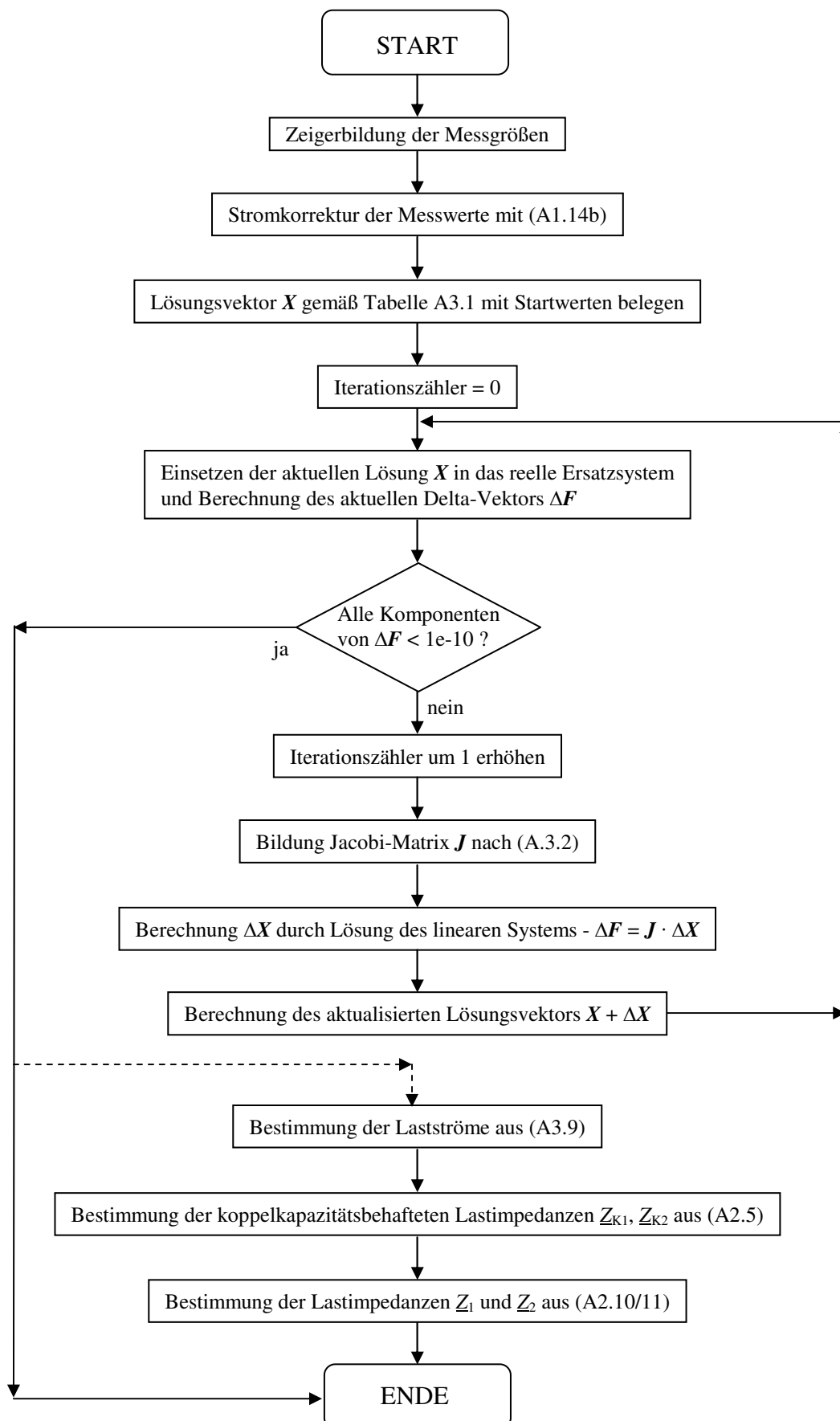
Wenn das Newton-Raphson-Verfahren konvergiert, ergibt sich eine Lösung für die unbekanntenen Größen: $I_6, I_{10}, I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{15}, \alpha, R_F$

Zur Berechnung der Last ist die Bestimmung der Lastströme I_{16}, I_{18}, I_{20} erforderlich. Dazu ist das lineare 3x3-System (A3.9) zu lösen, welches aus (K6), (K8), (K9) des Systems (4.1) entsteht:

$$\begin{pmatrix} I_{15} - I_{11} \\ I_2^A - I_{12} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{16} \\ I_{18} \\ I_{20} \end{pmatrix} \quad (\text{A3.9})$$

Die weitere Berechnung der Lastimpedanzen wird gemäß den Ausführungen des Anhangs A2.2 ab Schritt 14 vorgenommen.

A.3.6 Ablaufdiagramm zum Newton-Raphson-Verfahren



Anhang 4

A.4 Analyse des linearen Näherungsmodells mit den Kirchhoffschen Gesetzen hier: Lösung mit unsymmetrischer Last

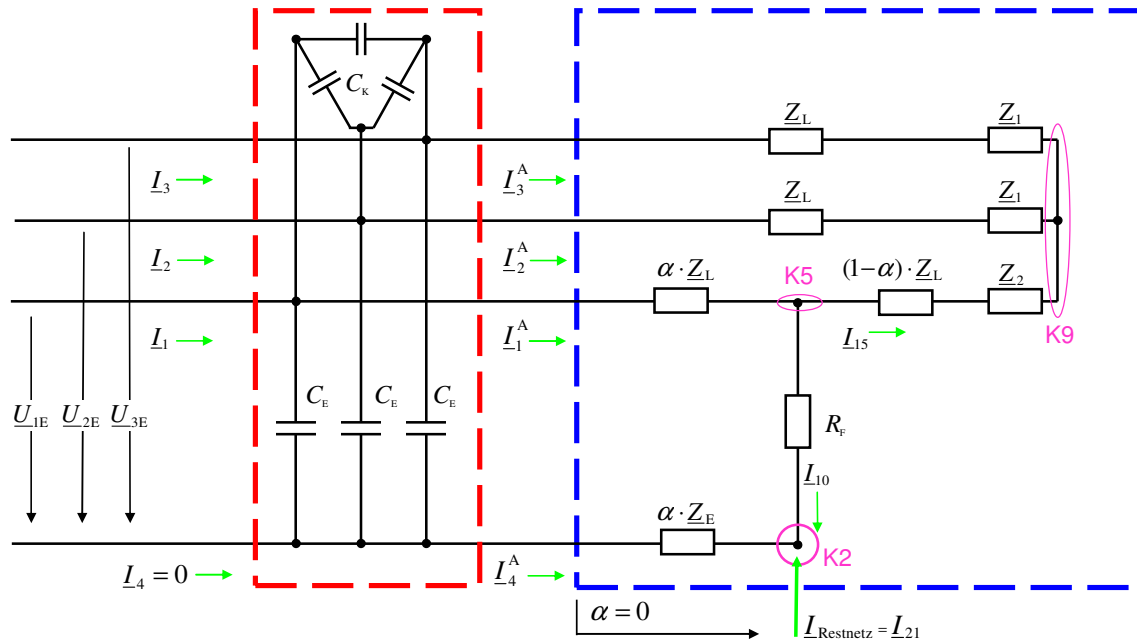


Abb. A4.1 Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit unsymmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk (rot) und Restschaltung (blau)

Es wird der blau eingerahmte Schaltungsteil nach **Abb. A4.1** betrachtet.

Willkürlich wird die Knotengleichung (K9) als redundante Knotengleichung festgelegt, die bei Anwendung der Kirchhoffschen Regeln entfällt. Die Knotengleichung über der Gesamtschaltung wird nicht mehr aufgeführt, da sie zur Berechnung der externen Strominjektion $I_{21} = -I_S$ dient.

bekannte Größen: $I_1^A, I_2^A, I_3^A, I_4^A, U_{1E}, U_{2E}, U_{3E}, Z_E, Z_L, I_{21}$

unbekannte Größen: $I_{10}, I_{15}, Z_1, Z_2, \alpha, R_F$

Schritt 1: Berechnung des Fehlerstroms I_{10} aus der Knotengleichung (K2)

$$I_{10} = -(I_4^A + I_{21}) \quad (\text{A4.1})$$

Schritt 2: Aus der Knotengleichung (K5) folgt der Strom I_{15}

$$I_{15} = I_1^A - I_{10} \quad (\text{A4.2})$$

Schritt 3: Alle Ströme sind damit bekannt. Es verbleiben drei Maschengleichungen

$$(M1) \quad \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E} + (\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A) \cdot (\underline{Z}_L + \underline{Z}_1) = 0$$

$$(M2) \quad \underline{U}_{2E} - \underline{U}_{1E} + \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{15} \cdot [(1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L + \underline{Z}_2] - \underline{I}_2^A \cdot (\underline{Z}_L + \underline{Z}_1) = 0$$

$$(M3) \quad \underline{U}_{1E} + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L = 0$$

Schritt 4: Zerlegen der Maschengleichung (M3) in Real- und Imaginärteil

$$\alpha \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} + R_F \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}_{10}\} = \operatorname{Re}\{\underline{U}_{1E}\}$$

$$\alpha \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} + R_F \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}_{10}\} = \operatorname{Im}\{\underline{U}_{1E}\}$$

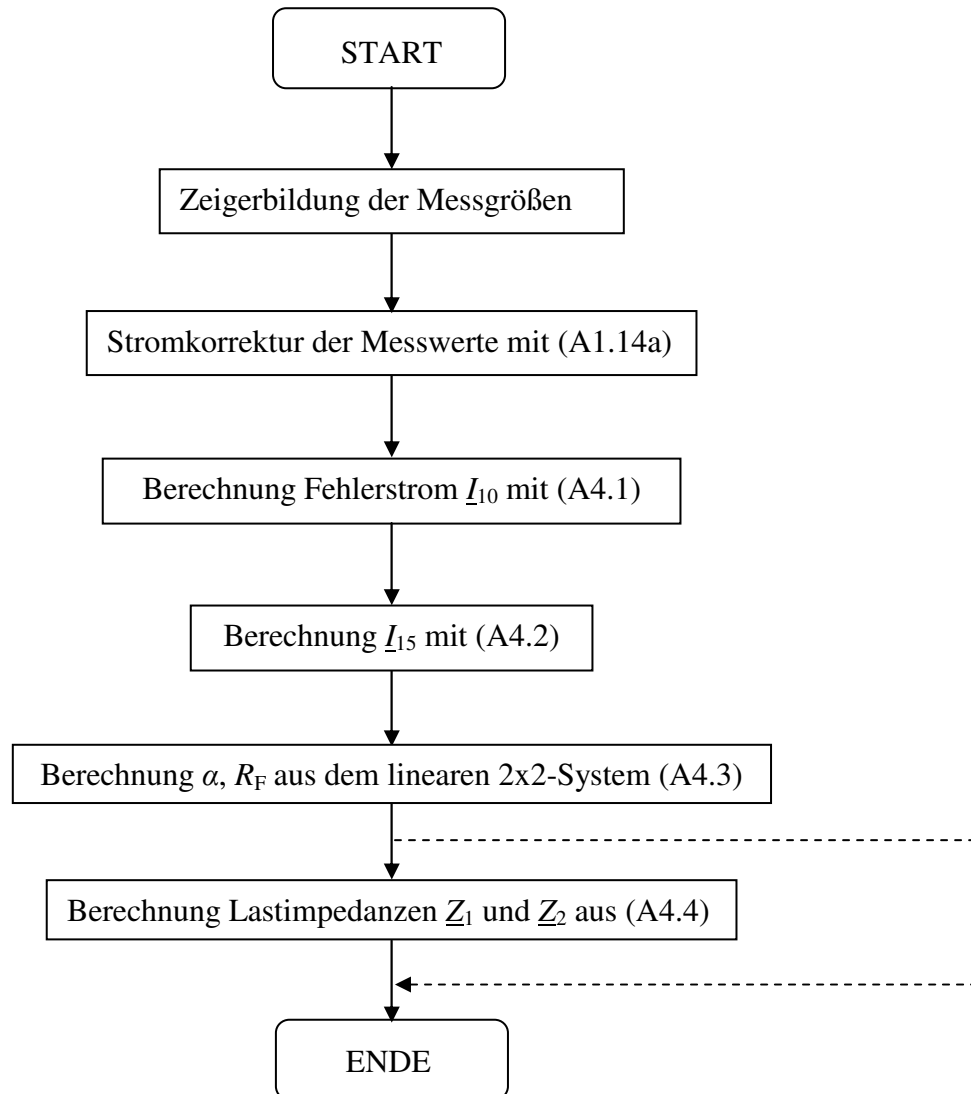
und Umsetzung der beiden Gleichungen in Matrix-Vektor-Form:

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{\underline{U}_{1E}\} \\ \operatorname{Im}\{\underline{U}_{1E}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \operatorname{Re}\{\underline{I}_{10}\} \\ \operatorname{Im}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \operatorname{Im}\{\underline{I}_{10}\} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ R_F \end{pmatrix} \quad (A4.3)$$

Die Lösung dieses linearen 2x2-Systems liefert den Fehlerentfernungparameter α und den Fehlerwiderstand R_F

Schritt 5: Durch Rückeinsetzen des nunmehr bekannten Wertes für α in (M2) entsteht aus (M1), (M2) wiederum ein lineares 2x2-System in den Lastimpedanzen $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} - (\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A) \cdot \underline{Z}_L \\ \underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} - \alpha \cdot \underline{Z}_L \cdot (\underline{I}_1^A - \underline{I}_{15}) + (\underline{I}_2^A - \underline{I}_{15}) \cdot \underline{Z}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A & 0 \\ -\underline{I}_2^A & \underline{I}_{15} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{Z}_1 \\ \underline{Z}_2 \end{pmatrix} \quad (A4.4)$$

A.4.1 Ablaufdiagramm zur Analyse des fehlerbehafteten Stichabgangs mit dem linearen Näherungsmodell und unsymmetrischer Last (Algorithmus: LGS_U)

Anhang 5

A.5 Analyse des linearen Näherungsmodells mit den Kirchhoffschen Gesetzen hier: Lösung mit symmetrischer Last

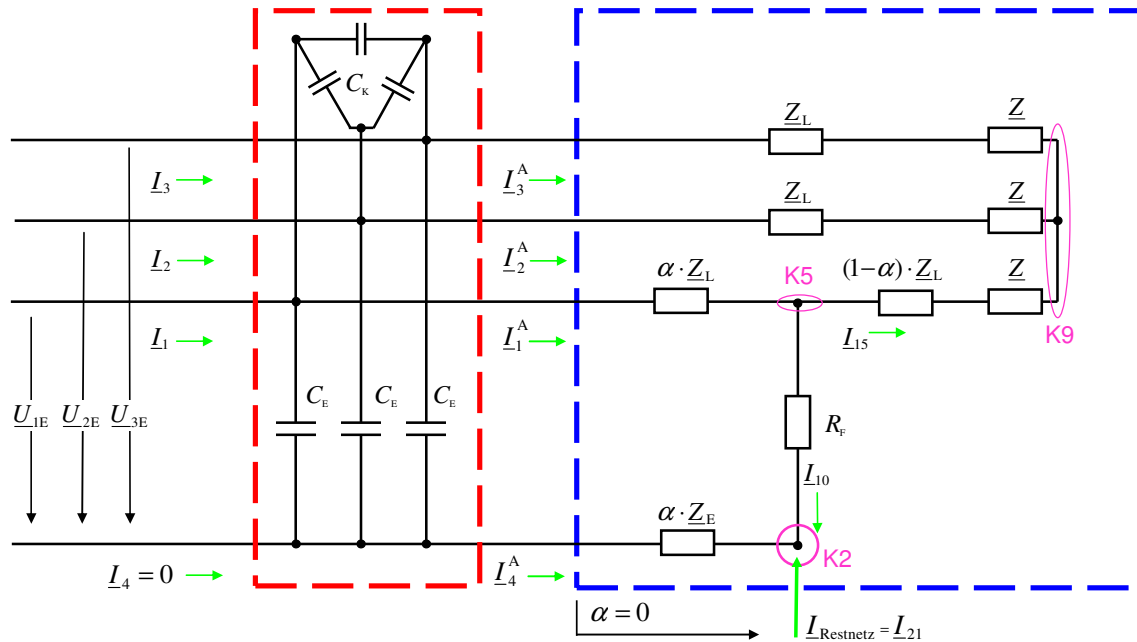


Abb. A5.1 Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit symmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk (rot) und Restschaltung (blau)

Es wird der blau eingerahmte Schaltungsteil nach **Abb. A5.1** betrachtet; das weitere Vorgehen bis Schritt 4 erfolgt zunächst analog Anhang 4.

Willkürlich wird die Knotengleichung (K9) als redundante Knotengleichung festgelegt, die bei Anwendung der Kirchhoffschen Regeln entfällt. Die Knotengleichung über der Gesamtschaltung wird nicht mehr aufgeführt, da sie zur Berechnung der externen Strominjektion $\underline{I}_{21} = -\underline{I}_S$ dient.

bekannte Größen: $\underline{I}_1^A, \underline{I}_2^A, \underline{I}_3^A, \underline{I}_4^A, \underline{U}_{1E}, \underline{U}_{2E}, \underline{U}_{3E}, \underline{Z}_E, \underline{Z}_L, \underline{I}_{21}$

unbekannte Größen: $\underline{I}_{10}, \underline{I}_{15}, \underline{Z}, \alpha, R_F$

Schritt 1: Berechnung des Fehlerstroms \underline{I}_{10} aus der Knotengleichung (K2)

$$\underline{I}_{10} = -(\underline{I}_4^A + \underline{I}_{21}) \quad (\text{A5.1})$$

Schritt 2: Aus der Knotengleichung (K5) folgt der Strom \underline{I}_{15}

$$\underline{I}_{15} = \underline{I}_1^A - \underline{I}_{10} \quad (\text{A5.2})$$

Schritt 3: Es verbleiben drei Maschengleichungen

$$(M1) \quad \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{2E} + (\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A) \cdot (\underline{Z}_L + \underline{Z}) = 0$$

$$(M2) \quad \underline{U}_{2E} - \underline{U}_{1E} + \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L + \underline{I}_{15} \cdot [(1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_L + \underline{Z}] - \underline{I}_2^A \cdot (\underline{Z}_L + \underline{Z}) = 0$$

$$(M3) \quad \underline{U}_{1E} + \underline{I}_4^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_E - \underline{I}_{10} \cdot R_F - \underline{I}_1^A \cdot \alpha \cdot \underline{Z}_L = 0$$

Schritt 4: Auflösen von (M1) nach \underline{Z} und bilden von Real- und Imaginärteil

$$\text{Re}\{\underline{Z}\} = \text{Re}\left\{\frac{\underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A}\right\} \quad (A5.3)$$

$$\text{Im}\{\underline{Z}\} = \text{Im}\left\{\frac{\underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A}\right\} \quad (A5.4)$$

Schritt 5: Sammeln von (M2) nach α , \underline{Z} und bilden von Real- und Imaginärteil

$$\alpha \cdot \text{Re}\left\{\frac{\underline{Z}_L \cdot (\underline{I}_1^A - \underline{I}_{15})}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} + \text{Re}\{\underline{Z}\} = \text{Re}\left\{\frac{\underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} \quad (A5.5)$$

$$\alpha \cdot \text{Im}\left\{\frac{\underline{Z}_L \cdot (\underline{I}_1^A - \underline{I}_{15})}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} + \text{Im}\{\underline{Z}\} = \text{Im}\left\{\frac{\underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} \quad (A5.6)$$

Schritt 6: Sammeln von (M3) nach α , R_F und bilden von Real- und Imaginärteil

$$\alpha \cdot \text{Re}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} + R_F \cdot \text{Re}\{\underline{I}_{10}\} = \text{Re}\{\underline{U}_{1E}\} \quad (A5.7)$$

$$\alpha \cdot \text{Im}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} + R_F \cdot \text{Im}\{\underline{I}_{10}\} = \text{Im}\{\underline{U}_{1E}\} \quad (A5.8)$$

Schritt 7: Die Gleichungen (A5.3) – (A5.8) lauten in Matrix-Vektor-Form:

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\left\{\frac{\underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A}\right\} \\ \text{Im}\left\{\frac{\underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_2^A - \underline{I}_3^A}\right\} \\ \text{Re}\left\{\frac{\underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} \\ \text{Im}\left\{\frac{\underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} - \underline{Z}_L}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} \\ \text{Re}\{\underline{U}_{1E}\} \\ \text{Im}\{\underline{U}_{1E}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \text{Re}\left\{\frac{\underline{Z}_L \cdot (\underline{I}_1^A - \underline{I}_{15})}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} & 0 & 1 & 0 \\ \text{Im}\left\{\frac{\underline{Z}_L \cdot (\underline{I}_1^A - \underline{I}_{15})}{\underline{I}_{15} - \underline{I}_2^A}\right\} & 0 & 0 & 1 \\ \text{Re}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \text{Re}\{\underline{I}_{10}\} & 0 & 0 \\ \text{Im}\{\underline{I}_1^A \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_4^A \cdot \underline{Z}_E\} & \text{Im}\{\underline{I}_{10}\} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ R_F \\ \text{Re}\{\underline{Z}\} \\ \text{Im}\{\underline{Z}\} \end{pmatrix} \quad (A5.9)$$

Die Lösung dieses überbestimmten, linearen 6x4-Systems liefert den Fehlerentfernungsparameter α , den Fehlerwiderstand R_F und die symmetrische Last \underline{Z} .

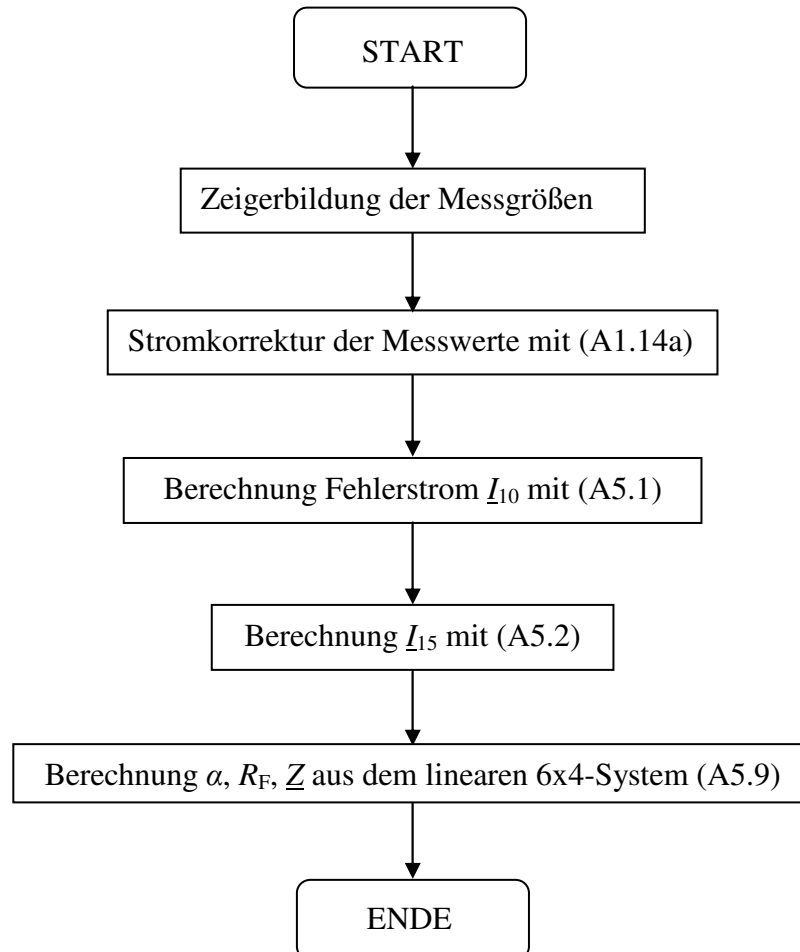
A.5.1 Ablaufdiagramm zur Analyse des fehlerbehafteten Stichabgangs mit dem linearen Näherungsmodell und symmetrischer Last (Algorithmus: LGS_S)

Tabelle A6.1 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$; Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	-0,0006	0,0097	0,0776	0,2069	1,2452	0,2989	0,3149	0,3914	0,5267	1,6130	0,4641	0,4791	0,5561	0,6920	1,7445	0,6180	0,6359	0,7093	0,8543	1,9186	0,9299	0,9370	1,0302	1,1457	2,2186
1	LGS_S Ist	-0,0005	0,0100	0,0780	0,2072	1,2456	0,2993	0,3152	0,3918	0,5271	1,6134	0,4644	0,4794	0,5565	0,6924	1,7449	0,6184	0,6363	0,7096	0,8547	1,9191	0,9303	0,9374	1,0305	1,1461	2,2190
1	KUB_U Ist	-0,0006	0,0094	0,0758	0,2020	1,2192	0,2919	0,3076	0,3823	0,5147	1,5802	0,4533	0,4680	0,5433	0,6763	1,7095	0,6039	0,6213	0,6931	0,8350	1,8802	0,9086	0,9157	1,0067	1,1201	2,1750
1	LGS_U Delta	-0,06%	0,97%	7,76%	20,69%	124,52%	-3,44%	-1,85%	5,80%	19,34%	127,97%	-3,59%	-2,09%	5,61%	19,20%	124,45%	-4,86%	-3,07%	4,26%	18,76%	125,19%	-7,01%	-6,30%	3,02%	14,57%	121,86%
1	LGS_S Delta	-0,05%	1,00%	7,80%	20,72%	124,56%	-3,41%	-1,81%	5,84%	19,37%	128,01%	-3,56%	-2,06%	5,65%	19,24%	124,49%	-4,83%	-3,04%	4,29%	18,80%	125,24%	-6,97%	-6,26%	3,05%	14,61%	121,90%
1	KUB_U Delta	-0,06%	0,94%	7,58%	20,20%	121,92%	-4,14%	-2,58%	4,90%	18,14%	124,69%	-4,67%	-3,20%	4,33%	17,63%	120,95%	-6,28%	-4,54%	2,64%	16,83%	121,35%	-9,14%	-8,43%	0,67%	12,01%	117,50%
5	LGS_U Ist	-0,0016	0,0013	-0,0355	-0,0486	-0,2266	0,4046	0,3875	0,2987	0,3097	0,1073	0,5739	0,4907	0,4697	0,4474	0,2908	0,7665	0,7090	0,6560	0,5934	0,4238	1,1749	1,0529	1,0165	1,0285	0,8084
5	LGS_S Ist	0,1984	-0,6041	-0,5821	-0,3354	-0,7423	-0,1579	-0,4081	-0,4813	0,2247	-0,5468	-0,0282	0,2303	0,3891	-0,6009	0,1302	0,3993	0,6248	0,1757	0,5942	0,1258	0,6754	0,1263	0,1630	0,5754	0,7523
5	KUB_U Ist	-0,0016	0,0014	-0,0385	-0,0518	-0,2321	0,4483	0,4285	0,3247	0,3352	0,1125	0,6366	0,5373	0,5124	0,4828	0,3018	0,8514	0,7839	0,7189	0,6391	0,4395	1,3020	1,1541	1,1069	1,1131	0,8383
5	LGS_U Delta	-0,16%	0,13%	-3,55%	-4,86%	-22,66%	7,13%	5,41%	-3,47%	-2,36%	-22,60%	7,39%	-0,93%	-3,04%	-5,26%	-20,92%	9,98%	4,23%	-1,07%	-7,33%	-24,29%	17,49%	5,29%	1,65%	2,85%	-19,16%
5	LGS_S Delta	19,84%	-60,41%	-58,21%	-33,54%	-74,23%	-49,12%	-74,15%	-81,46%	-10,87%	-88,02%	-52,82%	-26,97%	-11,09%	-110,09%	-36,98%	-26,73%	-4,19%	-49,10%	-7,25%	-54,09%	-32,46%	-87,38%	-83,70%	-42,46%	-24,77%
5	KUB_U Delta	-0,16%	0,14%	-3,85%	-5,18%	-23,21%	11,50%	9,51%	-0,86%	0,19%	-22,09%	13,66%	3,73%	1,24%	-1,72%	-19,82%	18,47%	11,72%	5,22%	-2,75%	-22,72%	30,20%	15,41%	10,69%	11,31%	-16,17%
7	LGS_U Ist	-0,0004	-0,0048	-0,0183	-0,0364	-0,0976	0,3856	0,3855	0,3621	0,3534	0,3023	0,5661	0,5798	0,5461	0,5295	0,4138	0,7718	0,7647	0,7383	0,7002	0,5881	1,1707	1,1902	1,1681	1,1087	0,9289
7	LGS_S Ist	0,1961	0,2908	0,5018	0,3079	0,3925	0,2267	0,4817	0,5153	0,1092	0,2939	1,1863	0,7156	0,8802	0,7373	1,0938	0,8294	0,7953	0,7549	0,7250	0,8177	1,4968	1,2252	1,0392	0,9228	1,2705
7	KUB_U Ist	-0,0004	-0,0052	-0,0196	-0,0386	-0,0993	0,4216	0,4219	0,3935	0,3810	0,3147	0,6218	0,6368	0,5951	0,5717	0,4306	0,8509	0,8417	0,8062	0,7564	0,6118	1,2915	1,3139	1,2806	1,2022	0,9684
7	LGS_U Delta	-0,04%	-0,48%	-1,83%	-3,64%	-9,76%	5,23%	5,21%	2,87%	2,01%	-3,11%	6,61%	7,98%	4,61%	2,95%	-8,62%	10,51%	9,81%	7,16%	3,35%	-7,86%	17,07%	19,02%	16,81%	10,87%	-7,11%
7	LGS_S Delta	19,61%	29,08%	50,18%	30,79%	39,25%	-10,67%	14,84%	18,19%	-22,41%	-3,94%	68,63%	21,56%	38,02%	23,73%	59,38%	16,27%	12,86%	8,82%	5,83%	15,10%	49,68%	22,52%	3,92%	-7,72%	27,05%
7	KUB_U Delta	-0,04%	-0,52%	-1,96%	-3,86%	-9,93%	8,83%	8,85%	6,02%	4,77%	-1,87%	12,18%	13,68%	9,51%	7,17%	-6,94%	18,42%	17,50%	13,95%	8,98%	-5,48%	29,15%	31,39%	28,06%	20,22%	-3,16%

Tabelle A6.2 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $R_F \notin [-5\Omega; \infty]$; Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	0,03	5,97	37,62	93,93	447,28	2,41	8,34	39,86	95,94	447,34	2,65	8,70	40,11	96,30	448,75	3,49	9,33	40,94	96,56	447,87	5,51	12,04	42,77	99,50	451,21
1	LGS_S Ist	0,03	5,95	37,61	93,91	447,26	2,39	8,33	39,84	95,93	447,32	2,63	8,69	40,10	96,28	448,73	3,47	9,31	40,92	96,54	447,85	5,49	12,02	42,75	99,48	451,19
1	KUB_U Ist	0,03	5,98	37,69	94,12	448,68	2,67	8,62	40,21	96,43	449,14	3,06	9,12	40,62	96,95	450,69	4,03	9,89	41,57	97,36	450,01	6,33	12,87	43,71	100,57	453,66
1	LGS_U Delta	0,03	-1,31	-7,83	-19,71	-112,72	2,41	1,07	-5,60	-17,70	-112,66	2,65	1,43	-5,34	-17,34	-111,25	3,49	2,06	-4,52	-17,08	-112,13	5,51	4,77	-2,69	-14,14	-108,79
1	LGS_S Delta	0,03	-1,32	-7,85	-19,73	-112,74	2,39	1,06	-5,61	-17,71	-112,68	2,63	1,42	-5,35	-17,35	-111,27	3,47	2,04	-4,53	-17,09	-112,15	5,49	4,75	-2,70	-14,16	-108,81
1	KUB_U Delta	0,03	-1,30	-7,76	-19,52	-111,32	2,67	1,35	-5,24	-17,20	-110,86	3,06	1,85	-4,84	-16,69	-109,31	4,03	2,62	-3,88	-16,28	-109,99	6,33	5,59	-1,75	-13,07	-106,34
5	LGS_U Ist	0,09	6,74	45,17	112,23	549,93	-1,67	4,50	46,24	111,99	545,85	-1,64	8,28	45,08	111,51	549,76	-2,38	5,32	46,35	114,18	551,20	-6,14	9,50	46,25	111,35	551,08
5	LGS_S Ist	-1,25	30,66	67,51	124,50	574,35	21,67	38,36	76,75	115,42	578,36	23,04	18,64	48,33	156,50	557,57	12,80	8,75	65,00	114,15	565,47	14,22	44,30	81,31	129,78	553,74
5	KUB_U Ist	0,09	6,72	45,19	112,09	547,63	-3,45	2,77	45,32	111,22	545,32	-4,17	6,49	43,59	110,48	550,26	-5,79	2,39	44,30	113,08	552,45	-11,09	6,03	43,31	109,47	554,54
5	LGS_U Delta	0,09	-0,53	-0,28	-1,40	-10,07	-1,67	-2,78	0,78	-1,65	-14,15	-1,64	1,01	-0,38	-2,12	-10,24	-2,38	-1,95	0,90	0,54	-8,80	-6,14	2,22	0,79	-2,28	-8,92
5	LGS_S Delta	-1,25	23,38	22,05	10,87	14,35	21,67	31,09	31,29	1,78	18,36	23,04	11,37	2,87	42,86	-2,43	12,80	1,48	19,55	0,51	5,47	14,22	37,02	35,86	16,14	-6,26
5	KUB_U Delta	0,09	-0,55	-0,26	-1,54	-12,37	-3,45	-4,50	-0,13	-2,42	-14,68	-4,17	-0,78	-1,87	-3,16	-9,74	-5,79	-4,89	-1,16	-0,56	-7,55	-11,09	-1,24	-2,14	-4,17	-5,46
7	LGS_U Ist	0,08	7,06	45,55	113,78	556,35	1,39	6,90	45,87	112,68	549,06	-1,40	7,99	44,94	111,72	548,30	-0,44	7,89	43,55	113,69	545,53	-1,39	5,96	44,73	112,89	551,61
7	LGS_S Ist	-3,08	-5,30	23,03	99,05	530,38	7,28	3,04	39,89	122,71	549,44	-27,78	2,79	31,48	102,91	517,44	-2,68	6,72	42,86	112,71	534,62	-14,08	4,61	49,56	120,15	536,95
7	KUB_U Ist	0,08	7,05	45,41	113,34	552,97	0,10	5,55	44,95	112,21	550,67	-3,64	6,04	43,58	111,19	551,26	-3,26	5,33	41,70	113,38	550,67	-5,43	2,08	42,42	112,75	561,35
7	LGS_U Delta	0,08	-0,22	0,09	0,15	-3,65	1,39	-0,37	0,42	-0,96	-10,94	-1,40	0,72	-0,51	-1,91	-11,70	-0,44	0,62	-1,90	0,05	-14,47	-1,39	-1,31	-0,73	-0,75	-8,39
7	LGS_S Delta	-3,08	-12,57	-22,42	-14,59	-29,62	7,28	-4,24	-5,56	9,08	-10,56	-27,78	-4,48	-13,98	-10,72	-42,56	-2,68	-0,55	-2,59	-0,92	-25,38	-14,08	-2,66	4,11	6,51	-23,05
7	KUB_U Delta	0,08	-0,23	-0,04	-0,29	-7,03	0,10	-1,72	-0,50	-1,42	-9,33	-3,64	-1,23	-1,87	-2,45	-8,74	-3,26	-1,94	-3,75	-0,26	-9,33	-5,43	-5,20	-3,03	-0,89	1,35

Tabelle A6.3 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$;
 $(Z, \Delta Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Istwert R_F	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
k Sollwert Z	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8
1 LGS U Ist	663,21	662,75	663,06	663,08	664,07	662,55	663,51	663,43	663,38	663,55	662,56	662,99	662,98	663,43	663,93	662,27	663,05	663,00	662,96	663,99	662,98	663,22	663,35	663,37	663,60
1 LGS S Ist	665,07	661,32	661,77	662,05	663,38	661,14	661,64	662,06	661,69	662,90	661,18	661,58	661,79	661,92	663,21	660,89	661,52	661,98	661,84	663,61	661,73	661,66	661,91	662,29	663,03
1 KUB U Ist	637,05	619,40	623,61	623,60	638,62	621,90	622,06	627,20	622,64	636,77	624,10	619,31	621,19	623,91	635,76	618,89	619,96	620,62	628,10	640,04	625,56	620,62	626,16	627,70	634,68
1 LGS U Delta	-18,61	-19,07	-18,76	-18,74	-17,75	-19,27	-18,31	-18,38	-18,43	-18,27	-19,26	-18,83	-18,84	-18,38	-17,89	-19,55	-18,77	-18,82	-18,86	-17,83	-18,83	-18,59	-18,47	-18,44	-18,21
1 LGS S Delta	-16,75	-20,50	-20,05	-19,77	-18,44	-20,68	-20,18	-19,76	-20,13	-18,92	-20,63	-20,24	-20,03	-19,89	-18,61	-20,93	-20,30	-19,84	-19,98	-18,21	-20,09	-20,16	-19,91	-19,53	-18,79
1 KUB U Delta	-44,76	-62,42	-58,21	-58,21	-43,20	-59,92	-59,76	-54,62	-59,17	-45,05	-57,72	-62,50	-60,63	-57,90	-46,06	-62,93	-61,86	-61,19	-53,72	-41,78	-56,26	-61,20	-55,66	-54,12	-47,14
5 LGS U Ist	628,15	616,21	603,50	639,74	616,42	631,53	597,29	609,38	634,09	625,75	620,92	625,90	622,91	607,05	627,77	614,96	633,48	619,24	640,94	620,79	624,70	617,60	597,05	634,78	633,89
5 LGS S Ist	620,45	617,86	604,83	640,92	623,24	630,23	596,68	611,12	634,16	636,04	619,96	624,52	621,93	610,66	635,22	613,65	634,13	619,62	640,94	630,88	624,21	621,17	600,38	636,88	638,70
5 KUB U Ist	936,39	722,32	652,71	698,89	581,20	885,09	809,51	587,19	712,90	638,02	879,99	622,07	623,91	696,50	592,42	892,70	834,49	705,80	624,81	573,24	822,79	647,03	638,90	744,64	580,46
5 LGS U Delta	-53,67	-65,61	-78,32	-42,08	-65,40	-50,29	-84,53	-72,44	-47,73	-56,07	-60,90	-55,92	-58,91	-74,77	-54,04	-66,86	-48,33	-62,58	-40,87	-61,03	-57,12	-64,22	-84,77	-47,04	-47,93
5 LGS S Delta	-61,37	-63,96	-76,98	-40,90	-58,58	-51,59	-85,14	-70,69	-47,66	-45,78	-61,85	-57,30	-59,89	-71,16	-46,60	-68,17	-47,69	-62,20	-40,88	-50,94	-57,60	-60,64	-81,44	-44,94	-43,12
5 KUB U Delta	254,57	40,50	-29,11	17,08	-100,62	203,27	127,70	-94,62	31,08	-43,80	198,17	-59,75	-57,91	14,68	-89,40	210,88	152,68	23,98	-57,01	-108,58	140,97	-34,79	-42,92	62,82	-101,36
7 LGS U Ist	695,78	683,68	682,22	681,59	687,67	670,47	660,11	679,61	652,78	667,81	689,57	671,38	674,11	680,99	702,00	666,05	676,64	670,56	671,60	680,09	687,89	677,42	653,84	654,97	674,43
7 LGS S Ist	695,39	679,60	676,52	668,81	675,87	669,52	655,87	671,37	646,11	662,43	688,74	671,44	672,96	674,25	686,01	659,50	674,51	669,58	660,21	669,50	684,41	671,13	656,52	654,93	668,88
7 KUB U Ist	721,78	511,37	557,82	519,01	724,39	510,24	511,12	518,39	501,44	635,11	518,14	489,29	525,82	516,87	723,68	438,92	464,98	503,24	507,37	721,87	501,50	454,29	468,25	488,61	781,97
7 LGS U Delta	13,96	1,87	0,41	-0,23	5,85	-11,35	-21,71	-2,20	-29,04	-14,01	7,75	-10,44	-7,70	-0,83	20,18	-15,76	-5,18	-11,25	-10,21	-1,73	6,07	-4,40	-27,97	-26,84	-7,39
7 LGS S Delta	13,57	-2,22	-5,29	-13,00	-5,95	-12,29	-25,94	-10,45	-35,71	-19,39	6,92	-10,37	-8,85	-7,57	4,19	-22,32	-7,31	-12,23	-21,61	-12,32	2,59	-10,69	-25,30	-26,89	-12,93
7 KUB U Delta	39,96	-170,45	-124,00	-162,81	42,58	-171,58	-170,70	-163,43	-180,38	-46,71	-163,68	-192,53	-156,00	-164,95	41,86	-242,90	-216,84	-178,58	-174,45	40,05	-180,31	-227,53	-213,57	-193,21	100,15

Tabelle A6.4 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$;
 $(\varphi_Z, \Delta\varphi_Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Istwert R_F	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
k Sollwert φ°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 LGS U Ist	0,37	0,55	0,55	0,53	0,56	0,56	0,59	0,53	0,57	0,52	0,56	0,54	0,53	0,58	0,55	0,54	0,56	0,53	0,55	0,52	0,54	0,54	0,55	0,54	0,55
1 LGS S Ist	0,87	0,80	0,81	0,78	0,78	0,81	0,86	0,80	0,81	0,74	0,82	0,78	0,78	0,82	0,75	0,80	0,81	0,80	0,81	0,75	0,82	0,80	0,82	0,81	0,76
1 KUB U Ist	3,92	5,80	5,69	5,81	6,94	6,22	5,78	5,89	6,24	6,82	6,04	5,90	6,23	6,44	6,40	6,05	6,08	5,89	6,10	6,50	6,08	5,85	6,28	5,93	6,71
1 LGS U Delta	0,37	0,55	0,55	0,53	0,56	0,56	0,59	0,53	0,57	0,52	0,56	0,54	0,53	0,58	0,55	0,54	0,56	0,53	0,55	0,52	0,54	0,54	0,55	0,54	0,55
1 LGS S Delta	0,87	0,80	0,81	0,78	0,78	0,81	0,86	0,80	0,81	0,74	0,82	0,78	0,78	0,82	0,75	0,80	0,81	0,80	0,81	0,75	0,82	0,80	0,82	0,81	0,76
1 KUB U Delta	3,92	5,80	5,69	5,81	6,94	6,22	5,78	5,89	6,24	6,82	6,04	5,90	6,23	6,44	6,40	6,05	6,08	5,89	6,10	6,50	6,08	5,85	6,28	5,93	6,71
5 LGS U Ist	-3,18	-1,98	-1,60	-0,12	-0,54	-3,21	-3,25	-2,20	-2,94	-1,41	-2,75	-2,82	-2,84	-0,22	-1,77	-3,60	-0,87	-2,89	-1,79	-1,16	-2,89	-0,98	-2,19	-1,34	-0,66
5 LGS S Ist	-1,94	-1,89	-1,56	-0,26	-0,05	-2,30	-2,07	-1,67	-2,45	-0,69	-1,77	-1,81	-1,90	-0,15	-0,89	-2,64	-1,16	-1,89	-1,35	-0,16	-1,78	-1,32	-1,29	-1,20	-0,10
5 KUB U Ist	-23,56	-19,87	-20,45	-9,17	-14,60	-12,89	-13,52	-19,31	-24,28	-7,26	-16,98	-14,80	-19,44	-10,49	-5,55	-21,94	-21,69	-28,02	-17,01	-5,87	-18,35	-23,63	-16,13	-20,74	-5,81
5 LGS U Delta	-3,18	-1,98	-1,60	-0,12	-0,54	-3,21	-3,25	-2,20	-2,94	-1,41	-2,75	-2,82	-2,84	-0,22	-1,77	-3,60	-0,87	-2,89	-1,79	-1,16	-2,89	-0,98	-2,19	-1,34	-0,66
5 LGS S Delta	-1,94	-1,89	-1,56	-0,26	-0,05	-2,30	-2,07	-1,67	-2,45	-0,69	-1,77	-1,81	-1,90	-0,15	-0,89	-2,64	-1,16	-1,89	-1,35	-0,16	-1,78	-1,32	-1,29	-1,20	-0,10
5 KUB U Delta	-23,56	-19,87	-20,45	-9,17	-14,60	-12,89	-13,52	-19,31	-24,28	-7,26	-16,98	-14,80	-19,44	-10,49	-5,55	-21,94	-21,69	-28,02	-17,01	-5,87	-18,35	-23,63	-16,13	-20,74	-5,81
7 LGS U Ist	0,37	-0,46	-1,34	-0,35	-1,73	-0,52	-1,04	-0,35	0,43	-1,86	-2,50	-1,01	-1,05	-0,17	-1,53	-0,04	-0,16	-0,77	0,93	-1,07	-0,96	0,09	-1,14	-0,66	-1,75
7 LGS S Ist	-0,96	-0,78	-1,51	-1,09	-1,40	-0,72	-1,50	-1,05	-0,27	-1,90	-2,26	-0,87	-0,81	-0,49	-1,07	-0,91	-0,40	-0,86	0,12	-0,90	-0,99	-0,62	-1,02	-0,88	-1,45
7 KUB U Ist	13,51	4,25	6,97	12,67	8,69	12,76	9,84	14,50	13,74	18,43	1,92	11,00	11,98	10,10	21,95	8,77	9,29	5,44	18,59	12,55	9,20	9,77	15,37	15,82	15,56
7 LGS U Delta	0,37	-0,46	-1,34	-0,35	-1,73	-0,52	-1,04	-0,35	0,43	-1,86	-2,50	-1,01	-1,05	-0,17	-1,53	-0,04	-0,16	-0,77	0,93	-1,07	-0,96	0,09	-1,14	-0,66	-1,75
7 LGS S Delta	-0,96	-0,78	-1,51	-1,09	-1,40	-0,72	-1,50	-1,05	-0,27	-1,90	-2,26	-0,87	-0,81	-0,49	-1,07	-0,91	-0,40	-0,86	0,12	-0,90	-0,99	-0,62	-1,02	-0,88	-1,45
7 KUB U Delta	13,51	4,25	6,97	12,67	8,69	12,76	9,84	14,50	13,74	18,43	1,92	11,00	11,98	10,10	21,95	8,77	9,29	5,44	18,59	12,55	9,20	9,77	15,37	15,82	15,56

Tabelle A6.5 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$;
 Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U_Ist	0,0015	-0,0219	-0,1409	-0,2975	-1,2443	0,3768	0,3204	0,2265	0,0677	-0,8818	0,5416	0,4904	0,3960	0,2359	-0,7201	0,7104	0,6591	0,5269	0,4043	-0,5678	1,0731	1,0118	0,9312	0,7669	-0,2097
1	LGS_S_Ist	0,0027	-0,0209	-0,1398	-0,2962	-1,2429	0,3791	0,3224	0,2275	0,0690	-0,8804	0,5433	0,4924	0,3971	0,2372	-0,7186	0,7121	0,6610	0,5272	0,4056	-0,5663	1,0750	1,0140	0,9323	0,7682	-0,2082
1	KUB_U_Ist	0,0015	-0,0221	-0,1417	-0,2977	-1,2248	0,3808	0,3235	0,2278	0,0678	-0,8680	0,5473	0,4951	0,3983	0,2362	-0,7088	0,7177	0,6654	0,5299	0,4046	-0,5588	1,0840	1,0214	0,9363	0,7673	-0,2063
1	LGS_U_Delta	0,15%	-2,19%	-14,09%	-29,75%	-124,43%	4,35%	-1,30%	-10,69%	-26,56%	-121,51%	4,16%	-0,96%	-10,40%	-26,41%	-122,01%	4,38%	-0,76%	-13,97%	-26,24%	-123,44%	7,31%	1,18%	-6,88%	-23,31%	-120,97%
1	LGS_S_Delta	0,27%	-2,09%	-13,98%	-29,62%	-124,29%	4,57%	-1,09%	-10,58%	-26,43%	-121,37%	4,33%	-0,76%	-10,29%	-26,28%	-121,86%	4,54%	-0,57%	-13,95%	-26,11%	-123,30%	7,50%	1,40%	-6,78%	-23,18%	-120,82%
1	KUB_U_Delta	0,15%	-2,21%	-14,17%	-29,77%	-122,48%	4,75%	-0,98%	-10,55%	-26,55%	-120,13%	4,73%	-0,49%	-10,17%	-26,39%	-120,88%	5,10%	-0,13%	-13,68%	-26,20%	-122,55%	8,40%	2,14%	-6,37%	-23,27%	-120,63%
5	LGS_U_Ist	0,0006	-0,0034	-0,0252	-0,0563	-0,0493	0,3261	0,3322	0,3210	0,2767	0,2744	0,4704	0,4842	0,4821	0,4153	0,4875	0,6224	0,6392	0,6184	0,5723	0,6113	0,9740	0,9821	0,9709	0,8819	0,9448
5	LGS_S_Ist	0,1540	0,0633	0,0437	0,0264	-0,0863	0,3243	0,3214	0,3379	0,3635	0,2750	0,4797	0,4753	0,5140	0,5709	0,3424	0,6314	0,6459	0,7229	0,7032	0,7387	0,9717	1,0178	0,9995	1,0560	1,1670
5	KUB_U_Ist	0,0006	-0,0034	-0,0253	-0,0563	-0,0485	0,3286	0,3346	0,3226	0,2771	0,2717	0,4742	0,4879	0,4849	0,4162	0,4832	0,6278	0,6445	0,6223	0,5737	0,6062	0,9845	0,9923	0,9787	0,8859	0,9387
5	LGS_U_Delta	0,06%	-0,34%	-2,52%	-5,63%	-4,93%	-0,72%	-0,11%	-1,24%	-5,67%	-5,90%	-2,96%	-1,58%	-1,79%	-8,47%	-1,25%	-4,43%	-2,75%	-4,82%	-9,44%	-5,54%	-2,61%	-1,79%	-2,91%	-11,81%	-5,52%
5	LGS_S_Delta	15,40%	6,33%	4,37%	2,64%	-8,63%	-0,90%	-1,19%	0,45%	3,02%	-5,83%	-2,03%	-2,47%	1,40%	7,09%	-15,77%	-3,53%	-2,07%	5,62%	3,65%	7,20%	-2,83%	1,78%	-0,05%	5,60%	16,70%
5	KUB_U_Delta	0,06%	-0,34%	-2,53%	-5,63%	-4,85%	-0,47%	0,13%	-1,08%	-5,62%	-6,16%	-2,58%	-1,21%	-1,51%	-8,38%	-1,68%	-3,89%	-2,21%	-4,44%	-9,30%	-6,04%	-1,55%	-0,77%	-2,13%	-11,41%	-6,13%
7	LGS_U_Ist	0,0002	-0,0024	-0,0135	-0,0265	-0,0766	0,3155	0,3151	0,3162	0,2939	0,2524	0,4565	0,4590	0,4687	0,4427	0,3982	0,6186	0,6061	0,6198	0,5980	0,5259	0,9378	0,9382	0,9471	0,9250	0,8309
7	LGS_S_Ist	0,0434	0,0248	0,0609	-0,0436	0,1372	0,3938	0,3868	0,3680	0,4011	0,3840	0,5060	0,5200	0,5339	0,5057	0,6198	0,6509	0,6774	0,7862	0,6169	0,7877	0,9688	1,0220	1,0470	1,0101	0,9182
7	KUB_U_Ist	0,0002	-0,0024	-0,0136	-0,0265	-0,0755	0,3184	0,3178	0,3182	0,2948	0,2501	0,4611	0,4633	0,4722	0,4447	0,3946	0,6257	0,6126	0,6253	0,6015	0,5219	0,9520	0,9521	0,9593	0,9338	0,8274
7	LGS_U_Delta	0,02%	-0,24%	-1,35%	-2,65%	-7,66%	-1,78%	-1,82%	-1,72%	-3,95%	-8,10%	-4,35%	-4,10%	-3,13%	-5,73%	-10,18%	-4,81%	-6,06%	-4,69%	-6,87%	-14,08%	-6,22%	-6,18%	-5,29%	-7,50%	-16,91%
7	LGS_S_Delta	4,34%	2,48%	6,09%	-4,36%	13,72%	6,04%	5,35%	3,46%	6,78%	5,07%	0,60%	2,00%	3,39%	0,57%	11,98%	-1,57%	1,07%	11,95%	-4,98%	12,10%	-3,12%	2,20%	4,70%	1,01%	-8,18%
7	KUB_U_Delta	0,02%	-0,24%	-1,36%	-2,65%	-7,55%	-1,50%	-1,55%	-1,52%	-3,86%	-8,32%	-3,89%	-3,67%	-2,78%	-5,53%	-10,54%	-4,10%	-5,41%	-4,13%	-6,52%	-14,48%	-4,80%	-4,80%	-4,07%	-6,62%	-17,27%

Tabelle A6.6 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $R_F \notin [-5\Omega; \infty]$;
 Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U_Ist	0,06	7,31	46,34	114,83	569,17	-0,29	7,45	46,02	114,70	568,76	-0,13	7,48	46,02	114,85	568,81	-0,14	7,50	49,41	114,94	569,11	-0,35	7,46	45,84	115,08	568,69
1	LGS_S_Ist	0,04	7,30	46,33	114,81	569,14	-0,31	7,42	46,01	114,68	568,73	-0,15	7,46	46,00	114,83	568,78	-0,16	7,48	48,36	114,93	569,08	-0,38	7,44	45,83	115,07	568,66
1	KUB_U_Ist	0,06	7,31	46,35	114,82	568,53	-0,33	7,41	46,01	114,70	568,30	-0,20	7,42	46,00	114,85	568,43	-0,23	7,43	47,04	114,96	568,81	-0,48	7,35	45,79	115,11	568,58
1	LGS_U_Delta	0,06	0,03	0,89	1,19	9,17	-0,29	0,17	0,56	1,06	8,76	-0,13	0,21	0,56	1,21	8,81	-0,14	0,23	3,96	1,31	9,11	-0,35	0,19	0,38	1,45	8,69
1	LGS_S_Delta	0,04	0,02	0,87	1,17	9,14	-0,31	0,15	0,55	1,04	8,73	-0,15	0,18	0,55	1,19	8,78	-0,16	0,20	2,90	1,29	9,08	-0,38	0,16	0,37	1,43	8,66
1	KUB_U_Delta	0,06	0,04	0,90	1,18	8,53	-0,33	0,14	0,55	1,06	8,30	-0,20	0,15	0,54	1,22	8,43	-0,23	0,15	1,59	1,32	8,81	-0,48	0,08	0,34	1,47	8,58
5	LGS_U_Ist	-0,02	7,03	44,59	110,80	544,15	2,05	9,14	45,38	110,20	541,95	3,26	10,26	46,16	110,89	541,36	4,11	11,19	47,50	111,52	543,24	5,56	12,25	48,83	112,39	544,38
5	LGS_S_Ist	-2,14	6,25	43,73	109,71	544,92	2,07	9,26	45,18	109,07	541,93	3,15	10,36	45,79	108,84	544,06	4,02	11,12	46,28	109,93	541,07	5,58	11,88	48,51	110,21	540,96
5	KUB_U_Ist	-0,02	7,03	44,57	110,73	543,80	2,03	9,15	45,51	110,50	543,40	3,25	10,29	46,36	111,34	544,02	4,11	11,24	47,79	112,16	546,61	5,60	12,36	49,32	113,42	549,66
5	LGS_U_Delta	-0,02	-0,24	-0,87	-2,83	-15,85	2,05	1,87	-0,07	-3,43	-18,05	3,26	2,99	0,70	-2,75	-18,64	4,11	3,92	2,05	-2,12	-16,76	5,56	4,98	3,37	-1,25	-15,62
5	LGS_S_Delta	-2,14	-1,02	-1,72	-3,93	-15,08	2,07	1,99	-0,27	-4,56	-18,07	3,15	3,08	0,33	-4,80	-15,94	4,02	3,85	0,83	-3,71	-18,93	5,58	4,60	3,06	-3,43	-19,04
5	KUB_U_Delta	-0,02	-0,24	-0,88	-2,91	-16,20	2,03	1,88	0,06	-3,14	-16,60	3,25	3,01	0,91	-2,29	-15,98	4,11	3,97	2,34	-1,47	-13,39	5,60	5,09	3,86	-0,21	-10,34
7	LGS_U_Ist	0,08	7,03	44,53	110,32	545,86	1,87	8,92	46,17	113,03	542,29	2,34	9,91	47,27	114,04	543,61	2,07	10,83	47,07	116,24	540,18	5,36	12,68	50,61	119,29	545,98
7	LGS_S_Ist	-0,43	6,71	43,61	110,54	541,48	1,05	8,15	45,60	111,76	539,79	1,84	9,29	46,58	113,29	540,02	1,76	10,14	47,06	116,03	535,86	5,07	11,90	49,67	118,40	544,75
7	KUB_U_Ist	0,08	7,02	44,50	110,23	544,88	1,86	8,95	46,43	113,65	544,88	2,34	9,99	47,70	115,02	547,83	2,09	10,96	50,01	117,60	545,71	5,48	12,94	51,60	121,52	554,95
7	LGS_U_Delta	0,08	-0,25	-0,93	-3,32	-14,14	1,87	1,64	0,71	-0,61	-17,71	2,34	2,64	1,82	0,40	-16,39	2,07	3,56	1,62	2,60	-19,82	5,36	5,41	5,15	5,65	-14,02
7	LGS_S_Delta	-0,43	-0,57	-1,84	-3,10	-18,52	1,05	0,88	0,14	-1,88	-20,21	1,84	2,02	1,13	-0,35	-19,98	1,76	2,87	1,61	2,39	-24,14	5,07	4,63	4,21	4,76	-15,25
7	KUB_U_Delta	0,08	-0,25	-0,95	-3,41	-15,12	1,86	1,68	0,98	0,02	-15,12	2,34	2,71	2,24	1,38	-12,17	2,09	3,68	4,56	3,96	-14,29	5,48	5,66	6,15	7,89	-5,05

Tabelle A6.7 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 $(Z, \Delta Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	
k	Sollwert Z	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8	681,8
1	LGS U Ist	664,01	664,15	664,67	665,79	666,84	655,96	664,64	664,37	665,86	667,04	663,19	664,08	664,99	665,65	666,89	662,86	663,85	668,72	665,19	667,60	663,70	663,81	664,58	665,99	666,76	
1	LGS S Ist	653,01	652,85	653,90	657,13	670,69	631,35	639,85	653,67	657,09	670,85	638,55	641,41	654,16	657,29	671,26	639,76	641,17	651,89	657,03	671,44	637,69	637,94	654,08	657,46	670,99	
1	KUB U Ist	669,49	657,29	665,61	684,85	697,65	656,24	664,91	661,73	684,66	697,03	663,46	664,35	668,12	685,15	697,79	663,14	664,12	679,36	685,18	696,49	663,97	664,08	663,47	686,58	695,54	
1	LGS U Delta	-17,81	-17,67	-17,15	-16,03	-14,98	-25,85	-17,18	-17,45	-15,96	-14,78	-18,63	-17,74	-16,83	-16,17	-14,93	-18,95	-17,97	-13,10	-16,63	-14,22	-18,12	-18,01	-17,24	-15,83	-15,06	
1	LGS S Delta	-28,81	-28,96	-27,92	-24,68	-11,13	-50,47	-41,97	-28,15	-24,72	-10,97	-43,26	-40,40	-27,66	-24,53	-10,56	-42,06	-40,65	-29,93	-24,78	-10,38	-44,13	-43,87	-27,73	-24,36	-10,83	
1	KUB U Delta	-12,33	-24,53	-16,20	3,04	15,83	-25,58	-16,91	-20,09	2,84	15,21	-18,35	-17,47	-13,70	3,33	15,97	-18,68	-17,69	-2,46	3,37	14,67	-17,85	-17,73	-18,35	4,76	13,72	
5	LGS U Ist	614,88	628,26	611,00	633,89	654,59	598,19	590,24	628,49	658,18	658,41	592,96	584,28	610,39	654,57	658,98	586,30	594,46	622,49	646,08	658,04	595,78	618,56	628,21	653,13	658,59	
5	LGS S Ist	607,21	622,39	611,34	634,22	657,64	600,43	599,02	626,83	653,07	660,90	596,38	594,81	618,25	648,18	663,91	591,24	602,61	616,73	646,50	661,40	609,12	628,81	634,82	648,64	661,94	
5	KUB U Ist	823,26	719,12	570,82	553,70	680,14	649,46	609,54	564,37	649,48	613,99	447,03	471,11	568,64	673,70	661,35	459,92	428,61	586,87	570,50	621,11	426,47	467,22	570,40	672,35	585,00	
5	LGS U Delta	-66,94	-53,56	-70,81	-47,93	-27,23	-83,63	-91,58	-53,33	-23,64	-23,41	-88,85	-97,54	-71,43	-27,25	-22,84	-95,51	-87,36	-59,33	-35,74	-23,78	-86,03	-63,26	-53,61	-28,69	-23,23	
5	LGS S Delta	-74,61	-59,43	-70,48	-47,59	-24,18	-81,39	-82,80	-54,99	-28,75	-20,91	-85,44	-87,01	-63,57	-33,64	-17,91	-90,57	-79,21	-65,09	-35,32	-20,42	-72,70	-53,01	-46,99	-33,17	-19,88	
5	KUB U Delta	141,44	37,30	-111,00	-128,11	-1,68	-32,36	-72,28	-117,45	-32,34	-67,83	-234,79	-210,71	-113,18	-8,12	-20,47	-221,90	-253,20	-94,95	-111,32	-60,71	-255,35	-214,60	-111,42	-9,47	-96,82	
7	LGS U Ist	669,55	673,11	694,18	671,29	664,52	717,07	702,51	679,84	678,02	670,07	695,20	695,60	697,31	668,41	661,34	685,05	695,33	681,67	672,90	671,16	696,75	705,81	675,52	666,43	669,16	
7	LGS S Ist	650,88	647,98	669,02	657,88	658,78	705,70	673,10	666,88	666,77	664,57	701,33	631,24	679,59	666,20	659,76	720,49	695,57	666,31	672,20	670,88	693,60	712,44	681,26	678,80	667,96	
7	KUB U Ist	500,03	486,19	797,64	788,39	760,85	1.202,95	989,16	863,70	850,52	737,16	1.175,13	1.000,57	810,81	724,22	762,33	875,26	960,84	722,86	743,44	748,66	930,11	943,60	842,70	725,65	737,22	
7	LGS U Delta	-12,27	-8,70	12,36	-10,53	-17,29	35,25	20,69	-1,98	-3,80	-11,75	13,38	13,78	15,49	-13,41	-20,47	3,23	13,51	-0,15	-8,92	-10,66	14,93	24,00	-6,29	-15,39	-12,65	
7	LGS S Delta	-30,94	-33,84	-12,80	-23,94	-23,03	23,89	-8,72	-14,94	-15,05	-17,25	19,52	-50,58	-2,23	-15,62	-22,05	38,67	13,75	-15,51	-9,62	-10,94	11,78	30,62	-0,55	-3,02	-13,86	
7	KUB U Delta	-181,79	-195,63	115,82	106,57	79,03	521,13	307,35	181,88	168,70	55,35	493,31	318,75	129,00	42,40	80,51	193,44	279,02	41,04	61,62	66,84	248,29	261,78	160,88	43,84	55,40	

Tabelle A6.8 Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 $(\varphi_Z, \Delta\varphi_Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
k	Sollwert φ°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	LGS U Ist	0,28	0,42	0,47	0,39	0,09	0,41	0,45	0,47	0,39	0,12	0,42	0,44	0,44	0,40	0,08	0,39	0,43	0,64	0,39	0,09	0,47	0,44	0,44	0,38	0,08
1	LGS S Ist	0,50	0,60	0,89	1,20	1,02	0,67	0,73	0,89	1,18	1,03	0,48	0,76	0,89	1,22	1,01	0,52	0,74	0,73	1,20	1,05	0,65	0,80	0,88	1,22	1,02
1	KUB U Ist	0,76	2,85	3,47	3,08	-0,37	0,79	0,83	3,31	3,20	-0,41	0,81	0,83	3,39	2,74	-1,10	0,77	0,82	0,83	3,23	-0,88	0,85	0,83	3,35	2,66	-0,41
1	LGS U Delta	0,28	0,42	0,47	0,39	0,09	0,41	0,45	0,47	0,39	0,12	0,42	0,44	0,44	0,40	0,08	0,39	0,43	0,64	0,39	0,09	0,47	0,44	0,44	0,38	0,08
1	LGS S Delta	0,50	0,60	0,89	1,20	1,02	0,67	0,73	0,89	1,18	1,03	0,48	0,76	0,89	1,22	1,01	0,52	0,74	0,73	1,20	1,05	0,65	0,80	0,88	1,22	1,02
1	KUB U Delta	0,76	2,85	3,47	3,08	-0,37	0,79	0,83	3,31	3,20	-0,41	0,81	0,83	3,39	2,74	-1,10	0,77	0,82	0,83	3,23	-0,88	0,85	0,83	3,35	2,66	-0,41
5	LGS U Ist	-3,12	-2,69	0,01	0,55	-1,36	-4,01	-2,43	2,46	0,23	-0,73	-4,98	-0,97	0,61	0,25	-0,66	-1,02	0,73	0,11	1,13	-2,12	1,31	1,77	0,53	-0,73	-1,78
5	LGS S Ist	-3,50	-1,68	0,49	0,81	-1,32	-2,23	-0,33	2,43	0,20	-0,66	-2,84	0,71	1,32	0,40	-0,76	0,42	1,91	0,44	1,49	-1,83	2,61	2,87	0,92	-0,37	-1,37
5	KUB U Ist	-12,26	-24,28	-7,70	4,71	5,47	-27,51	-19,63	4,22	-3,24	7,01	-24,79	-18,69	-5,01	4,51	0,01	-13,76	-8,76	5,16	2,47	6,58	-4,11	-3,31	-2,20	3,92	4,69
5	LGS U Delta	-3,12	-2,69	0,01	0,55	-1,36	-4,01	-2,43	2,46	0,23	-0,73	-4,98	-0,97	0,61	0,25	-0,66	-1,02	0,73	0,11	1,13	-2,12	1,31	1,77	0,53	-0,73	-1,78
5	LGS S Delta	-3,50	-1,68	0,49	0,81	-1,32	-2,23	-0,33	2,43	0,20	-0,66	-2,84	0,71	1,32	0,40	-0,76	0,42	1,91	0,44	1,49	-1,83	2,61	2,87	0,92	-0,37	-1,37
5	KUB U Delta	-12,26	-24,28	-7,70	4,71	5,47	-27,51	-19,63	4,22	-3,24	7,01	-24,79	-18,69	-5,01	4,51	0,01	-13,76	-8,76	5,16	2,47	6,58	-4,11	-3,31	-2,20	3,92	4,69
7	LGS U Ist	-2,10	1,01	-2,81	-1,00	-2,58	-0,33	-1,56	-1,29	-2,87	-2,32	-2,26	-2,53	-2,44	-2,63	-2,47	-0,63	-2,53	-3,45	-1,67	-2,33	-2,48	-2,70	-2,98	-2,84	-2,24
7	LGS S Ist	-3,42	-0,82	-2,56	-0,71	-1,96	-2,88	-3,47	-0,71	-2,09	-1,76	-4,34	-5,08	-1,46	-2,32	-1,95	-0,46	3,93	-2,09	-1,57	-1,75	-2,70	-1,81	-3,35	-3,51	-1,98
7	KUB U Ist	5,58	21,42	6,53	10,56	1,45	51,59	20,74	8,22	-0,68	-4,57	23,58	16,45	2,49	0,37	2,11	12,85	0,97	3,59	2,85	3,15	6,03	7,76	-2,75	2,56	-3,82
7	LGS U Delta	-2,10	1,01	-2,81	-1,00	-2,58	-0,33	-1,56	-1,29	-2,87	-2,32	-2,26	-2,53	-2,44	-2,63	-2,47	-0,63	-2,53	-3,45	-1,67	-2,33	-2,48	-2,70	-2,98	-2,84	-2,24
7	LGS S Delta	-3,42	-0,82	-2,56	-0,71	-1,96	-2,88	-3,47	-0,71	-2,09	-1,76	-4,34	-5,08	-1,46	-2,32	-1,95	-0,46	3,93	-2,09	-1,57	-1,75	-2,70	-1,81			

Tabelle A6.9 Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; $\alpha = 0,5$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$; Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

Injektion	p=2					p=36				
Sollwert α	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS_U Ist	0,6551	0,6232	0,3747	-0,0844	-2,9445	0,5358	0,5284	0,4232	0,2713	-1,2736
1 LGS_S Ist	274,5517	258,9241	220,8941	250,5372	219,1179	-65,3388	-64,9950	-40,9549	-50,3385	-132,9981
1 KUB_U Ist	0,7182	0,6822	0,4097	-0,0914	-3,1223	0,5392	0,5317	0,4250	0,2715	-1,2455
1 LGS_U Delta	15,51%	12,32%	-12,53%	-58,44%	-344,45%	3,57%	2,84%	-7,68%	-22,87%	-177,36%
1 LGS_S Delta	27405,17%	25842,41%	22039,41%	25003,72%	21861,79%	-6583,88%	-6549,50%	-4145,49%	-5083,85%	-13349,81%
1 KUB_U Delta	21,82%	18,22%	-9,03%	-59,14%	-362,23%	3,92%	3,17%	-7,50%	-22,85%	-174,55%
5 LGS_U Ist	0,5982	0,6544	0,6049	0,5513	0,2632	0,4751	0,4886	0,5027	0,4034	0,4143
5 LGS_S Ist	-21,7077	-14,9036	-21,1834	-7,2777	-10,1912	0,0511	0,5032	2,1466	4,6682	18,9641
5 KUB_U Ist	0,6483	0,7102	0,6540	0,5936	0,2790	0,4790	0,4924	0,5058	0,4043	0,4069
5 LGS_U Delta	9,82%	15,44%	10,49%	5,13%	-23,68%	-2,49%	-1,15%	0,27%	-9,66%	-8,57%
5 LGS_S Delta	-2220,77%	-1540,36%	-2168,34%	-777,77%	-1069,12%	-44,89%	0,32%	164,66%	416,82%	1846,41%
5 KUB_U Delta	14,83%	21,02%	15,40%	9,36%	-22,10%	-2,11%	-0,76%	0,58%	-9,57%	-9,31%
7 LGS_U Ist	0,5491	0,5360	0,5451	0,5345	0,5042	0,4649	0,4607	0,4606	0,4398	0,3426
7 LGS_S Ist	-9,0291	7,0989	-0,9171	0,7094	11,2857	1,1652	0,5201	5,2068	4,2888	6,6709
7 KUB_U Ist	0,5991	0,5818	0,5923	0,5788	0,5355	0,4696	0,4651	0,4641	0,4414	0,3359
7 LGS_U Delta	4,91%	3,60%	4,51%	3,45%	0,42%	-3,51%	-3,93%	-3,94%	-6,02%	-15,74%
7 LGS_S Delta	-952,91%	659,89%	-141,71%	20,94%	1078,57%	66,52%	2,01%	470,68%	378,88%	617,09%
7 KUB_U Delta	9,91%	8,18%	9,23%	7,88%	3,55%	-3,04%	-3,49%	-3,59%	-5,86%	-16,41%

Tabelle A6.10 Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; $\alpha = 0,5$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift verlassen den erweiterten Wertebereich $R_F \notin [-5\Omega; \infty]$; Wertebereichsverletzungen von LGS_S sind nicht dargestellt

Injektion	p=2					p=36				
Istwert α	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
k Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS_U Ist	-0,28	6,50	42,76	108,16	533,55	-0,11	6,95	45,91	113,63	561,56
1 LGS_S Ist	-2064,91	-1911,84	-1610,83	-1771,96	-1130,72	605,47	609,46	424,16	577,23	1.781,86
1 KUB_U Ist	-0,79	6,04	42,48	108,20	534,21	-0,15	6,92	45,90	113,64	561,03
1 LGS_U Delta	-0,28	-0,77	-2,70	-5,48	-26,45	-0,11	-0,33	0,46	0,00	1,56
1 LGS_S Delta	-2064,91	-1919,11	-1656,28	-1885,60	-1690,72	605,47	602,19	378,71	463,59	1.221,86
1 KUB_U Delta	-0,79	-1,24	-2,97	-5,43	-25,79	-0,15	-0,36	0,45	0,01	1,03
5 LGS_U Ist	2,60	9,04	46,65	113,20	534,06	3,08	10,01	46,70	112,78	541,66
5 LGS_S Ist	167,91	124,00	222,52	164,01	598,07	6,92	9,88	31,89	73,14	401,26
5 KUB_U Ist	2,26	8,69	46,53	113,54	534,78	3,08	10,04	46,92	113,23	543,86
5 LGS_U Delta	2,60	1,77	1,19	-0,43	-25,94	3,08	2,74	1,24	-0,85	-18,34
5 LGS_S Delta	167,91	116,73	177,07	50,37	38,07	6,92	2,60	-13,57	-40,50	-158,74
5 KUB_U Delta	2,26	1,42	1,07	-0,10	-25,22	3,08	2,77	1,47	-0,41	-16,14
7 LGS_U Ist	6,18	12,14	48,48	114,51	545,76	0,54	9,59	47,69	113,14	538,70
7 LGS_S Ist	75,08	-38,55	59,99	113,15	492,84	-65,34	9,07	6,80	79,44	498,05
7 KUB_U Ist	5,89	11,95	48,65	115,36	550,67	0,54	9,67	48,10	114,10	542,19
7 LGS_U Delta	6,18	4,87	3,03	0,87	-14,24	0,54	2,32	2,23	-0,49	-21,30
7 LGS_S Delta	75,08	-45,83	14,54	-0,49	-67,16	-65,34	1,80	-38,65	-34,20	-61,95
7 KUB_U Delta	5,89	4,68	3,20	1,72	-9,33	0,54	2,39	2,65	0,47	-17,81

Tabelle A6.11 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; Abgang erdschlussfrei; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $\alpha \in [-0,2; 1,2]$

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-0,1103	-0,0567	0,1990	0,6206	3,2134	-0,1439	-0,0988	0,1418	0,5673	3,2044	-0,1748	-0,1356	0,0964	0,5012	3,1301	-0,1976	-0,1717	0,0632	0,4789	3,0834	-0,2756	-0,2276	0,0027	0,4076	3,0230
1 KUB U Ist	-0,1086	-0,0560	0,1953	0,6103	3,1856	-0,1417	-0,0975	0,1389	0,5576	3,1770	-0,1723	-0,1338	0,0941	0,4924	3,1033	-0,1947	-0,1693	0,0613	0,4704	3,0566	-0,2716	-0,2245	0,0017	0,4001	2,9972
5 LGS U Ist	-0,0396	0,3183	0,1654	3,1530	8,0543	-12,6670	-1,4355	-0,1933	4,3505	9,0162	-0,7843	0,1202	-1,0390	4,1660	18,8785	-1,7224	-15,2712	-7,3725	8,7853	13,6478	-10,1377	-37,4139	6,9711	-3,8494	13,3466
5 KUB U Ist	-0,0198	0,3376	0,2967	2,5160	4,0392	-56,7891	-0,5257	0,1439	-21,6800	4,9285	-0,3946	0,2987	-0,0147	-1,9276	-4,8562	-0,6609	-1,5283	-1,1339	-0,5646	7,0535	-2,0493	-1,3793	-6,7325	-0,0696	-6,2292
7 LGS U Ist	1,5672	-0,0134	-0,1771	-0,8738	-2,9652	36,6593	7,9942	5,8769	3,0422	-1,3074	7,8504	21,5076	8,8386	3,3647	-1,1131	13,0765	14,7005	9,4120	5,0589	0,0030	42,5141	21,8071	12,4675	5,5543	0,8504
7 KUB U Ist	-0,1905	0,0143	0,4098	-78,7925	-44,1883	-27,0625	-4,4005	-2,6053	-5,5790	-43,9126	-4,8361	-3,1820	-4,5276	-3,8515	-43,3646	-4,4411	-4,5132	-4,4061	-3,2318	-0,4493	-4,6011	-4,7171	-3,8973	-4,5550	0,9013

Tabelle A6.12 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; Abgang erdschlussfrei; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	56,20	123,39	509,88	1.204,57	5.557,07	119,35	194,53	587,69	1.282,91	5.598,95	158,15	233,95	631,29	1.338,49	5.676,66	192,26	276,47	672,73	1.371,41	5.689,66	276,12	349,92	745,01	1.455,18	5.810,33
1 KUB U Ist	55,45	122,95	511,06	1.209,13	5.599,87	118,33	193,76	588,44	1.287,01	5.641,53	156,90	232,92	631,69	1.342,08	5.718,63	190,84	275,14	672,86	1.374,84	5.731,09	274,09	348,16	744,65	1.457,99	5.851,26
5 LGS U Ist	-320,65	648,11	-6.235,67	-680,34	-80.825,12	-42,145,07	-7.473,70	-5.818,03	2.617,76	-61.490,86	-4,052,47	-4.736,93	-13.162,74	9.565,33	-128.985,67	-8.553,39	-62.439,32	-33.697,93	39.321,98	-47.101,69	-33.133,80	-191.324,74	14.179,48	-39.274,71	-58.290,13
5 KUB U Ist	-317,75	1.081,30	-6.795,37	-2.867,74	-36.405,39	3.749,35	-6.583,69	-5.580,19	11.061,34	-27.247,38	-3.973,76	-4.857,41	-12.064,88	41.956,59	-42.289,36	-8.611,74	-50.399,53	-28.198,52	-129.619,46	-19.280,97	-48.121,79	1.317.420,58	21.292,25	-30.924,89	40.667,23
7 LGS U Ist	1.514,04	-239,05	-1.558,99	-3.997,56	-21.311,84	31.114,98	6.578,91	3.693,35	-937,10	-18.424,47	6.638,98	18.693,83	6.207,87	-803,47	-19.415,49	11.105,41	9.717,92	6.432,26	749,41	-17.483,21	29.980,46	14.911,21	8.604,02	695,27	-18.340,40
7 KUB U Ist	-255,78	-241,37	-1.055,15	-5.170,92	-1.256,83	2.019,66	-104.285,62	-8.384,17	41.714,36	-1.224,97	84.602,45	-10.843,93	-65.788,71	-24.388,62	-1.063,42	-130.692,32	-41.762,93	-86.094,64	-25.670,86	-22.254,29	-88.988,16	224.513,15	-61.978,55	212.024,26	-18.010,32

Tabelle A6.13 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; Abgang erdschlussfrei; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $\alpha \in [-0,2; 1,2]$

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-0,0422	0,5997	3,8781	9,9669	11,9198	-0,7057	-0,0999	3,2257	9,8550	10,7716	-1,0593	-0,4699	2,1531	8,2392	12,0021	-1,3817	-0,8341	2,6696	8,9351	7,4367	-2,1632	-1,3868	1,6148	7,0186	10,3489
1 KUB U Ist	-0,0416	0,5898	3,8549	10,1345	11,4474	-0,6969	-0,1016	3,2088	10,0508	10,2996	-1,0461	-0,4677	2,1369	8,4150	11,5653	-1,3653	-0,8284	2,6565	9,1323	7,0816	-2,1398	-1,3785	1,6020	7,1980	9,9218
5 LGS U Ist	0,2889	0,7118	-17,2721	7,1913	188,5094	22,1346	13,3695	12,5270	118,5596	-3,202,0825	26,3924	18,5755	12,7667	34,1615	235,4288	28,7502	22,1705	17,7918	42,9284	1,043,1568	37,0005	28,8667	21,9270	-17,4522	36,2128
5 KUB U Ist	0,1264	3,3280	-92,1621	-86,6296	-82,0207	-6,6623	-8,2464	-7,2665	-6,7963	-81,8960	-7,4831	-7,9447	-9,3968	-6,1747	-83,1748	-8,2013	-8,8359	-10,0071	-6,5856	-82,6309	-9,5070	-10,6803	-11,1915	-2,0628	-82,8614
7 LGS U Ist	-1,6830	0,0783	0,0294	-3,4739	26,8459	25,8158	14,8316	5,9690	1,1092	-131,1619	26,8259	15,6878	4,5501	-0,8888	21,7866	33,1362	28,0992	0,7522	-9,5095	-14,8961	43,9098	-8,8957	-0,5072	27,6299	10,4156
7 KUB U Ist	0,4694	0,1008	-0,0034	-42,5550	-41,0518	-4,4159	-3,9937	-4,2928	1,1135	-2,6592	-4,3541	-3,7130	-2,1080	-41,6063	-41,7912	-3,2245	-2,7194	0,7901	-41,6896	-41,8754	-2,6835	-1,0769	-40,1633	-4,5696	6,8683

Tabelle A6.14 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; Abgang erdschlussfrei; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	116,00	1.232,03	6.748,12	14.686,27	76.774,28	1.074,44	2.164,59	7.672,72	15.286,88	76.613,86	1.529,43	2.670,41	8.584,63	16.694,72	76.662,37	1.973,74	3.124,32	8.595,24	16.389,15	83.657,50	2.903,64	3.997,96	9.730,74	18.502,56	79.748,72
1 KUB U Ist	115,66	1.236,42	6.804,37	14.844,57	79.133,52	1.068,32	2.162,64	7.721,32	15.433,59	78.760,98	1.519,60	2.664,39	8.619,17	16.824,51	78.979,79	1.960,04	3.113,83	8.637,49	16.523,56	85.256,71	2.879,63	3.979,82	9.757,32	18.610,78	81.862,40
5 LGS U Ist	122,24	-5.527,47	-138.397,30	121.854,64	4.994.701,95	21.219,04	6.042,74	-39.387,71	-949.066,13	-54.679.744,76	11.101,34	1.200,33	-29.727,06	-339.750,94	3.274.743,02	1.395,84	-3.025,47	-35.116,01	-383.014,53	16.923.659,34	-20.853,62	-18.016,93	-43.321,62	477.199,09	343.643,39
5 KUB U Ist	-248,36	-67,02	-3.380,48	-5.381,29	-16.765,78	52.826,38	42.120,21	67.622,66	78.769,88	-17.389,40	85.796,56	62.224,43	78.600,93	109.826,30	-17.336,24	74.201,75	83.025,48	61.098,19	105.161,55	-19.904,45	86.938,32	82.045,97	71.878,76	166.350,22	-17.287,74
7 LGS U Ist	-1.755,23	-3.131,70	-16.370,12	-60.794,71	681.303,87	1.944,42	-2.499,68	-31.120,60	-57.582,86	10.538.045,75	-11.212,65	-14.765,20	-52.724,13	-65.519,99	340.710,22	-53.333,87	-73.097,39	-85.142,58	-156.219,88	-342.047,40	-236.727,22	86.699,73	-57.666,00	-456.743,11	-222.916,83
7 KUB U Ist	247,55	-3.472,53	-18.244,70	-2.264,66	-9.449,03	134.219,92	235.978,53	125.206,71	-55.138,04	464.257,87	136.249,33	344.094,48	-546.601,53	-2.892,24	-15.658,14	166.719,16	129.148,09	-84.178,64	-3.253,13	-24.242,86	240.544,70	59.718,44	-2.499,04	125.742,90	-233.585,30

Tabelle A6.15 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$;
 Abgang erdschlussfrei; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $\alpha \in [-0,2; 1,2]$

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	0,0670	-0,4653	-3,3994	-7,6748	-32,0064	0,7781	0,2309	-2,4139	-7,3978	-31,4187	1,1049	0,5550	-2,1967	-6,3645	-31,1878	1,3768	0,9078	-1,6899	-6,2665	-31,5700	2,0998	1,7171	-1,1004	-5,5934	-30,2846
1 KUB U Ist	0,0832	-0,5778	-4,2166	-9,2020	-34,1232	0,9833	0,2913	-2,9416	-9,0017	-33,4908	1,3917	0,6925	-2,6724	-7,5864	-33,2194	1,7073	1,1364	-2,0483	-7,4598	-33,6682	2,5941	2,1483	-1,3447	-6,6584	-32,2050
5 LGS U Ist	0,1508	0,4124	2,0715	0,0640	53,8329	3,4188	3,3238	5,8673	13,9745	61,0386	6,4203	4,1266	7,4923	4,7322	105,8913	8,0145	8,9069	10,6242	14,0896	51,6613	12,4859	10,8573	12,5774	17,7232	115,1081
5 KUB U Ist	0,3533	1,1159	2,8021	-0,5568	-13,2874	-3,4842	-4,0608	-5,3268	-8,5350	-13,0547	-3,8706	-3,7871	-4,5740	-3,3826	-13,9028	-3,6849	-2,6297	-3,7877	-6,9347	-7,5742	-4,5750	-4,7290	-4,4202	-4,4106	-10,5992
7 LGS U Ist	-0,0070	-0,0441	-0,5277	0,8429	-10,5532	3,1046	2,3241	2,2354	-1,4538	-8,8261	5,4212	3,4286	3,9515	7,1858	-6,8697	7,0583	6,4616	8,8545	3,0978	-13,5014	8,8426	7,7293	11,3072	9,7762	-10,1560
7 KUB U Ist	-0,0177	-0,1961	-39,6597	1,2115	-42,4331	-4,9952	-4,5501	-4,1307	6,9892	-41,5193	-4,7120	-4,5623	-4,2736	-5,0315	-42,0768	-4,2390	-4,4677	-5,0161	-1,9873	-40,7430	-4,8619	-4,7953	-4,5034	-4,5145	-42,0184

Tabelle A6.16 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$;
 Abgang erdschlussfrei; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	8,51	77,22	457,60	1.175,53	6.039,68	88,02	159,34	546,55	1.230,80	6.085,67	129,99	197,54	582,95	1.292,57	6.099,03	165,15	239,21	626,50	1.327,43	6.022,05	254,50	323,14	706,09	1.403,45	6.106,23
1 KUB U Ist	9,18	72,17	421,70	1.092,68	5.586,72	96,25	161,56	521,74	1.147,03	5.637,09	142,29	202,90	561,19	1.224,44	5.650,75	178,50	248,33	608,97	1.257,52	5.565,48	276,74	341,12	693,78	1.340,22	5.664,53
5 LGS U Ist	-104,64	-651,83	-4.815,59	-6.922,54	-64.085,99	-1.677,83	-1.785,22	-4.750,45	-10.786,97	-60.440,12	-2.759,67	-2.269,92	-5.039,49	-13.404,78	-82.955,33	-2.884,72	-4.099,83	-10.182,54	-11.971,52	-107.594,22	-4.744,53	-4.576,69	-8.551,32	-15.853,22	-122.028,58
5 KUB U Ist	-176,21	-718,06	-3.494,26	-8.476,49	-64.287,33	11.885,33	14.382,85	14.006,37	7.257,58	15.340,68	14.209,60	32.889,94	18.867,63	111.311,49	13.096,97	43.128,34	17.596,55	19.707,06	11.459,28	29.575,02	27.147,08	418.627,51	25.875,91	31.357,26	19.094,04
7 LGS U Ist	-27,18	-234,14	-1.344,47	-4.983,69	-16.849,86	-404,90	-660,69	-2.015,83	-4.071,84	-17.682,45	-818,73	-764,96	-2.298,02	-5.107,59	-17.076,00	-1.039,87	-1.260,30	-2.782,14	-4.791,14	-14.088,51	-2.172,49	-1.660,47	-3.275,51	-5.410,89	-19.435,89
7 KUB U Ist	-30,06	-267,62	-52,27	-4.590,28	-133,36	-10.144,71	-18.113,53	-14.387,19	-2.720,07	-118,05	-15.907,81	-21.354,33	-215.622,19	24.445,68	-77,27	-14.483,51	-5.171,54	33.764,73	-9.841,25	-127,59	-27.336,21	47.824,53	-66.210,73	-28.346,47	-161,80

Tabelle A6.17 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 Abgang erdschlussfrei; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $\alpha \in [-0,2; 1,2]$

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-0,5326	-7,7386	-33,1325	-63,8359	143,4975	8,4246	1,2047	-31,3941	-69,9050	92,0807	11,4836	6,0292	-25,6380	-47,1108	149,3352	14,1746	9,5045	-16,5597	-39,1530	178,5903	23,6385	18,2638	-8,9147	-44,4221	158,5344
1 KUB U Ist	-0,6535	-9,4150	-34,3023	-53,4272	85,6320	10,3878	1,4767	-31,7206	-57,4203	54,6892	13,8257	7,1883	-25,7955	-39,2241	94,3385	16,7685	11,0833	-16,4723	-32,3369	106,5415	27,4726	20,7381	-8,6405	-35,7625	95,5508
5 LGS U Ist	-0,3718	1,3500	774,8296	76,3917	-11,11721	71,8226	77,9109	107,0022	-116,5651	-337,4283	73,5624	93,0143	559,0038	-307,9821	-254,7296	184,3103	187,5664	-569,1242	-159,3447	-3,269,4448	219,0550	641,6645	-268,1415	-890,4175	-986,5904
5 KUB U Ist	-0,7499	2,4090	-8,7453	-88,5065	-80,0298	-5,8795	-6,5055	-7,5831	-15,2778	-88,2794	-6,4910	-7,1468	-10,2768	-8,2273	-83,6013	-8,3466	-8,1062	-12,3188	-11,7441	-91,3774	-9,8207	-10,8238	-12,8397	-15,8072	55,9489
7 LGS U Ist	-0,5587	-0,8505	-8,1346	-16,7117	476,5335	47,8668	51,4675	61,3709	-28,7457	-231,0932	141,7274	91,2054	15,7365	-55,6984	-190,2843	490,6680	253,7578	33,8242	-126,9324	-197,1270	-1,361,5202	-690,4875	32,8328	21,4583	-123,3752
7 KUB U Ist	-1,8842	-3,0057	-41,6124	-43,9384	-45,0148	-4,1429	-4,3171	-7,6687	-41,7744	18,1886	-3,7467	-3,2634	-0,2800	-42,9450	-42,9560	-3,5110	-3,4717	-0,9779	14,6958	-41,0578	-2,1382	-3,7387	0,0674	0,5533	28,1197

Tabelle A6.18 Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$;
 Abgang erdschlussfrei; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	73,68	1.171,98	7.631,54	19.875,14	99.588,38	1.102,16	2.220,78	8.290,20	20.049,41	96.385,32	1.546,28	2.640,99	8.804,59	21.078,47	97.926,77	1.939,30	3.137,19	9.488,66	21.746,84	97.712,80	3.069,90	4.124,20	10.387,97	22.296,05	97.317,48
1 KUB U Ist	68,65	1.084,42	7.107,66	18.286,26	114.165,82	1.202,36	2.235,70	7.791,78	18.405,05	105.295,48	1.674,43	2.718,15	8.375,40	19.832,69	114.125,73	2.098,62	3.261,58	9.192,60	20.695,63	116.504,27	3.400,61	4.382,18	10.220,00	21.108,07	113.832,35
5 LGS U Ist	-356,32	-7.929,59	-1.719.482,99	-129.586,97	-91.440,64	-22.576,28	-29.023,39	-93.678,99	-77.657,50	-356.762,78	-24.863,58	-37.886,12	-339.713,29	-385.530,34	-337.992,39	-45.328,34	-54.256,08	-203.328,73	-154.850,20	-1.529.800,59	-56.266,67	-179.545,47	-105.523,08	-259.859,64	-376.391,08
5 KUB U Ist	-246,47	-6.178,45	-21.679,12	-630,51	-879,81	-42.258,92	-37.651,21	87.678,74	24.700,09	-1.479,59	77.224,08	46.393,61	38.127,31	64.203,21	-2.149,46	48.781,05	59.323,90	29.957,38	38.250,76	-2.650,49	75.295,53	61.272,74	36.657,61	37.325,19	-118.914,80
7 LGS U Ist	-131,22	-2.995,56	-18.031,05	-46.804,72	264.720,29	-14.892,84	-22.373,10	-44.049,38	-59.033,93	190.262,60	-48.128,75	-36.299,88	-51.092,24	-71.650,85	-170.633,43	-138.245,25	-103.357,35	-63.712,69	-59.239,87	-242.185,28	1.279.406,84	448.354,79	-174.510,07	-606.462,28	2.508,42
7 KUB U Ist	43,35	-6.789,88	-104,17	-169,10	-1.870,47	105.014,00	158.570,93	34.662,29	-274,38	-207.837,07	108.200,82	-306.254,23	-57.320,70	-390,37	-1.280,23	143.154,28	-374.579,61	-76.977,00	-39.972,88	-1.645,15	199.025,96	347.549,97	-158.763,80	-600.284,27	-4.222.787,55

Tabelle A6.19 Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt;

$\alpha = 0,5$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k, p)$ nach Algorithmen

Injektion	p=0					p=1					p=2					p=36				
	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
k Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS_U_Ist	0,4937	0,5001	0,5005	0,5418	0,7280	0,4772	0,4852	0,4935	0,5505	0,8529	0,4602	0,4691	0,4857	0,5587	0,9881	0,5928	0,5556	0,3227	0,1197	-0,6929
1 KUB_U_Ist	0,4888	0,4951	0,4955	0,5364	0,7211	0,4724	0,4803	0,4885	0,5451	0,8453	0,4554	0,4642	0,4807	0,5530	0,9799	0,6047	0,5650	0,3258	0,1199	-0,6821
1 LGS_U_Delta	-0,63%	0,00%	0,05%	4,18%	22,80%	-2,28%	-1,49%	-0,65%	5,05%	35,29%	-3,98%	-3,09%	-1,43%	5,87%	48,81%	9,28%	5,56%	-17,73%	-38,03%	-119,29%
1 KUB_U_Delta	-1,12%	-0,49%	-0,45%	3,64%	22,11%	-2,76%	-1,98%	-1,15%	4,51%	34,53%	-4,46%	-3,58%	-1,93%	5,30%	47,99%	10,47%	6,50%	-17,42%	-38,01%	-118,21%
5 LGS_U_Ist	0,4504	0,4523	0,4630	0,4587	0,4779	0,4560	0,4697	0,4732	0,4697	0,4961	0,4684	0,4692	0,4849	0,4833	0,5143	0,4855	0,4949	0,5351	0,5933	0,5880
5 KUB_U_Ist	0,4531	0,4551	0,4657	0,4615	0,4807	0,4589	0,4726	0,4761	0,4726	0,4988	0,4714	0,4721	0,4879	0,4863	0,5170	0,4887	0,4982	0,5378	0,5959	0,5894
5 LGS_U_Delta	-4,96%	-4,77%	-3,70%	-4,13%	-2,21%	-4,40%	-3,03%	-2,68%	-3,03%	-0,39%	-3,16%	-3,08%	-1,51%	-1,67%	1,43%	-1,45%	-0,51%	3,51%	9,33%	8,80%
5 KUB_U_Delta	-4,69%	-4,49%	-3,43%	-3,85%	-1,93%	-4,11%	-2,74%	-2,40%	-2,74%	-0,12%	-2,86%	-2,79%	-1,21%	-1,37%	1,70%	-1,13%	-0,18%	3,78%	9,59%	8,94%
7 LGS_U_Ist	0,4917	0,4923	0,4885	0,4996	0,5225	0,5153	0,5172	0,5161	0,5235	0,5687	0,5413	0,5441	0,5435	0,5468	0,6199	0,4413	0,4481	0,4637	0,4490	0,4948
7 KUB_U_Ist	0,5029	0,5033	0,5007	0,5114	0,5356	0,5271	0,5293	0,5291	0,5358	0,5842	0,5540	0,5570	0,5574	0,5598	0,6374	0,4466	0,4532	0,4688	0,4517	0,5042
7 LGS_U_Delta	-0,83%	-0,77%	-1,16%	-0,04%	2,25%	1,53%	1,72%	1,61%	2,35%	6,87%	4,13%	4,41%	4,35%	4,68%	11,99%	-5,87%	-5,20%	-3,63%	-5,11%	-0,52%
7 KUB_U_Delta	0,29%	0,33%	0,07%	1,14%	3,56%	2,71%	2,93%	2,91%	3,58%	8,42%	5,40%	5,70%	5,74%	5,98%	13,74%	-5,34%	-4,68%	-3,12%	-4,83%	0,42%

Tabelle A6.20 Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt;

$\alpha = 0,5$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k, p)$ nach Algorithmen

Injektion	p=0					p=1					p=2					p=36				
	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
k Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS_U_Ist	1,28	5,67	33,76	81,29	394,29	3,55	9,02	40,79	96,36	456,22	4,41	10,55	43,36	101,22	474,08	-0,90	6,52	47,47	117,64	577,47
1 KUB_U_Ist	2,00	6,40	34,49	82,10	395,49	3,92	9,40	41,18	96,80	457,04	4,67	10,82	43,64	101,56	474,82	-1,06	6,39	47,43	117,65	577,02
1 LGS_U_Delta	1,28	-1,60	-11,70	-32,35	-165,71	3,55	1,75	-4,66	-17,28	-103,78	4,41	3,28	-2,09	-12,41	-85,92	-0,90	-0,75	2,02	4,01	17,47
1 KUB_U_Delta	2,00	-0,88	-10,96	-31,54	-164,51	3,92	2,13	-4,28	-16,83	-102,96	4,67	3,54	-1,81	-12,08	-85,18	-1,06	-0,88	1,98	4,01	17,02
5 LGS_U_Ist	221,29	226,70	264,85	319,07	776,33	111,66	114,16	155,68	215,89	667,91	75,95	89,68	121,84	184,07	636,43	4,08	11,05	53,92	134,38	615,55
5 KUB_U_Ist	220,57	226,21	265,54	319,14	779,15	111,43	114,42	156,37	216,57	671,59	75,92	89,74	122,46	184,91	640,33	4,12	11,15	54,30	135,29	618,72
5 LGS_U_Delta	221,29	219,43	219,39	205,44	216,33	111,66	106,89	110,23	102,25	107,91	75,95	82,41	76,38	70,43	76,43	4,08	3,77	8,47	20,75	55,55
5 KUB_U_Delta	220,57	218,93	220,09	205,51	219,15	111,43	107,14	110,92	102,93	111,59	75,92	82,47	77,00	71,27	80,33	4,12	3,88	8,85	21,66	58,72
7 LGS_U_Ist	50,08	55,85	87,85	166,01	641,64	28,84	37,25	68,57	139,69	605,36	22,61	29,81	63,62	134,14	607,76	3,83	10,52	46,98	108,51	526,97
7 KUB_U_Ist	53,06	58,73	91,17	170,78	653,45	30,34	39,06	70,60	142,95	617,78	23,75	31,05	65,33	137,06	620,91	3,84	10,60	47,45	109,45	533,82
7 LGS_U_Delta	50,08	48,57	42,40	52,37	81,64	28,84	29,98	23,12	26,06	45,36	22,61	22,54	18,17	20,50	47,76	3,83	3,25	1,53	-5,13	-33,03
7 KUB_U_Delta	53,06	51,45	45,72	57,14	93,45	30,34	31,78	25,14	29,32	57,78	23,75	23,78	19,87	23,43	60,91	3,84	3,33	1,99	-4,19	-26,18

Tabelle A6.21 Messreihe 5.: Bestimmung der Erdschlusentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 1$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen außerhalb des erweiterten Wertebereichs $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U_Ist	-0,0407	0,0304	0,5430	1,4809	9,3358	0,2493	0,2784	0,5477	0,9925	4,5538	0,4185	0,4603	0,7089	1,3282	5,9451	0,6064	0,6606	0,9544	1,5334	5,7697	0,9591	0,9339	1,1286	1,6768	4,9582
1	KUB_U_Ist	-0,0382	0,0285	0,5113	1,3943	8,8232	0,2345	0,2621	0,5162	0,9373	4,3084	0,3957	0,4356	0,6709	1,2575	5,6599	0,5761	0,6271	0,9055	1,4578	5,5100	0,9204	0,8882	1,0743	1,5974	4,7522
1	LGS_U_Delta	-4,07%	3,04%	54,30%	148,09%	933,58%	-8,40%	-5,50%	21,44%	65,91%	422,05%	-8,15%	-3,97%	20,89%	82,82%	544,51%	-6,03%	-0,60%	28,77%	86,67%	510,30%	-4,09%	-6,61%	12,86%	67,68%	395,82%
1	KUB_U_Delta	-3,82%	2,85%	51,13%	139,43%	882,32%	-9,88%	-7,12%	18,29%	60,39%	397,51%	-10,43%	-6,44%	17,09%	75,75%	515,99%	-9,06%	-3,96%	23,88%	79,11%	484,33%	-7,97%	-11,18%	7,43%	59,74%	375,22%
5	LGS_U_Ist	0,0146	0,0020	-0,0585	-0,1342	-0,6512	0,4494	0,3767	0,3710	0,3468	0,1024	0,6168	0,5838	0,5897	0,5498	0,1810	0,8143	0,8676	0,7498	0,6630	0,3159	1,1281	1,5189	1,2328	1,1579	0,2878
5	KUB_U_Ist	0,0159	0,0022	-0,0631	-0,1433	-0,6712	0,5026	0,4147	0,4082	0,3786	0,1096	0,6942	0,6539	0,6597	0,6050	0,1925	0,9247	0,9960	0,8417	0,7337	0,3358	1,4683	1,8303	1,4299	1,3280	0,3106
5	LGS_U_Delta	1,46%	0,20%	-5,85%	-13,42%	-65,12%	11,61%	4,33%	3,76%	1,34%	-23,09%	11,68%	8,38%	8,97%	4,98%	-31,90%	14,77%	20,09%	8,31%	-0,37%	-35,08%	12,81%	51,89%	23,28%	15,79%	-71,22%
5	KUB_U_Delta	1,59%	0,22%	-6,31%	-14,33%	-67,12%	16,92%	8,14%	7,49%	4,53%	-22,37%	19,42%	15,39%	15,97%	10,50%	-30,75%	25,80%	32,93%	17,51%	6,70%	-33,09%	46,83%	83,03%	42,99%	32,80%	-68,94%
7	LGS_U_Ist	-0,0032	-0,0089	-0,0408	-0,0831	-0,3137	0,3839	0,3883	0,3707	0,3497	0,2575	0,5908	0,5883	0,5475	0,5222	0,3769	0,8166	0,8133	0,7972	0,7277	0,6512	1,1481	1,4808	1,4394	1,3142	1,0033
7	KUB_U_Ist	-0,0035	-0,0096	-0,0439	-0,0885	-0,3221	0,4246	0,4299	0,4098	0,3839	0,2720	0,6625	0,6584	0,6086	0,5761	0,3990	0,9279	0,9217	0,9029	0,8110	0,6947	1,4267	1,7718	1,7026	1,5153	1,0789
7	LGS_U_Delta	-0,32%	-0,89%	-4,08%	-8,31%	-31,37%	5,06%	5,50%	3,74%	1,63%	-7,59%	9,08%	8,83%	4,75%	2,22%	-12,31%	14,99%	14,66%	13,06%	6,10%	-1,54%	14,81%	48,08%	43,94%	31,42%	0,33%
7	KUB_U_Delta	-0,35%	-0,96%	-4,39%	-8,85%	-32,21%	9,13%	9,65%	7,65%	5,06%	-6,13%	16,25%	15,84%	10,86%	7,61%	-10,10%	26,12%	25,50%	23,63%	14,44%	2,80%	42,67%	77,18%	70,26%	51,53%	7,89%

Tabelle A6.22 Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlusentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 1$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen außerhalb des erweiterten Wertebereichs $R_F \notin [-5\Omega; \infty]$

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U_Ist	0,63	4,81	29,33	71,81	280,35	3,20	10,82	48,31	116,45	522,11	3,89	11,94	53,93	123,42	537,87	4,30	12,73	58,10	137,85	612,76	3,53	20,46	81,42	185,15	842,22
1	KUB_U_Ist	0,58	4,84	30,07	73,86	295,44	3,59	11,25	49,16	118,00	530,95	4,52	12,64	55,03	125,53	549,01	5,20	13,74	59,59	140,29	624,10	5,27	22,07	83,38	188,20	853,31
1	LGS_U_Delta	0,63	-2,47	-16,12	-41,83	-279,65	3,20	3,55	2,86	2,81	-37,89	3,89	4,67	8,47	9,79	-22,13	4,30	5,45	12,64	24,21	52,76	3,53	13,19	35,97	71,51	282,22
1	KUB_U_Delta	0,58	-2,43	-15,39	-39,78	-264,56	3,59	3,98	3,71	4,36	-29,05	4,52	5,36	9,58	11,89	-10,99	5,20	6,47	14,13	26,65	64,10	5,27	14,80	37,93	74,56	293,31
5	LGS_U_Ist	0,04	7,36	46,14	114,64	555,29	-1,10	8,83	55,51	137,64	654,00	0,51	8,45	60,46	149,73	726,34	-0,33	8,58	68,04	172,89	817,86	-4,20	2,08	94,04	231,04	1.130,67
5	KUB_U_Ist	0,01	7,34	46,14	114,44	550,24	-2,59	7,73	54,67	137,18	653,24	-1,65	6,26	58,79	148,86	726,03	-3,73	4,66	65,64	172,00	818,55	-23,35	-9,79	88,85	228,83	1.130,73
5	LGS_U_Delta	0,04	0,09	0,69	1,01	-4,71	-1,10	1,55	10,06	24,00	94,00	0,51	1,18	15,00	36,09	166,34	-0,33	1,31	22,59	59,25	257,86	-4,20	-5,19	48,59	117,41	570,67
5	KUB_U_Delta	0,01	0,07	0,69	0,80	-9,76	-2,59	0,46	9,22	23,55	93,24	-1,65	-1,01	13,34	35,22	166,03	-3,73	-2,61	20,19	58,36	258,55	-23,35	-17,06	43,40	115,19	570,73
7	LGS_U_Ist	0,08	7,04	46,15	115,74	567,62	0,25	9,15	56,66	141,00	676,83	1,95	12,14	64,15	155,48	746,61	3,46	14,23	69,07	175,54	829,61	6,84	3,23	86,66	228,11	1.159,59
7	KUB_U_Ist	0,09	7,02	45,99	115,18	561,20	-0,89	8,11	55,96	140,88	677,95	0,15	10,56	63,35	155,49	749,96	0,76	11,82	67,39	176,39	839,25	-5,94	-7,23	81,82	229,58	1.186,18
7	LGS_U_Delta	0,08	-0,24	0,69	2,11	7,62	0,25	1,88	11,20	27,36	116,83	1,95	4,87	18,70	41,84	186,61	3,46	6,95	23,62	61,90	269,61	6,84	-4,04	41,20	114,48	599,59
7	KUB_U_Delta	0,09	-0,25	0,54	1,54	1,20	-0,89	0,84	10,51	27,24	117,95	0,15	3,29	17,89	41,85	189,96	0,76	4,55	21,93	62,75	279,25	-5,94	-14,51	36,36	115,95	626,18

Tabelle A6.23 Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlusentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen außerhalb des erweiterten Wertebereichs $\alpha \notin [-0,2; 1,2]$

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	0,0005	-0,0750	-0,4862	-1,2818	-1,3040	0,3688	0,2832	-0,1926	-0,9358	-4,7357	0,5483	0,4289	-0,1411	-1,0271	-6,6849	0,7032	0,5789	-0,0292	-0,9030	-3,9243	1,0644	0,8605	-0,1853	-2,1222	-17,4983
1	KUB U Ist	0,0005	-0,0756	-0,4887	-1,2821	-1,3042	0,3727	0,2860	-0,1938	-0,9360	-4,6221	0,5549	0,4338	-0,1420	-1,0271	-6,5016	0,7129	0,5864	-0,0294	-0,9031	-3,8182	1,0862	0,8768	-0,1873	-2,1210	-16,6999
1	LGS U Delta	0,05%	-7,50%	-48,62%	-128,18%	-130,40%	3,54%	-5,01%	-52,60%	-126,91%	-506,90%	4,83%	-7,11%	-64,11%	-152,71%	-718,49%	3,65%	-8,77%	-69,59%	-156,97%	-459,10%	6,44%	-13,95%	-118,53%	-312,22%	-1849,83%
1	KUB U Delta	0,05%	-7,56%	-48,87%	-128,21%	-130,42%	3,93%	-4,73%	-52,71%	-126,93%	-495,54%	5,49%	-6,62%	-64,20%	-152,71%	-152,71%	4,63%	-8,02%	-69,61%	-156,98%	-448,49%	8,62%	-12,32%	-118,73%	-312,10%	-1769,99%
5	LGS U Ist	-0,0024	-0,0089	-0,0528	-0,1400	-0,1252	0,3226	0,3222	0,2649	0,1261	0,3744	0,4715	0,4696	0,4194	0,2324	0,6950	0,6151	0,6119	0,5447	0,3451	0,7404	0,9349	0,9334	0,8575	0,6488	0,8467
5	KUB U Ist	-0,0024	-0,0089	-0,0530	-0,1398	-0,1251	0,3254	0,3249	0,2663	0,1262	0,3690	0,4762	0,4741	0,4221	0,2326	0,6848	0,6221	0,6185	0,5487	0,3455	0,7283	0,9488	0,9465	0,8654	0,6499	0,8312
5	LGS U Delta	-0,24%	-0,89%	-5,28%	-14,00%	-12,52%	-1,07%	-1,11%	-6,85%	-20,72%	4,11%	-2,86%	-3,04%	-8,07%	-26,77%	19,50%	-5,16%	-5,48%	-12,20%	-32,16%	7,38%	-6,51%	-6,67%	-14,25%	-35,12%	-15,33%
5	KUB U Delta	-0,24%	-0,89%	-5,30%	-13,98%	-12,51%	-0,79%	-0,84%	-6,70%	-20,71%	3,57%	-2,38%	-2,59%	-7,79%	-26,74%	18,48%	-4,46%	-4,82%	-11,80%	-32,12%	6,16%	-5,12%	-5,36%	-13,46%	-35,01%	-16,88%
7	LGS U Ist	-0,0030	-0,0063	-0,0315	-0,0756	-0,0782	0,3160	0,3196	0,3122	0,2165	0,1412	0,4590	0,4557	0,4623	0,3917	0,2760	0,6378	0,6504	0,6364	0,5136	0,2459	1,0022	0,9711	0,9393	0,7934	0,3921
7	KUB U Ist	-0,0031	-0,0063	-0,0316	-0,0756	-0,0782	0,3191	0,3226	0,3145	0,2170	0,1392	0,4644	0,4608	0,4662	0,3929	0,2718	0,6467	0,6591	0,6429	0,5157	0,2416	1,0209	0,9880	0,9515	0,7970	0,3833
7	LGS U Delta	-0,30%	-0,63%	-3,15%	-7,56%	-7,82%	-1,74%	-1,38%	-2,11%	-11,68%	-19,22%	-4,10%	-4,43%	-3,78%	-10,83%	-22,40%	-2,88%	-1,62%	-3,03%	-15,31%	-42,07%	0,22%	-2,89%	-6,07%	-20,67%	-60,79%
7	KUB U Delta	-0,31%	-0,63%	-3,16%	-7,56%	-7,82%	-1,42%	-1,07%	-1,89%	-11,64%	-19,41%	-3,56%	-3,92%	-3,38%	-10,71%	-22,82%	-1,99%	-0,76%	-2,37%	-15,10%	-42,51%	2,09%	-1,20%	-4,85%	-20,30%	-61,67%

Tabelle A6.24 Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlusentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; Ergebnisse in roter Schrift liegen außerhalb des erweiterten Wertebereichs $R_F \notin [-5\Omega; \infty]$

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	0,06	8,36	52,93	133,83	134,02	-0,11	9,96	64,27	160,31	787,99	-0,05	11,38	72,15	181,51	904,25	0,21	12,85	80,13	199,03	948,94	0,23	16,92	108,65	270,55	1.482,69
1	KUB U Ist	0,06	8,37	52,94	133,78	133,97	-0,15	9,93	64,28	160,25	784,86	-0,12	11,33	72,16	181,44	899,09	0,10	12,77	80,13	198,96	945,73	-0,02	16,73	108,67	270,33	1.458,51
1	LGS U Delta	0,06	1,09	7,47	20,20	-425,98	-0,11	2,69	18,81	46,67	227,99	-0,05	4,11	26,69	67,87	344,25	0,21	5,58	34,68	85,39	388,94	0,23	9,64	63,20	156,92	922,69
1	KUB U Delta	0,06	1,09	7,49	20,14	-426,03	-0,15	2,66	18,82	46,62	224,86	-0,12	4,05	26,70	67,80	339,09	0,10	5,49	34,68	85,32	385,73	-0,02	9,46	63,21	156,69	898,51
5	LGS U Ist	0,09	7,22	45,27	113,81	114,28	2,30	10,63	57,42	139,49	657,49	3,75	13,38	65,27	155,94	741,89	4,43	14,80	72,31	171,52	826,11	5,74	19,77	95,80	229,45	1.109,69
5	KUB U Ist	0,09	7,22	45,24	113,63	114,13	2,29	10,64	57,56	139,65	659,90	3,74	13,41	65,52	156,28	747,07	4,42	14,85	72,68	172,10	832,24	5,70	19,88	96,60	230,96	1.119,13
5	LGS U Delta	0,09	-0,06	-0,19	0,17	-445,72	2,30	3,36	11,96	25,85	97,49	3,75	6,11	19,82	42,30	181,89	4,43	7,53	26,86	57,89	266,11	5,74	12,50	50,35	115,82	549,69
5	KUB U Delta	0,09	-0,06	-0,22	0,00	-445,87	2,29	3,37	12,10	26,01	99,90	3,74	6,14	20,07	42,64	187,07	4,42	7,58	27,22	58,46	272,24	5,70	12,61	51,14	117,32	559,13
7	LGS U Ist	0,09	7,14	44,90	112,24	112,27	1,93	10,18	57,73	141,51	655,70	2,86	12,21	64,02	159,89	728,63	1,45	13,22	72,14	179,55	803,68	0,19	16,38	96,63	235,07	1.111,89
7	KUB U Ist	0,09	7,14	44,86	112,05	112,07	1,92	10,22	58,06	142,07	657,35	2,86	12,29	64,57	161,07	732,40	1,43	13,35	73,03	181,32	807,35	0,15	16,64	98,42	238,74	1.120,16
7	LGS U Delta	0,09	-0,13	-0,55	-1,39	-447,73	1,93	2,91	12,28	27,88	95,70	2,86	4,93	18,56	46,25	168,63	1,45	5,95	26,69	65,91	243,68	0,19	9,11	51,18	121,43	551,89
7	KUB U Delta	0,09	-0,14	-0,59	-1,59	-447,93	1,92	2,95	12,60	28,44	97,35	2,86	5,01	19,11	47,43	172,40	1,43	6,07	27,58	67,69	247,35	0,15	9,37	52,96	125,11	560,16

Tabelle A6.25 Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlusentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 1$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; gelb: α im erweiterten Wertebereich; $\alpha \in [-0,2; 1,2]$; rot: α aus Tabelle A6.25 und R_F aus Tabelle A6.26 im erweiterten Wertebereich

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	-0,0723	0,0419	0,7224	1,9980	11,8230	0,1961	0,2962	0,7656	1,6098	8,5261	0,3373	0,3629	0,6003	1,3510	8,2622	0,5224	0,6081	1,0608	1,9214	8,8700	0,9231	1,0100	1,4862	2,3457	9,5607
1	KUB_U Ist	-0,0699	0,0403	0,6981	1,9357	11,6189	0,1884	0,2847	0,7358	1,5487	8,2846	0,3228	0,3470	0,5738	1,2943	8,0008	0,4998	0,5820	1,0157	1,8431	8,5786	0,8805	0,9641	1,4196	2,2433	9,2187
5	LGS_U Ist	0,1247	0,5655	2,0975	5,3840	1,7699	1,4461	1,6752	0,4792	-0,3406	-3,9086	1,5310	1,6359	1,1474	0,6509	-0,2802	1,5809	1,6962	1,3393	0,8401	-0,8910	1,3365	1,5822	1,2236	1,2528	0,6025
5	KUB_U Ist	0,1745	0,7179	2,8711	8,2711	-91,5172	2,3382	3,5054	0,7001	-0,4490	-3,7719	2,1722	2,4097	1,5342	0,8135	-0,2741	2,0936	2,3357	1,7503	1,0267	-0,9231	1,5778	1,9302	1,4204	1,4522	0,6481
7	LGS_U Ist	0,0347	-0,2565	-0,9012	-1,4528	-0,8883	1,3204	1,4343	1,1154	0,5581	-0,9582	1,4393	1,5065	1,3476	1,1708	-0,3489	1,4948	1,5760	1,3352	1,0978	0,5817	1,4804	1,4533	1,3345	1,2428	0,8021
7	KUB_U Ist	-0,1684	-77,5468	-54,7221	-53,5110	-43,0409	1,9680	2,2843	1,6584	0,7516	-0,9076	1,9392	2,0642	1,7806	1,4404	-0,3286	1,9098	2,0474	1,6580	1,3107	0,6361	1,7660	1,7293	1,5603	1,4294	0,8618

Tabelle A6.26 Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlusentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 1$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; gelb: R_F im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$;

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	8,19	40,11	213,74	512,02	2.159,67	16,68	32,62	109,39	252,91	8,5261	11,99	23,44	81,02	173,25	732,47	13,55	24,50	84,97	187,18	769,60	7,65	16,04	59,37	136,86	554,15
1	KUB_U Ist	7,97	40,23	216,00	518,93	2.215,91	17,03	33,14	110,71	255,92	11,12,20	12,42	23,89	81,82	175,05	746,44	14,36	25,43	86,65	190,28	786,95	8,90	17,38	61,39	140,16	569,77
5	LGS_U Ist	-95,66	89,52	1.749,26	3.725,20	90.963,09	-63,51	-35,97	254,57	686,62	3.570,06	-64,72	-24,18	164,68	463,38	2.351,78	-35,29	1,63	111,49	338,45	1.659,95	-4,75	-6,01	88,00	221,39	1.102,53
5	KUB_U Ist	-156,72	-153,80	659,14	1.424,50	-1.862,36	-138,56	-181,48	240,27	682,38	3.213,68	-119,42	-80,95	146,52	457,68	2.319,68	-63,27	-23,46	94,08	334,40	1.626,23	-13,61	-20,07	82,19	217,07	1.107,19
7	LGS_U Ist	-7,50	-495,65	-2.485,46	-5.370,63	-20.115,08	-72,53	-13,07	236,94	705,21	3.821,49	-29,37	-4,50	155,31	436,78	2.526,97	-27,77	1,64	118,75	349,13	1.771,89	-8,28	7,80	93,95	232,05	1.140,42
7	KUB_U Ist	-228,54	-2.510,12	-1.015,14	-958,77	-528,69	-145,39	-87,04	202,51	699,40	3.541,29	-60,98	-38,61	138,94	437,38	2.447,40	-51,00	-19,64	107,44	351,50	1.788,03	-18,50	-1,10	90,93	235,00	1.158,92

Tabelle A6.27 Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlusentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 36$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; gelb: α im erweiterten Wertebereich; $\alpha \in [-0,2; 1,2]$; rot: α aus Tabelle A6.27 und R_F aus Tabelle A6.28 im erweiterten Wertebereich

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	-0,2156	-0,8903	-6,0040	-28,8171	-48,5839	13,1483	6,6995	-3,3200	-7,6834	0,8663	3,2221	2,2200	-1,0778	-5,0679	-19,5837	1,9982	1,4778	-0,9912	-4,6086	-23,0259	1,0637	0,8196	-0,3485	-2,0599	-11,3303
1	KUB_U Ist	-0,2049	-0,8471	-5,7615	-30,2654	-38,1155	24,2143	9,2535	-3,5713	-7,6519	0,8280	3,4779	2,3797	-1,1117	-5,0583	-18,3845	2,0832	1,5348	-1,0109	-4,6012	-21,6850	1,0863	0,8355	-0,3523	-2,0590	-10,8887
5	LGS_U Ist	0,4521	4,7060	17,2942	23,4842	63,0789	1,4360	1,4194	1,1380	1,0456	-3,7789	1,3234	1,3316	1,1862	1,1220	-2,0579	1,2262	1,2063	1,0716	0,8966	-0,6193	0,9351	0,9248	0,8512	0,6185	0,6395
5	KUB_U Ist	0,5341	5,6068	89,4083	-85,6590	-21,5867	1,4932	1,4706	1,1623	1,0515	-3,5303	1,3617	1,3672	1,2068	1,1284	-1,9610	1,2539	1,2320	1,0865	0,9003	-0,5973	0,9491	0,9377	0,8591	0,6196	0,6266
7	LGS_U Ist	0,3933	5,8113	40,6423	-157,1695	10,7956	1,3965	1,3325	1,0866	1,0567	-0,3777	1,2759	1,2650	1,1114	0,9507	-0,1587	1,1775	1,1818	1,1089	0,9325	-0,0677	0,9851	0,9778	0,9405	0,8011	0,6410
7	KUB_U Ist	0,4314	9,7593	-43,8396	-42,1009	7,9223	1,4607	1,3877	1,1138	1,0691	-0,3587	1,3189	1,3053	1,1349	0,9590	-0,1507	1,2090	1,2118	1,1285	0,9393	-0,0664	1,0029	0,9942	0,9517	0,8045	0,6271

Tabelle A6.28 Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlusentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 36$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; gelb: R_F im erweiterten Wertebereich $R_F \in [-5\Omega; \infty]$;

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS_U Ist	32,98	407,63	2.692,44	8.979,54	80.338,90	-178,80	-45,11	320,27	783,51	2.868,74	-25,91	14,88	208,81	539,71	2.757,46	-9,25	18,68	165,51	423,90	2.276,70	0,41	18,03	111,78	277,82	1.406,68
1	KUB_U Ist	32,39	404,83	2.663,48	8.942,20	71.842,33	-347,03	-84,59	324,08	780,71	2.871,00	-29,35	12,74	209,22	538,56	2.704,45	-10,33	17,97	165,71	423,10	2.226,60	0,14	17,85	111,81	277,61	1.392,41
5	LGS_U Ist	-10,45	489,36	9.529,32	50.300,19	-304.777,14	5,42	41,40	242,38	608,84	3.541,46	8,03	32,84	169,26	431,90	2.190,21	7,80	27,12	136,30	338,08	1.672,08	6,02	20,29	96,26	229,55	1.099,62
5	KUB_U Ist	-41,54	213,95	-1.582,60	-2.871,31	105.676,39	4,88	41,46	245,03	615,28	3.393,81	7,82	33,00	171,17	436,82	2.142,04	7,69	27,28	137,72	341,13	1.660,64	5,99	20,41	97,06	230,97	1.106,56
7	LGS_U Ist	13,26	1.271,04	23.332,73	-274.457,54	-112.853,75	11,13	50,69	244,54	569,95	3.134,20	9,51	37,20	180,91	416,78	2.161,73	8,37	28,97	142,91	331,11	1.658,79	1,45	15,72	96,89	236,68	1.090,97
7	KUB_U Ist	-25,78	1.282,12	-772,73	-1.290,30	-87.009,58	11,08	51,76	249,68	581,89	3.106,79	9,56	37,98	184,86	424,55	2.153,25	8,45	29,55	146,02	337,12	1.655,89	1,42	15,98	98,66	240,36	1.104,32

Tabelle A6.29 Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion; $p = 2$; im gelöschten Netz;
 $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert R_F	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	-0,0146	-0,0299	-0,1206	-0,2817	-1,3050	0,3450	0,3271	0,2411	0,0839	-0,9225	0,5130	0,4959	0,4042	0,2396	-0,7694	0,6760	0,6590	0,5711	0,4110	-0,5938	1,0441	1,0322	0,9347	0,7804	-0,2126
1	KUB U Ist	-0,0146	-0,0299	-0,1207	-0,2818	-1,3076	0,3445	0,3266	0,2406	0,0833	-0,9249	0,5124	0,4953	0,4035	0,2389	-0,7720	0,6748	0,6580	0,5701	0,4101	-0,5961	1,0425	1,0305	0,9332	0,7791	-0,2149
1	LGS U Delta	-1,46%	-2,99%	-12,06%	-28,17%	-130,50%	1,16%	-0,62%	-9,22%	-24,94%	-125,58%	1,30%	-0,41%	-9,58%	-26,04%	-126,94%	0,93%	-0,77%	-9,56%	-25,56%	-126,04%	4,41%	3,22%	-6,53%	-21,96%	-121,26%
1	KUB U Delta	-1,46%	-2,99%	-12,07%	-28,18%	-130,76%	1,11%	-0,67%	-9,28%	-25,00%	-125,83%	1,24%	-0,47%	-9,65%	-26,11%	-127,20%	0,82%	-0,86%	-9,66%	-25,66%	-126,28%	4,25%	3,05%	-6,68%	-22,09%	-121,49%
5	LGS U Ist	0,0222	0,0215	0,0096	-0,0161	-0,1686	0,3669	0,3885	0,3255	0,2861	0,1203	0,5059	0,7430	0,5335	0,6691	0,5415	0,6914	0,6931	0,6262	0,5642	0,3716	1,0815	1,0826	1,0470	0,9495	0,6838
5	KUB U Ist	0,0246	0,0238	0,0108	-0,0169	-0,1725	0,4055	0,4318	0,3576	0,3116	0,1262	0,5499	0,8311	0,5834	0,7248	0,5658	0,7675	0,7706	0,6860	0,6117	0,3864	1,1999	1,2014	1,1536	1,0300	0,7113
5	LGS U Delta	2,22%	2,15%	0,96%	-1,61%	-16,86%	3,36%	5,51%	-0,78%	-4,73%	-21,30%	0,59%	24,30%	3,35%	16,91%	4,15%	2,48%	2,65%	-4,04%	-10,24%	-29,51%	8,15%	8,26%	4,70%	-5,05%	-31,62%
5	KUB U Delta	2,46%	2,38%	1,08%	-1,69%	-17,25%	7,22%	9,84%	2,43%	-2,17%	-20,71%	4,99%	33,11%	8,34%	22,48%	6,58%	10,08%	10,39%	1,93%	-5,49%	-28,02%	19,99%	20,14%	15,36%	3,00%	-28,88%
7	LGS U Ist	-0,0012	-0,0022	-0,0245	-0,0427	-0,0863	0,3836	0,3905	0,3870	0,3627	0,2913	0,5686	0,5536	0,5517	0,5288	0,4313	0,7411	0,7412	0,7272	0,7156	0,6106	1,1458	1,1679	1,1485	1,0788	0,9393
7	KUB U Ist	-0,0013	-0,0024	-0,0265	-0,0455	-0,0880	0,4208	0,4287	0,4234	0,3923	0,3030	0,6233	0,6067	0,6028	0,5707	0,4487	0,8158	0,8161	0,7957	0,7756	0,6372	1,2641	1,2902	1,2620	1,1702	0,9812
7	LGS U Delta	-0,12%	-0,22%	-2,45%	-4,27%	-8,63%	5,03%	5,71%	5,36%	2,93%	-4,20%	6,86%	5,36%	5,17%	2,88%	-6,87%	7,44%	7,45%	6,05%	4,89%	-5,61%	14,58%	16,79%	14,85%	7,88%	-6,07%
7	KUB U Delta	-0,13%	-0,24%	-2,65%	-4,55%	-8,80%	8,75%	9,53%	9,00%	5,89%	-3,03%	12,33%	10,67%	10,28%	7,07%	-5,13%	14,91%	14,94%	12,91%	10,89%	-2,95%	26,41%	29,02%	26,20%	17,02%	-1,88%

Tabelle A6.30 Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion; $p = 2$; im gelöschten Netz;
 $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Sollwert R_F	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	-0,19	11,49	77,79	199,21	989,58	0,05	13,45	78,19	198,82	982,19	8,77	21,11	88,67	208,32	991,34	14,02	26,48	91,57	210,49	989,59	10,84	23,41	92,67	208,79	982,53
1	KUB U Ist	-0,12	11,64	78,42	200,69	996,62	-1,65	11,85	77,05	198,49	987,21	6,21	18,70	86,75	207,22	995,60	10,75	23,29	88,85	208,57	992,92	5,83	18,48	88,21	205,10	983,98
1	LGS U Delta	-0,19	4,22	32,33	85,57	429,58	0,05	6,18	32,73	85,18	422,19	8,77	13,83	43,21	94,68	431,34	14,02	19,21	46,12	96,85	429,59	10,84	16,14	47,21	95,15	422,53
1	KUB U Delta	-0,12	4,37	32,96	87,06	436,62	-1,65	4,58	31,60	84,85	427,21	6,21	11,43	41,29	93,58	435,60	10,75	16,02	43,39	94,94	432,92	5,83	11,20	42,75	91,47	423,98
5	LGS U Ist	-0,57	5,91	43,08	110,33	543,98	1,16	6,54	47,00	113,13	544,78	-4,32	-7,69	31,11	97,57	507,66	2,19	8,14	47,86	117,22	552,71	-0,52	8,29	47,83	116,03	557,03
5	KUB U Ist	-0,67	5,80	42,94	110,13	541,97	-0,39	4,71	45,80	112,21	544,26	-5,96	-10,89	28,99	95,92	509,03	-0,78	5,04	45,69	115,90	553,58	-5,33	3,73	44,33	113,94	559,68
5	LGS U Delta	-0,57	-1,36	-2,38	-3,31	-16,02	1,16	-0,74	1,55	-0,50	-15,22	-4,32	-14,96	-14,35	-16,07	-52,34	2,19	0,87	2,41	3,58	-7,29	-0,52	1,02	2,37	2,40	-2,97
5	KUB U Delta	-0,67	-1,47	-2,51	-3,51	-18,03	-0,39	-2,56	0,34	-1,43	-15,74	-5,96	-18,16	-16,47	-17,72	-50,97	-0,78	-2,23	0,23	2,26	-6,42	-5,33	-3,54	-1,12	0,31	-0,32
7	LGS U Ist	0,14	6,70	44,86	113,44	553,99	0,04	7,35	42,87	110,82	545,91	1,19	8,01	44,91	112,21	542,84	0,66	8,32	44,91	111,90	541,08	2,54	8,22	45,09	111,89	545,90
7	KUB U Ist	0,14	6,68	44,74	113,00	550,76	-1,40	5,96	41,72	110,22	547,33	-0,72	6,06	43,48	111,77	545,97	-1,98	5,84	43,14	111,52	546,40	-1,11	4,56	42,66	111,66	555,65
7	LGS U Delta	0,14	-0,57	-0,59	-0,20	-6,01	0,04	0,08	-2,58	-2,82	-14,09	1,19	0,73	-0,54	-1,42	-17,16	0,66	1,05	-0,54	-1,73	-18,92	2,54	0,94	-0,36	-1,74	-14,10
7	KUB U Delta	0,14	-0,59	-0,71	-0,64	-9,24	-1,40	-1,31	-3,73	-3,41	-12,67	-0,72	-1,21	-1,97	-1,87	-14,03	-1,98	-1,43	-2,31	-2,11	-13,60	-1,11	-2,72	-2,79	-1,98	-4,35

Tabelle A6.31 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 0$;
 $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-0,0081	0,0006	0,0487	0,1397	0,7179	0,3248	0,3340	0,3811	0,4742	1,0410	0,5203	0,5282	0,5805	0,6728	1,2468	0,6948	0,7016	0,7582	0,8447	1,4263	1,0200	1,0320	1,0761	1,1701	1,7392
1 KUB U Ist	-0,0080	0,0006	0,0479	0,1374	0,7070	0,3197	0,3286	0,3750	0,4667	1,0254	0,5119	0,5198	0,5712	0,6621	1,2282	0,6837	0,6905	0,7462	0,8315	1,4052	1,0040	1,0158	1,0593	1,1520	1,7139
1 LGS U Delta	-0,81%	0,06%	4,87%	13,97%	71,79%	-0,85%	0,06%	4,77%	14,09%	70,77%	2,03%	2,82%	8,05%	17,28%	74,68%	2,82%	3,50%	9,15%	17,80%	75,96%	2,00%	3,20%	7,61%	17,01%	73,92%
1 KUB U Delta	-0,80%	0,06%	4,79%	13,74%	70,70%	-1,37%	-0,47%	4,17%	13,34%	69,21%	1,19%	1,98%	7,12%	16,21%	72,82%	1,70%	2,38%	7,95%	16,48%	73,85%	0,40%	1,58%	5,93%	15,20%	71,39%
5 LGS U Ist	0,0087	0,0095	0,0093	0,0155	-0,0334	0,2904	0,2875	0,2912	0,2892	0,3037	0,4346	0,4304	0,4386	0,4379	0,4613	0,5856	0,5870	0,5776	0,5870	0,6084	0,9101	0,9163	0,9124	0,9176	0,9419
5 KUB U Ist	0,0087	0,0094	0,0092	0,0154	-0,0335	0,2917	0,2888	0,2925	0,2904	0,3049	0,4370	0,4328	0,4410	0,4403	0,4638	0,5898	0,5912	0,5817	0,5912	0,6125	0,9200	0,9264	0,9223	0,9274	0,9517
5 LGS U Delta	0,87%	0,95%	0,93%	1,55%	-3,34%	-4,29%	-4,58%	-4,21%	-4,42%	-2,97%	-6,55%	-6,96%	-6,14%	-6,21%	-3,87%	-8,11%	-7,97%	-8,91%	-7,97%	-5,83%	-8,99%	-8,37%	-8,76%	-8,24%	-5,81%
5 KUB U Delta	0,87%	0,94%	0,92%	1,54%	-3,35%	-4,17%	-4,45%	-4,09%	-4,29%	-2,85%	-6,30%	-6,72%	-5,90%	-5,97%	-3,63%	-7,68%	-7,55%	-8,49%	-7,55%	-5,42%	-8,00%	-7,36%	-7,78%	-7,26%	-4,84%
7 LGS U Ist	-0,0030	-0,0029	-0,0035	-0,0033	-0,0017	0,3302	0,3308	0,3284	0,3305	0,3406	0,4889	0,4916	0,4913	0,4924	0,5202	0,6513	0,6520	0,6508	0,6567	0,6653	0,9835	0,9784	0,9846	0,9894	1,0122
7 KUB U Ist	-0,0031	-0,0029	-0,0035	-0,0033	-0,0013	0,3370	0,3375	0,3352	0,3373	0,3485	0,5008	0,5033	0,5031	0,5046	0,5341	0,6694	0,6701	0,6688	0,6749	0,6847	1,0182	1,0131	1,0194	1,0247	1,0496
7 LGS U Delta	-0,30%	-0,29%	-0,35%	-0,33%	-0,17%	0,31%	0,25%	0,49%	0,28%	0,72%	-1,11%	-0,84%	-0,87%	-0,76%	2,02%	-1,53%	-1,47%	-1,59%	-1,00%	-0,13%	-1,65%	-2,16%	-1,54%	-1,06%	1,22%
7 KUB U Delta	-0,31%	-0,29%	-0,35%	-0,33%	-0,13%	0,36%	0,42%	0,18%	0,40%	1,51%	0,08%	0,32%	0,31%	0,46%	3,41%	0,28%	0,34%	0,21%	0,83%	1,80%	1,82%	1,31%	1,94%	2,47%	4,96%

Tabelle A6.32 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 0$;
 $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Sollwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-1,51	-14,07	-83,82	-217,51	-1.064,97	16,62	1,50	-66,42	-206,37	-1.036,73	-25,53	-36,74	-114,65	-251,92	-1.094,58	-40,03	-49,94	-137,55	-266,26	-1.137,90	-8,51	-26,33	-90,67	-236,80	-1.093,45
1 KUB U Ist	-1,65	-14,03	-82,87	-214,91	-1.054,01	21,92	7,00	-60,15	-198,47	-1.021,69	-16,72	-27,92	-104,94	-240,75	-1.076,93	-28,29	-38,16	-124,96	-252,50	-1.118,00	8,61	-9,13	-72,88	-217,65	-1.069,67
1 LGS U Delta	-1,51	-21,34	-129,27	-331,15	-1.624,97	16,62	-5,78	-111,87	-320,01	-1.596,73	-25,53	-44,01	-160,10	-365,56	-1.654,58	-40,03	-57,21	-183,00	-379,89	-1.697,90	-8,51	-33,60	-136,12	-350,44	-1.653,45
1 KUB U Delta	-1,65	-21,30	-128,32	-328,54	-1.614,01	21,92	-0,27	-105,61	-312,11	-1.581,69	-16,72	-35,19	-150,39	-354,39	-1.636,93	-28,29	-45,43	-170,42	-366,13	-1.678,00	8,61	-16,40	-118,33	-331,29	-1.629,67
5 LGS U Ist	-72,12	-60,63	-28,36	2,47	795,09	249,28	269,96	304,39	380,89	798,59	290,25	314,68	328,31	404,52	841,20	294,35	305,56	342,56	412,38	853,07	282,63	285,90	327,34	394,81	838,92
5 KUB U Ist	-71,17	-59,68	-27,62	3,64	790,48	246,77	267,30	301,91	378,37	796,91	288,84	313,07	327,26	403,70	842,98	294,31	305,78	342,37	413,16	857,82	284,87	288,49	330,44	399,02	850,68
5 LGS U Delta	-72,12	-67,90	-73,82	-111,16	235,09	249,28	262,68	258,94	267,25	238,59	290,25	307,41	282,86	290,88	281,20	294,35	298,29	297,11	298,75	293,07	282,63	278,63	281,88	281,17	278,92
5 KUB U Delta	-71,17	-66,95	-73,08	-109,99	230,48	246,77	260,03	256,45	264,74	236,91	288,84	305,79	281,80	290,06	282,98	294,31	298,50	296,92	299,52	297,82	284,87	281,22	284,98	285,39	290,68
7 LGS U Ist	-4,80	2,48	40,96	114,96	590,77	26,21	34,64	71,05	146,68	616,09	45,62	55,95	92,86	161,94	644,41	63,17	70,98	110,26	178,89	641,50	76,56	80,11	120,23	191,91	660,98
7 KUB U Ist	-4,76	2,43	40,45	113,58	584,17	28,20	36,78	73,29	149,32	621,59	48,85	59,21	96,63	166,71	656,67	67,82	76,01	115,92	185,95	658,32	83,74	87,31	129,01	203,77	690,96
7 LGS U Delta	-4,80	-4,79	-4,50	1,32	30,77	26,21	27,37	25,59	33,04	56,09	45,62	48,67	47,40	48,31	84,41	63,17	63,71	64,80	65,25	81,50	76,56	72,83	74,77	78,28	100,98
7 KUB U Delta	-4,76	-4,84	-5,01	-0,05	24,17	28,20	29,51	27,83	35,68	61,59	48,85	51,93	51,17	53,07	96,67	67,82	68,74	70,46	72,32	98,32	83,74	80,03	83,56	90,14	130,96

Tabelle A6.33 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 1$;

$(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	-0,0108	-0,0344	-0,1673	-0,4327	-2,0330	0,3753	0,3475	0,2173	-0,0156	-1,5594	0,5236	0,5028	0,3680	0,1319	-1,3445	0,7024	0,6692	0,5413	0,3125	-1,1249	1,0991	1,0638	0,9485	0,7222	-0,6837
1	KUB U Ist	-0,0109	-0,0348	-0,1699	-0,4405	-2,0880	0,3789	0,3510	0,2190	-0,0172	-1,6004	0,5283	0,5076	0,3711	0,1318	-1,3787	0,7084	0,6746	0,5455	0,3143	-1,1532	1,1074	1,0721	0,9560	0,7278	-0,7022
1	LGS U Delta	-1,08%	-3,44%	-16,73%	-43,27%	-203,30%	4,20%	1,42%	-11,61%	-34,89%	-189,27%	2,36%	0,28%	-13,20%	-36,81%	-184,45%	3,57%	0,25%	-12,54%	-35,42%	-179,16%	9,91%	6,38%	-5,15%	-27,78%	-168,37%
1	KUB U Delta	-1,09%	-3,48%	-16,99%	-44,05%	-208,80%	4,56%	1,76%	-11,44%	-35,06%	-193,37%	2,83%	0,76%	-12,89%	-36,82%	-187,87%	4,18%	0,79%	-12,12%	-35,24%	-181,99%	10,74%	7,21%	-4,41%	-27,23%	-170,22%
5	LGS U Ist	0,0083	0,0090	0,0154	0,1152	-0,0367	0,2357	0,2439	0,2436	0,2526	0,2931	0,3913	0,3915	0,3972	0,4102	0,4464	0,5493	0,5522	0,5572	0,5627	0,6026	0,9073	0,9007	0,9085	0,9103	0,9608
5	KUB U Ist	0,0081	0,0089	0,0150	0,1038	-0,0367	0,2380	0,2460	0,2457	0,2545	0,2944	0,3942	0,3944	0,4002	0,4130	0,4488	0,5539	0,5567	0,5617	0,5670	0,6064	0,9174	0,9107	0,9185	0,9201	0,9701
5	LGS U Delta	0,83%	0,90%	1,54%	11,52%	-3,67%	9,76%	8,94%	-8,97%	-8,07%	-4,02%	-10,87%	-10,86%	-10,28%	-8,98%	-5,36%	-11,74%	-11,45%	-10,95%	-10,39%	-6,40%	-9,27%	-9,93%	-9,15%	-8,97%	-3,92%
5	KUB U Delta	0,81%	0,89%	1,50%	10,38%	-3,67%	9,53%	8,74%	-8,77%	-7,89%	-3,89%	-10,58%	-10,56%	-9,98%	-8,70%	-5,12%	-11,28%	-11,00%	-10,50%	-9,96%	-6,03%	-8,26%	-8,93%	-8,15%	-7,99%	-2,99%
7	LGS U Ist	-0,0022	-0,0026	-0,0044	-0,0077	-0,0030	0,3442	0,3430	0,3425	0,3417	0,3545	0,5110	0,5120	0,5108	0,5116	0,5283	0,6754	0,6758	0,6797	0,6850	0,7120	1,0458	1,0461	1,0486	1,0515	1,0839
7	KUB U Ist	-0,0022	-0,0027	-0,0044	-0,0077	-0,0026	0,3514	0,3502	0,3497	0,3489	0,3626	0,5236	0,5246	0,5234	0,5244	0,5422	0,6947	0,6952	0,6994	0,7050	0,7337	1,0852	1,0854	1,0885	1,0915	1,1255
7	LGS U Delta	-0,22%	-0,26%	-0,44%	-0,77%	-0,30%	1,08%	0,97%	0,92%	0,83%	2,12%	1,10%	1,20%	1,08%	1,16%	2,83%	0,87%	0,91%	1,30%	1,83%	4,54%	4,58%	4,61%	4,86%	5,15%	8,39%
7	KUB U Delta	-0,22%	-0,27%	-0,44%	-0,77%	-0,26%	1,80%	1,69%	1,63%	1,55%	2,92%	2,36%	2,46%	2,34%	2,44%	4,22%	2,80%	2,85%	3,28%	3,83%	6,71%	8,52%	8,54%	8,85%	9,15%	12,55%

Tabelle A6.34 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 1$;

$(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	1,47	35,63	226,84	599,89	2,933,15	-47,84	-8,61	181,02	523,43	2,813,58	-12,73	17,84	212,56	561,44	2,767,97	-24,22	21,33	206,42	542,05	2,705,54	-92,36	-40,85	132,58	466,05	2,589,29
1	KUB U Ist	1,72	36,49	231,35	612,69	3,011,87	-55,87	-16,18	176,64	525,18	2,872,79	-23,69	7,10	205,08	559,83	2,817,37	-38,46	8,34	196,06	536,52	2,746,19	-113,27	-60,95	114,48	452,26	2,614,83
1	LGS U Delta	1,47	28,36	181,38	486,25	2,373,15	-47,84	-15,88	135,56	409,79	2,253,58	-12,73	10,57	167,11	447,80	2,207,97	-24,22	14,06	160,97	428,41	2,145,54	-92,36	-48,12	87,13	352,41	2,029,29
1	KUB U Delta	1,72	29,22	185,90	499,05	2,451,87	-55,87	-23,45	131,19	411,54	2,312,79	-23,69	-0,17	159,62	446,19	2,257,37	-38,46	1,07	150,60	422,88	2,186,19	-113,27	-68,22	69,03	338,62	2,054,83
5	LGS U Ist	-15,69	-10,44	16,03	-71,79	612,11	154,83	164,72	196,49	251,75	640,91	166,24	172,46	198,72	249,77	666,33	157,55	169,84	197,34	263,97	689,64	151,12	160,47	191,02	255,39	693,42
5	KUB U Ist	-15,38	-10,12	16,61	-53,89	609,99	152,09	162,22	194,07	249,71	640,82	164,39	170,66	197,15	248,84	668,15	156,32	168,78	196,58	263,87	693,57	151,47	160,74	191,95	257,17	702,38
5	LGS U Delta	-15,69	-17,71	-29,43	-185,42	52,11	154,83	157,45	151,04	138,11	80,91	166,24	165,19	153,27	136,14	106,33	157,55	162,56	151,88	150,33	129,64	151,12	153,20	145,56	141,75	133,42
5	KUB U Delta	-15,38	-17,40	-28,84	-167,53	49,99	152,09	154,95	148,61	136,08	80,82	164,39	163,39	151,70	135,20	108,15	156,32	161,51	151,13	150,23	133,57	151,47	153,47	146,50	143,53	142,38
7	LGS U Ist	-1,99	4,71	41,57	109,62	557,78	16,38	23,64	61,46	128,74	573,43	27,58	34,73	70,98	137,94	582,62	33,94	40,51	78,47	146,37	594,27	47,78	53,45	90,78	158,81	610,99
7	KUB U Ist	-1,98	4,67	41,32	108,95	554,80	17,24	24,55	62,63	130,44	579,07	28,94	36,19	72,90	140,83	592,41	35,70	42,46	81,25	150,70	608,98	51,42	57,17	95,88	166,24	635,38
7	LGS U Delta	-1,99	-2,57	-3,89	-4,01	-2,22	16,38	16,36	16,00	15,10	13,43	27,58	27,46	25,53	24,31	22,62	33,94	33,23	33,02	32,73	34,27	47,78	46,17	45,33	45,17	50,99
7	KUB U Delta	-1,98	-2,60	-4,14	-4,68	-5,20	17,24	17,28	17,18	16,80	19,07	28,94	28,92	27,45	27,19	32,41	35,70	35,18	35,80	37,07	48,98	51,42	49,90	50,42	52,60	75,38

Tabelle A6.35 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 2$;
 $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	-0,0111	-0,0226	-0,0900	-0,2119	-0,9858	0,3679	0,3547	0,2896	0,1653	-0,5807	0,5390	0,5263	0,4591	0,3405	-0,3771	0,7241	0,7094	0,6377	0,5132	-0,2250	1,1080	1,0907	1,0224	0,9039	0,1962
1	KUB U Ist	-0,0111	-0,0226	-0,0901	-0,2124	-0,9892	0,3679	0,3546	0,2895	0,1650	-0,5834	0,5389	0,5261	0,4588	0,3401	-0,3793	0,7237	0,7091	0,6375	0,5129	-0,2271	1,1074	1,0902	1,0217	0,9033	0,1946
1	LGS U Delta	-1,11%	-2,26%	-9,00%	-21,19%	-98,58%	3,46%	2,13%	-4,37%	-16,80%	-91,40%	3,90%	2,63%	-4,09%	-15,95%	-87,71%	5,75%	4,27%	-2,89%	-15,34%	-89,16%	10,80%	9,07%	2,24%	-9,61%	-80,38%
1	KUB U Delta	-1,11%	-2,26%	-9,01%	-21,24%	-98,92%	3,45%	2,13%	-4,39%	-16,83%	-91,67%	3,89%	2,61%	-4,12%	-15,99%	-87,93%	5,70%	4,25%	-2,92%	-15,38%	-89,37%	10,74%	9,02%	2,17%	-9,67%	-80,54%
5	LGS U Ist	0,0079	0,0092	0,0203	-0,1654	-0,0194	0,2436	0,2540	0,2649	0,2709	0,3058	0,3982	0,4000	0,4135	0,4190	0,4551	0,5663	0,5721	0,5755	0,5821	0,6210	0,9270	0,9318	0,9321	0,9473	0,9955
5	KUB U Ist	0,0078	0,0090	0,0196	-0,1865	-0,0194	0,2459	0,2560	0,2669	0,2728	0,3070	0,4015	0,4033	0,4166	0,4220	0,4572	0,5713	0,5772	0,5803	0,5867	0,6248	0,9380	0,9429	0,9429	0,9578	1,0049
5	LGS U Delta	0,79%	0,92%	2,03%	-16,54%	-1,94%	-8,98%	-7,94%	-6,85%	-6,25%	-2,75%	-10,18%	-10,01%	-8,65%	-8,10%	-4,49%	-10,03%	-9,46%	-9,12%	-8,45%	-4,56%	-7,30%	-6,82%	-6,79%	-5,27%	-0,45%
5	KUB U Delta	0,78%	0,90%	1,96%	-18,65%	-1,94%	-8,75%	-7,73%	-6,65%	-6,05%	-2,64%	-9,85%	-9,67%	-8,34%	-7,80%	-4,28%	-9,53%	-8,95%	-8,64%	-7,99%	-4,19%	-6,20%	-5,71%	-5,71%	-4,22%	0,49%
7	LGS U Ist	-0,0023	-0,0030	-0,0066	-0,0105	-0,0292	0,3564	0,3589	0,3603	0,3570	0,3790	0,5396	0,5415	0,5438	0,5390	0,5596	0,7281	0,7223	0,7273	0,7279	0,7907	1,0943	1,0974	1,1154	1,1246	1,2269
7	KUB U Ist	-0,0024	-0,0031	-0,0067	-0,0106	-0,0291	0,3638	0,3664	0,3680	0,3647	0,3885	0,5530	0,5551	0,5577	0,5527	0,5753	0,7495	0,7435	0,7489	0,7496	0,8157	1,1361	1,1396	1,1583	1,1687	1,2786
7	LGS U Delta	-0,23%	-0,30%	-0,66%	-1,05%	-2,92%	2,31%	2,56%	2,70%	2,37%	4,56%	3,96%	4,15%	4,38%	3,90%	5,96%	6,14%	5,56%	6,06%	6,12%	12,41%	9,43%	9,74%	11,54%	12,46%	22,69%
7	KUB U Delta	-0,24%	-0,31%	-0,67%	-1,06%	-2,91%	3,05%	3,31%	3,46%	3,13%	5,52%	5,30%	5,51%	5,77%	5,27%	7,53%	8,28%	7,69%	8,23%	8,29%	14,90%	13,61%	13,96%	15,83%	16,87%	27,86%

Tabelle A6.36 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 2$;
 $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	0,74	14,20	91,51	233,00	1.154,20	-19,51	-3,82	73,33	217,05	1.130,66	-10,72	4,54	82,91	225,13	1.135,28	-16,87	-3,19	78,91	222,94	1.131,02	-41,66	-25,73	55,73	195,50	1.090,47
1	KUB U Ist	0,80	14,34	92,06	234,31	1.160,68	-21,45	-5,69	71,86	216,31	1.134,72	-13,51	1,80	80,60	223,50	1.138,11	-20,49	-6,74	75,65	220,43	1.133,00	-47,13	-31,14	50,75	191,11	1.090,15
1	LGS U Delta	0,74	6,93	46,06	119,37	594,20	-19,51	-11,10	27,88	103,42	570,66	-10,72	-2,73	37,46	111,49	575,28	-16,87	-10,46	33,45	109,30	571,02	-41,66	-33,00	10,27	81,86	530,47
1	KUB U Delta	0,80	7,06	46,60	120,67	600,68	-21,45	-12,96	26,41	102,67	574,72	-13,51	-5,47	35,15	109,86	578,11	-20,49	-14,02	30,20	106,80	573,00	-47,13	-38,41	5,29	77,48	530,15
5	LGS U Ist	-10,10	-5,05	20,17	281,11	570,80	98,22	102,59	125,19	181,42	603,85	102,84	104,66	135,35	195,64	635,21	99,22	104,80	139,01	200,75	641,37	95,33	99,69	138,49	204,94	658,67
5	KUB U Ist	-9,92	-4,85	20,76	302,01	569,42	96,55	101,15	123,98	180,47	604,77	101,64	103,44	134,58	195,27	637,64	98,45	104,13	138,75	201,11	645,58	95,52	99,96	139,25	207,02	667,45
5	LGS U Delta	-10,10	-12,33	-25,29	167,47	10,80	98,22	95,32	79,73	67,78	43,85	102,84	97,38	89,90	82,01	75,21	99,22	97,53	93,56	87,11	81,37	95,33	92,41	93,04	91,31	98,67
5	KUB U Delta	-9,92	-12,12	-24,69	188,37	9,42	96,55	93,87	78,53	66,83	44,77	101,64	96,17	89,12	81,64	77,64	98,45	96,86	93,30	87,48	85,58	95,52	92,69	93,79	93,38	107,45
7	LGS U Ist	-1,26	5,23	41,81	108,51	529,93	13,15	20,94	58,24	124,92	567,93	22,71	29,70	67,60	134,34	579,06	31,07	38,29	75,04	141,28	603,39	36,90	43,01	84,06	154,51	627,07
7	KUB U Ist	-1,26	5,21	41,63	108,05	527,55	13,72	21,63	59,31	126,61	574,74	23,79	30,85	69,37	137,09	589,80	32,70	40,00	77,66	145,31	619,52	39,31	45,64	88,41	161,58	654,42
7	LGS U Delta	-1,26	-2,04	-3,65	-5,13	-30,07	13,15	13,67	12,79	11,29	7,93	22,71	22,43	22,15	20,70	19,06	31,07	31,02	29,58	27,64	43,39	36,90	35,73	38,61	40,87	67,07
7	KUB U Delta	-1,26	-2,07	-3,83	-5,59	-32,45	13,72	14,36	13,86	12,97	14,74	23,79	23,58	23,92	23,45	29,80	32,70	32,73	32,20	31,68	59,52	39,31	38,37	42,95	47,95	94,42

Tabelle A6.37 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 5$;

$(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	-0,0116	-0,0290	-0,1363	-0,3249	-1,3978	0,3548	0,3343	0,2324	0,0482	-0,9553	0,5132	0,4938	0,3841	0,1958	-0,8093	0,6829	0,6550	0,5501	0,3615	-0,6401	1,0429	1,0188	0,9021	0,6991	-0,3638
1	KUB U Ist	-0,0117	-0,0291	-0,1370	-0,3262	-1,4010	0,3560	0,3354	0,2329	0,0480	-0,9576	0,5150	0,4955	0,3851	0,1960	-0,8114	0,6852	0,6569	0,5516	0,3622	-0,6421	1,0465	1,0222	0,9050	0,7011	-0,3657
1	LGS U Delta	-1,16%	-2,90%	-13,63%	-32,49%	-139,78%	2,15%	0,10%	-10,10%	-28,51%	-128,86%	1,32%	-0,62%	-11,59%	-30,42%	-130,93%	1,62%	-1,17%	-11,66%	-30,52%	-130,67%	4,29%	1,88%	-9,79%	-30,09%	-136,38%
1	KUB U Delta	-1,17%	-2,91%	-13,70%	-32,62%	-140,10%	2,26%	0,20%	-10,04%	-28,53%	-129,09%	1,50%	-0,45%	-11,49%	-30,40%	-131,14%	1,85%	-0,97%	-11,51%	-30,44%	-130,88%	4,65%	2,22%	-9,50%	-29,89%	-136,57%
5	LGS U Ist	0,0066	0,0236	0,1503	-0,0238	-0,0037	0,2841	0,2845	0,2961	0,2976	0,3303	0,4443	0,4455	0,4539	0,4632	0,5073	0,6405	0,6425	0,6477	0,6597	0,7337	0,9898	0,9937	0,9963	1,0159	1,1543
5	KUB U Ist	0,0065	0,0234	0,1428	-0,0239	-0,0036	0,2856	0,2860	0,2974	0,2989	0,3311	0,4469	0,4481	0,4565	0,4656	0,5093	0,6454	0,6475	0,6525	0,6644	0,7384	1,0017	1,0057	1,0080	1,0276	1,1666
5	LGS U Delta	0,66%	2,36%	15,03%	-2,38%	-0,37%	-4,93%	-4,88%	-3,72%	-3,57%	-0,30%	-5,57%	-5,45%	-4,61%	-3,68%	0,73%	-2,62%	-2,41%	-1,90%	-0,70%	6,70%	-1,02%	-0,63%	-0,38%	1,59%	15,43%
5	KUB U Delta	0,65%	2,34%	14,28%	-2,39%	-0,36%	-4,78%	-4,74%	-3,59%	-3,45%	-0,22%	-5,31%	-5,19%	-4,35%	-3,44%	0,93%	-2,13%	-1,92%	-1,42%	-0,22%	7,17%	0,17%	0,57%	0,80%	2,76%	16,66%
7	LGS U Ist	-0,0032	-0,0041	-0,0086	-0,0165	-0,1079	0,3368	0,3428	0,3419	0,3383	0,4562	0,4997	0,5030	0,5086	0,5175	0,7501	0,6675	0,6656	0,6753	0,6838	0,9258	1,0256	1,0242	1,0242	1,0398	1,3724
7	KUB U Ist	-0,0032	-0,0042	-0,0086	-0,0166	-0,1086	0,3428	0,3489	0,3481	0,3446	0,4715	0,5104	0,5139	0,5197	0,5290	0,7770	0,6854	0,6833	0,6936	0,7026	0,9592	1,0610	1,0595	1,0599	1,0764	1,4304
7	LGS U Delta	-0,32%	-0,41%	-0,86%	-1,65%	-10,79%	0,35%	0,94%	0,85%	0,50%	12,29%	-0,04%	0,30%	0,86%	1,75%	25,01%	0,08%	-0,11%	0,86%	1,71%	25,91%	2,56%	2,42%	2,42%	3,98%	37,24%
7	KUB U Delta	-0,32%	-0,42%	-0,86%	-1,66%	-10,86%	0,95%	1,55%	1,48%	1,13%	13,82%	1,04%	1,39%	1,97%	2,90%	27,70%	1,87%	1,66%	2,69%	3,59%	29,25%	6,10%	5,95%	5,99%	7,64%	43,04%

Tabelle A6.38 Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 5$;

$(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1	LGS U Ist	0,44	10,10	65,39	164,75	800,92	2,32	13,05	67,61	166,30	788,30	8,69	19,02	74,64	173,72	802,43	11,86	23,46	79,21	179,40	801,80	15,00	26,30	83,20	185,16	816,82
1	KUB U Ist	0,46	10,16	65,68	165,41	802,95	1,64	12,41	67,19	166,25	789,66	7,69	18,08	73,94	173,41	803,60	10,55	22,24	78,21	178,79	802,76	13,03	24,39	81,53	183,93	817,44
1	LGS U Delta	0,44	2,82	19,94	51,12	240,92	2,32	5,77	22,15	52,66	228,30	8,69	11,75	29,18	60,08	242,43	11,86	16,19	33,75	65,76	241,80	15,00	19,03	37,74	71,52	256,82
1	KUB U Delta	0,46	2,89	20,22	51,77	242,95	1,64	5,14	21,74	52,61	229,66	7,69	10,80	28,49	59,77	243,60	10,55	14,97	32,76	65,15	242,76	13,03	17,12	36,08	70,29	257,44
5	LGS U Ist	-16,33	-46,44	-240,56	153,68	563,65	41,24	49,38	83,08	143,10	592,53	50,05	55,26	89,29	154,08	619,81	49,04	55,62	95,31	162,88	676,99	49,12	56,14	94,40	162,20	697,04
5	KUB U Ist	-16,28	-45,96	-226,47	153,63	563,06	40,95	49,10	83,03	143,25	594,38	50,02	55,26	89,54	154,76	623,32	49,52	56,17	96,24	164,49	683,45	50,00	57,14	95,99	164,90	708,40
5	LGS U Delta	-16,33	-53,71	-286,01	40,05	3,65	41,24	42,10	37,63	29,46	32,53	50,05	47,98	43,83	40,45	59,81	49,04	48,35	49,86	49,25	116,99	49,12	48,87	48,94	48,56	137,04
5	KUB U Delta	-16,28	-53,23	-271,92	39,99	3,06	40,95	41,83	37,57	29,61	34,38	50,02	47,99	44,09	41,13	63,32	49,52	48,90	50,78	50,85	123,45	50,00	49,87	50,53	51,26	148,40
7	LGS U Ist	-0,58	6,05	42,77	108,10	484,20	7,41	14,74	50,77	115,39	589,80	10,36	17,89	55,10	120,60	636,08	12,88	19,94	57,12	122,32	624,17	20,42	27,33	62,26	127,30	644,45
7	KUB U Ist	-0,59	6,04	42,67	107,84	481,71	7,66	15,09	51,46	116,66	600,34	10,76	18,42	56,19	122,72	653,39	13,48	20,67	58,63	125,19	643,28	21,62	28,73	64,72	131,89	672,76
7	LGS U Delta	-0,58	-1,22	-2,69	-5,54	-75,80	7,41	7,46	5,31	1,75	29,80	10,36	10,62	9,65	6,97	76,08	12,88	12,66	11,67	8,69	64,17	20,42	20,05	16,80	13,67	84,45
7	KUB U Delta	-0,59	-1,23	-2,78	-5,79	-78,29	7,66	7,81	6,00	3,02	40,34	10,76	11,15	10,73	9,08	93,39	13,48	13,40	13,17	11,56	83,28	21,62	21,46	19,27	18,26	112,76

Tabelle A6.39 Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7; p = 2, 36$; Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messreihe 1; die Fehlerzenarien entsprechen denen der **Tabellen A6.1 – A6.8**

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
5	p = 2	43,07%	5,76%	4,81%	5,55%	4,14%	5,16%	5,42%	5,02%	5,56%	4,07%	5,28%	5,14%	5,45%	5,19%	4,70%	5,29%	5,33%	5,73%	5,80%	4,59%	5,95%	5,75%	6,29%	6,03%	4,80%
7	p = 2	28,07%	7,36%	7,44%	7,10%	4,58%	5,35%	7,87%	8,07%	7,48%	4,51%	5,89%	8,21%	8,28%	7,76%	4,53%	5,98%	8,75%	8,19%	7,78%	4,55%	9,29%	9,21%	9,22%	8,85%	4,38%
5	p = 36	3,37%	7,68%	3,98%	2,37%	1,36%	13,85%	10,29%	4,46%	2,25%	1,38%	15,65%	10,52%	4,51%	2,41%	1,49%	14,41%	10,20%	4,32%	2,45%	1,47%	9,05%	7,37%	4,10%	2,50%	1,45%
7	p = 36	18,74%	14,52%	5,55%	2,60%	1,34%	11,65%	12,84%	5,19%	2,68%	1,45%	8,22%	9,09%	4,45%	2,63%	1,42%	5,77%	7,03%	4,14%	2,44%	1,52%	5,39%	5,06%	3,52%	2,44%	1,42%

Tabelle A6.40 Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7; \alpha = 0,5$ und $p = 0, 1, 2, 36$; Standardtopologie mit Standard- und B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messreihen 1 und 4; die Fehlerkonstellationen entsprechen denen der **Tabellen A6.19 – A6.20**

	Injektion	p=0					p=1					p=2					p=36									
	Istwert α	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
5	Standardlast	4,68%	4,97%	4,47%	5,09%	4,69%	4,81%	5,21%	5,18%	5,45%	4,88%	5,28%	5,14%	5,45%	5,19%	4,70%	5,29%	5,33%	5,73%	5,80%	4,59%	5,95%	5,75%	6,29%	6,03%	4,80%
5	B6R-Last	17,09%	17,50%	12,43%	17,62%	18,85%	7,83%	7,75%	7,09%	7,76%	6,50%	8,06%	7,55%	7,49%	7,88%	5,75%	19,49%	12,58%	5,43%	2,92%	1,70%					
7	Standardlast	4,74%	7,39%	7,16%	6,74%	6,43, %	5,51%	7,80%	7,80%	7,68%	5,87%	5,89%	8,21%	8,28%	7,76%	4,53%	8,22%	9,09%	4,45%	2,63%	1,42%					
7	B6R-Last	12,76%	12,00%	12,99%	13,95%	15,19%	14,18%	14,32%	16,27%	12,92%	10,11%	15,14%	15,18%	17,12%	14,21%	8,38%	19,36%	17,92%	7,73%	4,37%	2,37%					

Tabelle A6.41 Oberschwingungsverhältnis $I_{Restnetz}^{(k)} / I_{Restnetz}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7; p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast; gelöschtes Netz; die Fehlerszenarien entspr. denen der **Tabellen A6.29 – A6.30**

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
5	p = 0	5,49%	6,41%	3,00%	5,75%	3,72%	3,04%	2,51%	5,14%	3,26%	2,16%	1,02%	3,02%	1,57%	5,33%	1,75%	3,19%	4,84%	1,39%	3,67%	3,68%	4,23%	2,62%	2,75%	2,88%	-
7	p = 0	3,52%	3,20%	2,87%	2,64%	3,66%	3,72%	2,02%	1,71%	0,80%	3,46%	3,08%	2,37%	2,10%	3,34%	1,17%	2,11%	2,33%	3,40%	3,29%	1,43%	2,28%	4,06%	2,29%	2,32%	-
5	p = 1	6,81%	6,14%	6,30%	8,27%	7,25%	7,37%	6,03%	6,29%	6,27%	6,19%	8,47%	6,16%	6,91%	7,10%	6,48%	6,33%	5,93%	6,66%	6,82%	5,47%	7,62%	6,40%	7,31%	7,84%	6,50%
7	p = 1	6,86%	5,30%	5,83%	6,46%	4,49%	6,19%	6,64%	5,54%	6,88%	5,38%	5,26%	5,82%	6,02%	6,66%	5,31%	7,44%	6,37%	5,67%	6,00%	4,90%	6,60%	5,70%	6,73%	6,96%	5,33%
5	p = 2	6,84%	7,01%	6,70%	7,20%	5,86%	7,16%	6,34%	6,72%	6,55%	6,81%	2,60%	1,52%	2,31%	3,26%	2,07%	7,09%	6,57%	7,92%	7,91%	5,33%	7,25%	7,10%	7,13%	8,18%	5,47%
7	p = 2	6,83%	7,08%	6,91%	6,64%	4,60%	7,84%	7,59%	7,88%	7,52%	5,22%	12,71%	13,32%	11,47%	12,20%	8,05%	8,85%	6,27%	7,56%	7,88%	4,63%	9,48%	8,63%	8,29%	8,53%	5,24%
5	p = 5	6,10%	6,48%	6,26%	5,40%	2,95%	7,41%	7,68%	7,11%	7,15%	3,49%	6,91%	7,29%	6,67%	6,07%	3,10%	7,30%	7,63%	7,83%	7,72%	4,03%	7,43%	7,31%	6,91%	6,12%	2,98%
7	p = 5	7,62%	6,78%	6,57%	6,13%	2,54%	6,86%	6,95%	6,22%	7,37%	2,03%	9,36%	9,62%	9,13%	8,04%	2,86%	7,17%	7,36%	6,70%	5,59%	2,17%	11,13%	10,57%	9,67%	7,81%	2,88%

Tabelle A6.42 Oberschwingungsverhältnis $I_{Restnetz}^{(k)} / I_{Restnetz}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7; p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit B6R-Last; gelöschtes Netz; die Fehlerszenarien entspr. denen der **Tabellen A6.31 – A6.38**

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
5	p = 0	2,11%	4,07%	5,18%	3,41%	7,03%	4,99%	10,51%	6,92%	6,84%	6,02%	6,59%	10,85%	7,69%	10,25%	10,60%	9,81%	11,72%	6,80%	13,45%	14,22%	14,10%	16,08%	11,85%	7,65%	8,43%
7	p = 0	6,00%	7,33%	5,57%	1,56%	3,85%	6,74%	7,31%	4,57%	7,34%	6,94%	7,88%	13,30%	9,81%	6,25%	6,94%	12,39%	12,68%	11,93%	14,87%	6,15%	17,83%	11,88%	13,32%	12,86%	11,00%
5	p = 1	7,49%	8,21%	8,80%	7,38%	7,07%	9,07%	7,80%	8,75%	8,41%	6,98%	7,62%	8,51%	8,45%	8,77%	7,11%	9,93%	9,24%	8,64%	8,75%	7,97%	11,87%	11,84%	13,04%	11,28%	9,02%
7	p = 1	7,74%	9,70%	8,46%	7,99%	7,86%	13,00%	12,10%	11,62%	15,53%	8,90%	12,69%	13,68%	13,46%	13,52%	10,51%	15,53%	16,03%	15,84%	15,36%	12,30%	19,96%	19,23%	19,20%	18,48%	13,65%
5	p = 2	7,68%	7,57%	7,86%	7,98%	6,63%	8,56%	8,21%	7,80%	8,19%	6,44%	9,85%	9,74%	10,08%	9,41%	7,19%	11,11%	11,16%	11,16%	10,83%	8,22%	15,46%	15,06%	14,60%	14,72%	9,96%
7	p = 2	14,45%	9,85%	9,90%	9,72%	6,25%	13,20%	13,08%	13,98%	13,17%	8,32%	14,82%	14,65%	15,10%	15,20%	9,20%	18,14%	18,38%	17,74%	16,68%	9,57%	22,39%	23,10%	22,48%	21,81%	12,53%
5	p = 5	2,25%	2,02%	2,27%	1,93%	1,09%	7,16%	6,73%	6,25%	6,74%	3,06%	7,60%	7,95%	7,90%	6,99%	3,45%	9,86%	9,51%	9,19%	8,15%	3,85%	15,79%	15,63%	14,75%	13,15%	5,51%
7	p = 5	10,73%	10,83%	10,22%	9,30%	3,91%	14,33%	13,51%	13,38%	11,47%	4,51%	16,30%	16,17%	15,44%	12,78%	5,05%	22,26%	21,85%	20,04%	16,61%	6,23%	29,81%	29,18%	26,14%	20,79%	7,41%

Tabelle A6.43 Oberschwingungsverhältnis $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ des gemessenen Abgangssummenstroms für $k = 5, 7; p = 0, 1, 2, 5;$
Standardtopologie mit Standardlast; gelöschtes Netz; die Fehlerszenarien entspr. denen der **Tabellen A6.29 – A6.30**

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	
5	p = 0	0,06%	0,07%	0,06%	0,06%	0,05%	0,07%	0,05%	0,06%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,07%	0,05%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,08%	0,05%	0,05%	0,07%	0,08%	0,05%	-	-
7	p = 0	0,06%	0,08%	0,07%	0,06%	0,06%	0,07%	0,07%	0,08%	0,07%	0,07%	0,07%	0,08%	0,06%	0,07%	0,07%	0,08%	0,07%	0,07%	0,08%	0,08%	0,08%	0,08%	0,08%	0,09%	0,08%	-
5	p = 1	7,78%	7,82%	7,79%	7,75%	6,93%	7,88%	7,70%	7,64%	7,27%	6,94%	8,13%	7,67%	7,49%	7,42%	6,38%	7,17%	7,03%	7,32%	7,32%	6,29%	7,62%	7,68%	7,37%	7,76%	6,00%	-
7	p = 1	7,34%	7,24%	7,58%	7,15%	5,32%	7,42%	7,50%	7,19%	7,23%	5,26%	7,12%	7,53%	7,76%	7,58%	5,61%	8,08%	8,05%	7,72%	7,74%	5,62%	8,00%	7,55%	7,55%	7,18%	5,43%	-
5	p = 2	13,10%	12,95%	12,97%	12,40%	9,44%	13,35%	12,81%	12,55%	12,63%	9,65%	5,05%	4,23%	4,01%	6,31%	3,69%	13,61%	13,31%	13,63%	14,12%	9,81%	13,83%	14,00%	14,19%	14,65%	10,41%	-
7	p = 2	13,68%	13,71%	13,77%	13,35%	8,75%	14,99%	15,34%	15,38%	14,97%	9,13%	24,81%	24,72%	23,23%	23,61%	18,82%	16,49%	16,29%	15,38%	15,21%	9,09%	17,38%	17,04%	16,70%	15,91%	9,11%	-
5	p = 5	20,06%	20,93%	20,51%	17,90%	9,70%	25,00%	25,76%	23,73%	22,91%	11,62%	22,97%	25,58%	21,89%	20,24%	9,83%	24,45%	25,40%	26,44%	25,38%	12,43%	24,40%	24,51%	23,69%	19,94%	9,41%	-
7	p = 5	25,80%	22,67%	21,66%	20,96%	8,51%	22,77%	22,94%	21,32%	17,80%	6,75%	31,38%	32,63%	30,65%	26,80%	9,75%	24,05%	24,80%	22,34%	16,68%	7,26%	37,74%	35,60%	33,76%	27,00%	9,46%	-

Tabelle A6.44 Oberschwingungsverhältnis $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ des gemessenen Abgangssummenstroms für $k = 5, 7; p = 0, 1, 2, 5;$
Standardtopologie mit B6R-Last; gelöschtes Netz; die Fehlerszenarien entspr. denen der **Tabellen A6.31 – A6.38**

	Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
k	Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	
5	p = 0	0,03%	0,33%	0,32%	0,32%	0,31%	0,32%	0,29%	0,30%	0,30%	0,30%	0,32%	0,30%	0,31%	0,29%	0,28%	0,31%	0,23%	0,31%	0,28%	0,29%	0,30%	0,29%	0,30%	0,31%	0,28%	-
7	p = 0	1,90%	0,19%	0,19%	0,20%	0,21%	0,20%	0,22%	0,20%	0,21%	0,25%	0,21%	0,20%	0,22%	0,23%	0,23%	0,22%	0,22%	0,22%	0,22%	0,26%	0,24%	0,26%	0,26%	0,25%	0,29%	-
5	p = 1	8,15%	8,03%	8,00%	8,12%	7,56%	8,34%	7,49%	7,79%	7,70%	6,89%	8,89%	9,00%	9,09%	9,23%	7,88%	10,95%	10,45%	10,71%	10,23%	8,60%	14,47%	14,47%	14,67%	14,50%	12,27%	-
7	p = 1	10,91%	11,07%	11,22%	10,98%	8,44%	15,12%	15,55%	15,04%	14,93%	11,26%	17,47%	17,23%	17,52%	17,32%	12,92%	19,68%	19,74%	19,92%	19,51%	14,28%	24,86%	24,81%	24,88%	24,28%	17,60%	-
5	p = 2	14,78%	14,24%	14,29%	14,53%	10,90%	15,35%	14,24%	14,83%	15,51%	11,35%	17,77%	18,50%	17,89%	17,60%	17,74%	21,44%	21,57%	20,79%	20,41%	15,09%	29,73%	30,05%	29,12%	28,17%	20,02%	-
7	p = 2	20,28%	20,07%	19,78%	19,06%	12,04%	27,82%	27,87%	27,77%	26,64%	16,12%	31,44%	31,83%	32,18%	30,91%	18,14%	37,44%	37,09%	36,71%	35,18%	20,20%	46,99%	47,77%	45,99%	44,02%	25,14%	-
5	p = 5	6,48%	5,85%	6,43%	6,26%	3,33%	22,19%	21,13%	19,46%	21,17%	9,72%	25,24%	25,25%	25,18%	22,70%	11,76%	32,52%	31,53%	30,59%	27,35%	13,23%	53,52%	53,45%	51,14%	45,27%	20,21%	-
7	p = 5	37,26%	37,39%	35,63%	31,64%	12,81%	48,39%	46,75%	45,50%	38,72%	15,01%	56,81%	55,66%	52,66%	44,03%	17,37%	76,68%	74,81%	69,64%	57,44%	21,23%	104,69%	102,47%	91,45%	71,47%	25,43%	-

Tabelle A6.45 Leiter-Erd-Spannung $U_{IE} = f(\alpha, R_F, p)$ in V der fehlerbetroffenen Phase L1 im Erdschlussfall; Grundschwingung; Standardtopologie mit Standardlast; Netz mit isoliertem Sternpunkt; die Fehlerszenarien entsprechen denen der **Tabellen A6.1 und A6.5**

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
$p = 2$	0,11	26	165	411	1.991	68	92	229	473	2.053	102	126	259	502	2.090	136	159	293	534	2.113	205	229	364	600	2.180
$p = 36$	3,73	386	2.406	5.380	10.890	255	627	2.647	5.569	11.008	383	755	2.761	5.710	11.080	509	876	2.916	5.785	11.030	769	1.132	3.153	6.060	11.130

Tabelle A6.46 Phasenstrom $I_1 = f(\alpha, R_F, p)$ in A der fehlerbetroffenen Phase L1 im Erdschlussfall; Grundschwingung; Standardtopologie mit Standardlast; Netz mit isoliertem Sternpunkt; die Fehlerszenarien entsprechen denen der **Tabellen A6.1 und A6.5**

Istwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
$p = 2$	20,7	16,9	17,0	16,9	17,2	16,8	16,9	17,0	16,8	17,2	16,9	16,9	16,9	16,8	17,3	16,9	16,8	17,0	16,9	17,3	16,9	16,8	17,1	16,9	17,3
$p = 36$	54,6	58,1	60,1	58,7	36,9	58,7	59,1	60,5	58,4	36,9	59,0	59,6	60,8	58,8	37,0	59,6	59,7	61,6	58,5	36,8	60,1	59,9	61,4	59,0	36,7

Tabelle A6.47 Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast nach [9], [10]; Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 0$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$; Algorithmus LGS_U; die Fehlerszenarien entsprechen denen der **Tabellen A6.1 und A6.5**

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	0,0000	0,0049	0,0350	0,0916	0,4708	0,3388	0,3478	0,3837	0,4437	0,8197	0,5177	0,5258	0,5612	0,6187	1,0020	0,6897	0,6984	0,7314	0,7905	1,1775	1,0312	1,0443	1,0764	1,1383	1,5134
1 LGS U Delta	0,00%	0,49%	3,50%	9,16%	47,08%	0,55%	1,44%	5,03%	11,03%	48,64%	1,77%	2,58%	6,12%	11,87%	50,20%	2,30%	3,17%	6,47%	12,38%	51,08%	3,12%	4,43%	7,64%	13,83%	51,34%
5 LGS U Ist	0,0236	0,0328	-0,0106	-0,0962	-0,1141	0,0698	0,0242	0,0083	-0,0222	-0,0586	-0,0340	-0,0095	-0,0490	-0,0346	-0,0597	-0,0565	-0,0391	-0,0644	-0,0072	-0,0766	0,0172	0,0025	-0,0164	0,0709	0,1654
5 LGS U Delta	2,36%	3,28%	-1,06%	-9,62%	-11,41%	26,36%	-30,91%	-32,50%	-35,56%	-39,19%	-53,40%	-50,95%	-54,90%	-53,46%	-55,97%	-72,32%	-70,58%	-73,11%	-67,38%	-74,33%	-98,28%	-99,75%	-101,64%	-92,91%	-83,46%
7 LGS U Ist	-0,0032	-0,0026	-0,0190	-0,0572	-0,1291	0,1517	0,1444	0,1499	0,1371	0,1390	0,2320	0,2249	0,2263	0,2241	0,2131	0,3016	0,3035	0,3162	0,2876	0,3302	0,5333	0,5187	0,5459	0,5479	0,5980
7 LGS U Delta	-0,32%	-0,26%	-1,90%	-5,72%	-12,91%	18,16%	-18,90%	-18,34%	-19,63%	-19,43%	-26,80%	-27,51%	-27,37%	-27,59%	-28,69%	-36,51%	-36,32%	-35,05%	-37,91%	-33,65%	-46,67%	-48,13%	-45,41%	-45,21%	-40,21%

Tabelle A6.48 Bestimmung der Erdschlusentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast nach [9], [10]; Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 1$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$; Algorithmus LGS_U; die Fehlerszenarien entsprechen denen der **Tabellen A6.1 und A6.5**

Sollwert α	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
k Istwert RF	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0	0,0	7,3	45,5	113,6	560,0
1 LGS U Ist	-0,0004	0,0073	0,0556	0,1472	0,8035	0,3235	0,3373	0,3878	0,4873	1,1586	0,4968	0,5082	0,5606	0,6576	1,3274	0,6667	0,6716	0,7263	0,8321	1,5068	0,9886	0,9963	1,0707	1,1528	1,8483
1 LGS U Delta	-0,04%	0,73%	5,56%	14,72%	80,35%	-0,98%	0,40%	5,44%	15,40%	82,53%	-0,32%	0,82%	6,06%	15,76%	82,74%	0,00%	0,49%	5,97%	16,55%	84,01%	-1,14%	-0,37%	7,07%	15,28%	84,83%
5 LGS U Ist	-0,0015	0,0106	-0,0314	-0,0567	-0,1814	0,2754	0,2628	0,1945	0,1947	0,0467	0,3456	0,3698	0,3148	0,2749	0,1388	0,4401	0,4441	0,4310	0,3929	0,2401	0,7261	0,7621	0,7054	0,6593	0,5327
5 LGS U Delta	-0,15%	1,06%	-3,14%	-5,67%	-18,14%	5,80%	-7,05%	-13,88%	-13,86%	-28,67%	-15,44%	-13,02%	-18,52%	-22,51%	-36,12%	-22,66%	-22,26%	-23,56%	-27,37%	-42,66%	-27,39%	-23,79%	-29,46%	-34,07%	-46,73%
7 LGS U Ist	-0,0004	-0,0034	-0,0187	-0,0359	-0,1071	0,3163	0,2951	0,2892	0,2581	0,2194	0,4410	0,4454	0,4036	0,3956	0,3737	0,5744	0,5693	0,5575	0,5498	0,4804	0,9100	0,9551	0,9160	0,8690	0,8072
7 LGS U Delta	-0,04%	-0,34%	-1,87%	-3,59%	-10,71%	-1,70%	-3,83%	-4,41%	-7,52%	-11,40%	-5,90%	-5,46%	-9,64%	-10,44%	-12,63%	-9,23%	-9,74%	-10,91%	-11,69%	-18,63%	-9,01%	-4,50%	-8,40%	-13,11%	-19,28%

Anhang 7

A.7 Quelltexte der Algorithmen

A.7.1 MATLAB[®]-Code zum Algorithmus KUB_U

```

1  %Erdschlussentfernungsberechnung auf einem homogenen Stichabgang
2  %Lösung des vollständigen Systems mittels kubischer Gleichung
3  %Algorithmus KUB_U
4  %Markus Mayer, 12.02.2012
5
6  format compact
7  format short g
8
9  k = 7;                %Ordnungszahl k der Harmonischen festlegen
10 f = k*50;            %Auswertungsfrequenz f in Hertz
11
12 %Leitungsparameter in symmetrischen Komponenten
13 ZM=9+k*8.184i;       %Mitimpedanz in OHM
14 Z0=13.104+k*26.904i; %Nullimpedanz in OHM
15 CB=184.8;            %Betriebskapazität in nF
16 C0=115.2;           %Kapazität des Nullsystems in nF
17
18 %Leitungsparameter im Vier-Leiter-Modell
19 ZL=ZM;               %Leiterimpedanz in OHM
20 ZE=(Z0-ZM)/3;       %Erdimpedanz in OHM
21 CE=C0;               %Leiter-Erd-Kapazität in nF
22 CK=(CB-C0)/3;      %Koppelkapazität in nF
23
24 %Berechnung Koppel- und Leiter-Erd-Impedanzen und -admittanzen
25 %f in Hz; CE, CK in nF
26 ZCE = 1e9/(1i*2*pi*f*CE); %gesamte Leiter-Erd-Impedanz in OHM pro Phase
27 YCE = 1/ZCE;         %Admittanz
28 ZCK = 1e9/(1i*2*pi*f*CK); %gesamte Koppelimpedanz in OHM pro Phase; Dreieckschaltung
29 YCK = 1/ZCK;        %Admittanz
30
31 %Berechnung der Zeiger aus dem eingelesenen Datensatz
32 %Summe(1)..Summe(14): Platzhalter für Real- und Imaginärteile d. Zeiger
33 %Summe(1)..Summe(14) mit Null vorbelegen
34 Summe = zeros(1,14);
35
36 %Umsortieren der eingelesenen Datenreihen in die Matrix "feld"
37 %vorher: B(1)..B(3) = I1..I3; F(1)..F(3) = U1E..U3E; G: IS
38 %nachher: feld(1)..feld(7) = I1, I2, I3, U1E, U2E, U3E, IS
39 %ACHTUNG: Der 2. Index indiziert das Array, der erste den Inhalt
40 feld = B(:,1);
41 feld(:,2) = B(:,2);
42 feld(:,3) = B(:,3);
43 feld(:,4) = F(:,1);
44 feld(:,5) = F(:,2);
45 feld(:,6) = F(:,3);
46 feld(:,7) = G(:,1);
47
48 %nspc = number samples per cycle
49 %Abtastfrequenz 50 kHz entspricht 1000 samples bei 50 Hz
50 nspc = 1000/k;
51
52 %npdw = number periods in data window
53 npdw = 1000/nspc;
54
55 %Durchführen der DFT;
56 for kk = 0:(nspc*k-1) %pro sample
57     for m = 1:7 %für jedes Feld
58         Summe(2*m-1) = Summe(2*m-1) + feld(kk+1,m)*cos(kk*pi*2/nspc);
59         Summe(2*m) = Summe(2*m) + feld(kk+1,m)*sin(kk*pi*2/nspc);
60     end
61 end
62
63 %Real- und Imaginärteile der Ströme
64 I1_re = Summe(1) *2 / nspc /npdw;
65 I1_im = Summe(2) *2 / nspc /npdw;
66 I2_re = Summe(3) *2 / nspc /npdw;
67 I2_im = Summe(4) *2 / nspc /npdw;
68 I3_re = Summe(5) *2 / nspc /npdw;
69 I3_im = Summe(6) *2 / nspc /npdw;
70 IS_re = Summe(13) *2 / nspc /npdw;
71 IS_im = Summe(14) *2 / nspc /npdw;
72
73 %Real- und Imaginärteile der Spannungen
74 U1E_re = Summe(7) *2 / nspc /npdw;
75 U1E_im = Summe(8) *2 / nspc /npdw;
76 U2E_re = Summe(9) *2 / nspc /npdw;

```

```

77     U2E_im = Summe(10) *2 / nspc /npdw;
78     U3E_re = Summe(11) *2 / nspc /npdw;
79     U3E_im = Summe(12) *2 / nspc /npdw;
80
81     %Ströme: Bildung komplexer Zeiger und Gewichtung mit Modellfaktor
82     I1 = complex(I1_re, -I1_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
83     I2 = complex(I2_re, -I2_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
84     I3 = complex(I3_re, -I3_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
85     IS = complex(IS_re, -IS_im);
86     IS = (((IS/2.2)*2.105263158)*100)/(sqrt(2));
87
88     %Spannungen: Bildung komplexer Zeiger und Gewichtung mit Modellfaktor
89     U1E = complex(U1E_re, -U1E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
90     U2E = complex(U2E_re, -U2E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
91     U3E = complex(U3E_re, -U3E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
92
93     %Korrektur bei anderem Meßbereich des OR2300
94     %U1E = U1E/1000;
95     %IS = IS/1000;
96 %Zeigerbildung ENDE
97
98 %Bestimmung der effektiven externen Strominjektion I21
99 I21 = -IS;
100
101 %Spaltenvektor E der Eingangsgrößen
102 E = [I1; I2; I3; 0; U1E; U2E; U3E];
103
104 %Stromkorrektur des Vorschaltgliedes
105 %Matrix T1b des vorderen Übertragungsgliedes mit YCE/2 und YCK/2
106 T1b = [1 0 0 0 -(YCE/2+YCK) YCK/2 YCK/2;
107        0 1 0 0 YCK/2 -(YCE/2+YCK) YCK/2;
108        0 0 1 0 YCK/2 YCK/2 -(YCE/2+YCK);
109        0 0 0 1 YCE/2 YCE/2 YCE/2;
110        0 0 0 0 1 0 0;
111        0 0 0 0 0 1 0;
112        0 0 0 0 0 0 1];
113
114 %Berechnung Spaltenvektor A der korrigierten Eingangsgrößen
115 A = T1b * E;
116
117 %Korrigierte Ströme den Ausgangsströmen zuordnen
118 I1A = A(1);
119 I2A = A(2);
120 I3A = A(3);
121 I4A = A(4);
122 %Stromkorrektur des Vorschaltgliedes ENDE
123
124 %erste Zeile der aktuellen Ausgabe:
125 disp('##### Algorithmus: KUB_U #####')
126
127 %Berechnung der komplexen Hilfsgrößen H1 bis H5
128 H1 = (2*ZCE+3*ZE+ZL)*(I1A*ZL-I4A*ZE)+U1E*(3*ZE+ZL);
129 H2 = 3*I21*ZE;
130 H3 = (3*ZE+ZL)*(I4A*ZE-I1A*ZL);
131 H4 = -(U1E+U2E+U3E)-(I4A+I21)*(2*ZCE+3*ZE+ZL);
132 H5 = U1E*(2*ZCE+3*ZE+ZL);
133
134 %Berechnung der Koeffizienten der kubischen Gleichung in alpha_var
135 q0 = imag(H4*conj(H5));
136 q1 = imag(H1*conj(H4)+H2*conj(H5));
137 q2 = imag(H1*conj(H2)+H3*conj(H4));
138 q3 = imag(H3*conj(H2));
139
140 %Deklaration alpha_var als symbolische Variable
141 syms alpha_var
142
143 %Lösung der kubischen Gleichung
144 %q0 + q1*alpha_var + q2 * alpha_var^2 + q3 * alpha_var^3 = 0
145 %erg: dreidimensionaler Lösungsvektor
146 erg = double(solve(q0 + q1*alpha_var + q2 * alpha_var^2 + q3 * alpha_var^3,alpha_var));
147
148 %Bestimmung der betragsmäßig kleinsten, reellen Lösung alpha aus den drei
149 %Komponenten des Lösungsvektors
150 %Vorbelegung alpha mit großem Wert
151 alpha = 1e120;
152 %Prüfung des Imaginärteils aller drei Lösungen
153 for kk = 1:3
154     if (abs(imag(erg(kk))) <= 1e-3)
155         %Imaginärteil höchstens 0.001 => betrachtete Lösung ist reell
156         if (abs(erg(kk)) < abs(alpha))
157             %alpha enthält immer die betragsmäßig kleinste Lösung
158             alpha = erg(kk);
159         end
160     end
161 end

```

```

162 %Berechnung des Fehlerwiderstandes RF
163 RF = (real(H5)-alpha^2*real(H3)-alpha*real(H1))/(alpha*real(H2)+real(H4));
164
165 %Berechnung aller unbekanntnen Zweigströme aus dem LGS: C1 = M1 * X1
166 %Lösungsvektor: X1 = [I6; I10; I11; I12; I13; I15; I16; I18; I20]
167 C1 = [0; -I2A*ZL+I4A*alpha*ZE+U2E; -I3A*ZL+I4A*alpha*ZE+U3E; -I4A-I21; 0; I1A; 0; I2A; 0];
168
169 M1 = [ (1-alpha)*ZE RF -2*ZCE 0 0 (alpha-1)*ZL 0 0 0
170 (alpha-1)*ZE 0 0 2*ZCE 0 0 0 0 0
171 (alpha-1)*ZE 0 0 0 2*ZCE 0 0 0 0
172 -1 1 0 0 0 0 0 0 0
173 1 0 1 1 1 0 0 0 0
174 0 1 0 0 0 1 0 0 0
175 0 0 -1 0 0 1 -1 0 0
176 0 0 0 1 0 0 0 1 0
177 0 0 0 0 0 0 1 1 1];
178
179 X1 = M1\C1;
180
181 %Berechnung der Lasten mit Koppelkapazitäten ZK1, ZK2
182 %aus dem LGS: C2 = M2 * X2; Lösungsvektor: X2 = [ZK1; ZK2]
183 C2 = [(X1(5)-X1(4))*2*ZCE; (X1(4)-X1(3))*2*ZCE];
184
185 M2 = [ X1(9)-X1(8) 0
186 X1(8) -X1(7)];
187
188 X2 = M2\C2;
189
190 %Elimination der Koppelkapazitäten aus ZK1, ZK2
191 Z1 = X2(1)/(1-3*X2(1)*YCK);
192 Z2 = Z1*(X2(2)-YCK*(2*X2(2)+X2(1))*X2(1))/(X2(1)*(1-YCK*(2*X2(2)+X2(1))));
193
194 %Ausgabe der Lösung
195 %Ausgabe der Eingangsgrößen
196 disp(['U1E [V] = ', num2str(U1E), ' = ', num2str(abs(U1E)), ' * exp(', num2str(angle(U1E)*180/pi), '° * j)'])
197 disp(['U2E [V] = ', num2str(U2E), ' = ', num2str(abs(U2E)), ' * exp(', num2str(angle(U2E)*180/pi), '° * j)'])
198 disp(['U3E [V] = ', num2str(U3E), ' = ', num2str(abs(U3E)), ' * exp(', num2str(angle(U3E)*180/pi), '° * j)'])
199 disp(['I1 [A] = ', num2str(I1), ' = ', num2str(abs(I1)), ' * exp(', num2str(angle(I1)*180/pi), '° * j)'])
200 disp(['I2 [A] = ', num2str(I2), ' = ', num2str(abs(I2)), ' * exp(', num2str(angle(I2)*180/pi), '° * j)'])
201 disp(['I3 [A] = ', num2str(I3), ' = ', num2str(abs(I3)), ' * exp(', num2str(angle(I3)*180/pi), '° * j)'])
202
203 %Ausgabe berechneter Größen
204 %Außenleiterspannungen am Abgangsanfang
205 U21=U2E-U1E;
206 disp(['U21 [V] = ', num2str(U21), ' = ', num2str(abs(U21)), ' * exp(', num2str(angle(U21)*180/pi), '° * j)'])
207 U13=U1E-U3E;
208 disp(['U13 [V] = ', num2str(U13), ' = ', num2str(abs(U13)), ' * exp(', num2str(angle(U13)*180/pi), '° * j)'])
209 U32=U3E-U2E;
210 disp(['U32 [V] = ', num2str(U32), ' = ', num2str(abs(U32)), ' * exp(', num2str(angle(U32)*180/pi), '° * j)'])
211 %Spannungen über dem Lastelement
212 UL32=U3E-U2E+(I2A-I3A)*ZL;
213 disp(['UL32 [V] = ', num2str(UL32), ' = ', num2str(abs(UL32)), ' * exp(', num2str(angle(UL32)*180/pi), '° * j)'])
214 UL21=-I2A*ZL+U2E-U1E+I1A*alpha*ZL;
215 disp(['UL21 [V] = ', num2str(UL21), ' = ', num2str(abs(UL21)), ' * exp(', num2str(angle(UL21)*180/pi), '° * j)'])
216 %Fehlerrspannung UF
217 U10=X1(2)*RF;
218 disp(['U10 [V] = ', num2str(U10), ' = ', num2str(abs(U10)), ' * exp(', num2str(angle(U10)*180/pi), '° * j)'])
219 %Zweigströme und korrigierte Eingangsströme
220 disp(['I4A [A] = ', num2str(I4A), ' = ', num2str(abs(I4A)), ' * exp(', num2str(angle(I4A)*180/pi), '° * j)'])
221 disp(['I6 [A] = ', num2str(X1(1)), ' = ', num2str(abs(X1(1))), ' * exp(', num2str(angle(X1(1))*180/pi), '° * j)'])
222 disp(['I10 [A] = ', num2str(X1(2)), ' = ', num2str(abs(X1(2))), ' * exp(', num2str(angle(X1(2))*180/pi), '° * j)'])
223 disp(['I11 [A] = ', num2str(X1(3)), ' = ', num2str(abs(X1(3))), ' * exp(', num2str(angle(X1(3))*180/pi), '° * j)'])
224 disp(['I12 [A] = ', num2str(X1(4)), ' = ', num2str(abs(X1(4))), ' * exp(', num2str(angle(X1(4))*180/pi), '° * j)'])
225 disp(['I13 [A] = ', num2str(X1(5)), ' = ', num2str(abs(X1(5))), ' * exp(', num2str(angle(X1(5))*180/pi), '° * j)'])
226 disp(['I1A [A] = ', num2str(I1A), ' = ', num2str(abs(I1A)), ' * exp(', num2str(angle(I1A)*180/pi), '° * j)'])
227 disp(['I15 [A] = ', num2str(X1(6)), ' = ', num2str(abs(X1(6))), ' * exp(', num2str(angle(X1(6))*180/pi), '° * j)'])
228 disp(['I16 [A] = ', num2str(X1(7)), ' = ', num2str(abs(X1(7))), ' * exp(', num2str(angle(X1(7))*180/pi), '° * j)'])
229 disp(['I2A [A] = ', num2str(I2A), ' = ', num2str(abs(I2A)), ' * exp(', num2str(angle(I2A)*180/pi), '° * j)'])
230 disp(['I18 [A] = ', num2str(X1(8)), ' = ', num2str(abs(X1(8))), ' * exp(', num2str(angle(X1(8))*180/pi), '° * j)'])
231 disp(['I3A [A] = ', num2str(I3A), ' = ', num2str(abs(I3A)), ' * exp(', num2str(angle(I3A)*180/pi), '° * j)'])
232 disp(['I20 [A] = ', num2str(X1(9)), ' = ', num2str(abs(X1(9))), ' * exp(', num2str(angle(X1(9))*180/pi), '° * j)'])
233 disp(['I21 [A] = ', num2str(I21), ' = ', num2str(abs(I21)), ' * exp(', num2str(angle(I21)*180/pi), '° * j)'])
234 %Summenströme berechnet und gemessen
235 disp(['I1+I2+I3 [A] = ', num2str(I1+I2+I3), ' = ', num2str(abs(I1+I2+I3)), ' * exp(', num2str(angle(I1+I2+I3)*180/pi), '° * j)'])
236 disp(['IS [A] = ', num2str(IS), ' = ', num2str(abs(IS)), ' * exp(', num2str(angle(IS)*180/pi), '° * j)'])
237 %Elemente des Lastäquivalents mit Spannungsbezug
238 disp(['ZK1 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z2(1)), ' = ', num2str(abs(Z2(1))), '*exp(', num2str(angle(Z2(1))*180/pi), '° * j)'])
239 disp(['Z1 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z1), ' = ', num2str(abs(Z1)), ' * exp(', num2str(angle(Z1)*180/pi), '° * j)'])
240 disp(['Z1 [OHM] (Bezug: 220 V) = ', num2str(Z1*1.1), ' = ', num2str(abs(Z1*1.1)), '*exp(', num2str(angle(Z1*1.1)*180/pi), '° * j)'])
241 disp(['ZK2 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z2(2)), ' = ', num2str(abs(Z2(2))), '*exp(', num2str(angle(Z2(2))*180/pi), '° * j)'])
242 disp(['Z2 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z2), ' = ', num2str(abs(Z2)), ' * exp(', num2str(angle(Z2)*180/pi), '° * j)'])
243 disp(['Z2 [OHM] (Bezug: 220 V) = ', num2str(Z2*1.1), ' = ', num2str(abs(Z2*1.1)), '*exp(', num2str(angle(Z2*1.1)*180/pi), '° * j)'])
244 %Fehlerwiderstand mit Spannungsbezug
245 disp(['RF [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(RF), ' = ', num2str(abs(RF)), ' * exp(', num2str(angle(RF)*180/pi), '° * j)'])
246 disp(['RF [OHM] (Bezug: 220 V) = ', num2str(RF*1.1), ' = ', num2str(abs(RF*1.1)), '*exp(', num2str(angle(RF*1.1)*180/pi), '° * j)'])
247 %Fehlerentfernung alpha
248 disp(['alpha = ', num2str(alpha), ' = ', num2str(abs(alpha)), ' * exp(', num2str(angle(alpha)*180/pi), '° * j)'])

```

A.7.2 MATLAB®-Code zum Newton-Raphson-Verfahren

```

1  %Erdschlussentfernungsberechnung auf einem homogenen Stichabgang
2  %Lösung des vollständigen Systems mittels Newton-Raphson-Algorithmus
3  %Markus Mayer, 31.01.2011
4
5
6  format compact
7  format short g
8
9  k = 7;                %Ordnungszahl k der Harmonischen festlegen
10 f = k*50;            %Auswertungsfrequenz f in Hertz
11
12 %Leitungsparameter in symmetrischen Komponenten
13 ZM=9+k*8.184i;       %Mitimpedanz in OHM
14 Z0=13.104+k*26.904i; %Nullimpedanz in OHM
15 CB=184.8;           %Betriebskapazität in nF
16 C0=115.2;           %Kapazität des Nullsystems in nF
17
18 %Leitungsparameter im Vier-Leiter-Modell
19 ZL=ZM;               %Leiterimpedanz in OHM
20 ZE=(Z0-ZM)/3;       %Erdimpedanz in OHM
21 CE=C0;               %Leiter-Erd-Kapazität in nF
22 CK=(CB-C0)/3;       %Koppelkapazität in nF
23
24 %Berechnung Koppel- und Leiter-Erd-Impedanzen und -admittanzen
25 %f in Hz; CE, CK in nF
26 ZCE = 1e9/(1i*2*pi*f*CE); %gesamte Leiter-Erd-Impedanz in OHM pro Phase
27 YCE = 1/ZCE;         %Admittanz
28 ZCK = 1e9/(1i*2*pi*f*CK); %gesamte Koppelimpedanz in OHM pro Phase; Dreieckschaltung
29 YCK = 1/ZCK;        %Admittanz
30
31 %Berechnung der Zeiger aus dem eingelesenen Datensatz
32 %Summe(1)..Summe(14): Platzhalter für Real- und Imaginärteile d. Zeiger
33 %Summe(1)..Summe(14) mit Null vorbelegen
34 Summe = zeros(1,14);
35
36 %Umsortieren der eingelesenen Datenreihen in die Matrix "feld"
37 %vorher: B(1)..B(3) = I1..I3; F(1)..F(3) = U1E..U3E; G: IS
38 %nachher: feld(1)..feld(7) = I1, I2, I3, U1E, U2E, U3E, IS
39 %ACHTUNG: Der 2. Index indiziert das Array, der erste den Inhalt
40 feld = B(:,1);
41 feld(:,2) = B(:,2);
42 feld(:,3) = B(:,3);
43 feld(:,4) = F(:,1);
44 feld(:,5) = F(:,2);
45 feld(:,6) = F(:,3);
46 feld(:,7) = G(:,1);
47
48 %nspc = number samples per cycle
49 %Abtastfrequenz 50 kHz entspricht 1000 samples bei 50 Hz
50 nspc = 1000/k;
51
52 %npdw = number periods in data window
53 npdw = 1000/nspc;
54
55 %Durchführen der DFT;
56 for kk = 0:(nspc*k-1) %pro sample
57     for m = 1:7 %für jedes Feld
58         Summe(2*m-1) = Summe(2*m-1) + feld(kk+1,m)*cos(kk*pi*2/nspc);
59         Summe(2*m) = Summe(2*m) + feld(kk+1,m)*sin(kk*pi*2/nspc);
60     end
61 end
62
63 %Real- und Imaginärteile der Ströme
64 I1_re = Summe(1) *2 / nspc /npdw;
65 I1_im = Summe(2) *2 / nspc /npdw;
66 I2_re = Summe(3) *2 / nspc /npdw;
67 I2_im = Summe(4) *2 / nspc /npdw;
68 I3_re = Summe(5) *2 / nspc /npdw;
69 I3_im = Summe(6) *2 / nspc /npdw;
70 IS_re = Summe(13) *2 / nspc /npdw;
71 IS_im = Summe(14) *2 / nspc /npdw;
72
73 %Real- und Imaginärteile der Spannungen
74 U1E_re = Summe(7) *2 / nspc /npdw;
75 U1E_im = Summe(8) *2 / nspc /npdw;
76 U2E_re = Summe(9) *2 / nspc /npdw;
77 U2E_im = Summe(10) *2 / nspc /npdw;
78 U3E_re = Summe(11) *2 / nspc /npdw;
79 U3E_im = Summe(12) *2 / nspc /npdw;
80

```

```

81     %Ströme: Bildung komplexer Zeiger und Gewichtung mit Modellfaktor
82     I1 = complex(I1_re, -I1_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
83     I2 = complex(I2_re, -I2_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
84     I3 = complex(I3_re, -I3_im)*100/(1*0.01*sqrt(2)*1000);
85     IS = complex(IS_re, -IS_im);
86     IS = (((IS/2.2)*2.105263158)*100)/(sqrt(2));
87
88     %Spannungen: Bildung komplexer Zeiger und Gewichtung mit Modellfaktor
89     U1E = complex(U1E_re, -U1E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
90     U2E = complex(U2E_re, -U2E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
91     U3E = complex(U3E_re, -U3E_im)*(396.7/6.66)*(1/sqrt(2))*(20000/220);
92
93     %Korrektur bei anderem Maßbereich des OR2300
94     U1E = U1E/1000;
95     IS = IS/1000;
96 %Zeigerbildung ENDE
97
98 %Bestimmung der effektiven externen Strominjektion I21
99 I21 = -IS;
100
101 %Spaltenvektor E der Eingangsgrößen
102 E = [I1; I2; I3; 0; U1E; U2E; U3E];
103
104 %Stromkorrektur des Vorschaltgliedes
105 %Matrix T1b des vorderen Übertragungsgliedes mit YCE/2 und YCK/2
106 T1b = [1 0 0 0 -(YCE/2+YCK) YCK/2 YCK/2;
107        0 1 0 0 YCK/2 -(YCE/2+YCK) YCK/2;
108        0 0 1 0 YCK/2 YCK/2 -(YCE/2+YCK);
109        0 0 0 1 YCE/2 YCE/2 YCE/2;
110        0 0 0 0 1 0 0;
111        0 0 0 0 0 1 0;
112        0 0 0 0 0 0 1];
113
114 %Berechnung Spaltenvektor A der korrigierten Eingangsgrößen
115 A = T1b * E;
116
117 %Korrigierte Ströme den Ausgangsströmen zuordnen
118 I1A = A(1);
119 I2A = A(2);
120 I3A = A(3);
121 I4A = A(4);
122 %Stromkorrektur des Vorschaltgliedes ENDE
123
124 %erste Zeile der aktuellen Ausgabe:
125 disp('##### Newton-Raphson-Algorithmus #####')
126
127 %Startwerte für Newton-Raphson setzen
128 alpha = 0.5;
129 RF = 0;
130 I6 = 0;
131 I10 = -I21;
132 I11 = 0;
133 I12 = 0;
134 I13 = 0;
135 I15 = I1A-I10;
136 %Startwerte für Newton-Raphson setzen ENDE
137
138 %Lösungsvektor als Spaltenvektor aufbauen; Transposition mittels .'
139 %mit X = [I6 I10 I11 I12 I13 I15 alpha RF]
140 X = [real(I6); imag(I6); real(I10); imag(I10); real(I11); imag(I11);
141      real(I12); imag(I12); real(I13); imag(I13); real(I15); imag(I15);
142      alpha; RF];
143
144 %jetzt Newton-Raphson
145 %Iterationszähler setzen
146 iter = 0;
147
148 %Schleife muß einmal durchlaufen werden
149 weiter = true;
150
151 while (weiter)
152     %Bildung von Hilfsgrößen zur vereinfachten Darstellung
153     h0 = 1-X(13);
154     h1 = complex(X(3),X(4))*X(14);
155
156     %Berechnung aktuelles Delta F durch Rückeinsetzen der
157     %aktuellen Lösung in das nichtlineare Ausgangssystem
158     GL(1) = I1A*X(13)*ZL+h1-I4A*X(13)*ZE-U1E;
159     GL(2) = h1+complex(X(1),X(2))*h0*ZE-complex(X(5),X(6))*2*ZCE-complex(X(11),X(12))*h0*ZL;
160     GL(3) = I2A*ZL+complex(X(7),X(8))*2*ZCE-complex(X(1),X(2))*h0*ZE-I4A*X(13)*ZE-U2E;
161     GL(4) = I3A*ZL+complex(X(9),X(10))*2*ZCE-complex(X(1),X(2))*h0*ZE-I4A*X(13)*ZE-U3E;
162     GL(5) = I4A+complex(X(3),X(4))+I21-complex(X(1),X(2));
163     GL(6) = complex(X(1),X(2))+complex(X(5),X(6))+complex(X(7),X(8))+complex(X(9),X(10));
164     GL(7) = I1A-complex(X(3),X(4))-complex(X(11),X(12));
165

```

```

166 %Bildung der Real- und Imaginärteile
167 for kk=1:7;
168     Delta(2*kk-1) = real(GL(kk));
169     Delta(2*kk) = imag(GL(kk));
170 end
171
172 %Aufbau des Vektors Delta F; transponierter Zeilenvektor;
173 %ACHTUNG: '.' zwingend, damit nicht auch noch konjugiert wird
174 Delta_F_Vektor = (Delta(1:14)).';
175
176 %Stoppbedingung: alle Elemente des Delta_F_Vektors <= 1e-11
177 kk = 1;
178 weiter = false;
179 while ((kk<=14) && not(weiter));
180     if (abs(Delta_F_Vektor(kk)) > 1e-11);
181         %Komponente zu groß -> weitere Iteration erforderlich
182         weiter = true;
183     end
184     kk = kk + 1;
185 end
186
187 if (weiter == true)
188
189     %Iterationszähler um eins erhöhen
190     iter = iter + 1;
191
192     %Bildung weiterer Hilfsgrößen zur Vereinfachung der JACOBI-Matrix
193     h2 = (X(13)-1)*imag(ZE);
194     h3 = (X(13)-1)*real(ZE);
195     h4 = 2*real(ZCE);
196     h5 = 2*imag(ZCE);
197     h6 = real(ZE*(complex(X(1),X(2))-I4A));
198     h7 = imag(ZE*(complex(X(1),X(2))-I4A));
199     h8 = (X(13)-1)*real(ZL);
200     h9 = (1-X(13))*imag(ZL);
201     h10= real(complex(X(11),X(12))*ZL-complex(X(1),X(2))*ZE);
202     h11= imag(complex(X(11),X(12))*ZL-complex(X(1),X(2))*ZE);
203     h12= real(I1A*ZL-I4A*ZE);
204     h13= imag(I1A*ZL-I4A*ZE);
205
206     %Bildung der JACOBI-Matrix
207
208     J = [
209         0 0 X(14) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 h12 X(3)
210         0 0 0 X(14) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 h13 X(4)
211         -h3 h2 X(14) 0 -h4 h5 0 0 0 0 h8 h9 h10 X(3)
212         -h2 -h3 0 X(14) -h5 -h4 0 0 0 0 -h9 h8 h11 X(4)
213         h3 -h2 0 0 0 0 h4 -h5 0 0 0 0 h6 0
214         h2 h3 0 0 0 0 h5 h4 0 0 0 0 h7 0
215         h3 -h2 0 0 0 0 0 h4 -h5 0 0 0 0 h6 0
216         h2 h3 0 0 0 0 0 0 h5 h4 0 0 0 0 h7 0
217         -1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
218         0 -1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
219         1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0
220         0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0
221         0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0
222         0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0];
223
224     %Berechnung der nächsten Änderungen Delta X
225     Delta_X_Vektor = J \ (-Delta_F_Vektor);
226
227     %Berechnung des aktualisierten Lösungsvektors
228     X = X + Delta_X_Vektor;
229 end
230
231 %Bildung der komplexen Ströme aus den Komponenten des Lösungsvektors
232 I6 = complex(X(1),X(2));
233 I10 = complex(X(3),X(4));
234 I11 = complex(X(5),X(6));
235 I12 = complex(X(7),X(8));
236 I13 = complex(X(9),X(10));
237 I15 = complex(X(11),X(12));
238
239 %Berechnung der unbekanntenen Lastströme aus dem LGS: C1 = M1 * X1
240 %Lösungsvektor X1 = [I16; I18; I20]
241 C1 = [I15-I11; I2A-I12; 0];
242
243 M1 = [ 1 0 0;
244       0 1 0;
245       1 1 1];
246
247 X1 = M1\C1;
248
249 %Zuweisung der Vektorkomponenten zu den komplexen Lastströmen
250 I16 = X1(1);

```



```

251 I18 = X1(2);
252 I20 = X1(3);
253
254 %Berechnung der Lasten mit Koppelkapazitäten ZK1, ZK2
255 %aus dem LGS: C2 = M2 * X2; Lösungsvektor: X2 = [ZK1; ZK2]
256 C2 = [(I13-I12)*2*ZCE; (I12-I11)*2*ZCE];
257
258 M2 = [ I20-I18    0
259       I18      -I16];
260
261 X2 = M2\C2;
262
263 %Zuweisung der Vektorkomponenten zu den Impedanzen ZK1, ZK2
264 ZK1 = X2(1);
265 ZK2 = X2(2);
266
267 %Elimination der Koppelkapazitäten aus ZK1, ZK2
268 Z1 = ZK1/(1-3*ZK1*YCK);
269 Z2 = Z1*(ZK2-YCK*(2*ZK2+ZK1)*ZK1)/(ZK1*(1-YCK*(2*ZK2+ZK1)));
270
271 %Ausgabe der Lösung
272 %Ausgabe der Eingangsgrößen
273 disp(['U1E [V] = ', num2str(U1E), ' = ', num2str(abs(U1E)), ' * exp(' , num2str(angle(U1E)*180/pi), '° * j)'])
274 disp(['U2E [V] = ', num2str(U2E), ' = ', num2str(abs(U2E)), ' * exp(' , num2str(angle(U2E)*180/pi), '° * j)'])
275 disp(['U3E [V] = ', num2str(U3E), ' = ', num2str(abs(U3E)), ' * exp(' , num2str(angle(U3E)*180/pi), '° * j)'])
276 disp(['I1 [A] = ', num2str(I1), ' = ', num2str(abs(I1)), ' * exp(' , num2str(angle(I1)*180/pi), '° * j)'])
277 disp(['I2 [A] = ', num2str(I2), ' = ', num2str(abs(I2)), ' * exp(' , num2str(angle(I2)*180/pi), '° * j)'])
278 disp(['I3 [A] = ', num2str(I3), ' = ', num2str(abs(I3)), ' * exp(' , num2str(angle(I3)*180/pi), '° * j)'])
279
280 %Ausgabe berechneter Größen
281 %Außenleiterspannungen am Abgangsanfang
282 U21=U2E-U1E;
283 disp(['U21 [V] = ', num2str(U21), ' = ', num2str(abs(U21)), ' * exp(' , num2str(angle(U21)*180/pi), '° * j)'])
284 U13=U1E-U3E;
285 disp(['U13 [V] = ', num2str(U13), ' = ', num2str(abs(U13)), ' * exp(' , num2str(angle(U13)*180/pi), '° * j)'])
286 U32=U3E-U2E;
287 disp(['U32 [V] = ', num2str(U32), ' = ', num2str(abs(U32)), ' * exp(' , num2str(angle(U32)*180/pi), '° * j)'])
288 %Spannungen über dem Lastelement
289 UL32=U3E-U2E+(I2A-I3A)*ZL;
290 disp(['UL32 [V] = ', num2str(UL32), ' = ', num2str(abs(UL32)), ' * exp(' , num2str(angle(UL32)*180/pi), '° * j)'])
291 UL21=-I2A*ZL+U2E-U1E+I1A*X(13)*ZL;
292 disp(['UL21 [V] = ', num2str(UL21), ' = ', num2str(abs(UL21)), ' * exp(' , num2str(angle(UL21)*180/pi), '° * j)'])
293 %Fehlerrspannung UF
294 U10=I10*X(14);
295 disp(['U10 [V] = ', num2str(U10), ' = ', num2str(abs(U10)), ' * exp(' , num2str(angle(U10)*180/pi), '° * j)'])
296 %Zweigströme und korrigierte Eingangsströme
297 disp(['I4A [A] = ', num2str(I4A), ' = ', num2str(abs(I4A)), ' * exp(' , num2str(angle(I4A)*180/pi), '° * j)'])
298 disp(['I6 [A] = ', num2str(I6), ' = ', num2str(abs(I6)), ' * exp(' , num2str(angle(I6)*180/pi), '° * j)'])
299 disp(['I10 [A] = ', num2str(I10), ' = ', num2str(abs(I10)), ' * exp(' , num2str(angle(I10)*180/pi), '° * j)'])
300 disp(['I11 [A] = ', num2str(I11), ' = ', num2str(abs(I11)), ' * exp(' , num2str(angle(I11)*180/pi), '° * j)'])
301 disp(['I12 [A] = ', num2str(I12), ' = ', num2str(abs(I12)), ' * exp(' , num2str(angle(I12)*180/pi), '° * j)'])
302 disp(['I13 [A] = ', num2str(I13), ' = ', num2str(abs(I13)), ' * exp(' , num2str(angle(I13)*180/pi), '° * j)'])
303 disp(['I1A [A] = ', num2str(I1A), ' = ', num2str(abs(I1A)), ' * exp(' , num2str(angle(I1A)*180/pi), '° * j)'])
304 disp(['I15 [A] = ', num2str(I15), ' = ', num2str(abs(I15)), ' * exp(' , num2str(angle(I15)*180/pi), '° * j)'])
305 disp(['I16 [A] = ', num2str(I16), ' = ', num2str(abs(I16)), ' * exp(' , num2str(angle(I16)*180/pi), '° * j)'])
306 disp(['I2A [A] = ', num2str(I2A), ' = ', num2str(abs(I2A)), ' * exp(' , num2str(angle(I2A)*180/pi), '° * j)'])
307 disp(['I18 [A] = ', num2str(I18), ' = ', num2str(abs(I18)), ' * exp(' , num2str(angle(I18)*180/pi), '° * j)'])
308 disp(['I3A [A] = ', num2str(I3A), ' = ', num2str(abs(I3A)), ' * exp(' , num2str(angle(I3A)*180/pi), '° * j)'])
309 disp(['I20 [A] = ', num2str(I20), ' = ', num2str(abs(I20)), ' * exp(' , num2str(angle(I20)*180/pi), '° * j)'])
310 disp(['I21 [A] = ', num2str(I21), ' = ', num2str(abs(I21)), ' * exp(' , num2str(angle(I21)*180/pi), '° * j)'])
311 %Summenströme berechnet und gemessen
312 disp(['I1+I2+I3 [A] = ', num2str(I1+I2+I3), ' = ', num2str(abs(I1+I2+I3)), ' * exp(' , num2str(angle(I1+I2+I3)*180/pi), '° * j)'])
313 disp(['IS [A] = ', num2str(IS), ' = ', num2str(abs(IS)), ' * exp(' , num2str(angle(IS)*180/pi), '° * j)'])
314 %Elemente des Lastäquivalents mit Spannungsbezug
315 disp(['ZK1 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(ZK1), ' = ', num2str(abs(ZK1)), ' * exp(' , num2str(angle(ZK1)*180/pi), '° * j)'])
316 disp(['Z1 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z1), ' = ', num2str(abs(Z1)), ' * exp(' , num2str(angle(Z1)*180/pi), '° * j)'])
317 disp(['Z1 [OHM] (Bezug: 220 V) = ', num2str(Z1*1.1), ' = ', num2str(abs(Z1*1.1)), ' * exp(' , num2str(angle(Z1*1.1)*180/pi), '° * j)'])
318 disp(['ZK2 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(ZK2), ' = ', num2str(abs(ZK2)), ' * exp(' , num2str(angle(ZK2)*180/pi), '° * j)'])
319 disp(['Z2 [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(Z2), ' = ', num2str(abs(Z2)), ' * exp(' , num2str(angle(Z2)*180/pi), '° * j)'])
320 disp(['Z2 [OHM] (Bezug: 220 V) = ', num2str(Z2*1.1), ' = ', num2str(abs(Z2*1.1)), ' * exp(' , num2str(angle(Z2*1.1)*180/pi), '° * j)'])
321 %Fehlerwiderstand mit Spannungsbezug
322 disp(['RF [OHM] (Bezug: 20 kV) = ', num2str(X(14)), ' = ', num2str(abs(X(14))), ' * exp(' , num2str(angle(X(14))*180/pi), '° * j)'])
323 disp(['RF [OHM] (220V) = ', num2str(X(14)*1.1), ' = ', num2str(abs(X(14)*1.1)), ' * exp(' , num2str(angle(X(14)*1.1)*180/pi), '° * j)'])
324 %Fehlerentfernung alpha
325 disp(['alpha = ', num2str(X(13)), ' = ', num2str(abs(X(13))), ' * exp(' , num2str(angle(X(13))*180/pi), '° * j)'])
326 %Iterationszahl
327 disp(['Iterationen: ', num2str(iter)])

```

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Kapitel 1	Einleitung	15
Abb. 1.1	Netzmodell in symmetrischen Komponenten [1]	18
Abb. 1.2	Netzmodell in symmetrischen Komponenten [67]	20
Abb. 1.3	Leitungsmodell erster Ordnung [49].....	23
Kapitel 2	Eigenschaften hochohmig geerdeter Netz	24
Abb. 2.1	Gelöschtes Netz im Erdschlussfall	24
Abb. 2.2	Gelöschtes Netz mit zwei Abgängen im Erdschlussfall	25
Kapitel 3	Entwicklung eines Leitungsmodells des homogenen Stichabgangs	26
Abb. 3.1	Fehlerfreier Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung.....	26
Abb. 3.2	Stichabgang mit Erdschluss als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung.....	27
Abb. 3.3	Stichabgang mit Erdschluss in vollständiger Beschaltung	28
Abb. 3.4	Symmetrische Last im fehlerfreien Normalbetrieb.....	30
Abb. 3.5	Symmetrische Last im Erdschlussfall.....	30
Tab. 3.1	Zusammenhang zwischen den symmetrischen Komponenten und den Elementen des Vier-Leiter-Modells nach [54], [85].....	26
Tab. 3.2	Untersuchte Verfahren zur Bestimmung der Erdschlussentfernung basierend auf symmetrischer bzw. unsymmetrischer Lastmodellierung	29
Kapitel 4	Mathematische Beschreibung des Stichabgangsmodells im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	31
Abb. 4.1	Fehlerbehafteter Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung; Festlegung aller Knoten und Zweigströme in vollständiger Darstellung	31
Abb. 4.2	Fehlerbehafteter Stichabgang als Π -Glied in Vier-Leiter-Ersatzschaltung; Zerlegung in Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk und Restschaltung.....	32
Abb. 4.3	Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit unsymmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk und Restschaltung	38
Abb. 4.4	Übersicht der Lösungsverfahren	42
Tab. 4.1	Vergleich der Lösungen mittels kubischer Gleichung und nach Newton-Raphson für das vollständige Stichabgangsmodell; Sollwert $\alpha = 0,5$	37
Tab. 4.2	Anzahl komplexer und reeller Gleichungen und Unbekannter im linearen Näherungsmodell abhängig von der Lastmodellierung	40

Kapitel 5	Aufbau des Messplatzes und Versuchsdurchführung.....	43
Abb. 5.1	Das Netz-Kraftwerksmodell der TU Kaiserslautern.....	43
Abb. 5.2	Übersichtsbild zum Aufbau der gesamten Versuchsanordnung	46
Tab. 5.1	Umrechnungsfaktoren des Netz-Kraftwerksmodells.....	44
Tab. 5.2	Kennwerte der Freileitungen des Netz-Kraftwerksmodells im 20-kV-Bereich	44
Tab. 5.3	Verwendete ohmsche Fehlerwiderstände im 220-V- und 20-kV-Bereich.....	45
Tab. 5.4	Betriebswerte Spannungswandler.....	47
Tab. 5.5	Betriebswerte Stromwandler	47
Tab. 5.6	Betriebswerte Messshunts	47
Tab. 5.7	Werte der Oberschwingungsspannungen bis zur Ordnungszahl $k = 25$ in Nieder- und Mittelspannungsnetzen nach EN 50160, [21], [51].....	49
Tab. 5.8	Verhältnis der Außenleiterspannungen der 5. und 7. Harmonischen zur Grundschwingung (Oberschwingungsverhältnis) am Netz-Kraftwerks- modell mit und ohne Erdschluss.....	50
Kapitel 6	Anwendung der Algorithmen im Netz mit isoliertem Sternpunkt und Analyse der Ergebnisse.....	51
Abb. 6.1	Versuchsanordnung zu Messreihe 1; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten Stich mit Standardlast.....	52
Abb. 6.2	Messreihe 1; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; Algorithmus: LGS_U; Tabelle A6.1	54
Abb. 6.3	Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; $R_F \leq 113,6 \Omega$, Algorithmus: LGS_U; Tab. A6.2.....	55
Abb. 6.4	Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei niedriger Strominjektion; $p = 2$; $R_F = 560 \Omega$, Algorithmus: LGS_U; Tab. A6.2.....	56
Abb. 6.5	Messreihe 1; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ bei hoher Strominjektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Tabelle A6.5	58
Abb. 6.6	Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei hoher Stromin- jektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Tabelle A6.6	60
Abb. 6.7	Messreihe 1; ermittelter Fehlerwiderstand $R_F = f(\alpha)$ bei hoher Stromin- jektion; $p = 36$; Algorithmus: KUB_U; Tabelle A6.6	60
Abb. 6.8	Versuchsanordnung zu Messreihe 2; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten leer laufenden Stich	62
Abb. 6.9	Versuchsanordnung zu Reihe 3; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung an einem fehlerfreien Stich mit oder ohne Last.....	68
Abb. 6.10	Versuchsanordnung zu Messreihe 4; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messung am fehlerbehafteten Stich mit B6R-Last; Fehlerstelle $\alpha = 0,5$	70
Abb. 6.11	Messreihe 4; ermittelter Fehlerort bei Standardtopologie mit B6R-Last für 7. Harmonische, Sollwert: $\alpha = 0,5 = f(p, R_F)$, Algorithmus: KUB_U; Tabelle A6.19	72
Abb. 6.12	Versuchsanordnung zu Messreihe 5; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Erdschluss zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung	74
Abb. 6.13	Versuchsanordnung zu Messreihe 6; Netz mit isoliertem Sternpunkt; Erdschluss außerhalb Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung	74

Abb. 6.14	Messreihe 5; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ auf einer Ringleitung zwischen Messstelle und erster Last bei hoher Strominjektion; $p = 36$; $\alpha = 0,5$; Algorithmus: KUB_U; Datenbasis: Tabelle A6.23.....	79
Tab. 6.1	Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	53
Tab. 6.2	Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	53
Tab. 6.3	Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	54
Tab. 6.4	Messreihe 1; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	55
Tab. 6.5	Messreihe 1; $p = 2$; Auswertung $(|\Delta Z_1|, \sigma_{Z_1}, |\Delta Z|, \sigma_Z, |\Delta\varphi_{Z1}|, |\Delta\varphi_Z|, \sigma_\varphi) = f(k)$ nach Algorithmen.....	56
Tab. 6.6	Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	57
Tab. 6.7	Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	58
Tab. 6.8	Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	59
Tab. 6.9	Messreihe 1; $p = 36$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	59
Tab. 6.10	Messreihe 1; $p = 36$; Auswertung $(|\Delta Z_1|, \sigma_{Z_1}, |\Delta Z|, \sigma_Z, |\Delta\varphi_{Z1}|, |\Delta\varphi_Z|, \sigma_\varphi) = f(k)$ nach Algorithmen.....	61
Tab. 6.11	Messreihe 2; $p = 2$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta\alpha| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$	62
Tab. 6.12	Messreihe 2; $p = 2$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta R_F| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$	63
Tab. 6.13	Messreihe 2; $p = 36$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta\alpha| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$	64
Tab. 6.14	Messreihe 2; $p = 36$; Leerlauf; Auswertung $|\Delta R_F| = f(R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; Istwert $\alpha = 1/2$	64
Tab. 6.15	Messreihe 3; Anzahl Fehldetektionen eines erdschlussbehafteten Stiches (Standardtopologie) im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	67
Tab. 6.16	Messreihe 3; Anzahl der Fehldetektionen eines fehlerfreien Stiches (Standardtopologie) im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	68
Tab. 6.17	Messreihen 5, 6; Anzahl Fehldetektionen nach (1) und (2); Strominjektion niedrig; $p = 1$; Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	75
Tab. 6.18	Messreihen 5, 6; Anzahl Fehldetektionen nach (1) und (2); Strominjektion hoch; $p = 36$; Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	75
Tab. 6.19	Messreihe 5; $p = 1$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	76
Tab. 6.20	Messreihe 5; $p = 1$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	77
Tab. 6.21	Messreihe 5; $p = 36$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschiwingung nach Algorithmen.....	78
Tab. 6.22	Messreihe 5; $p = 36$; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen.....	78

Tab. 6.23	Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabelle A6.39 für $k = 5$ und $k = 7$ der Messreihe 1; $p = 2$; Standardtopologie mit Standardlast.....	81
Tab. 6.24	Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabelle A6.39 für $k = 5$ und $k = 7$ der Messreihe 1; $p = 36$; Standardtopologie mit Standardlast.....	82
Tab. 6.25	Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabelle A6.40 für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 0, 1$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last	82
Tab. 6.26	Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabelle A6.40 für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 2$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last	83
Tab. 6.27	Kleinstes, größtes und mittleres k . Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabelle A6.40 für $k = 5$ und $k = 7$; $p = 36$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last	83
Tab. 6.28	Einfluss von Eingangsdatenfehlern auf die Ergebnisse α , R_F aufgeschlüsselt nach Algorithmen und Ordnungszahl k bei hoher Strominjektion; $p = 36$; Standardtopologie im Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	86
Tab. 6.29	Fehlergrenzen für Spannungswandler nach [8], [22].....	88
Tab. 6.30	Fehlergrenzen für Stromwandler nach [8], [22]	89
Tab. 6.31	Maximalwerte des Phasenstroms I_1 aller Fehlerzenarien nach Tabelle A6.46 und Verhältnis zum Wandlernennstrom I_n	90
Kapitel 7	Anwendung der Algorithmen im erdschlusskompensierten Netz.....	91
Abb. 7.1	Gelöschtes Netz im Erdschlussfall	91
Abb. 7.2	Versuchsanordnung zu Messreihe 7; gelöschtes Netz; Messung am fehlerbehafteten Stich mit Standardlast bei $p = 2$	94
Abb. 7.3	Versuchsanordnung zu Messreihe 8; gelöschtes Netz; Messung am fehlerbehafteten Stich mit B6R-Last	97
Abb. 7.4	Messreihe 8; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ für $p = 0$ und $p = 1$, Topologie: fehlerbehafteter Stich mit B6R-Last, 10% Überkompensation, Algorithmus: LGS_U mit der 7. Harmonischen; Tab. A6.31, A6.33.....	99
Abb. 7.5	Messreihe 8; ermittelter Fehlerort $\alpha = f(R_F)$ für $p = 2$ und $p = 5$, Topologie: fehlerbehafteter Stich mit B6R-Last, 10% Überkompensation, Algorithmus: LGS_U mit der 7. Harmonischen; Tab. A6.35, A6.37.....	99
Tab. 7.1	Abhängigkeit des Quotienten $1/k^2$ von der Ordnungszahl k	92
Tab. 7.2	Vergleich der Mess- und Ergebnisgrößen eines Netzes mit isoliertem Sternpunkt und eines gelöschten Netzes für einen speziellen Fehlerfall.....	93
Tab. 7.3	Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschwingung nach Algorithmen.....	95
Tab. 7.4	Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta\alpha|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen	95
Tab. 7.5	Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der Grundschwingung nach Algorithmen.....	96

Tab. 7.6	Messreihe 7; $p = 2$; mit Standardlast; Auswertung $(|\Delta R_F|, \sigma) = f(R_F)$ der k . Harmonischen nach Algorithmen	96
Tab. 7.7	Messreihe 8; Auswertung $|\Delta \alpha| = f(p, R_F)$ der 7. Harmonischen nach Algorithmen; Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz.....	98
Tab. 7.8	Kleinstes, größtes und mittleres 5. Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(5)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabellen A6.41, A6.42 für $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last im gelöschten Netz.....	100
Tab. 7.9	Kleinstes, größtes und mittleres 7. Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(7)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)}$ nach Tabellen A6.41, A6.42 für $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast oder B6R-Last im gelöschten Netz.....	101
Kapitel 8	Anwendung der Algorithmen bei inhomogenen Leitungsabgängen.....	103
Abb. 8.1	Gemischte Leitung mit Erdschluss auf dem zweiten Leitungsstück	103
Abb. 8.2	Inhomogener Stichabgang mit zwei Leitungsteilen in vollständiger Beschaltung.....	104
Abb. 8.3	Fehlerszenario 1; Aufspaltung der Leitung in zwei Π -Glieder.....	107
Abb. 8.4	Fehlerszenario 2; Aufspaltung der Leitung in zwei Π -Glieder.....	108
Abb. 8.5	Fehlerszenario 3; Aufspaltung der Leitung in zwei Π -Glieder.....	109
Tab. 8.1	Fehlerszenario 1; ermittelte Fehlerentfernung $(\alpha, R_F) = f(\text{Pos.})$	107
Tab. 8.2	Fehlerszenario 2; ermittelte Fehlerentfernung $(\alpha, R_F) = f(\text{Pos.})$	109
Tab. 8.3	Fehlerszenario 3; ermittelte Fehlerentfernung $(\alpha, R_F) = f(\text{Pos.})$	110
Anhang.....		114
Abb. A1.1	Übertragungsglied 1 mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen.....	114
Abb. A1.2	Übertragungsglied 2 mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen.....	116
Abb. A1.3	Π -Glied mit Bezugsrichtungen der Ein- und Ausgangsgrößen	117
Abb. A2.1	Entfernung der Koppelkapazitäten aus der errechneten Last.....	123
Abb. A3.1	Aufbau der Jacobi-Matrix J	126
Abb. A4.1	Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit unsymmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk und Restschaltung	129
Abb. A5.1	Fehlerbehafteter Stichabgang als lineares Näherungsmodell mit symmetrischer Last; Zerlegung in eine Kettenschaltung aus Reaktanznetzwerk und Restschaltung	132
Tab. A3.1	Belegung des Startvektors	127
Tab. A6.1	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\alpha, \Delta \alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; $p = 2$	135
Tab. A6.2	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; $p = 2$	135

Tab. A6.3	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(Z, \Delta Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; $p = 2$	136
Tab. A6.4	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\varphi_Z, \Delta\varphi_Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; $p = 2$	136
Tab. A6.5	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; $p = 36$	137
Tab. A6.6	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen; $p = 36$	137
Tab. A6.7	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(Z, \Delta Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; $p = 36$	138
Tab. A6.8	Messreihe 1: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\varphi_Z, \Delta\varphi_Z) = f(\alpha, R_F)$ nach Ordnungszahl k und Algorithmen; $p = 36$	138
Tab. A6.9	Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 2$; $\alpha = 0,5$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	139
Tab. A6.10	Messreihe 2: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit Leerlauf im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36$; $\alpha = 0,5$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	139
Tab. A6.11	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 2$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	140
Tab. A6.12	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 2$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	140
Tab. A6.13	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 36$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	140
Tab. A6.14	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 36$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	140
Tab. A6.15	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 2$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	141
Tab. A6.16	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 2$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	141
Tab. A6.17	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 36$; $\alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	141
Tab. A6.18	Messreihe 3: Bestimmung der Erdschlussrichtung bei Standardtopologie ohne Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Abgang erdschlussfrei; $p = 36$; $R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	141
Tab. A6.19	Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt nach Algorithmen; $\alpha = 0,5$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k, p)$	142

Tab. A6.20	Messreihe 4: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt nach Algorithmen; $\alpha = 0,5; (R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k, p)$	142
Tab. A6.21	Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 1; (\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	143
Tab. A6.22	Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 1; (R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	143
Tab. A6.23	Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36; (\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	144
Tab. A6.24	Messreihe 5: Bestimmung der Erdschlussentfernung zwischen Messstelle und (erster) Last auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; $p = 36; (R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	144
Tab. A6.25	Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 1; \alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	145
Tab. A6.26	Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 1; R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	145
Tab. A6.27	Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 36; \alpha = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	145
Tab. A6.28	Messreihe 6: Bestimmung der Erdschlussentfernung auf einer Ringleitung im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Fehlerort außerhalb Messstelle und (erster) Last; $p = 36; R_F = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	145
Tab. A6.29	Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion; $p = 2$; im gelöschten Netz nach Algorithmen; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$	146
Tab. A6.30	Messreihe 7: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie und niedriger Strominjektion; $p = 2$; im gelöschten Netz nach Algorithmen; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$	146
Tab. A6.31	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 0$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	147
Tab. A6.32	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 0$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	147
Tab. A6.33	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 1$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	148
Tab. A6.34	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 1$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	148
Tab. A6.35	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 2$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	149
Tab. A6.36	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlussentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 2$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	149

Tab. A6.37	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusssentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 5$; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen.....	150
Tab. A6.38	Messreihe 8: Bestimmung der Erdschlusssentfernung bei Standardtopologie mit B6R-Last im gelöschten Netz für $p = 5$; $(R_F, \Delta R_F) = f(R_F, k)$ nach Algorithmen	150
Tab. A6.39	Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7$; $p = 2, 36$; Standardtopologie mit Standardlast im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messreihe 1	151
Tab. A6.40	Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7$; $\alpha = 0,5$ und $p = 0, 1, 2, 36$; Standardtopologie mit Standard- und B6R-Last im Netz mit isoliertem Sternpunkt; Messreihen 1 und 4.....	151
Tab. A6.41	Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7$; $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast; gelöschtes Netz	152
Tab. A6.42	Oberschwingungsverhältnis $I_{\text{Restnetz}}^{(k)} / I_{\text{Restnetz}}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ der Erdschlussströme für $k = 5, 7$; $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit B6R-Last; gelöschtes Netz	152
Tab. A6.43	Oberschwingungsverhältnis $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ des gemessenen Abgangssummenstroms für $k = 5, 7$; $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit Standardlast; gelöschtes Netz	153
Tab. A6.44	Oberschwingungsverhältnis $I_{21}^{(k)} / I_{21}^{(1)} = f(\alpha, R_F, k, p)$ des gemessenen Abgangssummenstroms für $k = 5, 7$; $p = 0, 1, 2, 5$; Standardtopologie mit B6R-Last; gelöschtes Netz.....	153
Tab. A6.45	Leiter-Erd-Spannung $U_{1E} = f(\alpha, R_F, p)$ der fehlerbetroffenen Phase L1 im Erdschlussfall; Grundschiwingung; Standardtopologie mit Standardlast; Netz mit isoliertem Sternpunkt; die Fehlerszenarien entsprechen denen der Tabellen A6.1 und A6.5	154
Tab. A6.46	Phasenstrom $I_1 = f(\alpha, R_F, p)$ der fehlerbetroffenen Phase L1 im Erdschlussfall; Grundschiwingung; Standardtopologie mit Standardlast; Netz mit isoliertem Sternpunkt; die Fehlerszenarien entsprechen denen der Tabellen A6.1 und A6.5.....	154
Tab. A6.47	Bestimmung der Erdschlusssentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast nach [9], [10]; Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$; $p = 0$; Algorithmus LGS_U; die Fehlerszenarien entsprechen denen der Tabellen A6.1 und A6.5.....	154
Tab. A6.48	Bestimmung der Erdschlusssentfernung bei Standardtopologie mit Standardlast nach [9], [10]; Netz mit isoliertem Sternpunkt; $(\alpha, \Delta\alpha) = f(R_F, k)$; $p = 1$; Algorithmus LGS_U; die Fehlerszenarien entsprechen denen der Tabellen A6.1 und A6.5.....	154

Literaturverzeichnis

- [1] Achleitner, G.: „Earth fault distance protection“, TU Graz, Institute for Electrical Power Systems, Dissertation, 07/2008
- [2] A.Eberle GmbH & Co. KG, Frankenstraße 160, D-90461 Nürnberg; <http://www.a-eberle.de/>; Infobriefe 01 - 06, 08 – 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23
- [3] A.Eberle GmbH & Co. KG, Aalener Str. 30/32, D-90441 Nürnberg: Technische Daten des Reglers für Petersen-Spulen REG-DPA, 04/2006
- [4] A.Eberle GmbH & Co KG, Frankenstraße 160, D-90461 Nürnberg: Technische Daten des kombinierten Erdschluss- und Kurzschlussanzeigers EOR-3D, 2012
- [5] A.Eberle GmbH & Co. KG, Aalener Str. 30/32, D-90441 Nürnberg: Technische Daten des Erdschlussortungsrelais EOR 2D, 07/2006
- [6] A.Eberle GmbH & Co. KG, Aalener Str. 30/32, D-90441 Nürnberg: Bedienungsanleitung des Erdschlussortungsrelais EOR-D, 01/2010
- [7] A.Eberle GmbH & Co. KG, Aalener Str. 30/32, D-90441 Nürnberg: Technische Daten und Betriebsanleitung des Erdschlusswischerrelais EWR 22, 04/2004
- [8] ALSTOM: „Network Protection & Automation Guide“, 1st Edition July 2002, ISBN: 2-9518589-0-6
- [9] Averyanov, V.: „Fehlerortung in Netzen mit isoliertem Sternpunkt“, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrgebiet Elektrische Energieversorgung, Studienarbeit, 02/2012
- [10] Averyanov, V.: „Messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der Erdschlussentfernung in hochohmig geerdeten Netzen“, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrgebiet Elektrische Energieversorgung, Diplomarbeit, 09/2012
- [11] Becker, W.; Walter, J.: „Verfahren und Schaltungsanordnung zur Fehlerdiagnose in Hochspannungsnetzen“, Patentschrift DE 10 2004 008 994 B4, 22.12.2005
- [12] Beinhoff, H.; Völkel, S.; Pauli, W.; Conrad, R.; Nickel, H.: „Mathematik für Ingenieur- und Fachschulen“, Band 1, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 8. Auflage, 1985
- [13] Bewersdorff, J.: „Algebra für Einsteiger“, Vieweg-Verlag, 3. Auflage, 2007
- [14] Bott, C.: „Simulationstechnische Untersuchungen zur Fehlerortung in Netzen mit hochohmiger Sternpunkterdung“, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Regelungssysteme, Diplomarbeit, 04/2011
- [15] Brakelmann, H.: „Studie: Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?“ Universitätsprofessor an der Universität Duisburg-Essen/ Campus Duisburg, Energie-Transport und –Speicherung
- [16] Bultgen, M.: „Fehlerortung in Netzen mit hochohmiger Sternpunkterdung“, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrgebiet Elektrische Energieversorgung, Diplomarbeit, 12/2010
- [17] Carson, J. R.: „Wave propagation in overhead wires with ground return“, Bell System Technical Journal 5, 1926
- [18] Cichowski, R. (Hrsg.), Schlabbach, J.: „Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze“, Band 15 „Sternpunktbehandlung“, VDE-Verlag GmbH Berlin, 2002
- [19] Cichowski, R. (Hrsg.), Schossig, W.: „Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze“, Band 13 „Netzschutztechnik“, VDE-Verlag GmbH Berlin, 2. Auflage 2001
- [20] Dahmen, W., Reusken, A.: „Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, 2.Auflage, Springer-Verlag, 2008
- [21] DERlab Report No. R-002.0: „Electromagnetic Compatibility for Distributed Energy Resources“, ISBN 978-3-943517-05-7, 12/2011
- [22] Doemeland, W.: „Handbuch Schutztechnik“, 7. aktualisierte und erweiterte Auflage, VDEVerlag GmbH Berlin, 2003

- [23] Druml, G.: „Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen-Regelung“, TU Graz, Institut für Elektrische Anlagen, Dissertation, 11/2012
- [24] Druml, G., Papp, K.: „Verfahren zur Resonanzabstimmung von Erdschlusslöschspulen“, Patentschrift PCT/AT94/00158, 27.10.1994
- [25] Druml, G.: „Verfahren zur Fehlerortung in Drehstromnetzen“, Patentschrift AT 004 402 U1, 25.06.2001
- [26] Druml, G., Kugi, A., Seifert, O.: “Ein neues Wischerrelais für hochohmige Erdschlüsse”, 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona 12 - 15. Mai 2003
- [27] EAW Relaisstechnik GmbH, Hauptstr. 13, D-10317 Berlin, „Applikationsinformation Schutzgeräte D..2“, 03/2003
- [28] Edler, H.: Summenschaltung mit Stromwandlern; Archiv für Elektrotechnik, 36. Band, Heft 12, 1942
- [29] Eichhorn, K. F., Hosemann, G., Ladniak, L., Lobos, T.: „Einschwingverhalten digitaler Fourierfilter zur Echtzeitberechnung der Grundschiwingung ein- und dreiphasiger Zeitgrößen“, Archiv für Elektrotechnik 77 (1994), 267-275 Springer-Verlag 1994
- [30] Electricity Training Association, Institution of Electrical Engineers, Power System Protection, Volume 4: „Digital protection and signalling“, ISBN: 0-85296-838-8, University Press, Cambridge, 2005
- [31] ETG-Fachbericht STE 2009 „Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen - Stand, Herausforderungen, Perspektiven“; Vorträge der ETG-Fachtagung vom 27. bis 28. Januar in Dresden, VDE-Verlag, ISBN 978-3-8007-3143-5
- [32] Fickert, L., Achleitner, G.: „Verfahren zur Entfernungsortung von Erdschlüssen“, Patentschrift DE 10 2007 017 543 A1, 18.10.2007
- [33] Flosdorff, R., Hilgarth, G.: „Elektrische Energieverteilung“, B. G. Teubner Verlag Wiesbaden, 2005
- [34] FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH, 79331 Teningen, „Handbuch der Blindstrom-Kompensation“, 2002, <http://www.frako.de>
- [35] Framelsberger, W., Mayer, L.: „Erdschlußortungs-Einrichtung nach dem Pulsortungsverfahren“, Sonderdruck aus ETZ Elektrotechnik + Automation, Ausgabe 20/1996.
- [36] Geise, F.: "Erdschluß und Erdschlußrelais", erweiterter Sonderdruck aus der "Siemens-Zeitschrift", Heft 2, März 1952
- [37] Gino GmbH, 53117 Bonn, Prospekt: „Sternpunkterdungswiderstände“, 07/2005
- [38] Grigsby, L. L.: „Power system stability and control“, ISBN: 0-8493-9291-8, CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2007
- [39] Grünigen, von, D. Ch.: „Digitale Signalverarbeitung“, ISBN 978-3-446-41463-1, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, München, 2008
- [40] Hänninen, S., Lehtonen, M.: „Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay“, VTT Research Notes 2153, Espoo 2002, ISBN 951-38-6065-5
- [41] Hänninen, S.: „Single phase earth faults in high impedance grounded networks“, VTT Publications 453, Dissertation, Espoo, Finland, ISBN 951-38-5960-6, 2001
- [42] Handschin, E.: „Elektrische Energieübertragungssysteme I, II“, Kurs 2471 der Fernuniversität Hagen
- [43] Handschin, E.: „Elektrische Energieversorgung, Kapitel VII, Schutztechnik“, Skript Universität Dortmund, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, 11/2005
- [44] Herr, J.: „Harmonische Oberschwingungen – Netzqualität“, <http://www.energie.ch/harmonische-oberschwingungen-netzqualitaet>;
- [45] Herrmann, H.-J.: „Digitale Schutztechnik“, VDE-Verlag GmbH Berlin, 1997
- [46] Hubensteiner, H.: „Schutztechnik in elektrischen Netzen I“, Elektrokolleg, 2. Auflage, VDE-Verlag, ISBN 3-8007-1753-0, Januar 1993

- [47] Kerschberger, T.: „Oberschwingungsspannungen aufgrund von einphasigen Brückengleichrichtern in städtischen Verteilnetzen“, TU Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik, Diplomarbeit, 2001
- [48] Köck, G.: „Meßgerät zur Ermittlung von elektrischen Größen eines Wechselspannungsnetzes“, Patentschrift DE 198 23 706 A 1
- [49] Koglin, H.-J., Schegner, P.: „Verfahren und Vorrichtung zur Feststellung der Entfernung und der Richtung von Erdschlüssen in isolierten und kompensierten Starkstromnetzen“, Patentschrift DE 3636 367 C2
- [50] Kries-Energietechnik GmbH & Co KG, Sandwiesenstr. 19, 71334 Waiblingen, Prospekte „Wandlerstromversorgter Kurzschluss- und Erdschlussanzeiger IKI-20C“, „Erdschlusswischerrelais IKI-EDI-W“, „Erdfehlerrichtungsanzeiger IKI-10EDI“, „IKI-20PULS Kurzschluss-/ Erdschlussanzeiger für Netze mit Pulsortung“, <http://www.kries.com/>
- [51] Lang, O.: „Spannungsqualität, ein Durchblick; Wissenswertes zum Thema „Power Quality“, erläutert anhand der Norm EN 50160“, Publikation der Fa. Device GmbH, 21438 Brackel, 12/2009, <http://www.device.de/>
- [52] Mayer, M.: „Komponenten und Verfahren zum selektiven Netzschutz in gelöschten Mittelspannungsnetzen“, FernUniversität in Hagen, Lehrgebiet Elektrische Energietechnik, Diplomarbeit, 09/2007
- [53] Moeller, Fricke, Frohne, Vaske: „Grundlagen der Elektrotechnik“, B. G. Teubner Verlag Stuttgart, 1986
- [54] Nelles, D.; Tuttas, C.: Elektrische Energietechnik, B. G. Teubner 1998
- [55] Obkircher, C.: „Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze“, TU Graz, Institut für Elektrische Anlagen, Dissertation, 2008
- [56] Oswald, B. R.: „Sternpunkterdung“, Skript zur Vorlesung „Elektrische Energieversorgung II“, Universität Hannover, 2005
- [57] Oswald, B. R.: „Transformatoren“, Skript zur Vorlesung „Elektrische Energieversorgung I“, Universität Hannover, 2005
- [58] Oswald, B. R.: „Berechnung von Drehstromnetzen“, ISBN 978-3-8348-0617-8, Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [59] Papula, L.: „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, Band 2, Vieweg-Verlag, 10. Auflage, 2001
- [60] Peier, D.: „Einführung in die elektrische Energietechnik I, II“, Kurs 2465 der Fernuniversität in Hagen
- [61] Phadke, A. G., Thorp, J. S., Adamiak, M. G.: „A new measurement technique for tracking voltage phasors, system frequency, and rate of change of frequency“, IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-102, No.5, May 1983
- [62] Phadke, A. G., Thorp, J. S.: „Synchronized Phasor Measurements and Their Applications“, ISBN 978-0-387-76535-8; Springer Science + Business Media, LLC
- [63] REDUR Messwandler GmbH, 52399 Merzenich, Publikation: „Stromwandler - Technische Informationen“, <http://www.redur.de/>
- [64] Schegner, P.: „Digitaler Erdschlußuniversalschutz. Konzept und erste Realisierung.“, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Dissertation, 1989
- [65] Schegner, P., Märkel, P., Radtke, H.-J.; Seifert, O.: Results of earth fault measurements in an earth fault compensated 110-kV-system; Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 482)
- [66] Schegner, P., Eberl, G.: Computation of the earth fault distance in compensated MV-networks by evaluating steady state values; 14th PSCC, Sevilla, 24-28 June 2002

- [67] Schegner, P., Eberl, G.: Europäische Patentanmeldung EP 1 304 580 A2; „Verfahren zur Berechnung der Distanz zum Fehlerort eines einpoligen Erdfehlers in einem Energieversorgungsnetz“
- [68] Schegner, P., Erk, U.: Patentschrift DE 4428 118 C2; „Erdschlußortung in elektrischen Netzen mit einer Erdschlußspule“
- [69] Schegner, P., Rudolf, S., Igel, M.: Patentschrift DE 4401 888 A1; „Verfahren zur Bestimmung einer dem Abstand zwischen einem Fehlerort und einem Meßort proportionalen Impedanz bei unsymmetrischen Energieübertragungsleitungen“
- [70] Schlabbach, J. (Hrsg.), Metz, D.: „Netzsystemtechnik“, VDE-Verlag Berlin, 2005
- [71] Schweizer, W: „Lineare Algebra und Analytische Geometrie 1“; Themenhefte Mathematik, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1. Auflage, 1985
- [72] Siemens: „Der Erdschluß im Netzbetrieb“, Bestellnummer.: E50410-D0001-X000-A1-0070, Publikation, 1996
- [73] Siemens: SIPROTEC Compact 7SJ80 Überstromzeitschutz Ver. 4.6, technische Daten, 08/2010
- [74] Siemens: SIPROTEC Störschriebeauswertung SIGRA 4, Ver. 4.50, Handbuch, 02/2011
- [75] Siemens: „Erdfehlerschutz bei isoliertem Sternpunkt“, Applikationen für SIPROTEC Schutzgeräte der Firma Siemens, Prospekt, 2005
- [76] Siemens: „Erdfehlerschutz bei gelöschtem Sternpunkt“, Applikationen für SIPROTEC Schutzgeräte der Firma Siemens, Prospekt, 2005
- [77] Siemens: Handbuch zum SIPROTEC Distanzschutz 7SA6 ab Ver. 4.70, 02/2011
- [78] Siemens: Handbuch zum SIPROTEC Distanzschutz 7SA522 ab Ver. 4.61, 2005
- [79] Siemens: Applikationen für SIPROTEC Schutzgeräte „Schutz von kombinierten Kabel- und Freileitungsstrecken“, 2005
- [80] Siemens: „Anwendungsübersicht für SIPROTEC Schutzgeräte“, Power Transmission and Distribution, Energy Automation Division, 90026 Nürnberg, 2006
- [81] Soman, S. A.: „Computation of Phasor from Discrete Fourier Transform“, Lecture 35 webcourse of Department of Electrical Engineering, IIT Bombay, Publikation, http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Electrical%20Engineering/Power%20System%20Protection/digital_protection/DPLectures/lec35.pdf
- [82] Sprecher Automation Deutschland GmbH, Hauptstr. 13, D-10317 Berlin: „Erdschlussrichtungsrelais ERER3“, technische Unterlagen, 09/2006
- [83] Sprecher Automation Deutschland GmbH, Hauptstr. 13, D-10317 Berlin: „Digitale Schutzeinrichtungen“, technische Unterlagen, 03/2006
- [84] Swedish Neutral: „Earth Fault Locator with Automatic Arc Suppression Coil Tuning SN-NM-A1“, Technical specification, Premium power protection, <http://www.swedishneutral.se/>
- [85] Technische Universität Kaiserslautern, Lehrgebiet Elektrische Energieversorgung, Vertiefungslabor Energietechnik; Versuch 10: „Sternpunktbehandlung in elektrischen Energieversorgungsnetzen“
- [86] Trench Germany GmbH, Nürnberger Str. 199, 96050 Bamberg, „Erdschlusslöschspulen“, Prospekt, 06/2003, <http://www.trenchgroup.com>
- [87] Trench Germany GmbH, 96050 Bamberg, „Erdschlusslöschkombinationen“, 06/2003
- [88] Trench Germany GmbH, 96050 Bamberg, „EPSY-Erdschlusschutzsystem“, 06/2003
- [89] Unger, H. G., Heyen-Hinken, J.: „Theoretische Elektrotechnik I (Elektromagnetische Wellen auf Leitungen)“, Kurs 2245 der Fernuniversität in Hagen
- [90] Wagner, J., Mögel, U., Mayer, L.: „Betriebserfahrungen mit der Pulsortungsmethode“, Sonderdruck (Nr. 4862) aus Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98 (1999), H.6.S.42-46
- [91] Winter, K. M.: „Die Reststromkompensation - Ein neues Verfahren für den Erdschluss-Schutz von Kabel- und Freileitungsnetzen“ - Swedish Neutral AB - Stockholm, Schweden

-
- [92] Woodward: „MRA4 Highprotec Abgangsschutz“, Gerätehandbuch, 03/2009, <http://www.woodward.com>
- [93] Wupper, H.: „Digitale Signalverarbeitung I, II“, Kurs 2280 der Fernuniversität in Hagen
- [94] Ziegler, G.: „Digitaler Distanzschutz“, Siemens AG, Verlag Publicis MCD, München und Erlangen, 1999
- [95] Zube, B.: „Selektivschutz für elektrische Netze und Anlagen“, VDE-Verlag, Berlin, 1997

Lebenslauf

Name: Mayer
Vorname: Markus

Studium:

10/1991 - 03/1995 Elektrotechnik an der Fachhochschule Rheinland-Pfalz,
Abteilung Koblenz.
Abschluss: Dipl.-Ing. (FH)

04/2002 - 09/2007 parallel zur Berufstätigkeit weiterführendes Studium der
Elektrotechnik an der Fernuniversität in Hagen
Abschluss: Dipl.-Ing.

Promotion:

03/2008 - 04/2015 parallel zur Berufstätigkeit Promotion am Lehrgebiet Elektrische
Energieversorgung der TU Kaiserslautern