

Stromaufteilung bei Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung induktiv gekoppelter Leitungssysteme

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Vorgelegt von
Christoph Schuster BSc

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzer
Dipl.-Ing. Christian Raunig

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / November – 2012



Danksagung

Ich widme diese Masterarbeit meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und bedanke mich bei Ihnen recht herzlich.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 20.11.2012

Christoph Schuster

Kurzfassung

Die Berechnung von Kurzschlüssen in Nähe einer Station wird mit Hilfe symmetrischer Komponenten und einer Ersatzspannungsquelle am Kurzschlussort durchgeführt. Diese Vorgehensweise und der zur vereinfachten Berechnung der Stromaufteilung (Phasenseil-Mast-Erde-Erdseil) gehörige Erdseilreduktionsfaktor setzen jedoch die Reduktionswirkung von Erdseilen für die Berechnung mit symmetrischen Komponenten voraus. Die Aufteilung der Ströme in Mast und im Erdseil müssen gesondert in Phasengrößen betrachtet werden. Somit wird im Programm das im Zuge dieser Masterarbeit erstellt wurde, die Berechnung der Stromaufteilung Mast-Erdseil bei Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung der induktiv gekoppelten Leiter- und Erdseile durchgeführt. Besondere Beachtung findet hier der einpolige (Erd-)Kurzschluss gegen den Mast. Dabei teilt sich der Kurzschlussstrom unter Berücksichtigung des Kettenleiterwiderstandes und des Mastausbreitungswiderstandes des Systems auf. Der Stromfluss gegen den Mast und in den Seilen, unter Berücksichtigung der induktiven Kopplung, wird für verschiedene Szenarien dargestellt. Des Weiteren werden im Programm Mehrfachfehler wie z.B. (1-,2- und 3 pol. Fehler) implementiert. Somit können gleichzeitig beliebig viele Fehler, mit unterschiedlichen Fehlerarten und Fehlerorten berechnet werden. Das Modell wurde nach dem Knotenpotenzialverfahren erstellt und die Kopplung der Leiter mit Hilfe der Ersatzschaltung nach Clarke nachgebildet. Die Erwärmung des Erdseiles wird mit einem Temperaturmodell nachgebildet. Diese Nachbildung des Erwärmungsprozesses geschieht rein adiabatisch. Es kann daher, bei beliebiger Kurzschlussart, der Strom im Erdseil herangezogen werden, um auf die zulässige Dauer der Erwärmung bei gegebener Fläche und Materialeigenschaften, zu schließen.

Schlüsselwörter: induktive Kopplung, Kurzschluss, Erdseilreduktionsfaktor, Erdseilstrom, Seilerwärmung

Abstract

Normally the short circuit is calculated with symmetric components, but this method just works for a symmetric system by reducing the ground-wire. Therefore a method to calculate the current is given, which flows over the ground-wires and the power-poles, with symmetric components using the reduction-factor depending from many parameters. The developed model considers the inductive coupling between the conductor and parameters like power-pole-form or twist of the conductors. One of the most important short circuits is the single-pole short circuit, because in this case, the largest part of the current flows over the ground-wires and the power poles and earth causing danger to people. Furthermore it is possible to consider multiple error locations and error kinds. The model was realized with the "node potential method". The inductive coupling was realized with the equivalent circuit by Edith Clarke. The resulting warming of the ground-wire is reproduced with an adiabatically model. The calculated current of the simulated shot circuit can be used to determine the time until the maximum temperature is reached.

Keywords: inductive coupling, short circuit, warming, earth wire current, rope warming

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
1 Kurzfassung	9
1.1 Ziel.....	9
1.2 Methode	9
1.3 Ergebnisse	9
1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick	9
2 Einleitung.....	10
2.1 Bedeutung der Berechnung des Kurzschlussstromes	11
2.2 Fehlerarten im Hochspannungsnetz	12
2.3 Berechnungsverfahren	13
2.3.1 Überlagerungsverfahren	13
2.3.2 Verfahren nach der Ersatzspannungsquelle an Fehlerort.....	13
2.4 KS-Berechnung lt. Norm DIN EN 60909-3	14
3 Berechnungsmethoden	19
3.1 Allgemeines Knotenpotenzialverfahren.....	19
3.2 Vierpoltheorie/ Berücksichtigung der Koppelwirkung	25
3.2.1 Methoden zur Bestimmung der Vierpolersatzschaltung.....	25
3.2.2 Vierpoltheorie zweier Leiter.....	26
4 Erdseil einer Freileitung	28
4.1 Aufgaben des Erdseiles	28
4.2 Aufbau des Erdseiles	29
4.3 Durchhang der Seile.....	30
4.4 Anforderungen an das Erdseil.....	31
4.4.1 Mechanische Festigkeit.....	31
4.4.2 Elektrische Beanspruchung	32
4.4.3 Thermisches Verhalten	33
4.5 Kenngrößen von Leiterseilen	33
5 Leiterschleifen mit Erdrückleiter	35

5.1	Stromverteilung bei Gleichstrom	35
5.2	Stromverteilung bei Wechselstrom.....	35
5.3	Berechnung der Impedanzen von Leiterschleifen	36
6	Ausgangsbasis, Programm.....	39
6.1	Graphische Oberfläche, Eingangsdaten	39
6.2	Aufbau des Programmes.....	40
6.3	Übersichtsplan der Funktionen.....	40
6.3.1	Funktion „Y _Z “	42
6.3.2	Funktion „Ersatzelemente“	43
6.3.3	Funktion „generieren“.....	44
6.3.4	Funktion „C“	46
6.3.5	Funktion „knoten“	47
6.4	Beschreibung der Matrizen	48
7	Modellbildung.....	50
7.1	Knotennummerierung je Ersatzelement	50
7.2	Knotennummerierung je Spannfeld.....	51
7.3	Knotennummerierung je Leitungsabschnitt	52
7.4	Implementierung des Kurzschlussbügels.....	52
7.4.1	Implementierung von Mehrfachfehlern.....	55
7.4.2	Variation des Fehlerortes	55
7.5	Vorgabe der Anfangs-Abschlussadmittanzen	55
7.6	Sternpunkt, niederohmige Erdung.....	56
7.7	Quellenumwandlung.....	58
7.8	Arten der Quellenvorgabe	61
7.8.1	Vorgabe eines Knotenstromes.....	61
7.8.2	Vorgabe eines Zweigstromes.....	62
7.8.3	Vorgabe einer Knotenspannung	64
8	Überprüfung der Methode	67
8.1	Realisierte Stromvorgabe bei Erdkurzschluss.....	67
8.2	Y-Matrix	68
8.3	Nachbildung mit Matlab®-Simulink	70

8.4	Vergleich der Methoden bei einpoligem Kurzschluss.....	71
8.4.1	Stromfluss über Mast	71
8.4.2	Stromfluss im Erdseil	73
9	Szenarien	75
9.1	Einseitig gespeiste Leitung.....	75
9.1.1	Szenario 1, KS Phase L2.....	78
9.1.2	Szenario 1, 2pol. KS ohne Erde.....	79
9.1.3	Szenario 1, 3pol. KS ohne Erde.....	79
9.1.4	Szenario 1, unterschiedliche Masterdungswiderstände.....	80
9.1.5	Szenario 1, 2 Systeme, 2 Erdseile	81
9.2	Zweiseitig gespeiste Leitung	83
9.2.1	Szenario 2, 2 Systeme, 2 Erdseile, 2-pol. KS ohne Erde.....	85
9.3	Dreiseitig gespeiste Leitung, T-Leitung	86
9.3.1	Szenario 3, 2 Systeme, 2 Erdseile, unterschiedliche Masterdungswiderstände 88	
10	Erwärmungsprozess	91
10.1	Einflussfaktoren des Erwärmungsprozesses	91
10.2	Kurzschlussstromdichte	92
10.3	Modellbildung	94
11	Diskussion	98
11.1	Zusammenfassung.....	98
11.2	Kritische Betrachtung der Ergebnisse	98
11.3	Ausblick	99
12	Literaturverzeichnis	100
13	Anhang	101

1 Kurzfassung

1.1 Ziel

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Leiterseilerwärmung unter Berücksichtigung der induktiven Kopplung der Seile im Falle eines Kurzschluss in der Nähe einer Station zu erfassen und aufgrund der Stromaufteilung auf Erdseil und Mast Rückschlüsse auf die maximal zulässige Dauer des Kurzschlussstromes, unter Berücksichtigung des Erwärmungsprozess insbesondere beim Erdseil zu schließen.

1.2 Methode

Die induktive Kopplung der Seile wird gemäß dem Vierpolverfahren nach Clarke [1] realisiert. Nachbildung der Situation basiert auf dem Knotenpotenzialverfahren. Zur Auswertung der maximalen Kurzschlussdauer wird die vorhandene und maximale Leiterseiltemperatur unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften herangezogen.

1.3 Ergebnisse

Die Stromaufteilung auf Erdseil und Masten kann bei gegebenen Parametern unter der Berücksichtigung der induktiven Kopplung erfolgen. Somit kann ein beliebiges Szenario erstellt und der Realität angepasst werden. Die unterschiedlichen Einflüsse in Bezug auf die induktive Kopplung sind in der Masterarbeit angeführt. Die zulässige Zeit die der Fehler verweilen darf bis die maximale Leiterseiltemperatur erreicht wird, kann mit Hilfe des Temperaturmodells berechnet werden.

1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dieser Arbeit wird der Grundstein zur Berechnung thermischer Effekte auf Erdseile bei induktiver Beeinflussung im Kurzschlussfall gelegt. Eine Erweiterung des Modells in Bezug auf die kapazitive Kopplung der Leiterseile ist möglich wobei bei kapazitiver Beeinflussung die Ladespannung sowie die Ableitströme interessieren. Auswirkungen auf die Schutzeinrichtungen bei geringem Querschnitt des Erdseiles und Schutzversagen in der ersten Stufe müssen detaillierter untersucht werden.

2 Einleitung

Durch die Einbindung neuer Kraftwerke, Umspannwerke, Windparks etc. in das bestehende Hochspannungsnetz, erhöht sich die Kurzschlussleistung an den Netzknoten im Fehlerfall.

Da es Hochspannungsleitungen gibt, die über Jahrzehnte im Einsatz sind, muss auf die Übertragungskapazität sowie die Bewältigung der Kurzschlussströme im Fehlerfall, bei ständiger Erhöhung der Kurzschlussleistung geachtet werden.

Vor allem im Falle eines Kurzschluss mit Erdberührung fließt ein relativ großer Teil des Kurzschlussstromes über das Erdseil. Bei den meisten der über Jahrzehnte alten Hochspannungsleitungen ist das Erdseil mit einem geringeren Durchmesser als die stromführenden Seile ausgeführt, da früher das Erdseil hauptsächlich für den Blitzschutz gedacht war.

Im Erdseil ist, aufgrund der induktiven Kopplung, ein gewisser Strom im fehlerfreien Betrieb vorhanden. Somit stellt sich unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen eine gewisse Beharrungstemperatur ein. Während eines Kurzschlusses erhöht sich die Stromdichte, der Energieeintrag ist somit vom Strom zum Quadrat, vom Widerstand des Seiles und von der Dauer des Kurzschlusses abhängig.

Die Norm DIN EN 60909-3 [2] berücksichtigt die unterschiedliche induktive Kopplung der Seile nicht, sie führt den konstanten Erdseilreduktionsfaktor r und den Spannungsfaktor c ein.

Es stellt sich nun die Frage, mit welcher Dauer ein Fehler mit einer gewissen Amplitude anstehen darf, abhängig vom Kurzschlusspunkt, bis die Grenztemperatur des Erdseiles erreicht ist, da dies den geringsten Querschnitt und somit das geringste Energiespeichervermögen aufweist.

Die Zeit bis zum Erkennen und Abschalten des Erdkurzschluss/ Kurzschlusses ist relevant. Wenn jedoch ein Schutzversagen in der ersten Stufe vorliegt, löst der Schutz später, in der zweiten Stufe aus. Die Dauer des Fehlerstromes setzt sich aus der Dauer des Distanzschutzes und der Dauer bis zum Öffnen des Leistungsschalters zusammen. Die Endtemperatur im Erdseil darf die laut Norm zulässige Endtemperatur nicht überschreiten.

Die daraus gewonnenen Ergebnisse können gegebenenfalls zu einer Änderung des Schutzes bzw. zu einer Erhöhung des Durchmessers für das Erdseil führen.

Die induktive Kopplung der Leiter wurde mit der 4-Pol-Ersatzschaltung nach Clarke [1] und dem Kettenleitermodell berücksichtigt um die Ströme im Erdseil und Mast bestimmen zu können.

Mit dem Knotenpotenzialverfahren wird die Berechnung in Matlab[®] durchgeführt.

2.1 Bedeutung der Berechnung des Kurzschlussstromes

Die Berechnung des Kurzschlussstromes, vor allem die Amplitude und dessen zeitlichen Verlauf, ist für die dynamische und thermische Festigkeit der elektrischen Betriebsmittel und deren Dimensionierung von entscheidender Bedeutung.

Da die Stromtragfähigkeit von Leitern begrenzt ist, wird der Bestimmung des Kurzschlussstromes besondere Bedeutung zugemessen. Die auftretenden Kräfte sind dem Quadrat des Stromes proportional somit wird die Auslegung der mechanischen Komponenten vom Kurzschlussstrom abhängig gemacht.

Der maximale Kurzschlussstrom wird z.B. für die Betrachtung der induktiven Kopplung, Auslegung der Erdungsanlage und Einhalten der Schritt- und Berührungsspannungen benötigt. Den minimalen Kurzschlussstrom benötigt man vor allem um die Schutzeinrichtungen einzustellen.

Die Höhe und Dauer des Kurzschlussstroms sind von vielen Faktoren abhängig, die wichtigsten sind:

- Die Spannungsebene
- Generatornaher/ ferner-Kurzschluss
- Schaltzustand im Netz
- Kurzschlussort
- Anzahl der Generatoren die ins Netz speisen
- Speisen Generatoren mit Umrichter ins Netz, oder ist eine rotierende Reserve/Masse, vorhanden
- Erregungszustand der Generatoren
- Topologie des Netzes, Ring-/ Strahlenform
- Schaltzustand der Betriebsmittel, Stufenstellung der Stelltransformatoren
- Sternpunktbehandlung
- Übergangswiderstand an der Fehlerstelle
- Art des Kurzschlusses
- Auslösezeit der Schutzeinrichtung
- Verhalten des Spannungsreglers der Generatoren
- Verbraucherverhalten vor dem Kurzschluss.

Aufgrund dieser Vielzahl von Einflussfaktoren wird klar, dass ein gewisser Spielraum für den größten/ kleinsten Kurzschlussstrom gegeben ist. Die Norm DIN EN 60909-3 [2] versucht durch gewisse Maßnahmen entsprechende Annäherungen zu treffen, die auf der sicheren Seite liegen, und die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Betriebsmittel und Anlagen berücksichtigt:

- Ersatzspannungsquelle am Kurzschlussort einführen.
- Einführen des Spannungsfaktors c für die Ermittlung des größten / kleinsten Kurzschlussstromes.
- Impedanz-Korrektur für elektrische Betriebsmittel.

2.2 Fehlerarten im Hochspannungsnetz

Die Fehlerarten und damit verbundenen Spannungen bzw. Ströme im Hochspannungsnetz sind für die Erstellung der Schutzkonzepte sowie für die Dimensionierung der Komponenten von entscheidender Bedeutung.

Im Hochspannungsnetz kann zwischen 6 Arten des Kurzschluss unterschieden werden, die in Abbildung 2-1 ersichtlich sind.

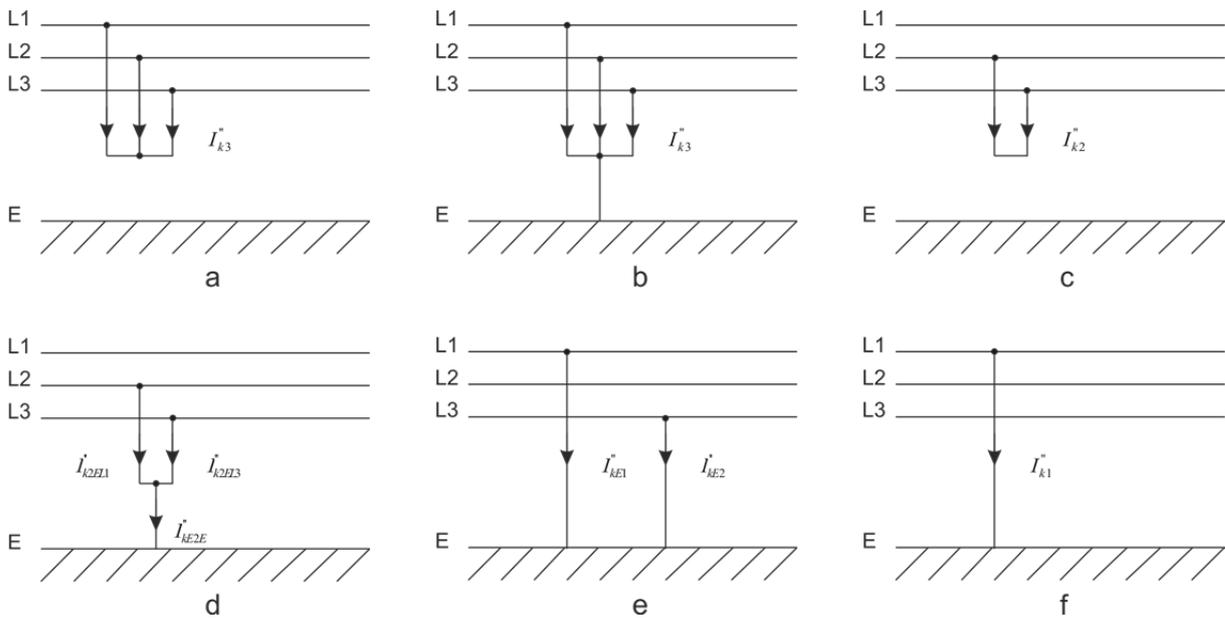


Abbildung 2-1: Kurzschlussarten im Drehstromnetz; a Dreiphasiger Kurzschluss, b Dreiphasiger Kurzschluss mit Erde, c Zweiphasiger Kurzschluss, d Zweiphasiger Kurzschluss mit Erde, e Doppelerdschluss, f Einphasiger Kurzschluss

Es muss laut Erfahrungen der jüngsten Vergangenheit der Cross-Country fault (Mehrfacherdschluss) wie in Abbildung 2-2 dargestellt berücksichtigt werden.

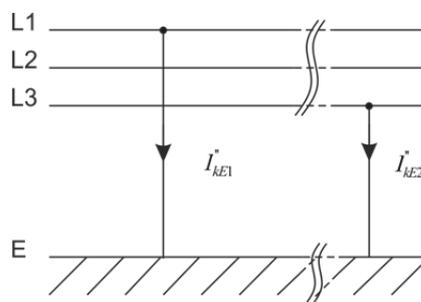


Abbildung 2-2: Cross-Country fault (Mehrfacherdschluss)

2.3 Berechnungsverfahren

Der Kurzschlussstrom kann auf zwei Arten berechnet werden:

- Überlagerungsverfahren
- Ersatzspannungsquelle

2.3.1 Überlagerungsverfahren

Beim Überlagerungsverfahren wird neben dem Anfangs-Kurzschlussstrom der zeitliche Verlauf des Stromes bestimmt.

Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Spannungswerte je Knoten, die aktuelle Position der Stufenschalter und die damit vorhandene Impedanz sowie der Lastfluss im Netz vor dem Kurzschluss bekannt sind.

Der Kurzschlussstrom wird aufgrund des aktuellen Lastflusses bestimmt. Somit muss man für jeden Knoten, unter der Voraussetzung dass die Spannung bekannt ist, den ungünstigsten Leistungsfluss finden der zum größten Kurzschlussstrom führt.

Eine Überlagerung des Netzzustandes vor dem Kurzschluss, mit dem Änderungszustand, bei Eintritt des Kurzschlusses, wird durchgeführt. Das Überlagerungsverfahren wird folgendermaßen durchgeführt:

Die Knotenpunktadmittanzmatrix Y wird für das betreffende Netz aufgestellt. Hierbei wird in aktive und passive Betriebsmittel unterschieden. Generatorknoten sind aktive Elemente wie Motoren mit nennenswerter Rückspeisung, Ersatznetze und Generatoren. Die passiven Elemente, werden durch Impedanzen/ Admittanzen nachgebildet.

2.3.2 Verfahren nach der Ersatzspannungsquelle an Fehlerort

Die Berechnung wird mit Hilfe der symmetrischen Komponenten durchgeführt. Dieses Verfahren wird in der Norm DIN EN 60909-3 [2] behandelt.

Dieses Verfahren führt eine Ersatzspannungsquelle am Kurzschlussort ein und betrachtet somit das Netz passiv. Mit der Einführung des Spannungsfaktors c wird erreicht, dass die Genauigkeit zur Berechnung des größten und kleinsten Kurzschlussstromes sich auf der sicheren Seite befindet. Wird ein Spannungsunterschied von 10% im ungestörten Netz vorausgesetzt, so wird der größte Kurzschlussstrom mit $c=1,1$ angenommen. Der Spannungsfaktor ist für den größten/kleinsten Kurzschlussstrom in Abhängigkeit der Spannungsebene in der Norm DIN EN 60909-3 [2] angeführt.

Voraussetzung für die Anwendung:

- Berechnung in symmetrischen Komponenten
- Ersatzspannungsquelle am Kurzschlussort einführen

- Impedanzen werden auf die betrachtete Spannungsebene bezogen
- Leitungskapazitäten werden nicht berücksichtigt
- Nennübersetzung der Stufensteller bei Transformatoren.

Die Vorgehensweise sieht folgendermaßen aus:

- Art des Kurzschluss und die damit einhergehenden Fehlerbedingungen annehmen
- Die Fehlerbedingungen in symmetrischen Komponenten anschreiben
- Erstellen der Ersatzschaltbilder für das Mit-Gegen- und Nullsystem unter Berücksichtigung der Fehlerbedingungen
- Ergebnisse der symmetrischen Komponenten in Phasenschreibweise transformieren.

2.4 KS-Berechnung lt. Norm DIN EN 60909-3

Die Norm DIN EN 60909-3 [2], Kurzschlussströme in Drehstromnetzen- Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde, enthält die Vorgehensweise für die Berechnung unsymmetrischer Kurzschlüsse. Betrachtet wird ein einpoliger Erdkurzschluss in der Nähe einer Anlage. Die nachfolgenden Erläuterungen enthalten die praktizierte Herangehensweise an die Problematik.

Die angeführten Formeln werden aus DIN EN 60909-3 [2] entnommen, die Abbildungen aus Oswald, D. Oeding B.R., Elektrische Kraftwerke und Netze [3] und aus DIN EN 60909-3 [2].

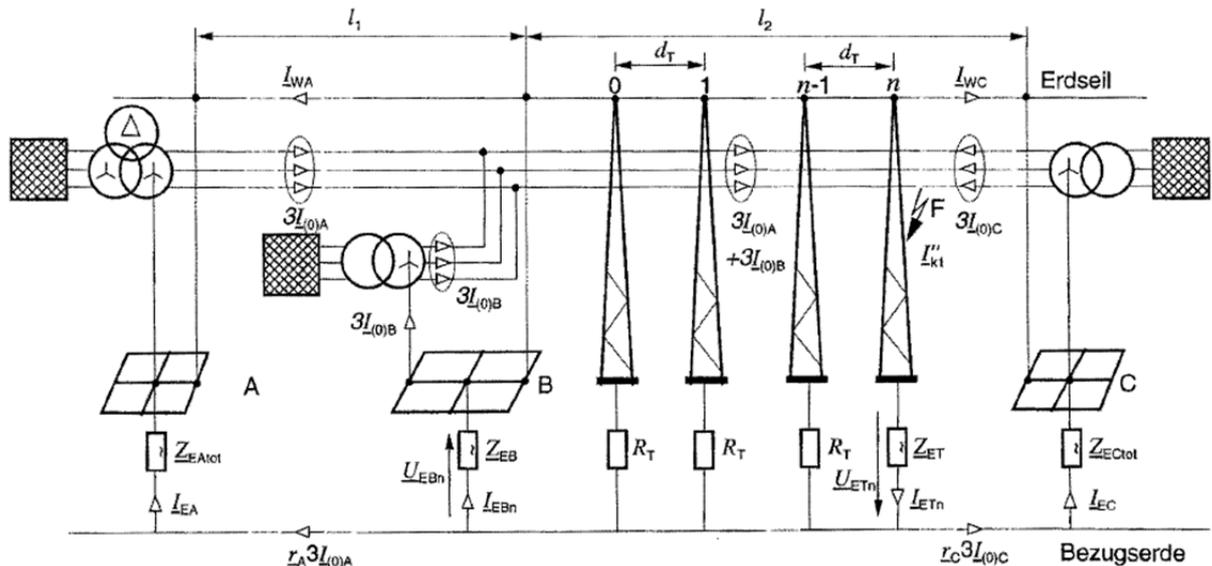


Abbildung 2-3: Beispiel zur Berechnung der Mast-/ Erde-Spannungen bei einpoligen Kurzschluss in der Nähe der Anlage B laut [2]

Das Szenario in Abbildung 2-3 wird betrachtet. Hierbei handelt es sich um einen einpoligen Kurzschluss in der Nähe der Anlage B am Mast Nr. n. Zur Bestimmung des Kurzschlussstromes wird das Ersatzspannungsquellenverfahren angewandt.

Dieses Verfahren wird folgendermaßen durchgeführt:

- Bilden der Ersatzimpedanzen des Mit-Gegen- und Nullsystems
- graphische Darstellung der symmetrischen Komponenten wurde in Abbildung 2-4 umgesetzt
- Fehlerbedingung einzeichnen und mit Hilfe der Ersatzspannungsquelle den Kurzschlussstrom vorgeben
- Ersatzimpedanz bilden laut Gleichung (2-7)
- einpoligen Kurzschlussstrom berechnen.

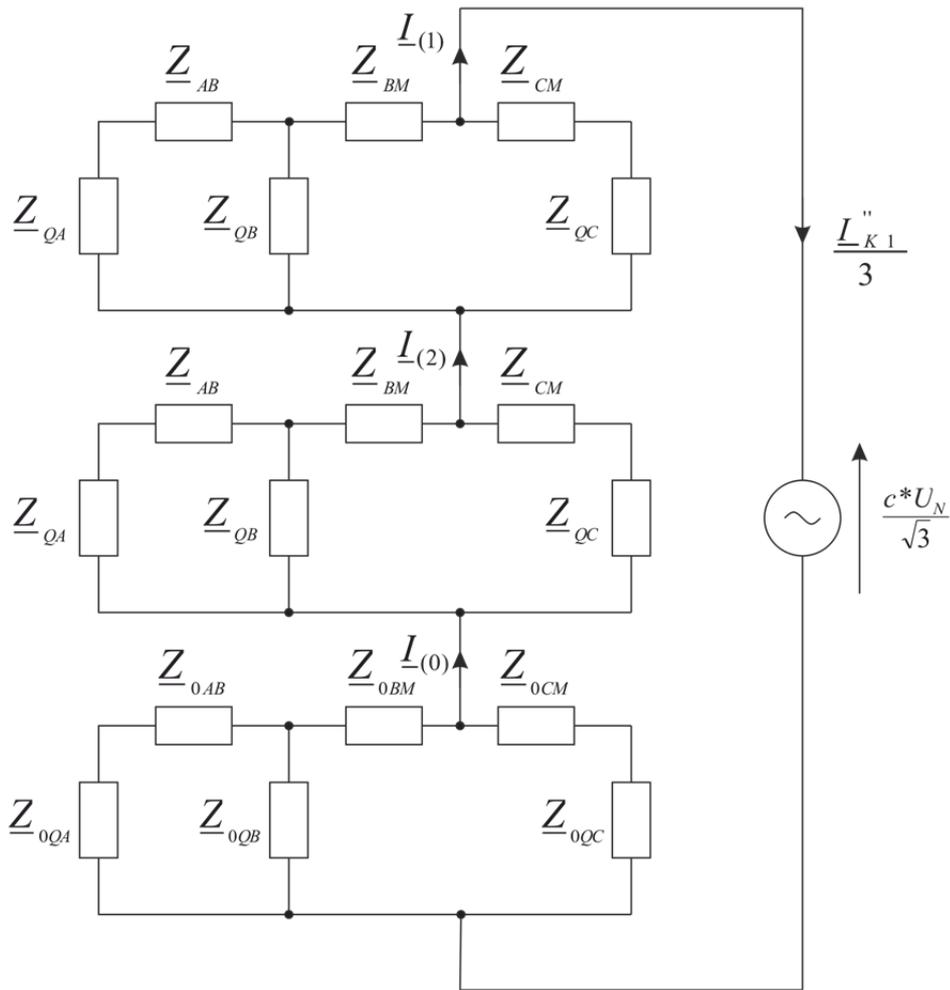


Abbildung 2-4: Ersatzquellenverfahren zur Berechnung des einpoligen-Kurzschluss

Die Gesamtimpedanz wird folgendermaßen aus Abbildung 2-4 gebildet:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_L * l_1 \quad (2-1)$$

$$\underline{Z}_{BM} = \underline{Z}_L * l_{bm} \quad (2-2)$$

$$\underline{Z}_{CM} = \underline{Z}_L * l_{cm} \quad (2-3)$$

$$\underline{Z}_{0AB} = \underline{Z}_{0L} * l_1 \quad (2-4)$$

$$\underline{Z}_{0BM} = \underline{Z}_{0L} * l_{bm} \quad (2-5)$$

$$\underline{Z}_{0CM} = \underline{Z}_{0L} * l_{cm} \quad (2-6)$$

$\underline{Z}_{AB}; \underline{Z}_{0AB}$	Impedanz/Nullimpedanz des Leitungsabschnitts AB
$\underline{Z}_{BM}; \underline{Z}_{0BM}$	Impedanz/Nullimpedanz des Leitungsabschnitts B zum Mast
$\underline{Z}_{CM}; \underline{Z}_{0CM}$	Impedanz/Nullimpedanz des Leitungsabschnitts C zum Mast
$\underline{Z}_L; \underline{Z}_{0L}$	Impedanz/Nullimpedanz der Leitung je Längeneinheit
$l_1; l_b; l_{bm}, l_{cm}, l_c$	Leitungslängen zu den Stationen bzw. Station zu Mast
c	Spannungsfaktor
U_N	Nennspannung
I''_{K1}	einpoliger Kurzschlussstrom

Die Impedanzen $\underline{Z}_{QA}; \underline{Z}_{QB}; \underline{Z}_{QC}; \underline{Z}_{0QA}; \underline{Z}_{0QB}; \underline{Z}_{0QC}$ sind gegeben.

$$\underline{Z}_{ges} = 2 * \frac{\left[\frac{(\underline{Z}_{QA} + \underline{Z}_{AB}) * \underline{Z}_{QB}}{(\underline{Z}_{QA} + \underline{Z}_{AB}) + \underline{Z}_{QB}} + \underline{Z}_{BM} \right] * (\underline{Z}_{CM} + \underline{Z}_{QC})}{\left[\frac{(\underline{Z}_{QA} + \underline{Z}_{AB}) * \underline{Z}_{QB}}{(\underline{Z}_{QA} + \underline{Z}_{AB}) + \underline{Z}_{QB}} + \underline{Z}_{BM} \right] + (\underline{Z}_{CM} + \underline{Z}_{QC})} \quad (2-7)$$

$$+ \frac{\left[\frac{(\underline{Z}_{0QA} + \underline{Z}_{0AB}) * \underline{Z}_{0QB}}{(\underline{Z}_{0QA} + \underline{Z}_{0AB}) + \underline{Z}_{0QB}} + \underline{Z}_{0BM} \right] * (\underline{Z}_{0CM} + \underline{Z}_{0QC})}{\left[\frac{(\underline{Z}_{0QA} + \underline{Z}_{0AB}) * \underline{Z}_{0QB}}{(\underline{Z}_{0QA} + \underline{Z}_{0AB}) + \underline{Z}_{0QB}} + \underline{Z}_{0BM} \right] + (\underline{Z}_{0CM} + \underline{Z}_{0QC})}$$

Der Spannungsfaktor c wird laut DIN [2] berücksichtigt.

Der einpolige Kurzschlussstrom ergibt sich zu:

$$I_{(0)} = I_{(1)} = I_{(2)} = \frac{c * U_N}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\underline{Z}_{ges}} \quad (2-8)$$

$$I''_{K1} = 3 * I_{(0)} \quad (2-9)$$

Der einphasige Kurzschlussstrom kann den einzelnen Anlagen zugeteilt werden. Mit dem nun bekannten Kurzschlussstrom wird die Aufteilung der Ströme über die jeweiligen Impedanzen des Nullsystems berechnet, denn es gilt:

$$I''_{K1} = 3 * I_{0A} + 3 * I_{0B} + 3 * I_{0C} \quad (2-10)$$

$I_{0A}; I_{0B}; I_{0C}$ Kurzschlussströme der Anlage A, B und C

Somit ist der jeweilige Anteil des Kurzschlussstromes der einzelnen Anlagen bekannt.

Zur Bestimmung des Stromflusses über Mast und Erdseil in Umspannwerknahe muss man dem Kettenleiter des Erdseil-/Mast eine besondere Aufmerksamkeit zukommen lassen.

Die Eingangsimpedanz eines unendlich¹ langen Kettenleiters, berechnet sich laut Gleichung (2-11). In Abbildung 2-5 ist die Ersatzschaltung des unendlich langen Kettenleiter dargestellt.

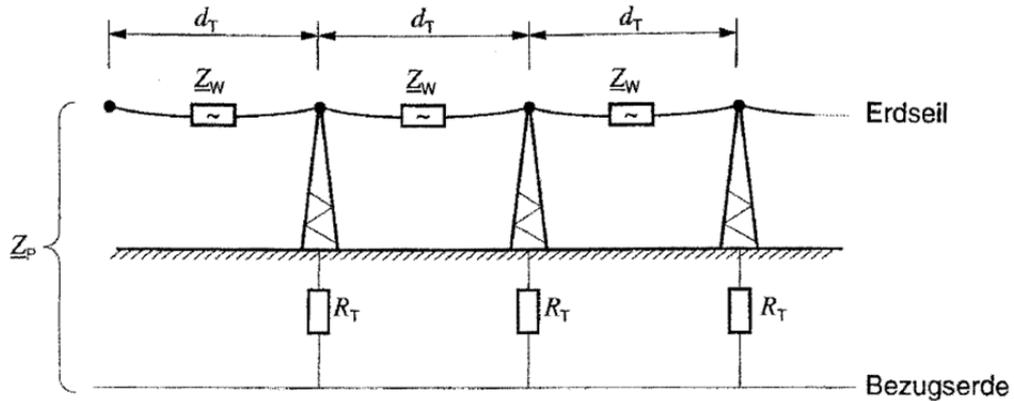


Abbildung 2-5: Impedanz des unendliche langen Erdseil/Mast-Kettenleiters laut DIN EN 60909-3 [2]

$$\underline{Z}_p = 0,5 * \underline{Z}_w + \sqrt{(0,5 * \underline{Z}_w)^2 + \underline{Z}_w * R_T}; lt. [2] \quad (2-11)$$

\underline{Z}_p Impedanz des unendlich langen Kettenleiters

Um den Kurzschlussort variieren zu können, wurde der Parameter „n“ eingeführt. Weist der Kettenleiter eine endliche Länge auf, siehe Abbildung 2-6 so wird die Eingangsimpedanz folgendermaßen bestimmt:

$$\underline{Z}_{pn} = \frac{\underline{Z}_p * (\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_p) * \underline{k}^n + [\underline{Z}_p * (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_p + 2 * \underline{Z}_w - \underline{Z}_w * (\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_w))] * \underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_p) * \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_p + \underline{Z}_w) * \underline{k}^{-n}}; lt. [2] \quad (2-12)$$

\underline{Z}_{pn} Impedanz des endlich Kettenleiters

n Mast Nummer

mit

$$\underline{k} = 1 + \underline{Z}_w * \left(\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_p} \right) \quad (2-13)$$

und

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_p}} \dots \text{Näherungsformel}; lt. [2] \quad (2-14)$$

¹ In der Praxis trifft dies ab 10 bis 15 Masten lt. DIN EN 60909-3 [2] zu

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{\underline{Z}_p}} \dots \text{Näherungsformel; lt. [2]} \quad (2-15)$$

\underline{Z}_{EB} Impedanz der Ersatzschaltung Anlage B

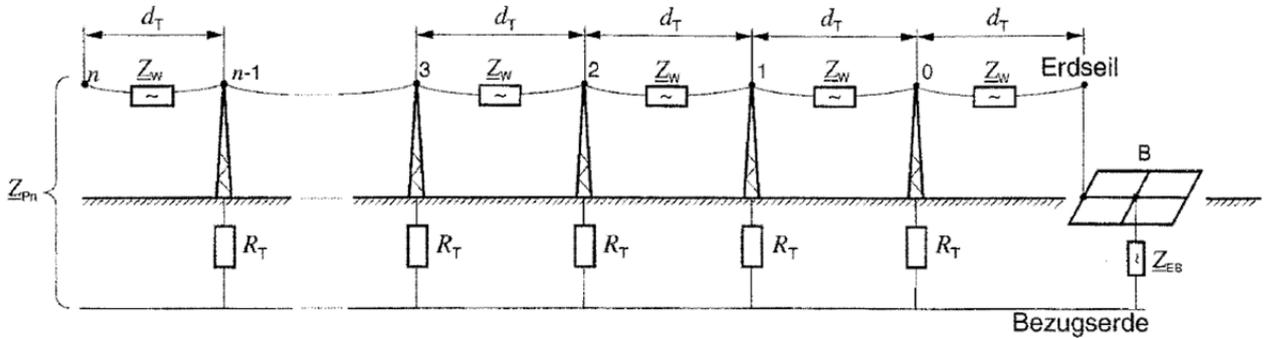


Abbildung 2-6: Endlicher Kettenleiter mit Berücksichtigung der Abschlussimpedanz, Erdungsanlage laut [2]

Der Strom am Mast wird durch die Überlagerung zweier Anteile gefunden.

$$\underline{I}_{ETn} = r_c * I''_{K1} * \frac{\underline{Z}_{pn}}{\underline{Z}_{pn} + \underline{Z}_{ET}} - r_c * 3 * I_{0B} * \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_p} * \frac{1}{k^n} \quad (2-16)$$

\underline{I}_{ETn} Stromfluss über Erde am kurzschlussbetroffenen Mast Nr. n

Die Spannung am Mast n ergibt sich zu:

$$\underline{U}_{ETn} = \underline{Z}_{ET} * \underline{I}_{ETn} \quad (2-17)$$

\underline{U}_{ETn} Spannung am kurzschlussbetroffenen Mast Nr. n

Der Strom über die Anlage B abhängig vom Kurzschlussort am Mast n:

$$\underline{I}_{EBn} = r_c * I''_{K1} * \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{pn}} * \frac{2 * \underline{Z}_p - \underline{Z}_w}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_p) * k^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_p + \underline{Z}_w) * k^{-n}} - r_c * 3 * I_{0B} * \frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{EB}} \quad (2-18)$$

Die Spannung der Anlage B ergibt sich abhängig vom Mast n zu:

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} * \underline{I}_{EBn} \quad (2-19)$$

Der Nachteil dieser Berechnungsmethode ist jedoch:

- konstanter Erdseilreduktionsfaktor r
- es wird die Kopplung der Leiterseile nicht berücksichtigt.

Um diese oben angeführten Nachteile zu umgehen, wird in der vorliegenden Arbeit die Kopplung der Leiterseile mit der Ersatzschaltung nach Clarke [1] mit dem Knotenpotenzialverfahren modelliert.

3 Berechnungsmethoden

Die Modellbildung wird mit Hilfe des Knotenpotenzialverfahrens realisiert, da so eine systematische Vorgehensweise möglich ist.

Die Abbildungen und Formeln in diesem Kapitel wurden aus Signale und Systeme 2 [4] entnommen.

3.1 Allgemeines Knotenpotenzialverfahren

Das Verfahren darf nur angewendet werden, wenn alle Quellen als Stromquellen vorliegen und ein Bezugsknoten festgelegt wird, auf den sich die Knotenspannungen beziehen.

Diese Methode eignet sich für komplexe Netzwerke, da hier ein formelles Vorgehen möglich ist. Bekannt sind die Admittanzen sowie die jeweiligen Ströme der Quellen. Somit kann die Knotenspannung bestimmt werden und als Folge daraus, die Zweigströme.

Um das Knotenpotenzialverfahren anzuwenden, muss das Netzwerk entsprechend aufbereitet werden.

Um dieses Verfahren anschaulicher zu gestalten, wird von einem Beispiel ausgegangen, das in Abbildung 3-1 ersichtlich ist und dies in [4] Verwendung findet.

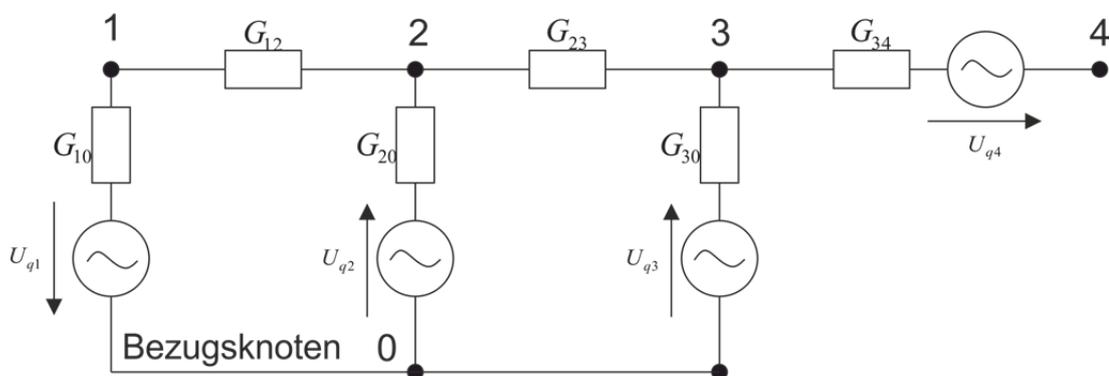


Abbildung 3-1: Ausgangssituation: Netzwerk mit Spannungsquellen

Es werden alle Spannungsquellen in Stromquellen umgewandelt, in Abbildung 3-2 ersichtlich, sodass nur mehr Stromquellen vorhanden sind. Diese Stromquellen besitzen eine Admittanz parallel zum Zweig. Die Definition eines Bezugsknoten ist Voraussetzung für ein systematisches Vorgehen.

U_z stellt die Vektorzweigspannungen dar, wobei U die Vektorspannung eines Knoten auf den Referenzknoten angibt. In Abbildung 3-4 ist dies ersichtlich.

$$\begin{bmatrix} U_{z10} \\ U_{z20} \\ U_{z30} \\ U_{z12} \\ U_{z23} \\ U_{z34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ 1 & -1 & & & & \\ & & 1 & -1 & & \\ & & & 1 & -1 & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} ; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ 1 & -1 & & & & \\ & & 1 & -1 & & \\ & & & 1 & -1 & \end{bmatrix}$$

Abbildung 3-4: Bilden der Zweigspannungen U_z unter Berücksichtigung der Zweig-Knoten-Inzidenzmatrix C

Die Zweig-Knoten-Inzidenzmatrix C besteht aus den Elementen 1,-1 und 0. Somit ist die Spannungs-/ Stromrichtung vorgegeben. Die Knotenspannung des Referenzknoten ist Null.

Vorgehensweise für das Erstellen des Zweig-Stromquellenvektors I_{zq} :

Es darf nur eine parallele Stromquelle pro Impedanz eingeführt werden, wobei die Reihenfolge der Nummerierung mit der Annahme von U_z übereinstimmen muss.

Wenn die Stromrichtung der Stromquelle nicht mit vorher definierter Zweigstromrichtung übereinstimmt, dann muss diese mit negativem Vorzeichen angenommen werden.

Der Index „zq“ steht für Zweig-Stromquellenvektor und ergibt sich in unserem Beispiel zu:

$$I_{zq} = \begin{bmatrix} -I_{q1} \\ I_{q2} \\ I_{q3} \\ 0 \\ 0 \\ I_{q4} \end{bmatrix}$$

Abbildung 3-5: Zweig-Stromquellenvektor I_{zq}

Die Beziehung zwischen Knotenstromquelle und Zweigstromquelle ist in Gleichung (3-3) dargestellt. Dies bedeutet, dass die am Anfang angegebenen Zweigstromquellen I_{zq} durch eine Vorgabe des Knotenstromes I ersetzt werden.

$$I = -C^T * I_{zq} \tag{3-3}$$

Das erste Kirchhoff'sche Gesetz „Summe der zufließenden Ströme ist gleich Summe der abfließenden Ströme in einem Knoten“ wird mit Gleichung (3-4) ausgedrückt.

$$0 = C^T * (I_{zq} + I_z) \quad (3-4)$$

Die Reihenfolge von I_z ist ident mit der von U_z . Werden laut Gleichung (3-3) die Zweigstromquellen durch Knotenstromquellen ersetzt so sieht dies laut Abbildung 3-6 folgendermaßen aus:

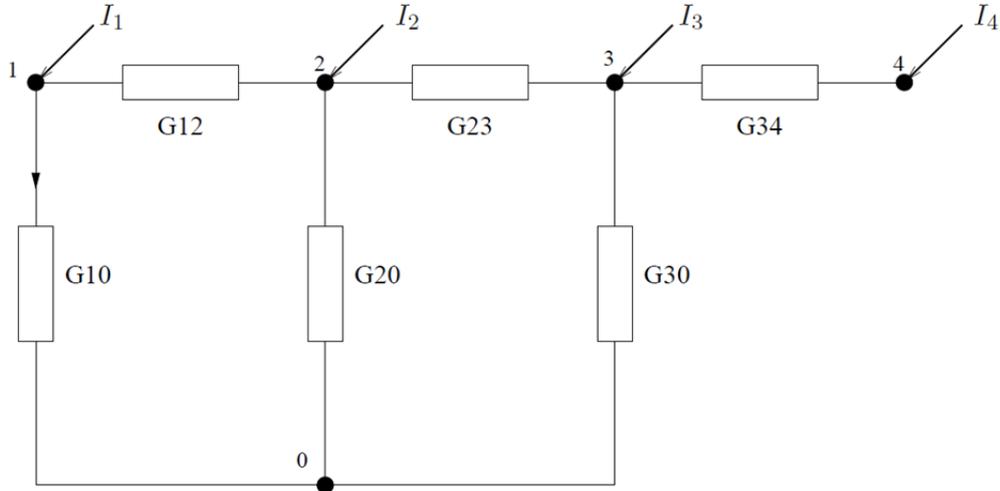


Abbildung 3-6: Zweigstromquellen I_{zq} durch Knotenstromquellen I_z ersetzt

Laut Gleichung (3-3) ergeben sich die Knotenstromquellen/Knotenstromvektor I zu:

$$I = -C^T I_{zq} = - \begin{bmatrix} -I_{q1} \\ I_{q2} \\ I_{q3} + I_{q4} \\ -I_{q4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q1} \\ -I_{q2} \\ -I_{q3} - I_{q4} \\ I_{q4} \end{bmatrix}$$

Abbildung 3-7: Knotenstromquellen I

Die Knotenstromquellen I sind nun vorhanden. Um einen Zusammenhang mit den Knotenspannungen U zu erhalten, geht man folgendermaßen vor:

Einsetzen der Gleichung (3-1) in Gleichung (3-4) ergibt:

$$C^T * Y_z * U_z - I = 0 \quad (3-5)$$

Gleichung (3-2) in obige Gleichung (3-5) eingesetzt ergibt:

$$C^T * Y_z * C * U - I = 0 \quad (3-6)$$

Knotenstromquellenvektor I in Gleichung (3-3) in Gleichung (3-6) ersetzen:

$$C^T * Y_z * C * U = -C^T * I_{zq} \quad (3-7)$$

Aus Gleichung (3-7) wird die Knotenpunktadmittanzmatrix Y definiert:

$$Y = C^T * Y_z * C \quad (3-8)$$

Setzt man Gleichung (3-3) in Gleichung (3-7) ein, ergibt sich:

$$Y * U = I \quad (3-9)$$

Somit kann bei einem aufbereiteten Netzwerk die Knotenspannungen U bestimmt werden.

Bei einem Netzwerk mit n Knoten, werden $n-1$ unabhängige Knotenspannungen, bezogen auf den Bezugsknoten, bestimmt. Sind die Knotenspannungen U bekannt, so können die Zweigspannungen U_z mit Gleichung (3-2) ausgedrückt werden.

Da der Zweigstromquellenvektor I_{zq} in einen Knotenstromquellenvektor I_z umgerechnet wurde, muss zur Bestimmung des gesamten Zweigstromes Gleichung (3-10) angewendet werden. In Abbildung 3-8 ist die schematisch dargestellt.

$$I_{zweig_total} = I_{zq} + Y_z * U_z \quad (3-10)$$

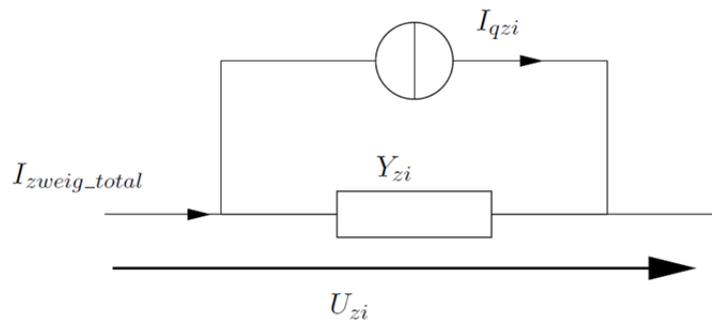


Abbildung 3-8: Zweigstrom der Admittanz und Zweigstrom der Quelle

Zur Vervollständigung wird die Y-Matrix in Formel (3-11) dargestellt sowie die Gleichung (3-9) in Formel (3-12).

$$Y = \begin{bmatrix} G_{12} + G_{10} & -G_{12} & 0 & 0 \\ -G_{12} & G_{12} + G_{20} + G_{23} & -G_{23} & 0 \\ 0 & -G_{23} & G_{23} + G_{30} + G_{34} & -G_{34} \\ 0 & 0 & -G_{34} & G_{34} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Wie in Formel (3-11) ersichtlich, ist die Y-Matrix eine Knotenpunktadmittanzmatrix.

$$\begin{bmatrix} G_{12} + G_{10} & -G_{12} & 0 & 0 \\ -G_{12} & G_{12} + G_{20} + G_{23} & -G_{23} & 0 \\ 0 & -G_{23} & G_{23} + G_{30} + G_{34} & -G_{34} \\ 0 & 0 & -G_{34} & G_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q1} \\ -I_{q2} \\ -I_{q3} - I_{q4} \\ I_{q4} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

Die Elemente in der Hauptdiagonale bildet sich aus den Admittanzen die an den Knoten angrenzenden. Die Y-Matrix ist entlang der Hauptdiagonale spiegelsymmetrisch, mit negativem Vorzeichen behaftet und gibt die Admittanzen der Knoten zueinander an.

3.2 Vierpoltheorie/ Berücksichtigung der Koppelwirkung

Die Berücksichtigung der induktiven Kopplung der Leiterseile wird mit Hilfe der Ersatzschaltung von E. Clarke realisiert. Im Buch „Circuit Analysis of A-C Power Systems“ [1] wird die Vorgehensweise erläutert.

Zu berücksichtigen ist, dass nur die Ströme und Spannungen an den Knoten plausible Größen liefern. Die Spannungen und Ströme im Ersatzschaltbild Abbildung 3-9 dienen nur der Berechnung der Knotengrößen und liefern damit keine repräsentativen Werte.

Die Anzahl der Zweigimpedanzen definiert sich durch die Anzahl der Verbindungen der Knoten.

3.2.1 Methoden² zur Bestimmung der Vierpolersatzschaltung

Die folgenden Methoden beschäftigen sich mit der Theorie der Vierpole und Bestimmung deren Zweigimpedanzen.

1. Methode: Durchführung mit zwei Spannungsquellen

- Zeichnen des Netzwerks mit der erforderlichen Anzahl der Knoten, ersetze die unbekanntes Impedanzen mit Symbolen.
- Teste das erstellte Netzwerk mit zwei Spannungsquellen. Schalte die Spannungsquellen an zwei Knoten und notiere den zu Stande kommenden Strom, lass die anderen Knoten frei.
- Wende das Ohm'sche Gesetz an, um die Zweigimpedanz zu errechnen.

2. Methode: Durchführung mit einer Spannungsquelle und einführen des Bezugsknoten

- Zeichne ein Netzwerk mit gleich vielen Knoten die untereinander mit einer Impedanz verbunden sind.
- Verbinde alle Knoten mit einem gemeinsamen Punkt. Führe eine Spannungsquelle für ein Knoten ein und nimm die Ströme in den anderen Knoten auf.
- Die Spannung die nun anliegt treibt einen Strom. Die Impedanz kann mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes bestimmt werden. Diese Impedanz ist die Transferimpedanz zwischen den Knoten.

Die Ersatzschaltung eines Vierpols besteht aus mindestens sechs Impedanzen.

² lt. E. Clarke [1]

3.2.2 Vierpoltheorie zweier Leiter

Bei der Realisierung wird nach der zweiten Methode lt. 3.2.1 vorgegangen. Die Leiter sind weder am Anfang noch am Ende miteinander verbunden. Die Selbstimpedanz der Leiter muss bekannt sein, sowie die Koppelimpedanz zueinander.

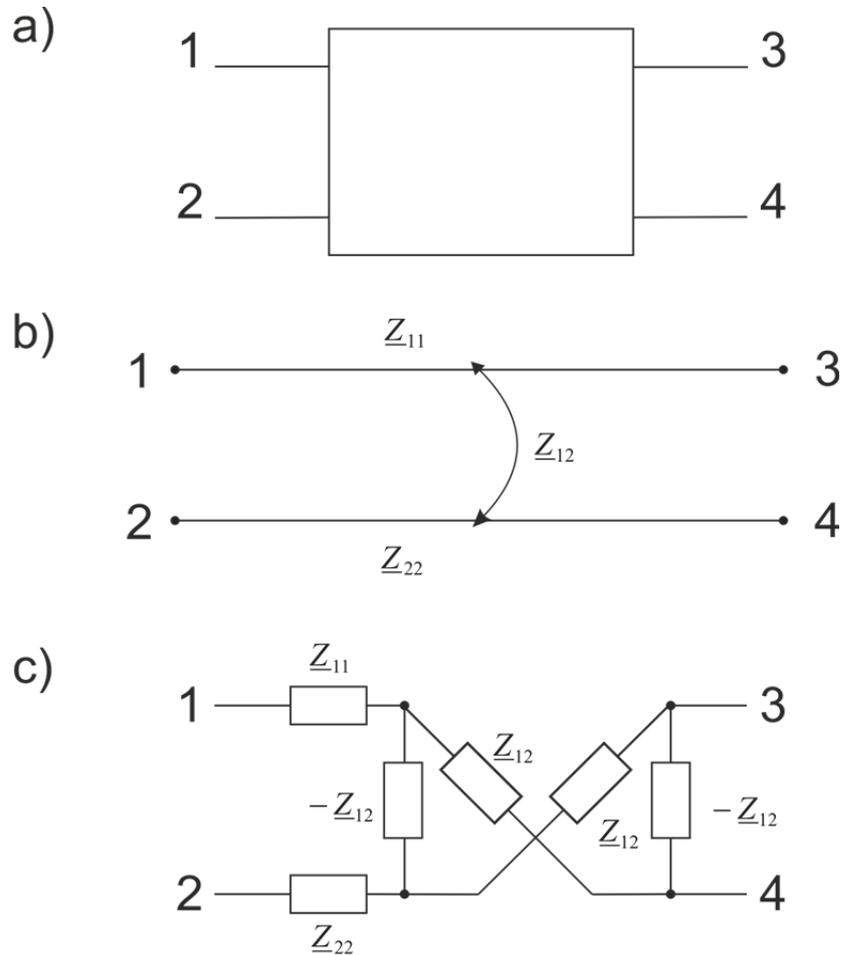


Abbildung 3-9: a) Vierpol b) Leiter, die eine Selbst bzw. Koppelimpedanz aufweisen c) mathematische Beschreibung, Ersatzschaltbild der Leiterseilanordnung in b)

- Z_{11} Selbstimpedanz des ersten Leiters
- Z_{22} Selbstimpedanz des zweiten Leiters
- Z_{12} Koppelimpedanz der zwei Leiter

In Abbildung 3-9 ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der Ersatzelemente ersichtlich. In a) ist der allgemeine Vierpol zu sehen, von dem ausgegangen wird. In b) der Leitungszug des Vierpoles mit den entsprechenden Selbst- bzw. Koppelimpedanzen dargestellt. In c) wird die Ersatzschaltung der Leiterseile mathematische beschrieben.

Zu erwähnen ist, dass nur die Ströme und Spannungen an den Punkten 1,2,3 und 4 am Vierpol relevant sind. Andere Knotenpunkte werden für die Berechnung zwar benötigt, liefern jedoch keine relevanten Ergebnisse und sind nur zur mathematischen Beschreibung des Vierpols relevant.

Somit ergibt sich nach Abbildung 3-9 c) folgende Impedanz zwischen den Knoten.

Zwischen Knoten 1 und 3:

$$\underline{Z}_{11} - \frac{\underline{Z}_{12}^2}{\underline{Z}_{22}} \quad (3-13)$$

Knoten 2 und 4:

$$\underline{Z}_{22} - \frac{\underline{Z}_{12}^2}{\underline{Z}_{11}} \quad (3-14)$$

Zwischen Knoten 1 und 2:

$$\frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2}{\underline{Z}_{12}} \quad (3-15)$$

Zwischen Knoten 3 und 4:

$$- \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2}{\underline{Z}_{12}} \quad (3-16)$$

Somit ist eine vollständige Beschreibung der Kopplung zweier Leiterstücke gegeben.

4 Erdseil einer Freileitung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen sowie die relevanten Parameter bzw. Kenngrößen des Erdseiles beschrieben.

4.1 Aufgaben des Erdseiles

Die Verwendung des Erdseiles wurde früher fast ausschließlich mit dem Blitzschutz in Verbindung gebracht. Die Anordnung des Erdseiles als höchstes Seil über den spannungsführenden Seilen soll Schutz vor direktem Blitzeinschlag bieten.

Ein Schutzwinkel von 30 Grad war nach der Blitzkugelmethode ausreichend. In Abbildung 4-1 ist dies ersichtlich. Der Punkt B stellt das Erdseil dar. Der Radius der Blitzkugel wird mit $2H$, zweifache Höhe Erde/ Erdseil, angenommen. Daraus ergibt sich der 30 Grad Schutzwinkel.

Heutzutage gibt es eine Vielzahl von Aufgaben sowie Einflussbereiche die das Erdseil zu bewältigen hat.

Die wichtigsten Aufgaben des/der Erdseile beinhalten:

- Schutz vor direktem Blitzeinschlag.
- Fehlerströme, Kurzschlussströme zu tragen, abzuleiten.
- Verbesserung der Erdungs-Anlage.
- Trägt zum globalen Erdungssystem bei.
- Ableiten der induktiv gekoppelten Ströme.
- Trageausrüstung für Lichtwellenleiter für interne Kommunikation und zur kommerziellen Nutzung.

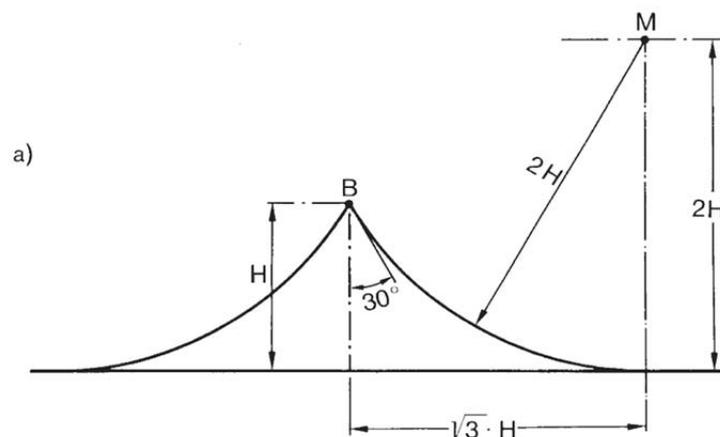


Abbildung 4-1: Bestimmen des Schutzwinkels mit Hilfe der Blitzkugelmethode [5] Seite 226

4.2 Aufbau des Erdseiles

Der Aufbau des Erdseiles muss mechanischen sowie elektrischen Anforderungen standhalten.

Leiterseile können aus Aluminium, Aluminiumlegierungen, Kupfer und Stahl bestehen. Ein Seil ist aus mehreren Einzeldrähten aufgebaut. Für Freileitungsseile ab einer Spannung von 110 kV wird fast ausschließlich Al/St verwendet. [3] S263. Der Stahl hat die Aufgabe das Eigengewicht des Seiles zu tragen, Aluminium fungiert als Leiter.

Ab einer Nennspannung von 220 kV setzt man vorwiegend 2er, 3er oder 4er Bündelleiter ein. Dies hat den Vorteil, dass bei hohen Spannungen die Randfeldstärke und damit verbundenen Korona-Entladungen, die akustisch wahrnehmbar sind, minimiert wird. Ein weiterer Vorteil der Teilleiter ist das für die große Querschnittsfläche verhältnismäßig leichte Einzelleiter eingesetzt werden können. Feldabstandhalter werden zusätzlich eingebaut um bei Wind bzw. Schwingungen den Teilleiterabstand einzuhalten.

Spezifische Daten zu den Al, Al/St Seilen sind in [5] Seite 618 bis 621 in tabellarischer Form aufgeführt.

Seile aus Aluminium nach DIN 48 201, Teil 5

Nenn- quer- schnitt	Soll- quer- schnitt	Seilaufbau Drahtanzahl × Durchmesser	Seil- durch- messer d	Rechne- rische Bruch- kraft	Seil- gewicht	Längen- gewichts- kraft	Normale Zusatzlast ¹⁾	Ohmscher Widerstand bei 20°C
mm ²	mm ²	mm	mm	kN	kg/m	N/m	N/m	Ω/km
16	15,89	7 × 1,70	5,1	2,84	0,043	0,421	5,51	1,8020
25	24,25	7 × 2,10	6,3	4,17	0,066	0,647	5,63	1,1808
35	34,36	7 × 2,50	7,5	5,78	0,094	0,922	5,75	0,8332
50	49,48	7 × 3,00	9,0	7,94	0,135	1,324	5,90	0,5786
50	48,35	19 × 1,80	9,0	8,45	0,133	1,304	5,90	0,5970
70	65,81	19 × 2,10	10,5	11,32	0,181	1,775	6,05	0,4386
95	93,27	19 × 2,50	12,5	15,68	0,256	2,511	6,25	0,3095
120	116,99	19 × 2,80	14,0	18,78	0,322	3,158	6,40	0,2467
150	147,11	37 × 2,25	15,8	25,30	0,406	3,982	6,58	0,1960
185	181,62	37 × 2,50	17,5	30,54	0,500	4,905	6,75	0,1587
240	242,54	61 × 2,25	20,3	39,51	0,670	6,572	7,03	0,1191
300	299,43	61 × 2,50	22,5	47,70	0,827	8,112	7,25	0,0965
400	400,14	61 × 2,89	26,0	60,86	1,104	10,830	7,60	0,0722
500	499,83	61 × 3,23	29,1	74,67	1,379	13,527	7,91	0,0578
625	626,20	91 × 2,96	32,6	95,25	1,732	16,990	8,26	0,0462
800	802,09	91 × 3,35	36,9	118,39	2,218	21,758	8,69	0,0361
1 000	999,71	91 × 3,74	41,1	145,76	2,767	27,144	9,11	0,0290

¹⁾ Normale Zusatzlast durch Eis nach DIN VDE 0210 (5 + 0,1 d) in N/m.

Die erhöhte Zusatzlast kann ein Vielfaches der normalen Zusatzlast betragen und ist von topographischen und meteorologischen Verhältnissen des Baugebietes einer Anlage oder Freileitung abhängig.

Abbildung 4-2: Spezifische Daten für Al/St Seile lt. ABB Schaltanlagenbuch [5]

In Abbildung 4-3 ist der unterschiedliche Aufbau von Leiterseilen ersichtlich.

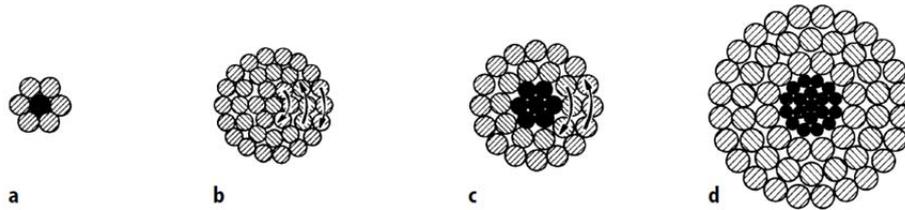


Abbildung 4-3: Aufbau von Leiterseilen,
a (einlagig) Al/St, b (dreilagig) Al oder Cu,
c (zweilagig) Al/St, d (dreilagig) Al/St [3] S263

Erdseilreduktionsfaktor:

Mit Hilfe des Erdseilreduktionsfaktors versucht man die Umstände, die im Kurzschlussfall gegen Erde herrschen, nachzubilden. Dieser Faktor beschreibt die Reduktion des Stromes der im Erdseil zurückfließt und ist folgendermaßen definiert.

$$\underline{r} = \frac{I_L - I_Q}{I_L} = \frac{3rI_0}{3I_0} = \frac{\text{Fehlerstrom im Erdreich}}{\text{Fehlerstrom}} \quad (4-1)$$

Dieser fiktive Faktor der auch laut DIN [2] zur Berechnung herangezogen wird, hängt von Mastbild, Aufbau der Seile und von der Beschaffenheit des Bodens zusammen. Sind bei einem Kurzschluss gegenüber Erde mehrere Stationen betroffen, so kann es je Station und Leitung einen Erdseilreduktionsfaktor geben.

4.3 Durchhang der Seile

Die Hyperbolische Funktion beschreibt den Durchhang der Leiterseile. Der Durchhang ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die wichtigsten sind:

- Weite eines Spannungsfeldes
- Aufstellort der Masten
- Masse des Seiles
- Zugkraft mit dem das Seil befestigt ist
- Der Temperatur des Seiles, die sich aus der Umgebungstemperatur, der Sonneneinstrahlung und den Stromwärmeverluste zusammensetzt.
- Wind
- Eislast

In der vorliegenden Arbeit wird die Höhe der einzelnen Leiterseile auf h gemittelt und ist folgendermaßen implementiert:

$$h = h_{Mast} - 0,7 * f_{max} \quad (4-2)$$

In Abbildung 4-4 ist dieses Herangehensweise ersichtlich dargestellt.

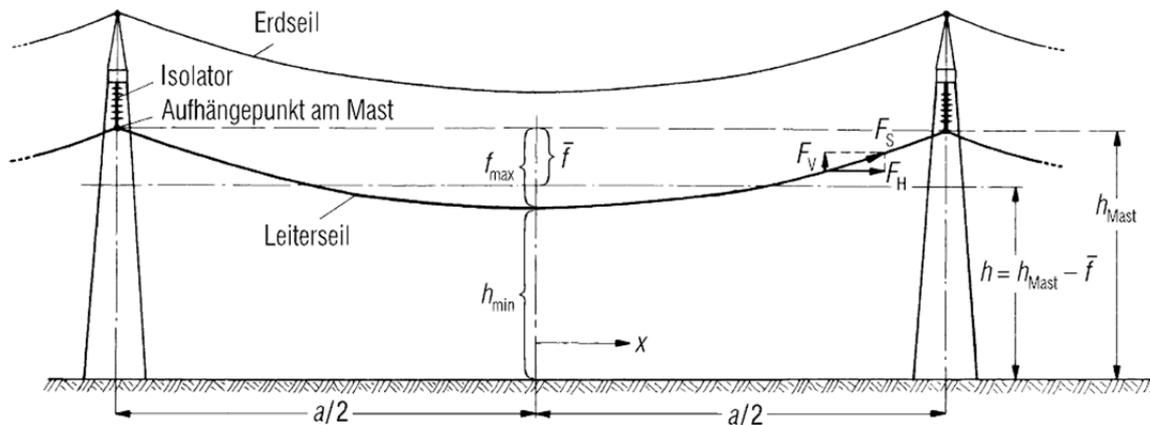


Abbildung 4-4: Definition des Seildurchhanges lt. [3] S 276

Die Durchschnittshöhe h aller Seile wurde berechnet und ist für den Abstand zu den Leiterseilen und somit für die induktive Kopplung ausschlaggebend und reicht für die geforderten Modelle.

4.4 Anforderungen an das Erdseil

Da die Nutzungsdauer einer Freileitung mehrere Jahrzehnte beträgt, muss der Faktor Zeit und die damit eingehenden Risiken vor allem der mechanischen Festigkeit, in Aufhängungspunkten, gegeben sein. Die Anforderungen an das Erdseil sind vielseitig und kann in folgende Bereiche unterteilt werden.

- mechanische Festigkeit
- elektrische Beanspruchung
- thermische Einwirkung

4.4.1 Mechanische Festigkeit

Die fachgerechte Montage unter Einhaltung der zulässigen bzw. mittleren Zugspannungen kommt besondere Bedeutung zu. Die Auswahl der richtigen Materialien ist von entscheidender Bedeutung um die Langlebigkeit des Erdseils und der gesamten Freileitung zu gewährleisten und dabei die Wirtschaftlichkeit nicht außer Acht zu lassen.

Wind bzw. Eislasten müssen bei der Dimensionierung des Erdseils miteinbezogen werden. Der Mindestabstand Seil-Erde muss auch unter Eislast gegeben sein.

Aufhängungspunkte des Erdseils sowie Verbindung zwischen Erdseil und Mast müssen den auftretenden Schwingungen standhalten.

Schwingungen, Seiltanzen und die damit verbundenen Kräfte müssen Berücksichtigung finden. Von Seiltanzen spricht man, wenn hohe Amplituden der Seilauslenkung vorhanden sind. Dies tritt vor allem bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auf.

Die Annäherung der Seile kann zu Kurzschlüssen führen. Leiterseile neigen zu Schwingungen abhängig von ihrer Zugspannung und den äußeren Einflüssen z.B. Wind. Kleine Schwingungen werden auch als Vibrationen bezeichnet. Um Schwingungen zu vermeiden, sind Seile immer mit geringerer als die zulässige Zugspannung zu befestigen.

Dies hat den Vorteil, dass die Aufhängepunkte keine Ermüdung erleiden und die Gefahr des Schwingungs-Bruches herabgesetzt wird. In Ausnahmefällen werden Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung getroffen. Durch Verstärkung des Seiles oder mit Hilfe von Schwingungsdämpfern kann den Schwingungen entgegengewirkt werden.

Die Berührungsfläche zwischen Erdseil und Mast soll nicht durch Korrosion beeinflusst werden. Um einen gut leitenden Kontakt herzustellen, muss bei Aluminium die oxidierte Oberfläche abgeschliffen werden. Dieser Vorgang lässt sich nur unter einer dünnen Fettschicht durchführen, da sich sonst eine neue Oxidationsschicht bildet [5] S616.

Verschiedenen Arten der Zusammensetzung des Fettes und damit verbundene zulässige thermische Belastung findet man in der EN 50326.

Im Falle des Kurzschluss, ist die auftretende Kraft die durch den Stromfluss zustande kommt dem Quadrat des Stromes proportional. Bei der Dimensionierung muss dies berücksichtigt werden.

4.4.2 Elektrische Beanspruchung

Die elektrischen Verluste werden bewusst „gering“ gehalten, um den Erdseilreduktionsfaktor auszunützen und bei Blitzeinschlag einen rückwärtigen Überschlag auf ein Phasenseil bei hohem Masterdungswiderstand zu vermeiden.

Stromtragfähigkeit bei statischen und dynamischen Belastungen: Vor allem im Fehlerfall bei hohen Stromdichten muss die Stromtragfähigkeit für eine gewisse Zeitspanne vorhanden sein.

Koronaverluste: Da das Erdseil nur im Störfall hohe Ströme führt und dieser Zustand zeitlich begrenzt ist, wird dieses Phänomen vernachlässigt.

Elektrisches, magnetisches Feld: Die Grenzwerte für das elektrische/- und magnetische Feld sind laut ÖNORM E8850 [6] einzuhalten. Die Leiterseilbelegung und Abstände der Leiter zueinander spielen bei der elektromagnetischen Beeinflussung eine entscheidende Rolle.

Das Erdseil ist mit den Masten verbunden und bildet somit einen Kettenleiter. Dieser Kettenleiter trägt zur Verbesserung der Erdungsverhältnisse bei und reduziert die Gefahr eines rückwärtigen Überschlages bei Blitzeinschlag.

Verschmutzung des Erdseils und der Isolatoren: Abgase, Salz vor allem in Meeresnähe und jegliche Art von Verunreinigungen können zu Kriechströmen an Isolatoren führen.

4.4.3 Thermisches Verhalten

Die Umgebungstemperatur und somit die Ausgangstemperatur des Leiterseil muss Berücksichtigung finden. Die Temperatur ist von dem jeweiligen Einsatzgebiet und der Jahreszeit abhängig, dies ist bei der mechanischen Auslegung zu beachten.

Durch die Sonneneinstrahlung wird das Leiterseil zunehmend erhitzt und dehnt sich aus.

Stromwärmeverluste: Die durch induktive Kopplung der spannungsführenden Seile im Erdseil hervorgerufenen Ströme tragen zur Erwärmung des Seiles bei.

Kurzschlussströme: Bei Fehlern mit Erdberührung trägt das Erdseil einen Teil des Fehlerstromes. Da der Fehlerstrom im Vergleich zum Beeinflussungs-/Unsymmetriestrom, im Normalbetrieb, um ein Vielfaches größer ist, spielt die Dauer des Fehlerstrom eine entscheidende Rolle.

Der Erwärmungsprozess muss in den vorhergesehen Grenzen stattfinden, da sonst eine dauerhafte Beschädigung der Leiterseile durch unzulässig hohe Temperatur auftreten kann. Der zulässige Temperaturanstieg bei Kurzschlüssen ist in IEC 60865 vermerkt.

4.5 Kenngrößen von Leiterseilen

In Abbildung 4-5 ist das π -Schema des Leitungsersatzschaltbildes dargestellt. Dieses besteht aus einem Ohm'schen Widerstand, der Induktivität in Längsrichtung sowie den Kapazitäten und Leitwerten gegenüber Erde.

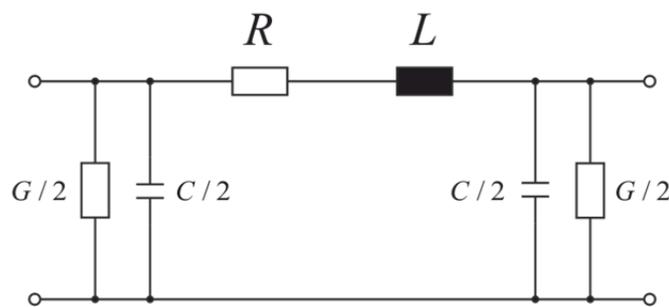


Abbildung 4-5: Leitungsersatzschaltbild

Die mit Hochstrich, $'$, gekennzeichneten Größen geben Werte je Längeneinheit, den sogenannten Längsbelag, an. Die Frequenz f wird mit 50 Hz angenommen.

Der Wellenwiderstand berechnet sich aus:

$$\underline{Z}_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (4-3)$$

Da der Wirkwiderstand nur einen Bruchteil im Vergleich zur Induktivität betragt, kann Gleichung (4-3) in Gleichung (4-4) übergeführt werden. Der Leiterwert G' wird vernachlässigt.

$$\underline{Z}_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{j\omega L'}{j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (4-4)$$

Bei der Berechnung der natürlichen Leistung wird von einer verlustlosen Leitung ausgegangen. Die natürliche Leistung S_{nat} ergibt sich zu:

$$\underline{S}_{nat} = \frac{U^2}{\underline{Z}_w} \quad (4-5)$$

Bei Freileitungsseilen ist die thermische Leistung um ein Vielfaches höher als z.B. bei Energiekabeln. In Tabelle 1 sind typische Werte Al/St Seile angegeben.

Typ	U_N	R'	X'	C_b'	C_e'	Z_w	S_{nat}	S_{therm}
	kV	Ω/km	Ω/km	nF	nF	Ω	MVA	MVA
Stalu95/15	20	0.306	0.355	10	5	336	1	12
Stalu240/40	110	0.119	0.4	9.2	4.6	372	33	120
2xStalu240/40	220	0.06	0.31	11.8	5.9	289	167	480
4xStalu240/40	380	0.03	0.266	13.8	6.9	248	583	1660

Tabelle 1: Typische Werte für Al/St Leiterseile, [7]

5 Leiterschleifen mit Erdrückleiter

5.1 Stromverteilung bei Gleichstrom

Die Stromverteilung bei Gleichstrom bildet ein Strömungsfeld aus das nur abhängig von dem Anfangs- bzw. Endpunkt des Stromflusses gegen Erde ist. Dieses Feld ist somit unabhängig von der Leitungsführung. Der Gleichstrom nimmt den Weg der geringsten Widerstände. Der Stromfluss in der Leitung ist in Rot dargestellt, dies ist in Abbildung 5-1 ersichtlich.

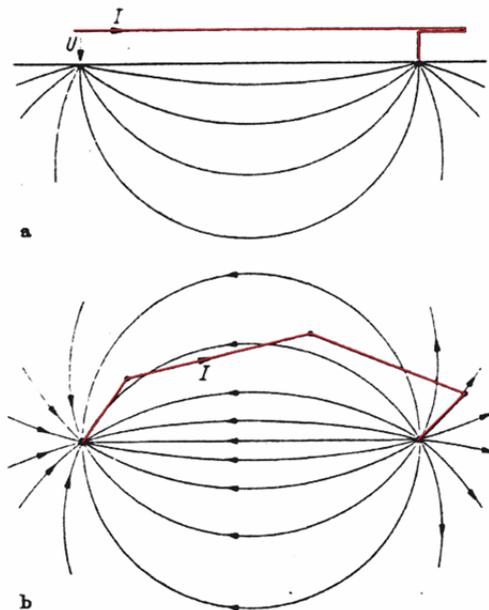


Abbildung 5-1: a) Seitenansicht b) Draufsicht des Strömungsfeldes bei Gleichstrom lt. [7]

5.2 Stromverteilung bei Wechselstrom

Im Fall des Wechselstromes wird der Strom im Erdreich durch das Magnetfeld gebündelt. Dieser Strom, der in Erde fließt, folgt der Leitungsführung und wird unter der Leitung gebündelt. Somit muss die Impedanz des Leiters je Abschnitt berechnet werden. Für Wechselstrom ist somit der Weg des geringsten Scheinwiderstandes ausschlaggebend. In Abbildung 5-2 ist der Stromfluss in der Leitung in Rot ersichtlich.

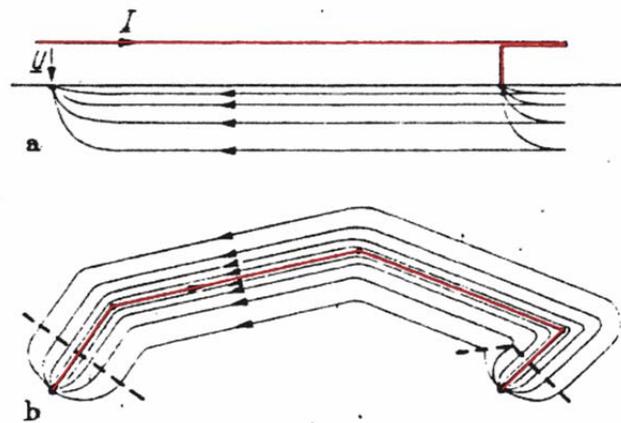


Abbildung 5-2: a) Seitenansicht b) Draufsicht der Strömungsfeldes bei Wechselstrom lt. [8]

5.3 Berechnung der Impedanzen von Leiterschleifen

Um die spezifische Selbst-/ Koppelimpedanz zu berechnen wird nach der Theorie von Carson und Pollaczek vorgegangen. Die Situation ist in Abbildung 5-3 dargestellt. In blau sind die zwei Leiter die betrachtet werden dargestellt. Die angeführten Formeln wurden aus ITU-T [9] entnommen und sind Näherungsformeln.

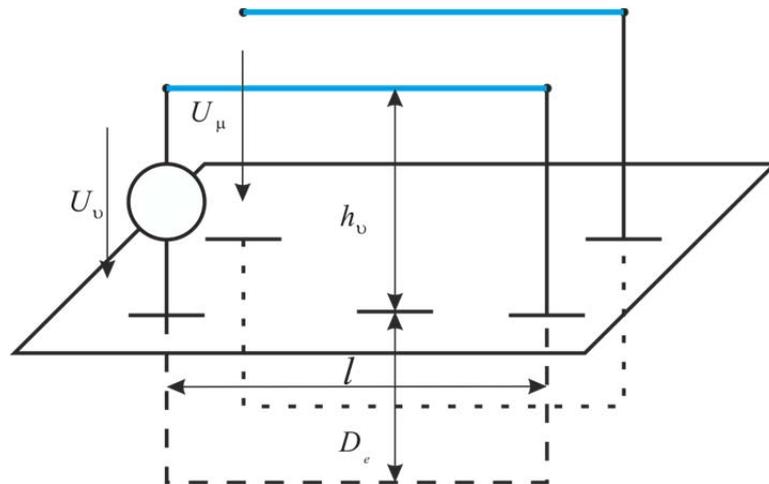


Abbildung 5-3: Modell zur Beschreibung der Berechnung der Selbst-/Gegenimpedanz

Erdwiderstand je Längeneinheit: r'_e

$$r'_e = \frac{\mu_0 * \omega}{8} \quad (5-1)$$

Eindringtiefe in das Erdreich einer elektromagnetischen Welle δ_e

$$\delta_e = \sqrt{\frac{2 * \rho}{\omega * \mu_0}} \quad (5-2)$$

Mit der Erdrückstromtiefe D_e wird der fiktive Rückleitungszyylinder beschrieben. Dieselben Werte für den fiktiven Rückleitungszyylinder werden für X'_{vv} und X'_{iv} erreicht.

$$D_e = \frac{\sqrt{2 * e}}{\gamma} * \delta_e \quad (5-3)$$

Die spezifische Selbstimpedanz \underline{Z}'_{vv} errechnet sich aus dem Erdwiderstand je Längeneinheit den Höhenkorrekturfaktor, den ohmschen Widerstand des Leiters sowie aus der Selbst- und Gegenreaktanz der beiden Leiterschleifen je Längeneinheit.

$$\underline{Z}'_{vv} = (r'_e - \Delta_{vv} + r'_v) + j * (X'_{vv} + \Delta_{vv} + X'_{iv}) \quad (5-4)$$

Spezifische Koppelimpedanz $\underline{Z}'_{v\mu}$

$$\underline{Z}'_{v\mu} = (r'_e - \Delta_{v\mu}) + j * (X'_{v\mu} + \Delta_{v\mu}) \quad (5-5)$$

Höhenkorrekturfunktion der betroffenen Leiterschleife Δ_{vv}

$$\Delta_{vv} = \frac{\mu_0 * \omega}{2 * \pi} * \frac{4 * h_v}{3 * \delta_e} \quad (5-6)$$

Höhenkorrekturfunktion der benachbarten Leiterschleife $\Delta_{v\mu}$

$$\Delta_{v\mu} = \frac{\mu_0 * \omega}{2 * \pi} * \frac{2 * (h_v + h_\mu)}{3 * \delta_e} \quad (5-7)$$

Selbstreaktanz der Leiterschleife je Länge X'_{vv}

$$X'_{vv} = \frac{\mu_0 * \omega}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{R_v} \quad (5-8)$$

Innere Reaktanz des Leiters je Länge X'_{iv}

$$X'_{iv} = \frac{\mu_0 * \omega}{2 * \pi} * \frac{\mu_r}{4} \quad (5-9)$$

Reaktanz der Gegeninduktion je Länge $X'_{v\mu}$

$$X'_{v\mu} = \frac{\mu_0 * \omega}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{d_{v\mu}} \quad (5-10)$$

μ_0	<i>Permeabilitätskonstante des leeren Raumes</i>
U_v	<i>Spannung am stromführenden Leiter</i>
U_μ	<i>Spannung am induzierten Leiter</i>
ρ	<i>spezifische Dichte des Erdreiches</i>
γ	<i>Besselsche Konstante</i>
h_v	<i>Abstand des Leiters v zur Erde</i>
$d_{v\mu}$	<i>Abstand zwischen den Leitern</i>

Die benötigten Parameter, die zur Berechnung vorhanden sein müssen, sind in einer Datenstruktur zusammengefasst. Somit kann für jeden Leitungsabschnitt die Selbstimpedanz der Leiterschleife berechnet werden.

6 Ausgangsbasis, Programm

Das Programm, mit dem gearbeitet wird, ist am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz erstellt worden. Hierfür verweise ich auf vorvergangenen Arbeiten von Herrn A. Steinkellner [10] und Herrn Dipl. Ing. C. Raunig [11].

Die Basis des Programmes zur Implementierung des Kurzschlusses sowie der Berechnung der maximal zulässigen Dauer des Kurzschlussstromes wird in diesem Abschnitt beschrieben. Um Änderungen vorzunehmen, ist die Einarbeitung in das bestehende Programm dessen Aufbau und Umsetzung essentiell. Die angeführte kurze Beschreibung dient der groben Orientierung und ist Voraussetzung, um die Erweiterung die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden zu verstehen.

6.1 Graphische Oberfläche, Eingangsdaten

Die Eingangsdaten können mit Hilfe einer graphischen Oberfläche, die sich „Beeinflussung“ nennt, hinterlegt werden. In dieser Oberfläche kann eine Vielzahl von Parametern frei gewählt werden. Durch diese Maßnahme kann die Verwendung des Programmes auch anderen fachkundigen Personen leicht zugänglich gemacht werden.

In Abbildung 6-1 ist ein Ausschnitt der Oberfläche dargestellt. Neben dem Mastbild, Leitungsabschnitten, Systembezeichnungen und Leitungsverdrillungen, gibt es eine Vielzahl von Einstellmöglichkeiten.

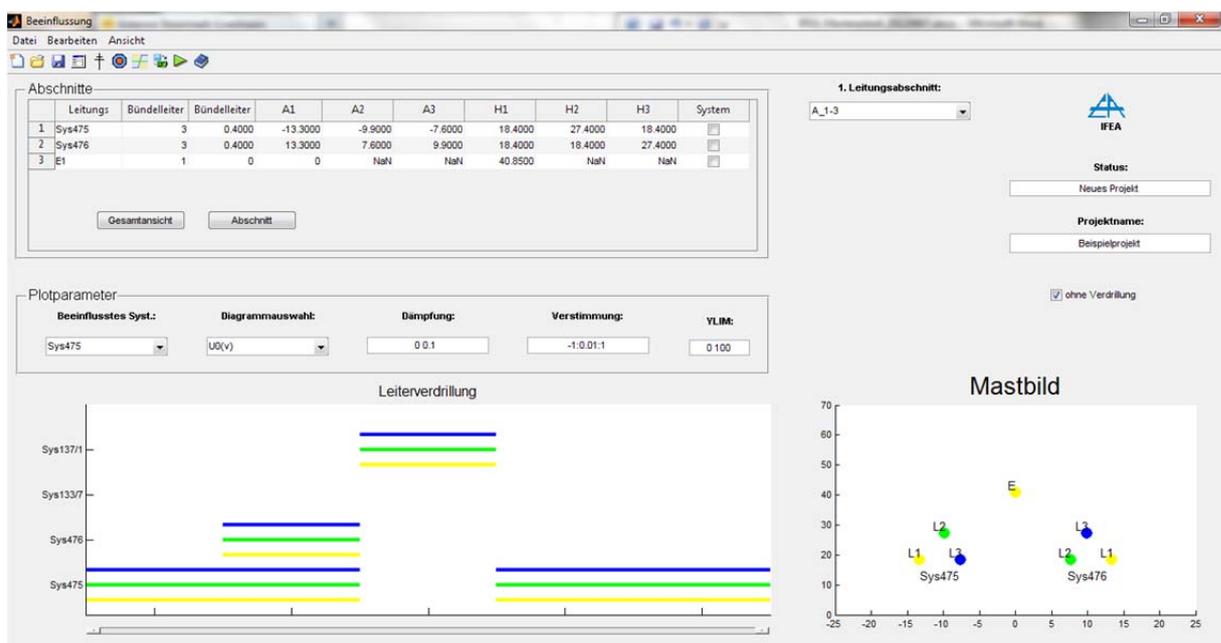


Abbildung 6-1: Graphische Oberfläche "Beeinflussung"

Die Eingabe verschiedener Leitungsabschnitte ist möglich; die wichtigsten Parameter sind im Folgenden aufgeführt:

- Anzahl der Systeme/ Spannfelder und Erdseile
- Selbst- und Koppelimpedanz der Leiterseile
- Position der Leiter zueinander und gegenüber Erde
- Verdrillungen vorgeben
- Länge des Leitungsabschnittes
- Masterdung, Erdungsimpedanz
- Spannungsebene, Frequenz

Es wird eine Datenstruktur erzeugt, welche die gesamten Daten und Berechnungsergebnisse beinhaltet und gespeichert wird.

6.2 Aufbau des Programmes

Sind alle Daten vorhanden, um die Berechnung zu starten, erfolgt die Lösung mit Hilfe des Knotenpotenzialverfahrens wie in Punkt 3.1 beschrieben. Für die vollständige Berechnung muss die Knotenpunktadmittanzmatrix Y aus den Eingangsdaten bestimmt werden.

Das Programm ist zur besseren Übersicht in mehrere Funktionen unterteilt, die anschließend beschrieben werden.

Die vorhandenen Abschnitte des Programms teilen sich ein in:

- Funktion „knoten“
- Funktion „ Y_z “
- Funktion „Ersatzelemente“
- Funktion „generieren“
- Funktion „C“

Zu Beginn jeder Funktion werden die bezogenen und ausgegebenen Datensätze definiert, danach erfolgt eine grobe Beschreibung der Vorgehensweise der jeweiligen Funktionen.

Um sich einen Überblick der Vorgehensweise zu verschaffen ist in Abbildung 6-2 ein Ablaufdiagramm mit den wichtigsten Funktionen ersichtlich.

6.3 Übersichtsplan der Funktionen

Durch den Übersichtsplan werden die wesentlichen Verknüpfungen der Funktionen dargestellt. Die Verteilung der Eingangsdaten ist ebenfalls erkennbar.

Abbildung 6-2 beschreibt im Wesentlichen, wie die Funktionen miteinander verbunden sind. Die wichtigsten Ein- und Ausgabeparameter sowie die Übergabe sind auf dem ersten Blick klar erkennbar.

Ersichtlich wir hier auch, welche Funktion welche Aufgaben übernehmen, und wo man im Falle einer Änderung, bzw. Manipulation der Daten eingreifen muss.

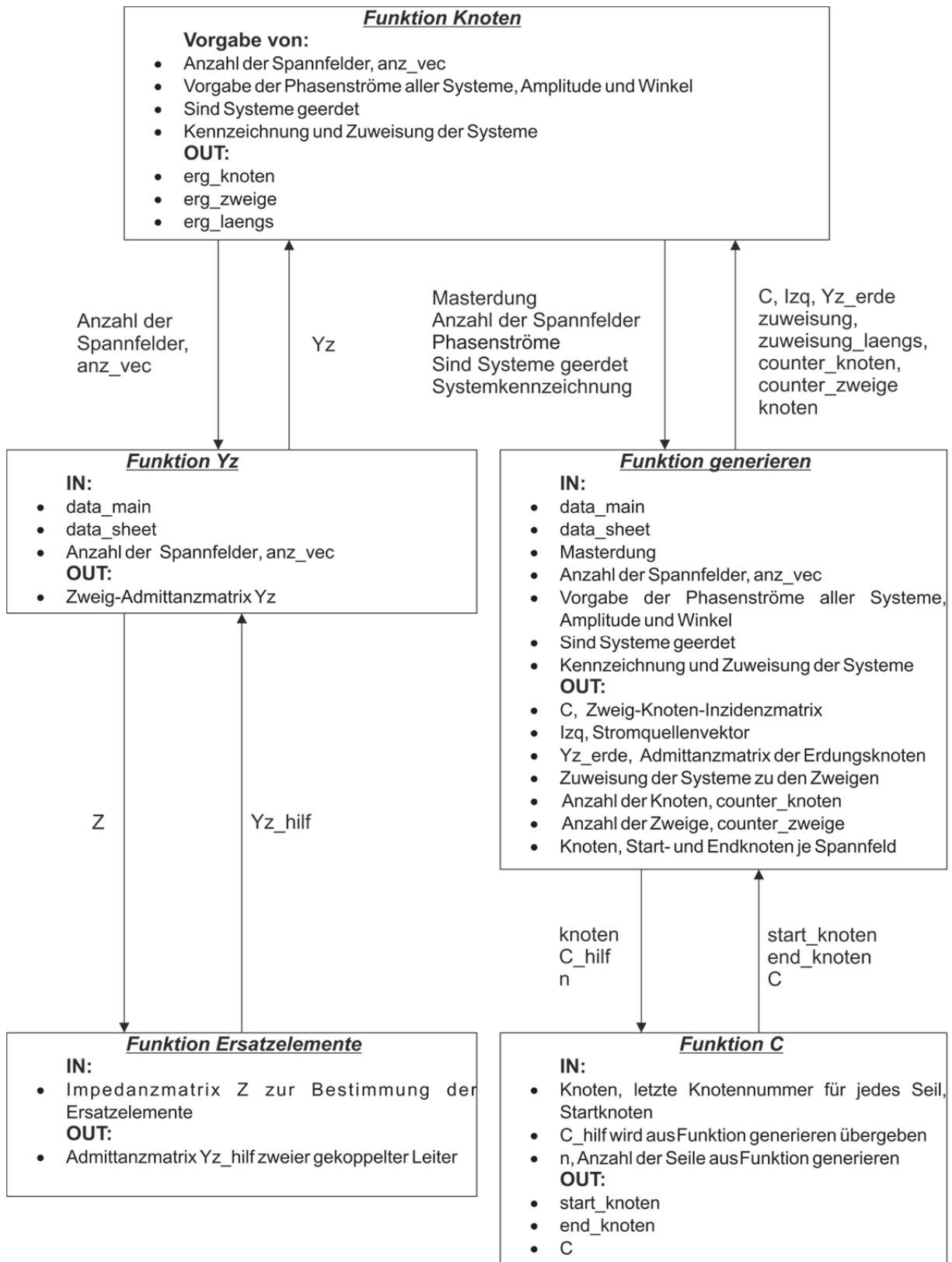


Abbildung 6-2: Zusammenhang der Funktion und dessen Übergabeparameter

6.3.1 Funktion „Y_z“

Zu beachten ist, dass pro Spannfeld die Y_z-Matrix gebildet und anschließend zusammengefügt wird. Diese Y_z-Matrix wird anschließend für die Bildung der Knotenpunktadmittanzmatrix benötigt. Die Berechnung der Selbst- und Koppelimpedanz lt. Carson wird wie in Abschnitt 5.3 durchgeführt.

Die Funktion greift bei jeder Abschnittsberechnung auf die Funktion „Ersatzelemente“ zu und setzt die Y_z-Matrix schrittweise zusammen.

Die Eingangsdaten der Funktion Y_z lauten:

- data_main
- data_sheet
- Anzahl der zu berechnenden Spannfelder

Folgende Daten werden ausgegeben:

- Zweig-Admittanzmatrix Y_z

Vorgehensweise je Abschnitt:

- Daten werden aus data_sheet geladen
- Zuweisung der Daten
- Aufbereitung der Datensätze
- Durchhang der Leiter- Erdseile wird lt. 4.3 gemittelt
- Erdwiderstand, Eindringtiefe, Erdrückstromtiefe berechnen
- Selbst- und Gegenimpedanz, Z-Matrix, lt Carson 5.3 bestimmen
- Aufrufen der Funktion „Ersatzelemente“ 6.3.2 und übergeben der Z Matrix
- Y_{z_hilf} entgegennehmen aus Funktion „Ersatzelemente“ 6.3.2
- Y_z-Matrix zusammensetzen
- Kurzschluss der Erdseile wenn mehrere vorhanden
- Berücksichtigen von Sammelschienen und Trafos

Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis alle Spannfelder/Abschnitte bearbeitet worden sind. Danach wird die Zweig-Admittanzmatrix Y_z an die Funktion „knoten“ übergeben.

Wenn mehrere Erdseile vorhanden sind, werden sie über eine Admittanz kurzgeschlossen, da diese beide am Mast leitend miteinander verbunden sind.

Sammelschienen werden in der Modellierung berücksichtigt. Mit Hilfe der Trafo-Nullimpedanz kann sich der Strom über den Sternpunkt der Transformator schließen. Zu beachten ist hierbei, dass mit Hilfe des Knotenpotenzialverfahrens lt. Kapitel 3.1 vorgegangen wird.

6.3.2 Funktion „Ersatzelemente“

Die Funktion Y_z verwendet diesen Programmteil je Leitungsabschnitt. Zuerst wird die Impedanzmatrix Z aller Leiterseile eingelesen. Diese Matrix enthält die Selbst-/Gegenimpedanzen die nach Carson berechnet werden.

Die Funktion wird verwendet, um die Ersatzelemente lt. Clarke [1] je Abschnitt zu generieren und die somit entstandene Yz_hlf Matrix der Funktion „ Y_z “ 6.3.1 zu übergeben.

Dazu wird die gesamte Impedanzmatrix Z eingelesen und die entsprechenden Leiterseile, immer zwei, herausgenommen, um die Ersatzelemente zu bilden.

Die Matrix Yz_hlf besteht letztendlich aus allen Kopplungen der Leiterseile zueinander je Abschnitt.

In Parameter:

- Impedanzmatrix Z zur Bestimmung der Ersatzelemente

Out:

- Admittanzmatrix Yz_hlf zweier gekoppelter Leiter

Vorgehensweise:

- Impedanzmatrix Z aus Funktion „ Y_z “ 6.3.1 einlesen
- Aus Impedanzmatrix Z eine Auswahl zweier Leiter mit Hilfe der Variable Zx treffen
- Ersatzelemente lt. Clarke [1] für berechnen
- Yz_hlf , für alle Leiter, aus den Ersatzelementen zusammenfügen
- Übergeben der Yz_hlf an Funktion „ Y_z “ 6.3.1

Die Auswahl der Impedanzmatrix Z wird so realisiert, dass immer nur die bestimmten Werte zweier Leiter, für die Berechnung berücksichtigt werden.

6.3.3 Funktion „generieren“

Diese Funktion liefert unter anderem die Zweig-Knoten-Inzidenzmatrix C und den Stromquellenvektor I_{zq} .

Folgende Übergabeparameter sind definiert:

In:

- data_main
- data_sheet
- Masterdung
- Anzahl der Spannfelder
- Sind Systeme geerdet
- Stromvorgabe: Amplitude und Winkel
- Systemkennzeichnung für die Zuweisung relevant

Out:

- C Zweig-Knoten-Inzidenzmatrix
- I_{zq} Stromquellenvektor
- Yz_{erde} Admittanzmatrix der Erdungsknoten
- Zuweisung der Systeme zu den Zweigen
- counter_knoten Anzahl der Knoten
- counter_zweige Anzahl der Zweige
- Knoten Start- und Endknoten je Spannfeld

Vorgehensweise:

- Initialisierung der Output-Variablen
- Definieren der Trafo-Admittanz Yz_{trafo}
- Systembezeichnung zuweisen, Systeme erden lt. Eingangsdaten
- C_{hilf} Matrix erzeugen nach Clarke [1], einheitliche Matrix

Vorgehen je Spannfeld/ Abschnitt:

- Masterdung am Anfang und Ende zuweisen
- Suche, welches System vorhanden ist
- Summierung der vorhandenen Systeme
- Feststellen, ob sich etwas zum vorherigen Abschnitt geändert hat
- Vergleich der aufgelegten Systeme mit vorherigem Abschnitt
- Spezialabschnitte setzen: Startabschnitt, Knoten für beginnende, durchgehende, endende Systeme, Definieren der endenden Systeme, setzen der Knoten für das Erdseil
- knoten, C_{hilf} , counter_knoten, counter_zweige wird an Funktion „C“ 6.3.4 übergeben

- Speichern der Knoten für Start und Ende des Abschnittes
- Bestimmen der Erdungsknoten und setzen des Masterdungswiderstandes
- Systembezeichnung den Zweigen zuweisen
- Kurzschluss der Erdseile falls zwei vorhanden, Systemzuweisung der Erdseile

Anfang des Leitungsabschnittes:

- Definition von Erdungswiderstand und Stromquellen für den Startabschnitt
- Speicher der Knoten des Startabschnitts
- Setzen der Admittanzen für geerdete Systeme
- Setzen der Stromquellen des Startabschnitts
- Einbinden des Erdseiles in die Erdungsanlage der Station
- Wenn zwei Erdseile vorhanden, diese kurzzuschließen sowie Zuweisung der Erdseile
- (Verbinden der Sammelschienen und Trafos)

Endabschnitt des Leitungsabschnittes:

- Definition von Erdungswiderstand und Stromquellen für den Endabschnitt
 - Speichern der Knoten des Endabschnitts
 - Setzen der Admittanzen für geerdete Systeme
 - Setzen der Stromquellen des Endabschnitts
- Setzen der laufenden Abschnittsnummer für die zugehörigen Knoten/ Zweige

Diese Prozedere wird durchgeführt, bis alle Spannungsfelder/Abschnitte bearbeitet worden sind.

Nachdem das letzte Spannungsfeld/ Abschnitt behandelt worden ist werden folgende Aktionen durchgeführt:

- Zusammenfügen und berechnen von C , Yz_{erde} und I_{zq}
- Zuweisung der Knoten, Zweige, Seile und Systeme
- Übergabe von C , I_{zq} , Yz_{erde} , $zuweisung$, $zuweisung_{laengs}$, $counter_{knoten}$, $counter_{zweige}$, $knoten$ an Funktion „knoten“ 6.3.5.

Das Speichern der Knoten für den Start und Endabschnitt je Spannungsfeld ist für das darauffolgende Spannungsfeld notwendig. Die Startknoten des „neuen“ Spannungsfelds sind mit den Endknoten des alten Spannungsfelds gleichzusetzen, um die gewollte Verbindung der Leiterseile bzw. Knoten zu gewährleisten.

6.3.4 Funktion „C“

Mit dieser Funktion wird die C-Matrix je Abschnitt erstellt und an die Funktion „generieren“ 6.3.3 übergeben. Die In- und Out-Parameter werden immer nur je Abschnitt/Spannfeld erstellt. Die Start- und Endknoten zur Orientierung, welcher Abschnitt gerade bearbeitet wird, ist essentiell.

In:

- knoten, letzte Knotennummer für jedes Seil
- C_hilf wird aus Funktion „generieren“ übernommen
- n, Anzahl der Seile

Out:

- start_knoten
- end_knoten
- C je Abschnitt

Vorgehensweise:

- Einlesen der In Parameter
- Generieren der Ersatzelemente lt. Clarke [1] für den aktuellen Abschnitt
- C je Abschnitt wird mit Hilfe von C_hilf erstellt
- start_knoten und end_knoten neu zuweisen
- Übergabe von C je Abschnitt an Funktion „generieren“ 6.3.3

Die Matrix C_hilf wird von der Funktion „generieren“ übergeben und ist standardisiert.

Die Start- und Endknoten sind für richtige Zusammenstellung der C-Matrix relevant. Die Endknoten des vorherigen Spannfeldes müssen mit den Startknoten des neuen Spannfeldes übereinstimmen um die Verbindung der Leiterseile über die gesamte Anzahl der Spannfelder/ Abschnitte herzustellen.

6.3.5 Funktion „knoten“

Diese ist die Hauptberechnungsfunktion. Für die Erstellung des Ergebnisses werden an die untergeordneten Funktionen relevante Parameter zur Berechnung übergeben.

Sie greift auf Funktion „Yz“ und Funktion „generieren“ zu und nimmt die Ausgabe der Knoten- bzw. Zweigströme vor.

Der wesentliche Teil besteht im Zusammensetzen der einzelnen Parameter/ Matrizen die übergeben werden. Somit kann die Berechnung, wie unten angeführt, gestartet werden.

Hier werden am Anfang folgende Werte vorgegeben:

- Anzahl der Spannungsfelder, `anz_vec`
- Vorgabe der Phasenströme aller Systeme, Amplitude und Winkel
- Sind Systeme geerdet
- Kennzeichnung und Zuweisung der Systeme

Out:

- `erg_knoten`
- `erg_zweige`
- `erg_laengs`

Vorgehensweise:

- Die am Anfang vorgegebenen Werte an Funktion „generieren“ übergeben
- Vorgegebene Werte an Funktion „Yz“ übergeben
- Output der beiden Funktionen bekannt
- Diagonalmatrix Yz mit Diagonalmatrix Yz_erde (Stromquellen) vereinigen
- Auffüllen und Zuweisung von I_{zq}

Berechnen von:

- Knotenpunktsadmittanzmatrix Y
 - Knotenstromes I
 - Knotenspannungen U
 - Zweigspannungen U_z
 - Zweigströmen I_z, entspricht der Summe aus Zweigstrom Admittanz und Quelleströme
-
- I_z zuweisen
 - Ausgabe der Knoten- und Zweigströme `erg_knoten`, `erg_zweige`

Die Darstellung der von `erg_laengs` setzt sich aus den Strömen je Leiterseil und Abschnitt zusammen und liefert repräsentative Werte.

6.4 Beschreibung der Matrizen

Zur besseren Übersicht werden in diesem Punkt die Matrizen und deren Inhalt beschrieben.

In der Diagonalmatrix Y_{z_erde} werden die Zweige aufgeführt, die mit Erde verbunden sind. Dazu gehören die darin gesetzten Stromquellen, Transformatoren und Masterdungen. Aufbau ist folgender:

$$\underline{Y}_{z_erde} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{10} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{20} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{n0} \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

mit der Dimension:

$$\dim(\underline{Y}_{z_erde}) = \text{Knoten} \times \text{Knoten} \quad (6-2)$$

wobei nur die Hauptdiagonale besetzt sind.

Die Spaltenmatrix Y_z beschreibt die Admittanz der einzelnen Zweige zueinander.

$$\underline{Y}_z = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{n-1 n} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

Dimension dieser Spaltenmatrix

$$\dim(\underline{Y}_z) = \text{Zweige} \times 1 \quad (6-4)$$

Die Matrix Y_z wird in Funktion „knoten“ zusammengesetzt. Dazu wird der Vektor Y_z in eine Diagonalmatrix gewandelt. Der Aufbau setzt sich schlussendlich folgendermaßen zusammen:

$$\underline{Y}_z = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{z_erde} \\ \underline{Y}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{10} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{20} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{n0} \\ \underline{Y}_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{23} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{mn} \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

Die Matrizen Y_{z_erde} und Y_z werden zu Y_z zusammengefasst, um auf die benötigte Form für das Knotenpotenzialverfahren zu kommen.

Die Dimension dieser Matrix ergibt sich zu:

$$\dim(\underline{Y}_z) = (\text{Knoten} + \text{Zweige}) \times (\text{Knoten} + \text{Zweige}) \quad (6-6)$$

Die Admittanzmatrix Y wird in Funktion „knoten“ berechnet und weist folgende Dimension auf:

$$\dim(\underline{Y}) = \text{Knoten} \times \text{Knoten} \quad (6-7)$$

Die C_{hilf} Matrix wird in Funktion „generieren“ erstellt und anschließen der Funktion „C“ übergeben.

$$C_{\text{hilf}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

Die Dimension von C_{hilf} ergibt sich zu:

$$\dim(C_{\text{hilf}}) = (\#Knoten \text{ je Ersatzelement}) \times (\#Knoten \text{ je Ersatzelement}) \quad (6-9)$$

Bei der gewählten Methode lt. Clarke [1] ergibt sich somit eine Dimension von 6 x 6.

Anschließend wird C je Abschnitt gebildet und enthält die Verbindungen der Zweige untereinander. Ein Beispiel ist in (6-10) angeführt:

$$C_{\text{je Spannfeld, Bsp}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

Dimension von C sieht folgendermaßen aus:

$$\dim(C_{\text{je Spannfeld}}) = \text{Zweige}_{\text{je Spannfeld}} \times \text{Knoten}_{\text{je Spannfeld}} \quad (6-11)$$

$C_{\text{je Spannfeld}}$, wird anschließen an Funktion „generieren“ übergeben und die gesamte C-Matrix erstellt.

Die endgültige C-Matrix weist folgende Dimension auf:

$$\dim(C) = \text{Zweige} \times \text{Knoten} \quad (6-12)$$

Der Knotenstromvektor I_{zq} enthält die vorgegebenen Stromquellen.

$$\dim(I_{zq}) = (\#Zweige + \#Knoten) \times 1 \quad (6-13)$$

7 Modellbildung

In Abschnitt 3.2.2, Vierpoltheorie zweier Leiter, wird ein Ersatzelement, bestehend aus 6 Elementen für die Kopplung zwischen zwei Leitern, beschrieben.

Aufbauend auf dieses Verfahren wird hier die Nachbildung von mehreren Leitern eines Spannungsfeldes beschrieben. Die Knotennummerierung und Zusammenhänge der einzelnen Ersatzelemente je Spannungsfeld sind angeführt.

7.1 Knotennummerierung je Ersatzelement

Die Nummerierung der einzelnen Elemente folgt stets einem gleichen Muster.

- Zuerst werden die Knotennummern der Seilanzahl für den Anfang zugeteilt.
- Danach erfolgt die Nummerierung der Knoten immer für eine gesamte Ersatzschaltung zweier Leiter.

In Abbildung 7-1 ist die Vorgehensweise bei der Knotennummerierung ersichtlich.

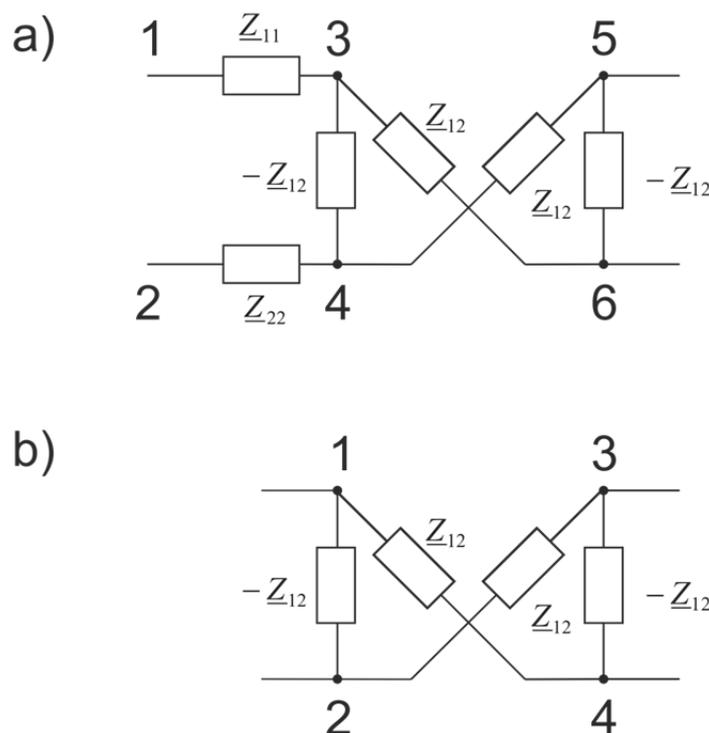


Abbildung 7-1: Knotennummerierung der Ersatzelemente, a) Anfangselemente b) Koppellemente zwischen zwei Leitern

Wendet man dieses Prinzip auf mehrere Leiter an, so ist zu berücksichtigen, dass sich die Längsimpedanz der ersten Elemente der Leitern nur einmal, am Anfang zu berücksichtigen sind. Aufgrund dessen, wird die Nummerierung in Abbildung 7-1 b nochmalig dargestellt.

7.2 Knotennummerierung je Spannfeld

Die Knotennummern am Anfang und Ende eines Spannfeldes werden benötigt um einen Leitungszug korrekt miteinander zu verschalten. Dazu wird folgendermaßen vorgegangen.

- Die Anfangsknoten wird der Anzahl der Leiter zugeordnet.
- Danach wird vom ersten Leiterseil die Kopplung auf die nachfolgenden Leiterseile erstellt.
- Kopplung zwischen zweitem Leiterseil und den nachfolgenden Seilen, usw..
- Dies geschieht so lange bis alle Kopplungen berücksichtigt worden sind.

Voraussetzung für die Nummerierung der Knoten ist das die Knotennummern gespeichert bzw. für ein neues Ersatzelement die vorherige Knotennummer verwendet wird, dass somit keine überflüssigen Knoten vorhanden sind.

Dies bedeutet, dass wie in Abbildung 7-2 nach dem ersten Ersatzelement mit der Knotennummer 8, das zweite Ersatzelement mit der Knotennummer 7 beginnt. Es wird das zweite Ersatzelement nummeriert und die Position sowie die Knotennummern gespeichert.

Dargestellt ist ein Spannfeld mit 4 Leiter, L1 bis L3 und das Erdseil ES, ist in Abbildung 7-2. Diesem Aufbau kann z.B. einer Leitung mit einem System und einem Erdseil zugeordnet werden.

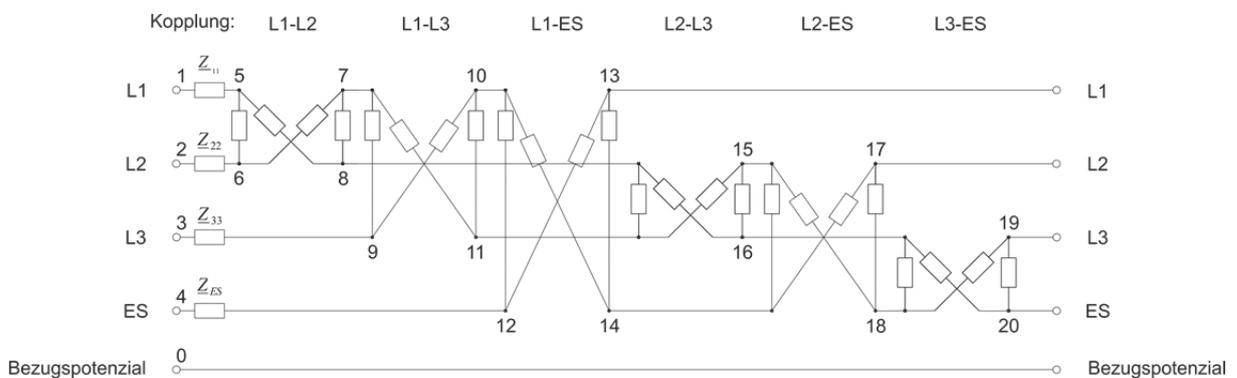


Abbildung 7-2: Aufbau mit Hilfe der Ersatzelemente für 4 Leiter

Die Abbildung 7-2 ist eine physikalische Darstellung eines mathematischen Modelles. Das Bezugspotenzial mit der Knotennummer Null ist angegeben.

Somit ist ein Spannfeld vollständig durch die Ersatzelemente bestimmt.

7.3 Knotennummerierung je Leitungsabschnitt

Die Anfang- und Endknoten der Spannfelder werden gespeichert. Die Anfangsknoten des nächsten Spannfeldes beginnen mit den Endknoten des vorherigen Spannfeldes.

Als Beispiel sind zwei Systeme mit zwei Erdseilen und deren Knotennummerierung in Abbildung 7-3 dargestellt. Diese Konfiguration enthält 8 Seile und erstreckt sich über 7 Spannfelder. Anfangs- und Endknoten sind zwischen den Spannfeldern jeweils die gleichen.

		1	2	3	4	5	6	7
System 1	1	29	93	157	221	285	349	413
	2	41	105	169	223	297	361	425
	3	51	115	179	243	307	371	435
	4	59	123	187	251	315	379	443
System 2	5	65	129	193	257	321	385	449
	6	69	133	197	261	325	389	453
Erdseile	7	71	135	199	263	327	391	455
	8	72	136	200	264	328	392	456

Abbildung 7-3: Knotennummerierung der Spannfelder

Die Variable „knoten“ enthält die Anfangs und Endknoten der Spannfelder. Diese Information ist für den weiteren Aufbau, einbinden der Transformatoren, Sammelschienen und Stromquellen wichtig.

Es gibt in diesem Beispiel insgesamt 7 Spannfelder und somit 14 Zeilen der Variable für Anfangs- und Endknoten je Spannfeld. Die Spalten enthalten den Spannfeldabschnitt sowie die Start- und Endknoten des betrachteten Spannfeldes.

7.4 Implementierung des Kurzschlussbügels

Das Erstellen des Kurzschlussbügels bzw. Implementierung des Zweiges setzt voraus, dass die Knotennummerierung bereits abgeschlossen ist. Es werden somit nachträglich die Matrizen erweitert bzw. vorhandene Werte überschrieben.

Um den Kurzschlussbügel zu setzen wird folgende Information benötigt:

- Kurzschluss von bis vorgeben
- Kurzschlussort, Spannfeld Nummer
- Betroffenen Seile, Phasenseile und/ oder Erdseile
- wenn benötigt Übergangswiderstand

Zu diesem Zweck wurden folgende Eingabeparameter eingeführt:

- „KS_von_bis“, mehrere Kurzschlussorte vorgeben
- „spannfeld“, entspricht Kurzschlussort

- „KS_knoten“, entspricht betroffenen Seilen
- „Yz_KS“, Widerstand des Kurzschlussbügels

Die Variable „spannfeld“ gibt den aktuellen Kurzschlussort an. Um an mehreren Orten einen Kurzschluss zu setzen und getrennt voneinander zu berechnen wird die Variable „KS_von_bis“ in einer Schleife durchlaufen.

Um im Programm die richtige Zuordnung der Parameter sicherzustellen werden die Eingangsparameter durch Hilfsparameter ersetzt. Zu berücksichtigen ist, dass die Knotennummerierung der Spannungsfelder bereits abgeschlossen ist.

„spannfeld_suche“, sucht mit Hilfe der Variablen „spannfeld“ das betroffene Spannungsfeld und gibt die entsprechende Zeile, in der Variablen „knoten“, zurück. In der Variablen „knoten“ stehen die Spannungsfelder und die dazugehörigen Anfangs und Endknoten. Somit können mit „KS_spannfeld_knoten“ die entsprechenden Knotennummern der Leiterseile am Kurzschlussort bestimmt werden.

Nun sind die Knotennummern am Kurzschlussort bekannt. Es wird ein zusätzlicher Zweig, der dem Pfad des Kurzschlussstromes entspricht eingeführt. Somit muss die Y_z Matrix und die C Matrix erweitert werden. Die benötigten Zweige ergeben sich aus der Anzahl der Kurzschlussknoten minus eins.

$$\#KS_Zweige = \#KS_Knoten - 1 \quad (7-1)$$

Somit wird eine Schleife generiert, die jeweils die einzelnen Kurzschlussknoten miteinander verbindet, über die Kurzschlussimpedanz, die variiert werden kann.

Die Matrix Y_z wird je Schleifenumlauf um eine Zeile und eine Spalte erweitert. In (7-2) ist dies für einen Durchlauf ersichtlich, links alt, rechts neu.

$$Y_{z\text{ Beispiel}} = \begin{bmatrix} Y_{10} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{20} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{n0} \\ Y_{12} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{23} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{mn} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} Y_{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{n0} & 0 \\ Y_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{z_KS} \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

Der Zweig ist erstellt und mit der Impedanz vorgegeben.

Jetzt muss dazu die Zweig-Knoten-Inzidenzmatrix C erweitert werden. Die Anzahl der Zweige wird erweitert, was der Erhöhung der Zeilen um eins gleichkommt. Nun wird in die neu geschaffene Zeile zu dem entsprechenden Kurzschlussknoten der Spalte die 1 gesetzt. Um die Stromflussrichtung und somit C fertigzustellen, wird -1 in der neu erstellten Zeile auf die Knotennummer der Spalte gesetzt. Ein Beispiel zur Verdeutlichung ist in (7-3) der letzten Zeile dargestellt, links alt, rechts neu.

$$C_{\text{Beispiel}} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

Das setzen der Kurzschlusszweige wird Programmtechnisch mit einer Schleife durchgeführt. Erst im anschließenden Teil des Programmes wird die Admittanzmatrix Y gebildet. Die Manipulation der Matrizen Y_z und C ist damit abgeschlossen.

Als graphisches Beispiel dienen zwei Systeme mit zwei Erdseilen wobei ein 2-poliger Kurzschluss mit der Übergangsimpedanz „ Y_{z_KS} “ implementiert ist. Am Spannungsfeld 6 und entspricht somit dem 6sten Mast.

	1	29	2	93	3	157	4	221	5	285	6	349	7	413
System 1	1	29	2	93	3	157	4	221	5	285	6	349	7	413
	2	41	105	169	223	297	307	361	425					
	3	51	115	179	243	307	371	435						
	4	59	123	187	251	315	379	443						
5	65	129	193	257	321	385	449							
System 2	6	69	133	197	261	325	389	453						
	7	71	135	199	263	327	391	455						
Erdseile	8	72	136	200	264	328	392	456						

Abbildung 7-4: Spannungsfelder mit Kurzschlussbügel zwischen 297 und 285

Der 3- oder mehrpolige Kurzschluss ist zur Verdeutlichung nochmals in Abbildung 7-5 ersichtlich. Bei einem 3-poligen Kurzschluss gilt es in diesem Beispiel die Knotennummern 285, 297 und 307 miteinander zu verbinden. Es werden somit zwei Zweige erstellt mit 2 Fehlerübergangswiderständen „ Y_{z_KS} “. Dieses Prinzip kann auf die verschiedensten Fehlerbedingungen angewandt werden. Somit kann jeder erdenkliche Fehler zwischen den Seilen hergestellt werden.

	1	29	2	93	3	157	4	221	5	285	6	349	7	413
System 1	1	29	2	93	3	157	4	221	5	285	6	349	7	413
	2	41	105	169	223	297	307	361	425					
	3	51	115	179	243	307	371	435						
	4	59	123	187	251	315	379	443						
5	65	129	193	257	321	385	449							
System 2	6	69	133	197	261	325	389	453						
	7	71	135	199	263	327	391	455						
Erdseile	8	72	136	200	264	328	392	456						

Abbildung 7-5: 3-poliger Kurzschluss an Mast Nr.6

Im Falle eines einpoligen Erdkurzschlusses muss in der Y_z -Matrix wie in (7-2) die Admittanz gegen Erde gesetzt werden. In der C-Matrix muss ebenfalls an der Stelle, Knoten mal Knoten, eine 1 wie in Abbildung 3-4 beschrieben gesetzt werden.

7.4.1 Implementierung von Mehrfachfehlern

Es können beliebig viele Fehler gesetzt werden. Somit ist eine Nachbildung aller Arten des Kurzschlusses im Netz wie in Abbildung 2-1 möglich.

Dazu werden die Variablen „spannfeld_suche“ und „KS_spannfeld_knoten“ erweitert. Dies geschieht, bevor die Y-Matrix vollständig zusammengeführt wird.

Somit kann in jedem Abschnitt die Verbindung zwischen den vorhandenen Leiterseilen, bzw. eine Verbindung mit Erde hergestellt werden. Folgender Ablauf ist hinterlegt:

- Vorgabe der Nenn- Kurzschlussleistungen
- Vorgabe der Abschlussadmittanzen
- Vorgabe des Kurzschlussbügels
- Vorgabe des Fehlerortes
- Berechnungsvorgang

7.4.2 Variation des Fehlerortes

Der Fehlerort kann zusätzlich noch variiert werden. Dies ist für mehrere Fehlerarten möglich. Es wird folgendermaßen vorgegangen:

- Vorgabe der Nenn- Kurzschlussleistungen
- Vorgabe der Abschlussadmittanzen
- Vorgabe des Kurzschlussbügels
- Vorgabe des ersten Fehlerortes
- Berechnung für den ersten Fehlerort
- Vorgabe des X-ten Fehlerortes
- Berechnung für den X-ten Fehlerort usw.

Die Ergebnisse werden anschließend gespeichert und können dann zur Auswertung herangezogen werden.

7.5 Vorgabe der Anfangs-Abschlussadmittanzen

Die Abschlussadmittanzen werden gesetzt, bevor die Matrix Y_z zusammengefügt wird. Hierfür wird die Variable „knoten“ benötigt. Daraus können die Anfangs- und Endknoten der Leitung bestimmt werden.

Nach Bestimmung der spezifischen Admittanzen werden diese mit Hilfe einer Schleife gesetzt. Dazu werden alle spannungsführenden Leiterseile an den Leitungsenden mit der Admittanz abgeschlossen.

Der Schleifendurchlauf je Phasenseil beinhaltet folgende Aktionen:

- Y_{z_erde} für Phasenseil i am Anfang setzen

- Y_{z_erde} für Phasenseil i am Ende setzen

Durchlauf i entspricht der Anzahl der vorhandenen Phasenseile.

Eine graphische Darstellung der Situation zur Verdeutlichung des Aufbaus ist in Abbildung 7-6 angeführt.

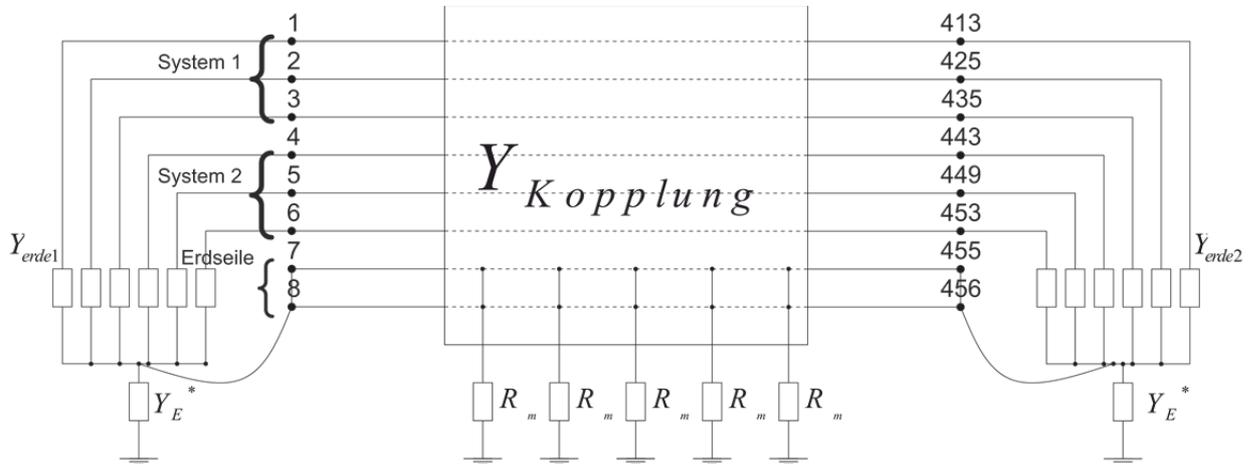


Abbildung 7-6: Setzen der Admittanzen gegen Erde

Die Kopplung der Seile zueinander und gegenüber Erde wird mit $Y_{Kopplung}$ ausgedrückt. R_M steht für den/die Mastwiderstände. Die Anfangs- und Endknoten des Leitungszuges sind ebenfalls ersichtlich.

Y_{erde1} und Y_{erde2} entsprechen den Admittanzen der Leiterseile gegen Y_E^{*3} . Die Knotennummern und Mastwiderstände sind ebenfalls vermerkt.

Somit können alle Phasenseile gegenüber Y_E^* gesetzt werden. Mit Hilfe der Variablen „ Y_{z_erde} “ und „knoten“ können alle Knoten gegen Erde gesetzt werden. Wichtig ist hierfür nur, dass dies vor dem Zusammenfügen der Y Matrix geschieht, Näheres ist in 6.4 erläutert.

7.6 Sternpunkt, niederohmige Erdung

Um einen Sternpunkt zu erstellen, werden die Phasenseile miteinander verbunden. Je nachdem ob man einen oder mehrere Transformatoren je System hat, werden dementsprechend die Seile miteinander verbunden.

In Abbildung 7-7 befinden sich zwei Systeme, wobei jedes System mit einem Transformator ausgestattet ist.

Y_E^* ...Sternpunktterdung und die Erdungsanlage des jeweiligen Umspannwerkes zusammengefasst. Dies können je Umspannwerk verschiedene Werte annehmen.³

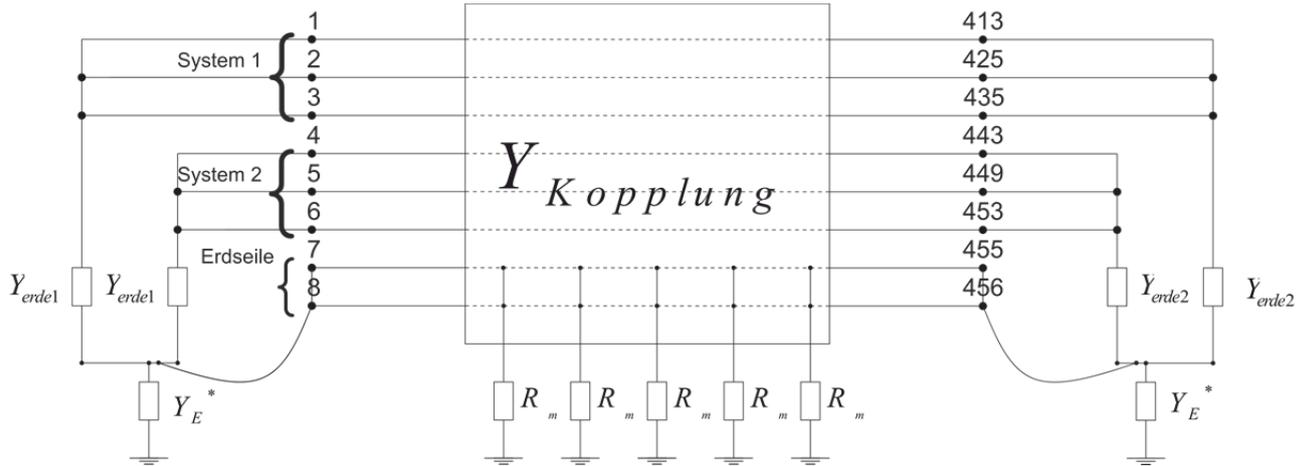


Abbildung 7-7: Sternpunkt und Erdung der Transformatoren mit Hilfe von Erde

Um die Zweige miteinander zu verbinden, müssen in der `func_knoten_generieren` für die Anfangs- und Abschlussknoten neue Zweige erstellt werden.

Dies erfolgt folgendermaßen:

- Erstellen eines neuen Zweiges
- C-Matrix die Verbindungen zwischen den Knotenpunkten herstellen

In `func_knoten_Yz`:

- Zweigadmittanz Y_z setzen

Somit ist eine Verbindung zwischen jeweils drei Phasenseilen eines Systems gegeben.

Mit Hilfe von Y_{z_erde} kann die Admittanz Y_{erde} gesetzt werden. Hierbei kann eine unterschiedliche Wahl der Admittanzen gegen Erde berücksichtigt werden.

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, den Nullstrom, der aufgrund der Kopplungen über Erde fließt, über die Transformatoradmittanz zu führen.

7.7 Quellenumwandlung

Da mit dem Knotenpotenzialverfahren vorgegangen wird, müssen alle Spannungsquellen in Stromquellen umgewandelt werden.

Die Umwandlung der Quellen geschieht mit Hilfe der Nennspannung und Kurzschlussleistung. Hierbei wird eine Kurzschlussleistung je Station/ Transformator vorgegeben. Eine Leitung kann somit ein-/zwei-/ oder mehrseitig gespeist werden.

Betrachtung einer dreiphasigen Quelle:

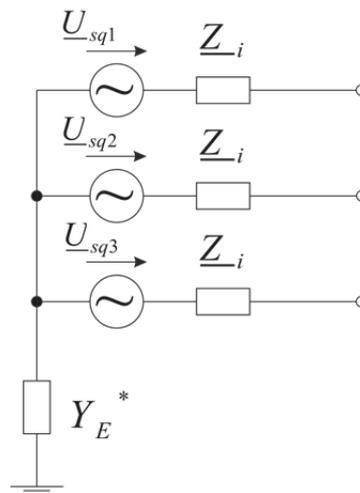


Abbildung 7-8: Ausgangssituation einer Drehstromquelle

Die drei Phasenspannungen sind ideal leitend miteinander verbunden und bilden somit den Sternpunkt. Der Sternpunkt ist über die Admittanz Y_E^* geerdet. Diese Ersatzadmittanz fasst die Sternpunktserdung und die Erdungsanlage des Umspannwerkes zusammen. Die Spannungen sind symmetrisch aufgebaut, je 120 Grad Phasenverschiebung, und weisen gleiche Amplitude auf. Die Impedanz Z_i verdeutlicht den Innenwiderstand der Quelle.

Um diese Spannungsquelle im Knotenpotenzialverfahren zu adaptieren, werden die Zweigspannungen U_z , die ebenfalls um 120° Grad phasenverschoben sind, vorgegeben. Mit Hilfe der Zweigspannungen wird der Zweigstrom berechnet und eingepreßt. Bevor dies geschehen kann, muss die Admittanz Y_1 bestimmt werden. Diese ergibt sich aus der Leistung je Phase und der Nennspannung je Phase.

Somit berechnet sich die Admittanz eines Zweiges zu:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{j} * \frac{S_{k1}}{3 * \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (7-4)$$

S_{k1} Kurzschlussleistung der Station / Netz

Die Ersatzschaltung im Knotenpotenzialverfahren sieht folgendermaßen aus:

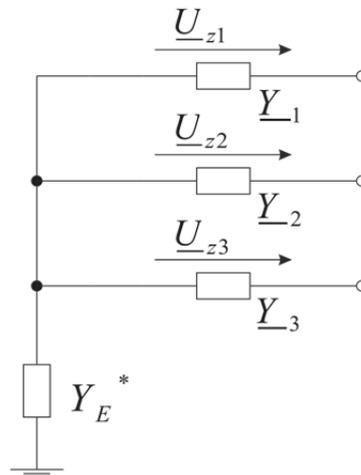


Abbildung 7-9: Schritt 1 Zweigspannungen und Admittanzen vorgeben

Die Zweigströme stellen sich aufgrund der Zweigspannung und den Verhältnissen der Admittanzen ein. Die berechneten Admittanz $\underline{Y}_{1..3}$ trägt wesentlich zur Kurzschlussstrombegrenzung bei. Durch die Multiplikation mit der \underline{Y}_z Matrix ergeben sich die Zweigströme.

$$\underline{I}_z = \underline{Y}_z * \underline{U}_z \quad (7-5)$$

Diese Zweigströme werden anschließend vorgegeben, da im verwendeten Verfahren nur Ströme vorgegeben werden können. Eine Ersatzschaltung sieht folgendermaßen aus:

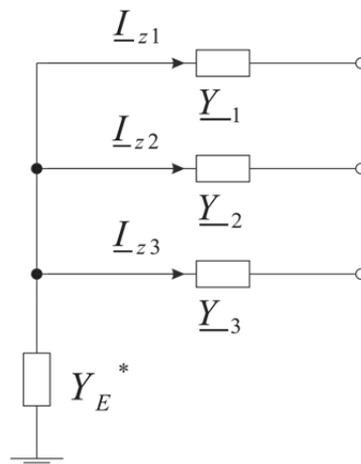


Abbildung 7-10: Zweigströme werden vorgegeben

Die Bestimmung der Zweigströme ist abgeschlossen.

Das gleiche Prinzip kann für verschiedene Systeme angewandt werden. Leitungsanfang und Leitungsende sowie eine Stichleitung stellen kein Problem dar.

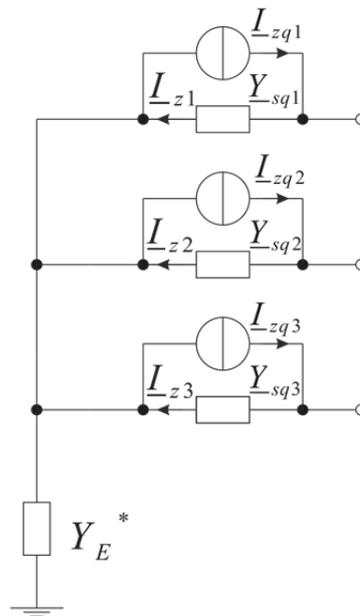


Abbildung 7-11: Ersatzstromquelle äquivalent zur Spannungsquelle

In Abbildung 7-11 ist die vollständige Ersatzstromquelle dargestellt.

Der Strom I_{zq} und die Admittanz Y_{sq} werden vorgegeben, je nach Admittanzverhältnis fließt ein Teil des Stromes in die Leitung bzw. über die Innenadmittanz der Stromquelle.

7.8 Arten der Quellenvorgabe

Da die Modellierung mit Hilfe des Knotenpotenzialverfahrens realisiert wird, müssen alle Spannungsquellen in Stromquellen umgewandelt werden. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 7.7 beschrieben. Je nach Anwendungsfall ist zu unterscheiden, welche Form gewählt wird.

Stromquellen können auf zwei verschiedene Arten vorgegeben werden:

- Knotenstromquellen I_{zq}
- Zweigstromquellen I_z

Die unterschiedlichen Vorgaben der Ströme wirken sich entscheidend auf den Stromfluss aus. Bei der Vorgabe von Strömen im Kurzschlussfall ist die Art der verwendeten Stromquellen entscheidend. Der Unterschied dieser zwei Verfahren wird in der Folge angeführt.

7.8.1 Vorgabe eines Knotenstromes

Die Vorgabe wird mit Hilfe des Knotenstromquellenvektor I_{zq} bewerkstelligt. Eine genauere Betrachtung der Auswirkungen bei der Vorgabe des Knotenstromes muss durchgeführt werden. Die Vorgabe der Knotenströme ist in Abbildung 7-12 ersichtlich.

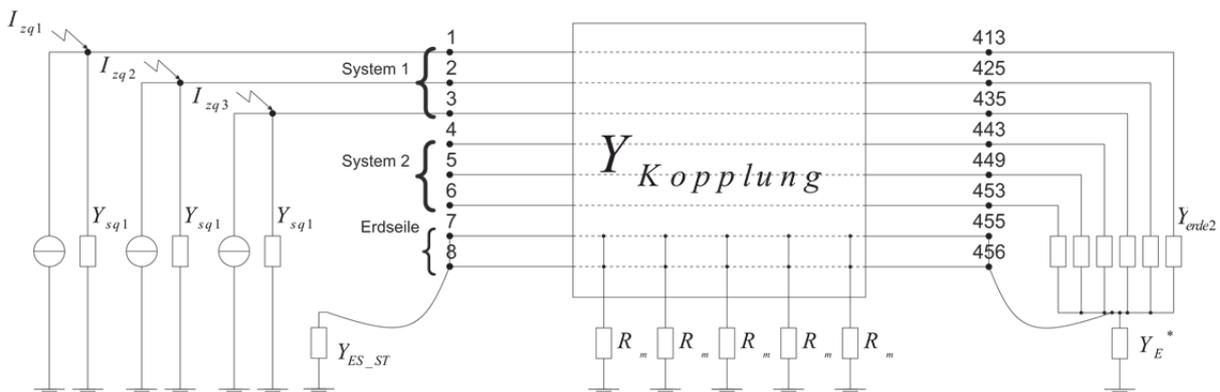


Abbildung 7-12: Knotenstromvorgabe für ein System

Y_{sq1} sind die Nulladmittanzen der jeweiligen Quellen. Y_{erde2} hingegen wird hier als Abschlussadmittanz verwendet. $Y_{Kopplung}$ stellt die Leitungs- und Kopplungseinflüsse dar. R_m repräsentiert die Mastwiderstände. I_{zq1} , I_{zq2} und I_{zq3} stehen symbolisch für die vorgegebenen Knotenströme. Y_{ES_ST} stellt die Einbindung des Erdseiles in die Station dar.

In Abbildung 7-12 ist ein System mit Hilfe von Knotenströmen vorgegeben. Am Ende der Leitung sind alle zwei Systeme geerdet. Der Stromfluss, der sich nun ergibt, muss gegen Erde fließen und ist in Abbildung 7-13 ersichtlich.

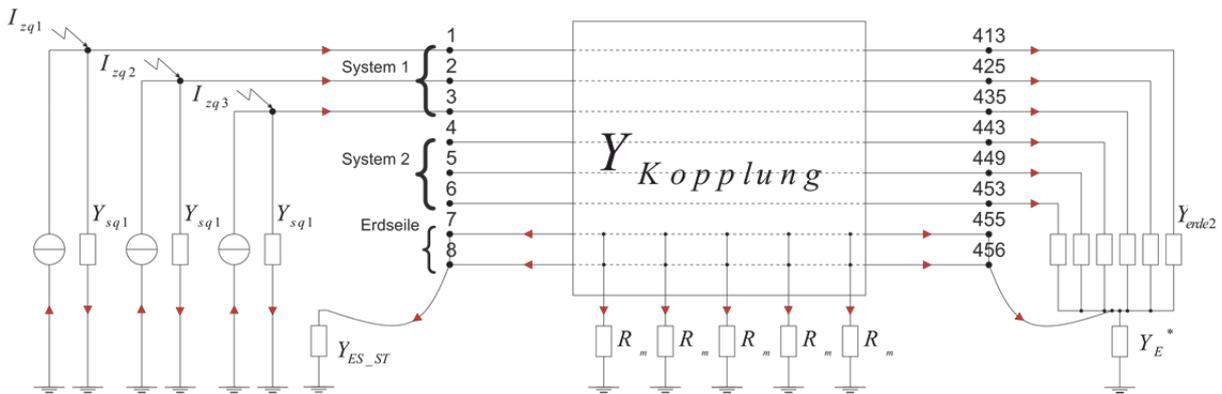


Abbildung 7-13: Stromaufteilung bei Knotenstromvorgabe

Nach den Verhältnissen der Admittanzen wird ein Teil des Stromes in der Leitung, über die Kopplung im Erdseil und schließlich über den Mastwiderstand sowie über die Admittanz Y_{sq1} fließen.

Die Knotenströme kann man sich wie eine ideale Stromquelle vorstellen. Wichtig hierbei ist, dass die Stromquellen geerdet sind somit muss sich der gesamte Strom über Erde schließen.

Somit muss sich bei der Vorgabe des Knotenstromes der Strom über Erde schließen. Wenn ein Admittanz Y_{sq1} am Einspeisepunkt des Knotenstromes gegeben ist, dann fließt der Knotenstrom über die ideale Stromquelle und die Admittanz Y_E^* zum Einspeiseknoten zurück.

Es entsteht bei der Vorgabe eines Knotenstromes ein Kreisstrom wenn eine Admittanz gegen Erde gegeben ist. Wenn die Admittanz Y_{sq1} im Vergleich zur Parallelschaltung des restlichen Netzwerkes zu niederohmig ist, dann schließt sich ein Großteil des Stromes über die Innenadmittanz der Stromquelle Y_{sq1} . Die ist meist nicht erwünscht, da der Strom in Längsrichtung fließen soll.

7.8.2 Vorgabe eines Zweigstromes

Die Vorgabe des Zweigstromes geschieht mit Hilfe von I_z . Hier wird direkt im Zweig ein Strom vorgegeben. Der Strom kann also zwischen zwei Knoten vorgegeben werden.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen ist dies in Abbildung 7-14 ersichtlich. Es wird ein System mit Hilfe von Zweigstromquellen gespeist.

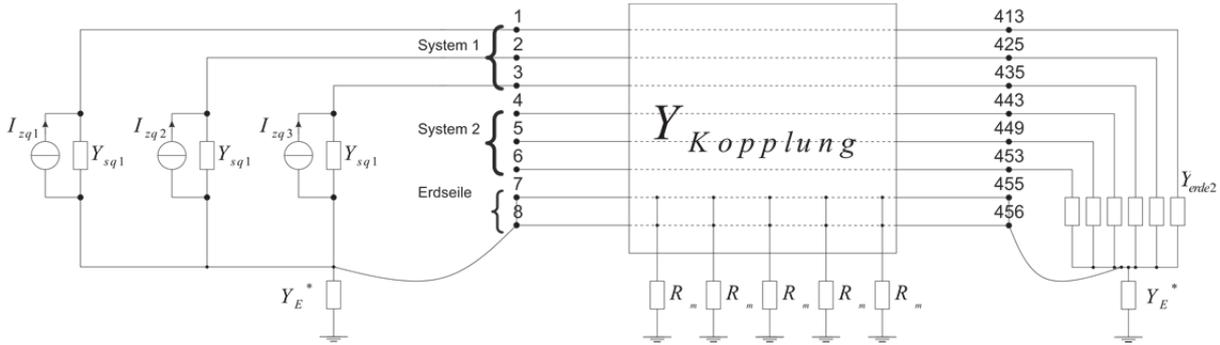


Abbildung 7-14: Vorgabe der Zweigströme

Y_{sq1} stellt in diesem Fall die Admittanz der Stromquelle dar, R_m die Mastwiderstände, Y_E^* die zusammengefasste Admittanz der Erdungsanlage und des Sternpunktes, und Y_{erde} die Admittanz gegen Erde. Y_{erde2} bilden die Abschlussadmittanzen der Phasenseile. Die Kopplung der Seile und Berücksichtigung der Mastwiderstände findet man in $Y_{Kopplung}$.

Die Admittanzen Y_{sq1} können auch null gesetzt werden, dann sind nur mehr die Stromquellen zwischen den zwei Knoten vorhanden. Somit muss der gesamte Strom über den Zweig der Stromquelle fließen. Der Strom kann beliebig vorgegeben werden und bildet unter Berücksichtigung von Y_{sq1} gleich Null keinen Kreisstrom. In Abbildung 7-15 ist dies dargestellt.

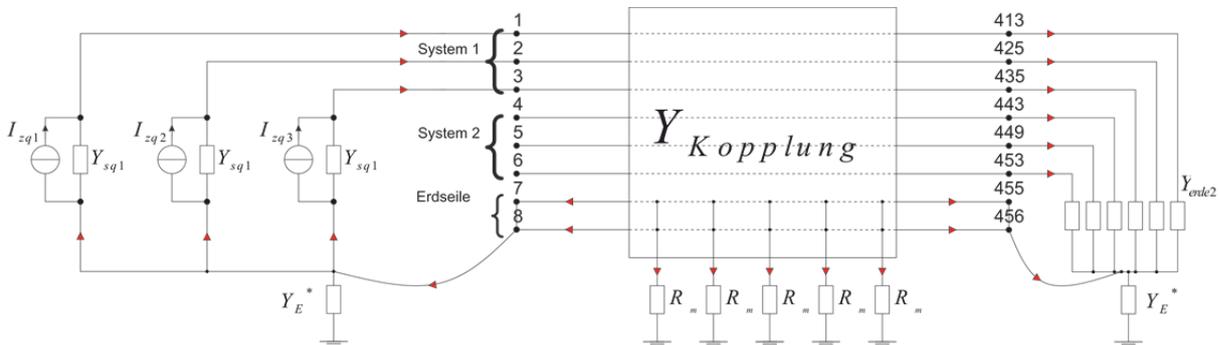


Abbildung 7-15: Stromaufteilung bei Zweigstromvorgabe, wobei Y_{sq1} gleich null ist

Mit der Admittanz gegen Erde, Y_E^* erreicht man, dass der gesamte Strom, der von der Stromquelle vorgegeben wird, über Erde, Erdseil, in der Innenadmittanz bzw. in den zwei anderen Phasen zur Stromquelle fließen muss.

Die Stromquelle tritt also nicht gegenüber Erde auf, sondern zwischen zwei Knoten. Der Strom wird sich den Weg bahnen, mit dem Unterschied, dass dieser je nach Vorgabe nicht zwangsläufig gegen Erde fließen muss, wie es bei den Knotenströmen der Fall ist.

Im Kurzschlussfall muss berücksichtigt werden welche Art der Stromvorgabe man wählt. Diese ist entscheidend, da man entweder eine Stromquelle gegenüber Erde, bzw. einen Strom im Zweig unabhängig von Erde vorgibt.

7.8.3 Vorgabe einer Knotenspannung

Da das Knotenpotenzialverfahren nur Stromquellen als Vorgabe akzeptiert, kann mittels Hybridisierung die Spannung vorgegeben werden.

Bevor die Hybridmatrix aufgestellt werden kann muss zuerst die Y-Matrix aufbereitet werden. Dies setzt voraus, dass die entsprechenden Knotenströme/-Spannungen, an der die Eingabe erfolgen soll, bekannt sind.

Die Verwendung der Hybridmatrix ist nur sinnvoll, wenn Knotenspannungen vorgegeben werden sollen. Da durch Knotenspannungen, Knotenströme vorgeben werden, muss man sich der Stromaufteilung bei Vorgabe eines Knotenstromes bewusst sein.

7.8.3.1 Y Matrix aufbereiten

Da nur einzelne Zeilen, bzw. Bereiche zur Hybridisierung herangezogen werden können müssen die entsprechenden Zeilen und Spalten der Y-Matrix in diesen Bereich verschoben werden. Dazu wird folgendermaßen vorgegangen:

Ausgangsbasis ist die Y-Matrix sowie die jeweiligen Spannungsvorgaben gegenüber Erde. Die Y-Matrix stellt den Bezug der Spannungen und Ströme her. Um den Vorgang zu beschreiben wird ein Beispiel angeführt.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 6 & 9 & 7 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 5 \\ 9 & 8 & 8 & 7 & 6 & 9 \\ 9 & 8 & 7 & 8 & 6 & 1 \\ 1 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

Die vollständige Beziehung ist in (7-7) dargestellt. In (7-8) wird nach U_1 und U_5 gelöst.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 6 & 9 & 7 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 5 \\ 9 & 8 & 8 & 7 & 6 & 9 \\ 9 & 8 & 7 & 8 & 6 & 1 \\ 1 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_5 \\ \underline{I}_6 \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= 1 * \underline{I}_1 + 3 * \underline{I}_2 + 5 * \underline{I}_3 + 6 * \underline{I}_4 + 9 * \underline{I}_5 + 7 * \underline{I}_6 \\ \underline{U}_5 &= 1 * \underline{I}_1 + 9 * \underline{I}_2 + 8 * \underline{I}_3 + 7 * \underline{I}_4 + 6 * \underline{I}_5 + 5 * \underline{I}_6 \end{aligned} \quad (7-8)$$

Als Beispiel soll hier U_1 , U_2 und U_5 vorgegeben werden. Das bedeutet, dass die Matrix so gestaltet wird, dass sich Zeile U_5 unter U_2 befindet. Somit bilden die Spannungen, die vorgegeben werden, einem Bereich der später für die Hybridisierung verwendet werden kann. Die Gleichung (7-7) sieht dann folgendermaßen aus:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_5 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 & 5 & 6 & 7 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 5 \\ 1 & 9 & 6 & 8 & 7 & 5 \\ 9 & 8 & 6 & 8 & 7 & 9 \\ 9 & 8 & 6 & 7 & 8 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_5 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (7-9)$$

$$U_1 = 1 * I_1 + 3 * I_2 + 9 * I_5 + 5 * I_3 + 6 * I_4 + 7 * I_6 \quad (7-10)$$

$$U_5 = 1 * I_1 + 9 * I_2 + 6 * I_5 + 8 * I_3 + 7 * I_4 + 5 * I_6$$

In diesem Fall ist die fünfte Zeile an Position drei gekommen und die fünfte Spalte ebenfalls an Position drei. Zur Kontrolle der Durchführung wurde die Multiplikation nochmals durchgeführt und ist in (7-10) ersichtlich.

Somit werden alle Zeilen und Spalten verschoben, bis sich alle Spannungen die vorgegeben werden sollen im oberen Block befinden, da kann erst die Hybridisierung dieses Bereiches erfolgen.

7.8.3.2 Hybridisierung durchführen

Nach Aufbereitung der Y-Matrix läuft die Hybridisierung nach folgendem Schema ab:

Zuerst wird die Matrix in verschiedene Teilbereiche eingeteilt.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_5 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 3 & 2 & 1 \\ 1 & 9 & 6 \\ 9 & 8 & 6 \\ 9 & 8 & 6 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 & 7 \\ 1 & 1 & 5 \\ 8 & 7 & 5 \\ 8 & 7 & 9 \\ 7 & 8 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_5 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (7-11)$$

Die Gleichung (7-9) kann folgendermaßen dargestellt werden:

Der Ergebnisvektor besteht nun aus den Strömen und Spannungen. Vorgegeben werden können die Spannungen, die Ströme stellen sich dann ein. Die Elemente H_{aa} , H_{ab} , H_{ba} , und H_{bb} müssen noch bestimmt werden.

$$\begin{bmatrix} I \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ab} \\ H_{ba} & H_{bb} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} \quad (7-12)$$

Um die Hybridmatrix zu bestimmen, wird die Y-Matrix nach (7-13) aufgeteilt. Die Teilbereiche gliedern sich nach der Anzahl der Spannungen die vorgegebene werden sollen.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} \quad (7-13)$$

Um die Elemente der Hybridmatrix zu bestimmen, werden folgende Rechenoperationen ausgeführt:

$$\begin{aligned}\underline{H}_{aa} &= \underline{Y}_{aa} - \underline{Y}_{ab}/\underline{Y}_{bb} * \underline{Y}_{ba} \\ \underline{H}_{ab} &= \underline{Y}_{ab}/\underline{Y}_{bb} \\ \underline{H}_{ba} &= -1/\underline{Y}_{bb} * \underline{Y}_{ba} \\ \underline{H}_{bb} &= 1/\underline{Y}_{bb}\end{aligned}\tag{7-14}$$

Somit sind alle Elemente bestimmt, die Hybridisierung ist abgeschlossen.

8 Überprüfung der Methode

Um die Implementierung von Stromquellen, Anfangs- und Abschlussadmittanzen im Modell zu überprüfen und zu verifizieren wurde eine Nachbildung der Verhältnisse erstellt.

Die Plausibilitätskontrolle erfolgt bei Implementierung des Erdkurzschlusses. Dazu wurden folgende Modelle erstellt.

Nachbildung mit Hilfe von:

- Y-Matrix
- Simulink

Die Modellbildung wird in weiterer Folge beschrieben und eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist ebenfalls vorhanden.

8.1 Realisierte Stromvorgabe bei Erdkurzschluss

Beim Erdkurzschluss wurde mit einer Knotenstromquelle am Kurzschlussort ein Kurzschlussstrom vorgegeben. Die Realisierung im Programm wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Abschluss der Leitungen mit Y_{erde}
- Kurzschlussknoten bestimmen
- Knotenstromquelle am Knoten vorgeben
- Erstellen der Kurzschlussbügel mit entsprechender Admittanz

Für ein System und neun Spannungsfelder sieht der Aufbau folgendermaßen aus:

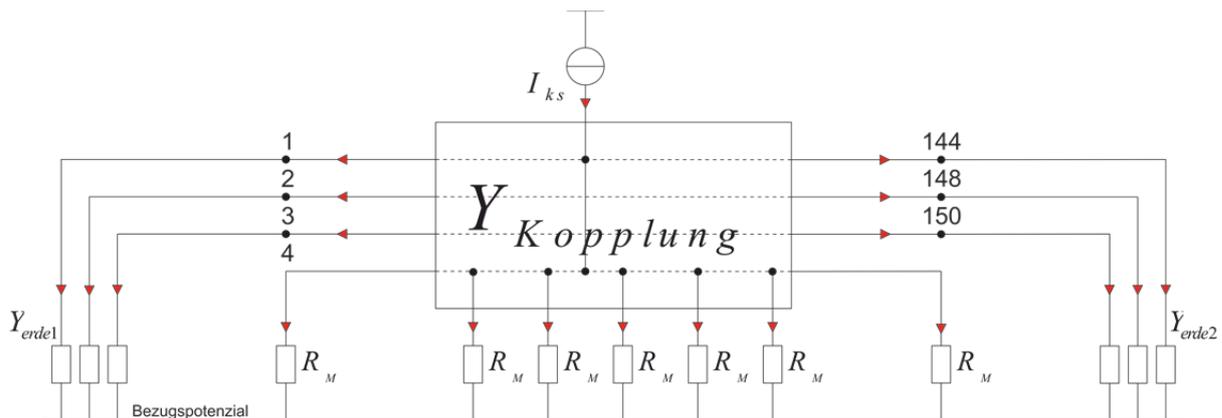


Abbildung 8-1: Ersatzschaltung bei der Stromvorgabe eines einpoligen Kurzschlusses mit der Vorgabe des Knotenstromes

Der Unterschied zur Zweigstromquelle ist in diesem Beispiel klar erkennbar. Die Knotenstromquelle ist an dem Knoten wo der Kurzschlussstrom eingespeist, starr gerdet.

Der Strom sucht sich den Weg nun nach dem Ohm'schen Gesetz und fließt über das Phasenseil und Erdseil zu Erde zurück.

Diese Vorgehensweis berührt darauf, dass der Kurzschlussstrom an der Kurzschlussstelle bekannt ist, dieser kann dann in das passive Netzwerk gespeist werden.

Die Ergebnisse der Simulation werden anschließen in 8.4 gegenübergestellt.

8.2 Y-Matrix

Die Matrix wurde erstellt um anschließend eine Überprüfung der Rechenergebnisse durchzuführen. Diese Prüfung wurde für den einpoligen Kurzschluss durchgeführt.

Bei dem bestehenden Programm wurde ein Kurzschluss am Ende eines Spannungsfeldes implementiert. Um dieses Verhalten zu überprüfen, wurden die Bedingungen in einem m-File nachgebildet. Dazu wurde eine Y-Matrix mit Hilfe von zweier Schleifen erstellt.

Die Vorgehensweise wird angeführt:

Eingangsdaten des m.File der Y-Matrix sind:

- Höhe des Kurzschlussstromes
- Kurzschluss an welchen Masten
- Anzahl der vorhandenen Masten
- Impedanz des Leitungsabschnittes
- Masterdungswiderstände

Ausgangsdaten:

- Strom im Erdseil
- Stromfluss über Erde

Anhand eines Beispiels ist die Vorgehensweise in Abbildung 8-2 ersichtlich. Es wird hier von 6 Masten ausgegangen, wobei sich am 4ten Mast der Kurzschluss befindet. Die dazugehörigen Knoten sind nummeriert. Wichtig hierbei ist, dass ein Bezugsknoten gewählt wird, in unserem Fall ist dies Erde.

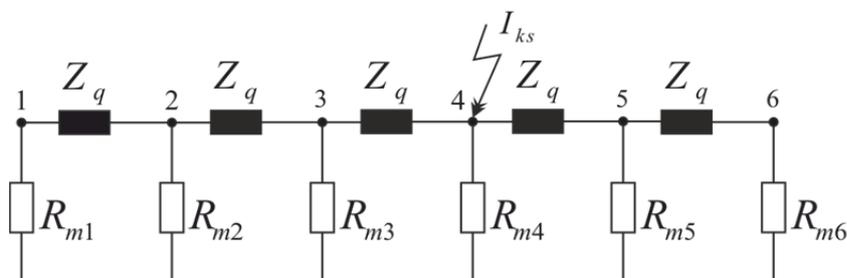


Abbildung 8-2: Bsp. für die Ersatzschaltung, Nachbildung der Y-Matrix

Die Y-Matrix ist folgendermaßen aufgebaut. In der Hauptdiagonale steht die Summe aller angrenzenden Admittanzen. Verbindungen von Knoten zu Knoten werden mit der negativen Admittanz eingetragen. Somit ist diese Y-Matrix spiegelsymmetrisch bezüglich der Hauptdiagonale. Als Beispiel ist hier eine Y-Matrix mit der Dimension 6x6 angeführt.

Zuerst werden die Leitungsverbindungen mit der negativen Admittanz Y_q der Leitung gesetzt.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 \end{bmatrix} \quad (8-1)$$

Danach werden der erste und der letzte Wert in der Hauptdiagonale gesetzt. Hierbei wird die Summe von Mastadmittanz, bei bestimmter Knotennummer, und Leitungsadmittanz gesetzt. Dies ist notwendig, da die Leitung am Anfang und Ende unterschiedlich im Vergleich zu den restlichem Knotenpunkten aufgebaut ist.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 \\ 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & 0 \\ 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & -1/\underline{Z}_q & 0 & -1/\underline{Z}_q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m6}} + \frac{1}{\underline{Z}_q} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m6}} + \frac{1}{\underline{Z}_q} \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

Der Aufbau kann nun automatisiert nachgebildet werden. Es werden die fehlenden Elemente der Hauptdiagonale besetzt. Die Summe aus Mastadmittanz und Admittanzen zweier Leiterseile bilden die T-Ersatzschaltung.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m2}} + \frac{2}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m3}} + \frac{2}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m4}} + \frac{2}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m5}} + \frac{2}{\underline{Z}_q} & -1/\underline{Z}_q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\underline{Z}_q & \frac{1}{R_{m6}} + \frac{1}{\underline{Z}_q} \end{bmatrix} \quad (8-3)$$

Dimension der Matrix ergibt sich zu:

$$\dim(\underline{Y}) = \text{Knoten} \times \text{Knoten} \quad (8-4)$$

Die Admittanzmatrix Y ist somit vollständig bestimmt.

Für die Vorgabe des Kurzschlussstromes wird der Spaltenvektor \underline{I} erstellt. Am betreffenden Knoten wird der KS-Strom gesetzt.

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{ks} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8-5)$$

Dimension von \underline{I} ergibt sich zu:

$$\dim(\underline{I}) = \text{Knoten} \times 1 \quad (8-6)$$

Die Berechnung kann laut Ohm'schen Gesetz erfolgen:

$$\underline{U} = \underline{Y}^{-1} * \underline{I} \quad (8-7)$$

Zuletzt werden noch die Ströme, die über den Masten und in den Leiterseilen fließen, berechnet.

8.3 Nachbildung mit Matlab[®]-Simulink

Das Szenario des einpoligen Fehlers kann zusätzlich mit Simulink nachgebildet werden. Die nachfolgende Aufzählung beschreibt grob die Vorgehensweise bei der Erstellung des Modells.

- Zuerst werden die Spannungsfelder und Masterdungswiderstände aufgebaut.
- Dann weist man die Daten für die Impedanz-Matrix den gekoppelten Spulenelementen zu.
- Setzen der Masterdungswiderstände und der Transformatorenimpedanzen. Der Abschluss mit der Transformatorimpedanz ist im Programm ebenso implementiert.
- Kurzschlusszweig erstellen zwischen Erd- und Leiterseil.
- Übergangswiderstand erstellen und definieren.
- Kurzschlussstrom vorgeben.

Die Vorgabe des Kurzschlussstromes ist bei allen Methoden gleich. Die Amplitude und Phasenlage des Stromes wird an einem bestimmten Knotenpunkt vorgegeben.

In Abbildung 8-3 ist zu sehen, dass das Netzwerk passiv ist, es ist nur eine treibende Stromquelle vorhanden. Mit Hilfe der Stromquelle wird am 5ten Masten von insgesamt 10 der Kurzschlussstrom vorgegeben.

Die Spannungsfelder und deren Kopplung können mit Hilfe der Spulenelemente nachgebildet werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Schleifenimpedanzen nach Carson Pollacek eingesetzt werden.

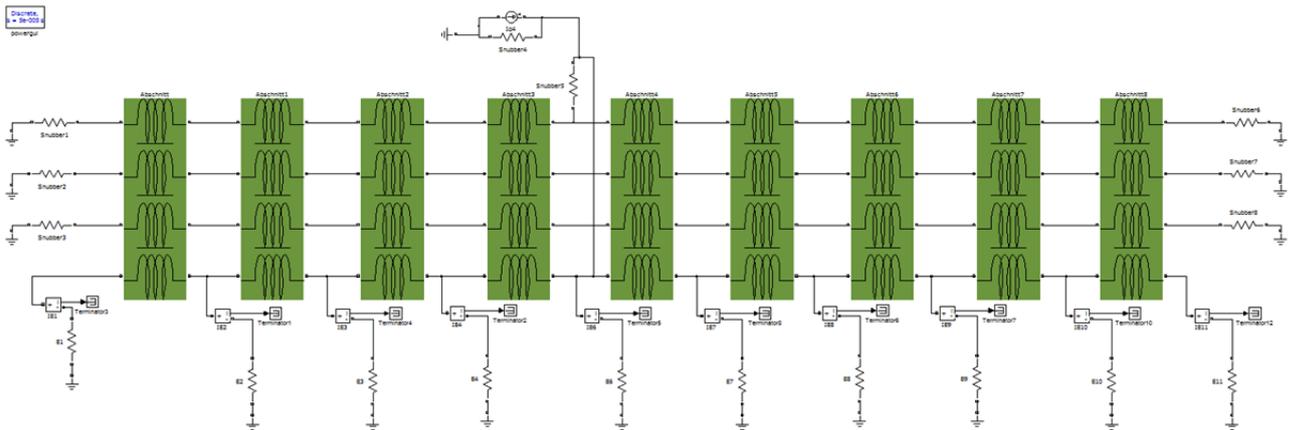


Abbildung 8-3: Simulink, nachbilden des einpoligen Kurzschlusses

Mit Hilfe des „Analysis tools“ wird die Berechnung durchgeführt.

Ermittelt werden die Ströme über Mast bzw. Erde/ Erdseil. Diese Ergebnisse werden anschließend für einen Vergleich herangezogen.

8.4 Vergleich der Methoden bei einpoligem Kurzschluss

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Modellierungen, um die Plausibilität zu überprüfen, wird in diesem Abschnitt vollzogen.

Es ist zu erwähnen, dass der Kurzschlussort, die Anzahl der Spannfelder und Höhe des Kurzschlussstromes ident für jede Modellierung vorgegeben wurde. Die Leitungsparameter und Masterdungswiderstände sind ebenfalls für alle Methoden gleich.

Es wurde der Kurzschlussort am 5ten Mast von insgesamt 10 vorgegeben.

8.4.1 Stromfluss über Mast

Es ist zu erkennen, dass das Programm in Fall eines einpoligen Kurzschlusses ähnliche Ergebnisse, verglichen mit der Lösung der Y-Matrix liefert.

Die nachfolgende Tabelle 2 stellt die Werte aller Modelle gegenüber. Angeführt ist der Strom über den Mast die mit den drei unterschiedlichen Modellen berechnet worden sind. Die Ergebnisse der drei Modellierungen stimmen, bis auf den ersten Mast, gut überein.

Für das Modell „Programm“ ist das in dieser Arbeit entworfene Modell gemeint. Bei dem Begriff „Y-Matrix“ die Nachbildung der Situation wie in 8.2 beschrieben.

Model	Programm	Y-Matrix	Simulink
	Mast	Mast	Mast
Mast Nr.	A	A	A
1	6125,6	6125,9	6105,4
2	146,0	146,1	145,9
3	900,3	900,9	899,3
4	1102,3	1103,0	1101,2
5	3502,4	3504,6	3499,0
6	1285,9	1287,2	1284,7
7	1395,2	1397,5	1393,9
8	1430,5	1434,1	1429,2
9	862,1	865,1	861,3
10	1160,6	1165,8	1159,5

Tabelle 2: Stromfluss über Masten, der drei Modellierungen

In der nachfolgenden Abbildung 8-4 ist der Stromfluss über Erde dargestellt. In blau sind die Werte des Programmes gekennzeichnet, in Rot, die Werte die mit Hilfe der Y-Matrix erstellt wurden. Abgebildet ist hier der Betrag der unterschiedlichen Methoden.

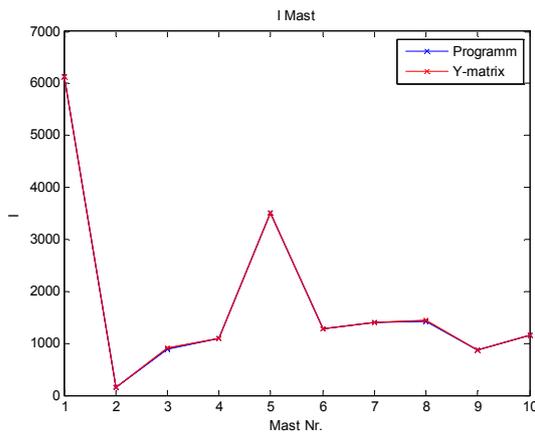


Abbildung 8-4: Vergleich des Programms mit der Y-Matrix, Stromfluss über Mast aufgetragen

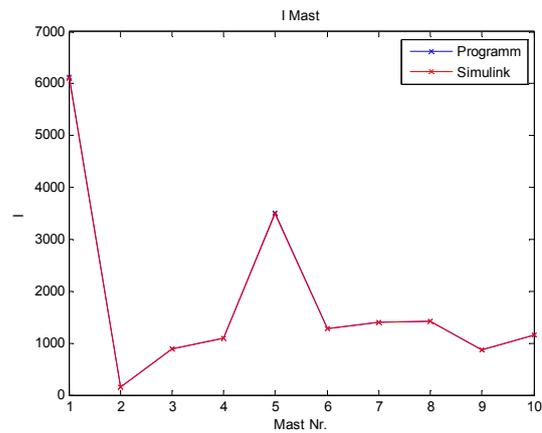


Abbildung 8-5: Vergleich des Programms mit Simulink, Stromfluss über Mast aufgetragen

In Abbildung 8-5 ist die graphische Umsetzung der Tabelle 2 mit Simulink dargestellt. Die Ergebnisse ähneln sich.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wird die Differenz der Ergebnisse in Abbildung 8-6 dargestellt.

Differenz	Prog. Y-Mat.	Prog. Sim.
	Mast	Mast
Mast Nr.	A	A
1	-0,3	20,2
2	-0,1	0,2
3	-0,6	0,9
4	-0,7	1,1
5	-2,2	3,4
6	-1,3	1,2
7	-2,3	1,3
8	-3,6	1,3
9	-3,0	0,8
10	-5,2	1,1

Tabelle 3: Differenz des Stromes über den Masten

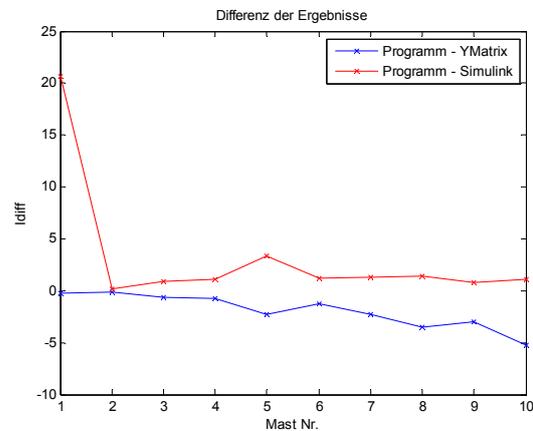


Abbildung 8-6: Differenzstrom der Ergebnisse gegenübergestellt

Die maximale Abweichung ist am ersten Mast zwischen dem Programm und Simulink Methode gegeben. Diese beträgt 20,2 Ampere und in Bezug auf den gesamten Strom eine Prozentuelle Abweichung von 0.3 %.

8.4.2 Stromfluss im Erdseil

Die Stromaufteilung im Erdseil wird ebenfalls berechnet und in Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8 dargestellt. In Tabelle 4 sind die berechneten Ströme, die im Erdseil fließen, dargestellt. Hier werden ebenfalls ähnlich Ergebnisse erzielt.

Model	Programm	Y-Matrix	Simulink
	Erdseilstrom	Erdseilstrom	Erdseilstrom
Sp.-feld NR.	A	A	A
1	6125,6	6125,9	6105,4
2	6211,6	6212,0	6191,3
3	6660,1	6661,1	6639,5
4	7226,9	7228,5	7206,3
5	6030,4	6045,2	6024,5
6	4811,2	4825,0	4806,5
7	3444,4	3456,2	3441,1
8	2021,7	2029,9	2019,8
9	1160,6	1165,8	1159,5

Tabelle 4: Erdseilströme der drei Berechnungsmethoden

In den folgenden Abbildungen ist der Stromfluss im Erdseil dargestellt. Verglichen werden jeweils die Werte des Programmes mit einer der zwei Methoden.

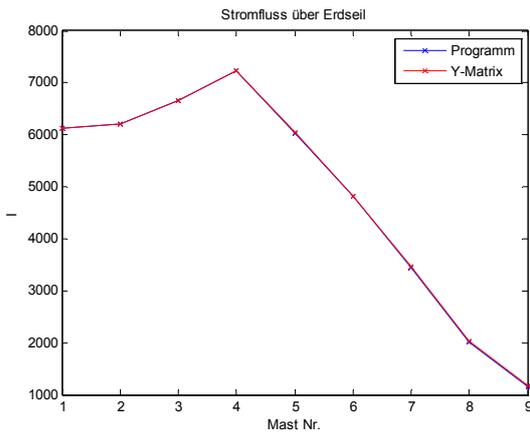


Abbildung 8-7: Vergleich der Methoden, Stromfluss im Erdseil

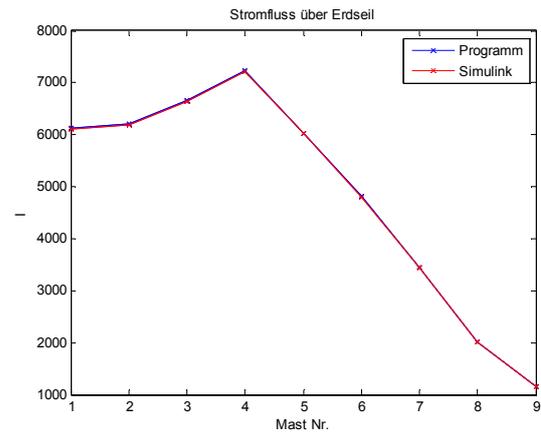


Abbildung 8-8: Stromfluss im Erdseil, Vergleich Programm mit Simulink

Die Differenz der Ergebnisse ist in Tabelle 5 ersichtlich und in Abbildung 8-9 dargestellt. Nach Auswertung der drei Methoden, kann davon ausgegangen werden, dass die Modellierung die herangezogen wird, entsprechende Genauigkeit aufweist. Somit kann man davon ausgehen das die Knotenstromvorgabe korrekt erfolgt und die Anfangs- bzw. Abschlussadmittanzen korrekt gesetzt wurden.

Differenz	Prog. Y-Mat.	Prog. Sim.
	Erdseilstrom	Erdseilstrom
Sp.feld NR.	A	A
1	-0,3	20,2
2	-0,4	20,3
3	-1,0	20,6
4	-1,6	20,6
5	-14,8	5,9
6	-13,8	4,7
7	-11,8	3,3
8	-8,2	1,9
9	-5,2	1,1

Tabelle 5: Differenz des Erdseilstromes der drei Methoden bezogen auf die Ergebnisse des Programmes

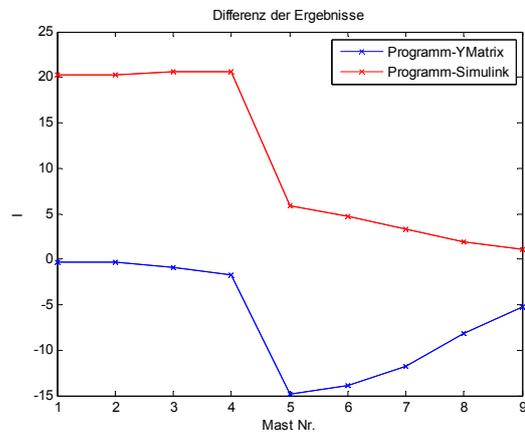


Abbildung 8-9: Differenz der Erdseilströme bezogen auf die Ergebnisse der Programmes

9 Szenarien

Im Zuge der Masterarbeit wurde einige Szenarien ausgewählt und diese genauer betrachtet.

Variiert wurden folgende Größen:

- Mastererdungswiderstand
- Kurzschlussort
- Art des Kurzschlusses
- Anzahl der Leitungssysteme
- Anzahl der Speisungen einer Leitung

Es wurden für alle Szenarien folgende Kurzschlussleistungen je Phase einer Station angenommen:

$$S_{k3} = 3 \text{ GVA} ; I_{K3phase} = 23,62 \text{ kA} \quad (9-1)$$

$$S_{k1} = 2 \text{ GVA} ; I_{K1phase} = 15,75 \text{ kA}$$

Der Strom der nicht vom Fehler betroffenen Phasen wurde mit 500 A eingepreist.

Die Impedanz des Sternpunktes zum Stationserder wurde für alle Stationen mit 0.01Ω angenommen. Die Erdseile wurden mit einer Impedanz von 0.5Ω für die linke Station, 1.2Ω für die rechte Station und 0.6Ω für die Station der Stichleitung angenommen. Es werden Zweigstromquellen vorgegeben, die Umwandlung und Berechnung der Ersatzadmittanzen ist in 7.7 angeführt.

9.1 Einseitig gespeiste Leitung

Hierbei handelt es sich um eine Leitung mit 50 Spannfeldern, also 51 Masten. Am Masten Nr. 25 wird ein Kurzschluss gegen den Mast simuliert. Dieser Kurzschlusszweig befindet sich zwischen einem spannungsführenden Leiter und dem geerdeten Mast Nr. 25. Die Fehlerimpedanz wurde vernachlässigt. Die Phasenbelegung ist in Abbildung 9-1 angeführt:



Abbildung 9-1: Szenario 1, Phasenbelegung

Die Darstellung des Szenarios ist in Abbildung 9-2 und Abbildung 9-3 ersichtlich.

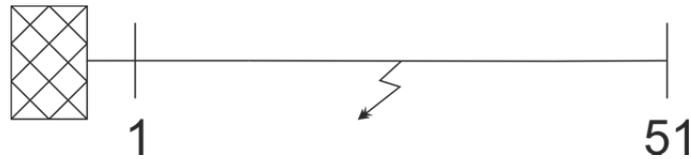


Abbildung 9-2: Übersichtsbild, einpoliger KS am Mast Nr. 25

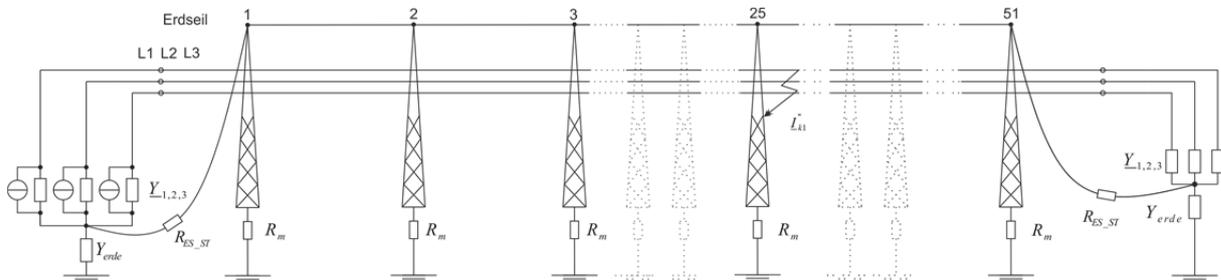


Abbildung 9-3: Detaillierte Darstellung, einpoliger KS am Mast Nr.25, Stromvorgabe nur von der linken Station

Die Leitung wird einseitig, von der linken Station, gespeist. Die Masterdungswiderstände wurden alle mit 3Ω angenommen.

Der Kurzschlussort wurde vom ersten bis zum letzten Mast variiert. Dementsprechend wird der Kurzschlussstrom in der betroffenen Phase, bei Variation des Fehlerortes dargestellt. Die Aufteilung des Stromes im Erdseil und über die Masten wird ebenfalls behandelt. Zusätzlich wird der Strom über den Mast Nr. 25 und den angrenzenden Erdseilen bei Variation des Fehlerortes betrachtet.

Nachfolgend werden Änderungen im aktuellen Szenario 1 vorgenommen. Die Eckdaten und die Auswertung des Szenario 1 sind angeführt:

- Masterdungswiderstände gleich mit 3Ω
- 1 System, 1 Erdseil
- 50 Spannfelder
- 1-poliger, Kurzschluss der Phase L1
- Einseitig von links gespeist

Stromaufteilung Erdseil/ Mast:

In Abbildung 9-6 ist die Aufteilung des Stromes im Erdseil und gegen die Masten dargestellt. Die Verbindung zwischen Erdseil und dem Stationserder wurde auf der speisenden linken Seite mit 0.5Ω angenommen. Die Ausbreitung des Stromes im Erdseil und über die Masten ist nur vom Kettenleiterwiderstand und deren Kopplungen abhängig. Durch die Wahl gleicher Masterdungswiderstände fließt der Strom vom Kurzschlussort nach links und rechts symmetrisch über die Masten. Das Erdseil wird in Richtung der speisenden Quelle am stärksten belastet. Die Amplitude des Stromes im Erdseil an Mast Nr. 25 übersteigt die 4 kA. Zwischen Mast Nr. 8 und 15 bleibt der Strom im Erdseil relativ konstant bei über 2 kA.

Variation des Kurzschlussortes:

Der Kurzschlussort wurde von Mast 1 bis 51 variiert. Dargestellt in Abbildung 9-7 sind die Effektivwerte der fließenden Ströme in den betroffenen Phasen bei Kurzschluss in Phase L1 und Variation des Kurzschlussortes. Die Ströme in Phase L2 und L3 die nicht vom Kurzschluss betroffen sind, sind fast deckungsgleich und führen jeweils einen Strom von ca. 500 A. Die Amplitude der nicht vom Kurzschluss betroffenen Ströme ändert sich nicht bei Variation des Kurzschlussortes, da diese vorgegeben sind. Die Abnahme des Kurzschlussstromes bei Variation des Fehlerortes, ist in Abbildung 9-7 ersichtlich.

Stromaufteilung am Mast Nr. 25:

Betrachtet man Mast Nr. 25 und variiert den Kurzschlussort, so kann für diesen Mast der Strom im Erdseil nach links, rechts und über den Masten angegeben werden. Ersichtlich ist dies in Abbildung 9-4. Wenn der einpolige Kurzschluss an Mast Nr. 25 ansteht, dann fließt der größte Teil des Stromes im Erdseil nach links. Wird jedoch der Kurzschlussort in Richtung Mast Nr. 50 verschoben, dann fließt im linken und rechten Erdseil fast der gleiche Strom, da nur ein kleiner Teil über den Masten abfließt. Zur besseren Verständlichkeit ist in Abbildung 9-5 der Mast Nr. 25 und dessen angrenzenden Spannungsfelder dargestellt.

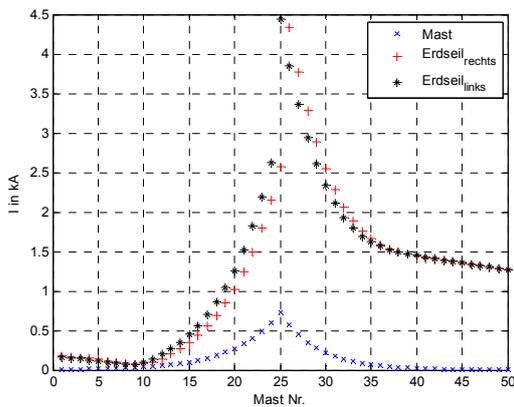


Abbildung 9-4: Szenario 1, 1-poliger KS, Stromaufteilung Mast Nr. 25 , $I_{k1_Mast\ Nr.25} = 7.58\ kA$

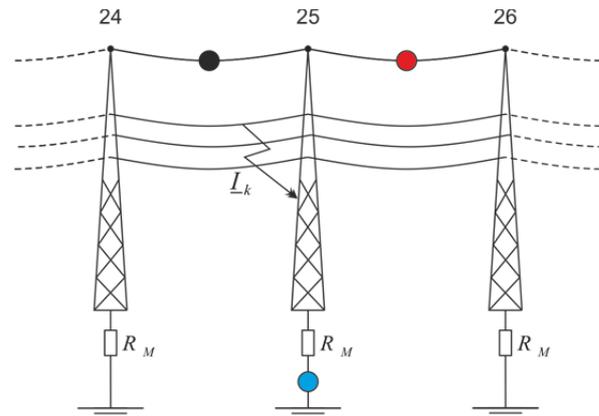


Abbildung 9-5: Szenario 1, Erdschluss an Mast Nr. 25

Bei Kurzschluss an Mast Nr. 25 ist die Stromaufteilung in Erdseil/Mast, über die gesamte Leitung in Abbildung 9-6 dargestellt.

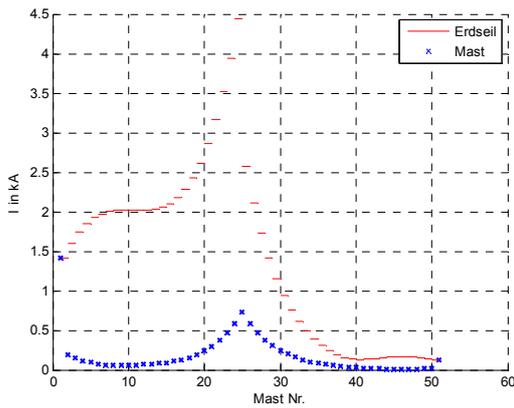


Abbildung 9-6: Szenario 1, 1-poliger KS an Mast Nr.25, Stromaufteilung Erdseil/ Mast über die gesamte Leitung

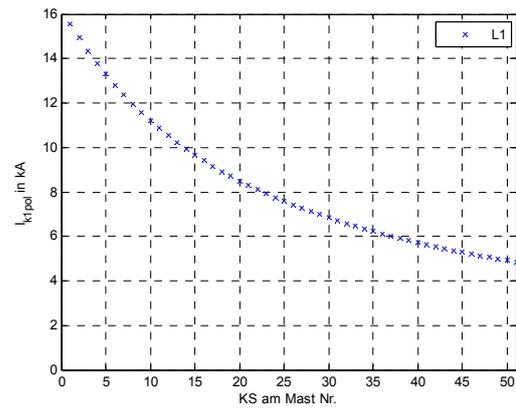


Abbildung 9-7: Szenario 1, Summenkurzschlussstrom der Phase L1 der Station

9.1.1 Szenario 1, KS Phase L2

Verursacht Phase L2 einen Erdkurzschluss gegen den Mast Nr. 25, so ist aufgrund der räumlich näheren Lage zwischen Phasenseil und Erdseil, der fließende Strom im Erdseil zur Station hin größer. Angeführt ist dies in Abbildung 9-8. Aufgrund der Symmetrisch angenommenen Kurzschlussleistung ist der Kurzschlussstrom in Phase L2 ident wie in Phase L1 wie in Abbildung 9-9 ersichtlich.

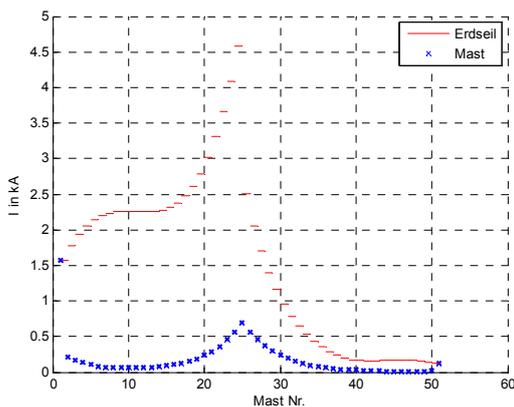


Abbildung 9-8: Szenario 1, Erdschluss Phase L2 an Mast Nr. 25

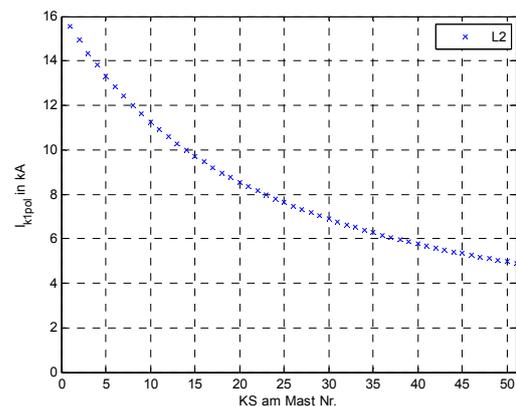


Abbildung 9-9: Szenario 1, Kurzschlussstrom Phase L2 entlang der Leitung

9.1.2 Szenario 1, 2pol. KS ohne Erde

Die Stromaufteilung im Erdseil/ Mast, bei Kurzschluss der Phasen L2 und L3 nach 24 Spannfeldern ist in Abbildung 9-10 ersichtlich. In Abbildung 9-11 ist der Kurzschlussstrom der Phase L1 und L2 dargestellt. Die vom Kurzschluss betroffenen Phasen besitzen gleiche Amplitude und entgegengesetzten Winkel. In der nicht betroffenen Phase L1 fließt weiterhin der Strom im Betriebsfall, da dieser eingepreist ist.

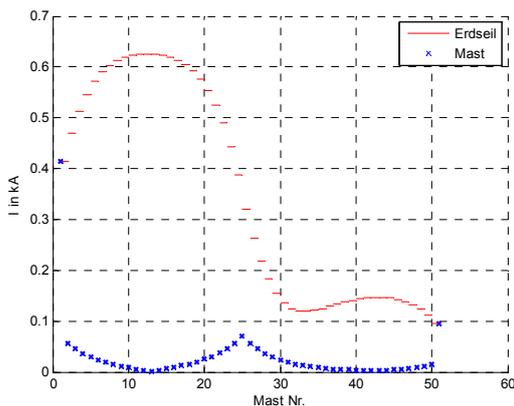


Abbildung 9-10: Szenario 1, 2-poliger KS, Stromaufteilung Erdseil Mast

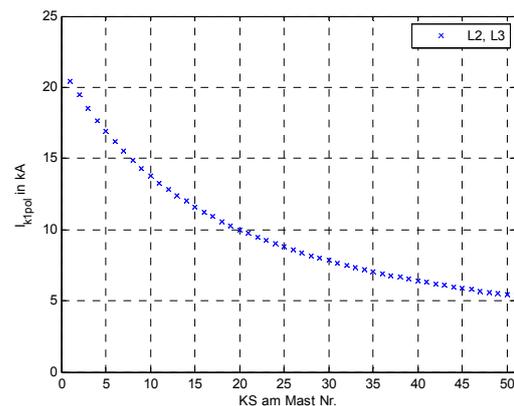


Abbildung 9-11: Szenario 1, 2-poliger KS, Kurzschlussstrom Station1

9.1.3 Szenario 1, 3pol. KS ohne Erde

Beim dreipoligen Kurzschluss am Mast Nr. 25, Abbildung 9-12, der von links gespeisten Leitung fließt durch die induktive Kopplung der Strom im Erdseil nach links zur speisenden Station zurück. Die Stromaufteilung im Erdseil bei zwei- und dreipoligem Kurzschluss fließt im Falle des zweipoligen Kurzschlusses ein Teil des Stromes im Erdseil zur Station nach rechts zurück, aufgrund der nur mehr vorhandene Stromführenden Phase L1 wirkt sich die Kopplung des Phasenseiles mit dem Erdseil stärker aus als wenn die anderen zwei Phasen noch Stromführend sind. Die Kurzschlussströme sind ebenfalls in Abbildung 9-13 dargestellt. Diese besitzen die gleichen Amplituden und sind jeweils um 120 Grad Phasenverschoben.

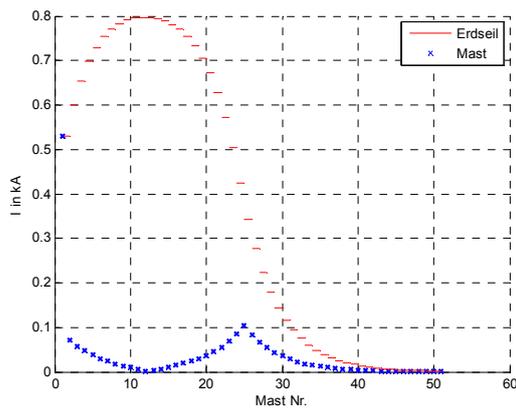


Abbildung 9-12: Szenario 1, 3-poliger KS an Mast Nr. 25, Stromaufteilung Erdseil Mast

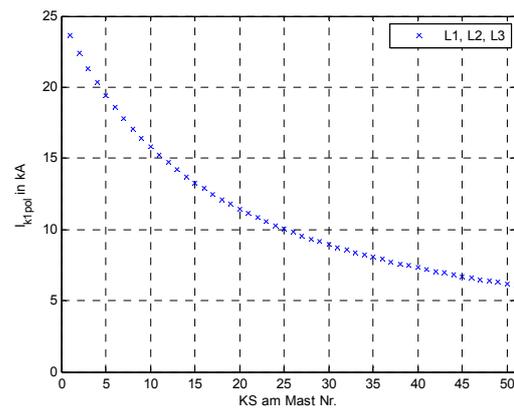


Abbildung 9-13: Szenario 1, 3-poliger KS entlang der Leitung, Station 1

Da nur die linke Station einen Strom speist, ist ab Mast Nr. 25 fast kein Stromfluss in den Leiterseilen und somit im Erdseil vorhanden. Der Kurzschlussstrom je Phase fließt jedoch bis Mast Nr. 25 und induziert somit eine Spannung die einen Strom im Erdseil fließen lässt.

9.1.4 Szenario 1, unterschiedliche Masterdungswiderstände

Die Masterdungswiderstände werden mit Hilfe eines Zufall Generators, in Matlab mit dem Befehl „rand“, erzeugt, und sind im Anhang angeführt. Diese bewegen sich in einer Größenordnung zwischen zwei und zwölf Ohm. Dies hat auf die Erdungswiderstände der Stationen sowie auf das Einbinden der Erdseile in den Stationen keine Auswirkung jedoch auf den Kettenleiter und die Stromaufteilung. Betrachtet wird hierbei der Erdkurzschluss von Phase L1 gegen den Mast. Je nachdem welchen Wert der Masterdungswiderstand an Mast Nr. 25 besitzt, teilt sich der Strom entsprechend dem Ohm'schen Gesetz unter Berücksichtigung des Kettenleiterwiderstand im Erdseil nach „links“ und „rechts“ vom betroffenen Mast auf. Es ist in Abbildung 9-14 ersichtlich, dass der Stromfluss über die Masten, aufgrund der unterschiedlichen Masterdungswiderstände, keine symmetrische Verteilung wie in Abbildung 9-6 einnimmt. Der Stromfluss über Mast Nr. 25, Abbildung 9-15, zeigt bei Variation des Kurzschlussortes im Vergleich zu regelmäßigen Masterdungswiderständen einen geringeren Stromfluss über den Mast.

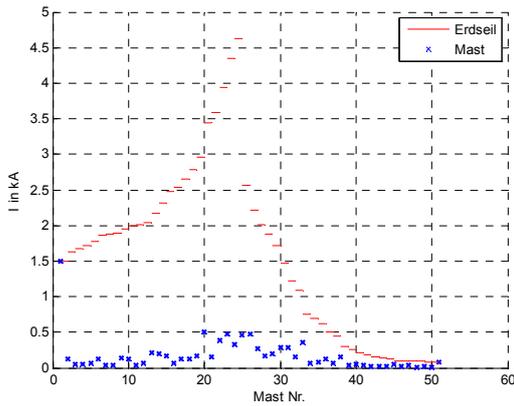


Abbildung 9-14: Szenario 1, 1-poliger KS an Mast Nr. 25, Masterdungswiderstände variabel im Anhang angeführt

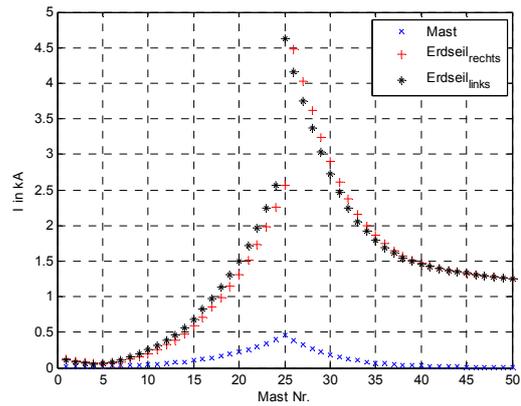


Abbildung 9-15: Szenario 1, 1-poliger KS an Mast Nr. 25, $I_{k25} = 7.55 \text{ kA}$ betrachtet wird Mast Nr. 25, Variation des Fehlers entlang der Leitung

9.1.5 Szenario 1, 2 Systeme, 2 Erdseile

- Zwei Systeme mit zwei Erdseilen werden aufgelegt
- 1-poligen Fehler gegen Masten, nicht betroffenes System ist geerdet.

Bei zwei Systemen sind die Leitungsimpedanzen der Phasenseile geringer als bei der Betrachtung mit einem System. Der prinzipielle Aufbau des zweiten Systems ist in Abbildung 9-16 dargestellt.

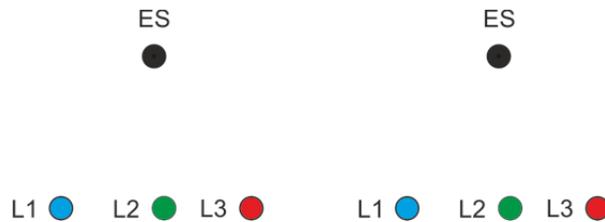


Abbildung 9-16: Phasenbelegung bei zwei Systemen

Dies wirkt sich dadurch aus, dass bei Variation des Kurzschlussortes der Kurzschlussstrom aufgrund der geringeren Leitungsimpedanzen bei Mast 51 einen Strom von über 8.4 kA lt. Abbildung 9-18 aufweist. Deshalb ist der Strom über das Erdseil in Richtung speisender Station am Mast Nr. 25 um ca. 3 kA größer, Abbildung 9-17, im Vergleich zur Stromaufteilung bei nur einem System.

Der Unterschied zwischen zweitem System geerdet bzw. stromführend ergibt sich dadurch, dass die Amplitude des Stromes im Erdseil geringer ausfällt wenn das zweite System geerdet ist. Dieser Effekt kommt durch die induktive Kopplung des zweiten Systems und der Erdseile zu Stande und erhöht somit den Stromfluss im Erdseil.

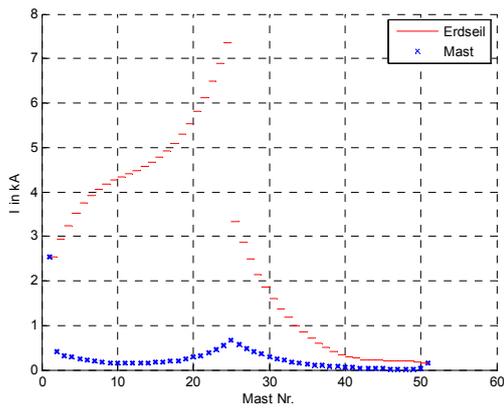


Abbildung 9-17: Szenario 1, 1-poliger KS an Mast Nr. 25, 2 Systeme, Stromaufteilung Erdseil/Mast

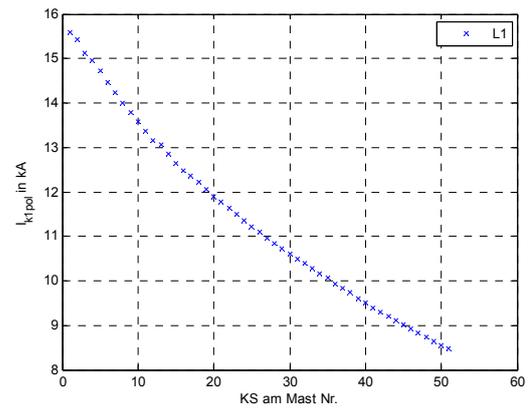


Abbildung 9-18: Szenario 1, 1-poliger KS, 2 Systeme, Kurzschlussstrom bei Variation des Kurzschlussortes

9.2 Zweiseitig gespeiste Leitung

Die Leitung wird nun von zwei Seiten gespeist. Folgendes zweites Szenario ergibt sich:

- Mastungswiderstände gleich
- 1 System, 1 Erdseil
- Zweiseitig gespeist
- 50 Spannfelder
- 1-poliger Kurzschluss an Mast Nr. 3

Es ergibt sich folgende Situation:



Abbildung 9-19: Zweiseitig gespeiste Leitung, Fehler am Mast Nr. 3

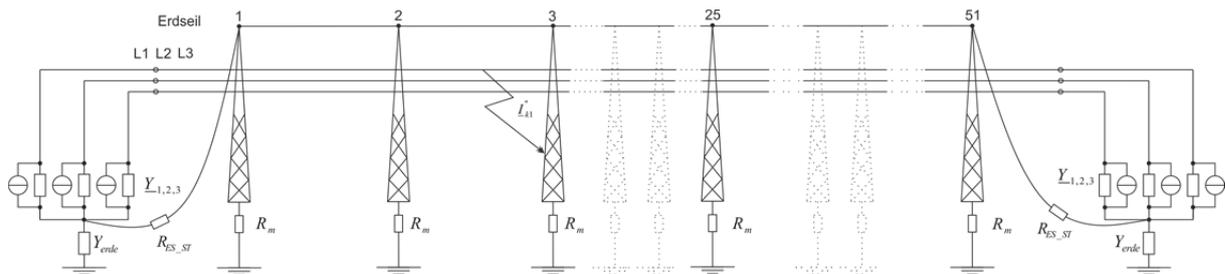


Abbildung 9-20: Ersatzschaltbild des zweiten Szenarios

Da die Leitung von zwei Stationen gespeist wird, sind die Kurzschlussströme beider Stationen und deren Kopplung in die anderen Leiterseile zu berücksichtigen. In den vom Kurzschluss nicht betroffenen Phasen fließt weiterhin ein eingprägter Lastflussstrom von 500 A.

Die relativ symmetrische Aufteilung des Stromflusses über Erdseil und Mast ist auf die zweiseitige Speisung bei gleicher Stationskurzschlussleistung und Fehler in der Mitte der Leitung Mast Nr. 25 zurückzuführen.

Beim Kurzschluss an Mast Nr.3 im Vergleich zu Kurzschluss an Mast Nr. 25 wird ein Abschnitt des Erdseiles immer mit ca. 7 kA belastet und ist bei gleichen Kurzschlussleistungen der Stationen ab ca. 10 Masten, relativ unabhängig vom Fehlerort. In Abbildung 9-21 und Abbildung 9-22 ist dies ersichtlich.

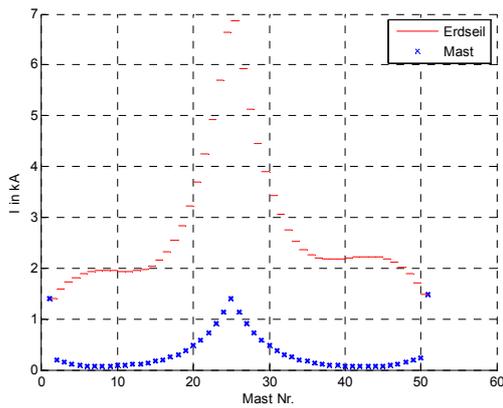


Abbildung 9-21: Szenario 2, Erdschluss an Mast Nr. 25, Stromaufteilung Erdseil/Mast

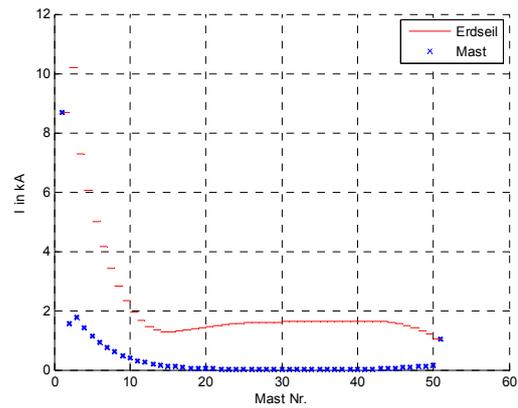


Abbildung 9-22: Szenario 2, Erdschluss an Mast Nr. 3, Stromaufteilung Erdseil/Mast

Sieht man sich den Mast Nr. 3 an und variiert den Kurzschlussort so kann der Strom im Erdseil nach rechts, links und gegen den Mast ermittelt werden. Wenn an Mast 3 ein Kurzschluss besteht, so fließt im linken Erdseil ein höherer Strom als im rechten Erdseil Abbildung 9-23. Je weiter der Kurzschluss in Richtung Station 2 hinauswandert, desto weniger fließt über den Mast gegen Erde ab.

Der Kurzschlussstrom von der linken und rechten Station sind in Abbildung 9-24 in blau dargestellt. Betroffen ist Phase L1, die Addition der beiden Anteile ergibt den Summenkurzschlussstrom. Diese ist in Stationsnähe größer als in der Mitte der Leitung. Die zwei nicht betroffenen Phasen halten ihren Betriebsstrom konstant.

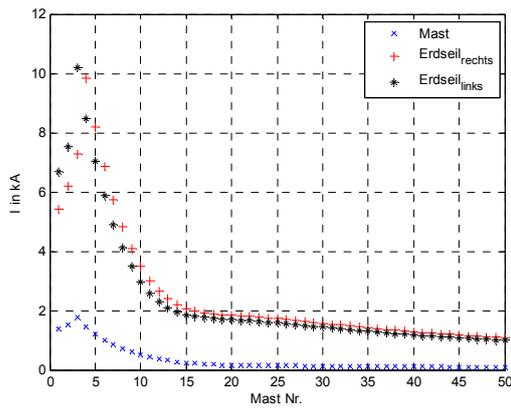


Abbildung 9-23: Szenario 2, 1-poliger KS, Stromfluss in den Erdseilen an Mast Nr. 3

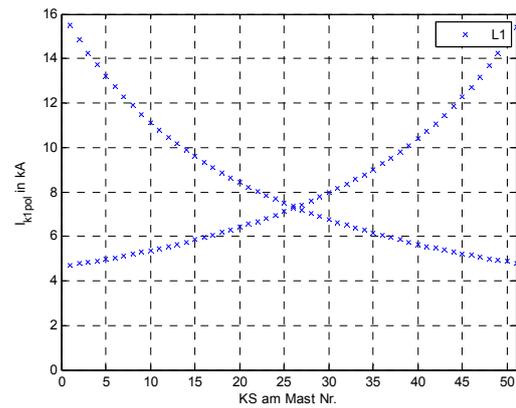


Abbildung 9-24: Szenario 2, 1-poliger KS, Kurzschlussstrom der Stationen 1 und 2

9.2.1 Szenario 2, 2 Systeme, 2 Erdseile, 2-pol. KS ohne Erde

Das zweite System ist geerdet und vom Kurzschluss nicht betroffen. Zuerst wird Phase L1 mit L2 verbunden, Abbildung 9-25. Zum Vergleich wird Phase L1 mit L3, Abbildung 9-26, verbunden um den Unterschied der räumlichen Lage der Leitungen und somit der induktive Kopplung der Seile zueinander zu verdeutlichen. In der nicht betroffenen Phase L3 des ersten Systems fließt der Betriebsstrom von ca. 500 A. Das Erdseil in Richtung linker Station wird je nachdem welche Phasen betroffen sind unterschiedlich belastet.

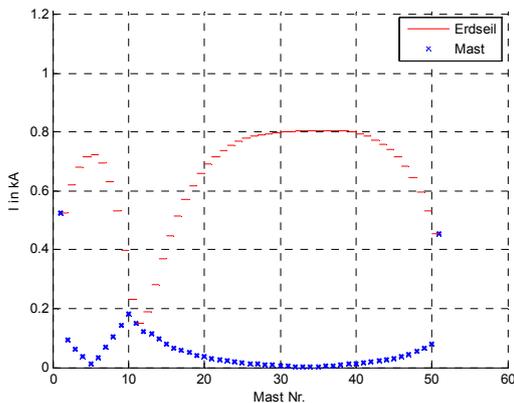


Abbildung 9-25: Szenario 2, 2-poliger KS, Mast Nr. 10, Phase L1-L2, Stromfluss über Erdseil/ Mast

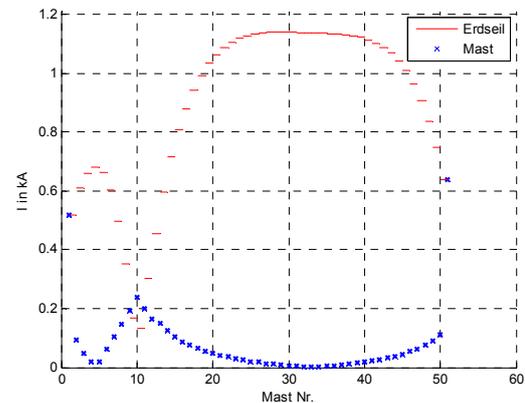


Abbildung 9-26: Szenario 2, 2-poliger KS, Mast Nr. 10, Phase L1-L3, Stromfluss über Erdseil/ Mast

Der Kurzschlussort an Mast Nr. 25 befindet sich, von links aus gesehen, nach der Stichleitung. Jede Station trägt mit Ihrer Kurzschlussleistung zum Stromfluss gegen den Mast bei. Die Stromaufteilung kann in Abbildung 9-29 zwischen der linken und rechten Station betrachtet werden. In Abbildung 9-30 wird der Stromfluss über die Masten und im Erdseil der Stichleitung dargestellt. Die Aufteilung des Stromes im Erdseil an Mast Nr. 21 zur linken und zur Station der Stichleitung ist ersichtlich. Der Strom im Erdseil zur linken Station ist aufgrund der höheren Anzahl der Spannungsfelder geringer als zur Station der Stichleitung.

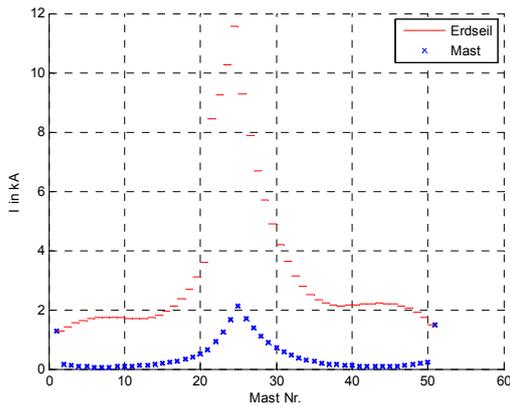


Abbildung 9-29: Szenario 3, Erdschluss an Mast Nr. 25, Darstellung der Spannfelder zwischen Station 1 und Station 2

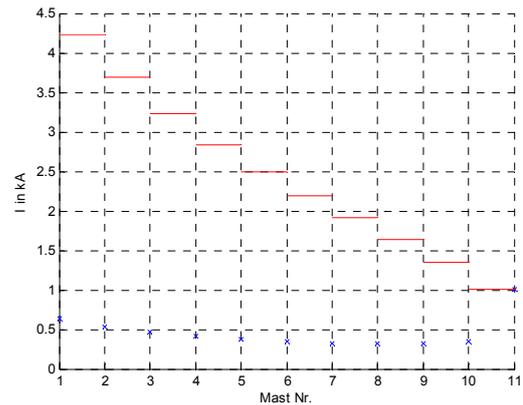


Abbildung 9-30: Szenario 3, Erdschluss an Mast Nr. 25, betrachtet wird die Stichleitung

Der Summenkurzschlussstrom kann ebenfalls angegeben werden. Es wird von jeder Station der Anteil des Kurzschlussstromes bei Variation des Kurzschlussortes entlang der Leitung gespeichert und anschließend addiert. Somit kann über den gesamten Leitungszug der zur Verfügung stehende Kurzschlussstrom ermittelt werden. In unserem Fall ist der Summenkurzschlussstrom am Mast Nr. 21 am höchsten, dies ist genau an dem Ort der Fall, wo die Stichleitung eingebunden ist.

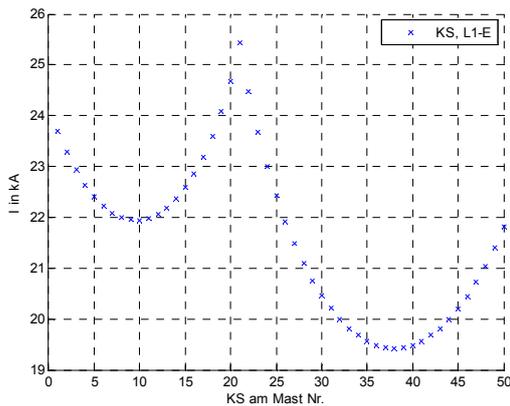


Abbildung 9-31: Szenario 3, Summenkurzschlussstrom, 1-poliger KS, von Mast 1 bis 50

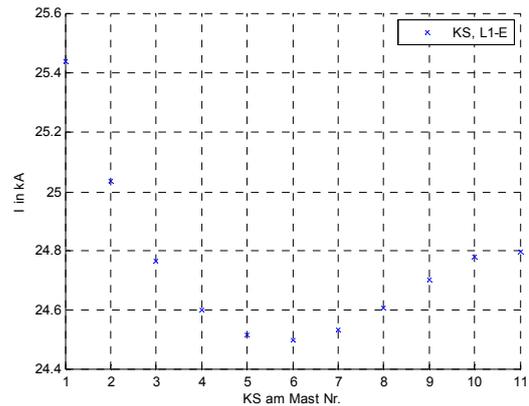


Abbildung 9-32: Szenario 3, Summenkurzschlussstrom, 1-poliger KS, der Sticheitung

9.3.1 Szenario 3, 2 Systeme, 2 Erdseile, unterschiedliche Masterdungswiderstände

Betrachtet wird der Erdkurzschluss an Mast Nr. 25, Abbildung 9-33, bei verschiedenen Masterdungswiderständen, im Anhang angegeben, so fließt im Erdseil bei Spannfeld Nr. 25 ein Teilkurzschlussstrom von über 18 kA. Die Amplitude des Stromes ist von den Kettenleiterwiderständen zu allen Stationen abhängig. Die Summenkurzschlussleistung ist ebenfalls höher, dies ist auf die unterschiedlichen Kettenleiterwiderstände zurückzuführen. Hiermit kann gezeigt werden, dass die Beanspruchung des Erdseiles in der Mitte der Leitung am stärksten sein kann.

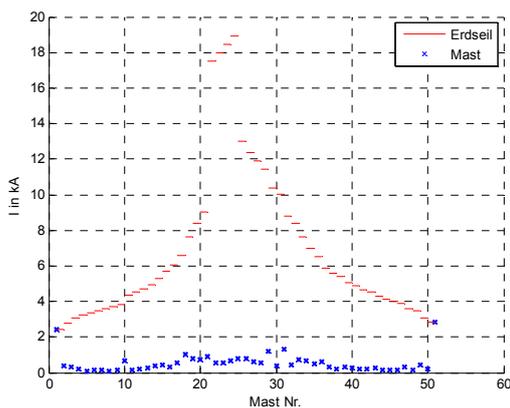


Abbildung 9-33: Szenario 3, 1-poliger KS an Mast Nr. 25, Stromaufteilung Erdseil/ Mast, bei unterschiedlichen R_m im Anhang angefügt

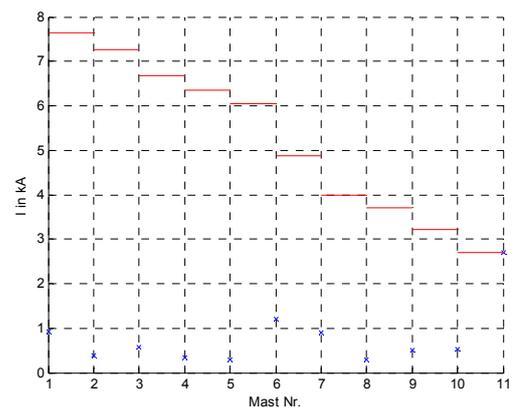


Abbildung 9-34: Szenario 3, 1-poliger KS, Stromaufteilung Erdseil/ Mast in der Sticheitung

Um das Szenario auch räumlich darstellen zu können, werden dreidimensionale Darstellungen gewählt. Die Stromaufteilung im Erdseil und Mast sowie der

Summenkurzschlussstrom der drei Stationen im einpoligen Fehlerfall sind in Abbildung 9-35 und Abbildung 9-36 dargestellt.

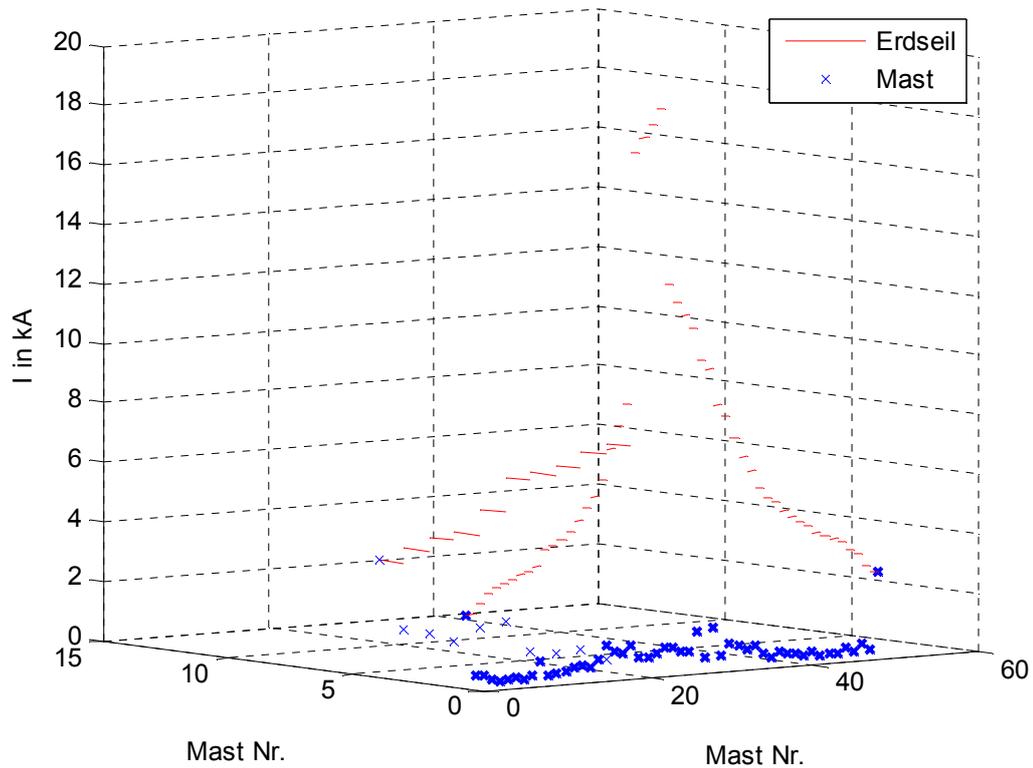


Abbildung 9-35: Szenario 3, 1-poliger KS, dreidimensionale Darstellung

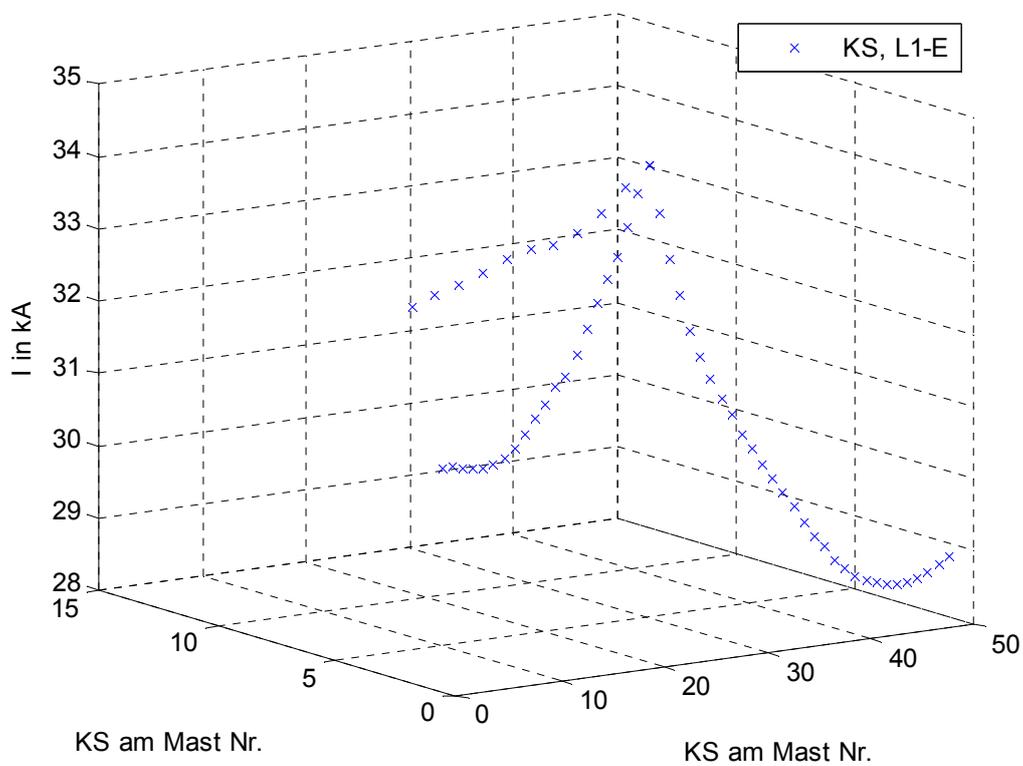


Abbildung 9-36: Szenario 3, 1-poliger KS, Summenkurzschlussstrom dreidimensionale Darstellung

10 Erwärmungsprozess

Die Stromaufteilung im Erdseil und über die Masten kann mit dem Programm ermittelt werden. Es kann nun der Erwärmungsprozess des Seiles mit Hilfe eines Temperaturmodells nachgebildet werden. Dazu müssen die Geometrie und die Materialeigenschaften des Erdseiles bekannt sein. Der im Erdseil maximal fließende Strom wird dann zur Berechnung der Kurzschlussdauer, bis die maximal zulässige Leiterseiltemperatur erreicht ist angenommen.

10.1 Einflussfaktoren des Erwärmungsprozesses

Der Erwärmungsprozess ist von vielen Faktoren abhängig, die wichtigsten angeführt:

- Aufbau der Leiter
 - Geometrische Abmessungen
 - Leiterquerschnitt
 - Länge des Leiters, Verbauung
 - Oberfläche
- Materialeigenschaften des Erdseiles
 - Dichte des Leiterwerkstoffes
 - Spezifische elektrische Leitfähigkeit
 - Spezifische Wärmekapazität
 - Temperaturbeiwert
- Umgebungsbedingungen
 - Umgebungstemperatur
 - Mittlere Windgeschwindigkeit
 - Sonneneinstrahlung
 - Eislast
 - Alter der Leiterseile

Von besonderer Bedeutung sind hierbei Anfangs/- bzw. Endtemperatur sowie der Querschnitt des Seiles. Es ist wichtig zu bestimmen, wie Wärme in das Seil eingetragen bzw. abgegeben werden kann. Dazu kann der Energieeintrag und die Energieabfuhr in folgende Kategorien eingeteilt werden.

- Energieeintrag
 - Stromwärmeverluste
 - Im Betrieb
 - Im Fehlerfall fließender Kurzschlussstrom
 - Solare Einstrahlung
 - Direkte/ indirekte Sonneneinstrahlung
 - Terrestrische Energiestrahlung
 - Temperaturstrahlung der Erde

- Energieabfuhr
 - Konvektive Wärmeabgabe
 - Wind
 - Natürliche Konvektion
 - Temperaturabstrahlung

10.2 Kurzschlussstromdichte

Die Materialeigenschaften bestimmen im Wesentlichen die Kurzschlussstromdichte S_{thr} , die in A/mm^2 für einen Zeitraum von einer Sekunde angegeben wird. Folgende Temperaturen müssen für die Berechnung definiert werden:

- Ausgangstemperatur
 - höchst zulässige Betriebstemperatur
- Endtemperatur im Kurzschlussfall
 - zulässige Leiterseiltemperatur

Die Berechnung basiert auf den spezifische Kenngrößen des Leiterseiles.

Die zulässige Kurzschlussstromdichte wird in Abhängigkeit von der Anfangs-/ Endtemperatur in einem Zeitraum von einer Sekunde angegeben.

Für ein Aluminium-Stahlseil wird die Kurzschlussstromdichte S_{thr} in Abbildung 10-1 dargestellt. Die Kennlinien beschreiben die Endtemperatur die erreicht wird in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur bei einer gewissen Stromdichte S_{thr} für eine Sekunde.

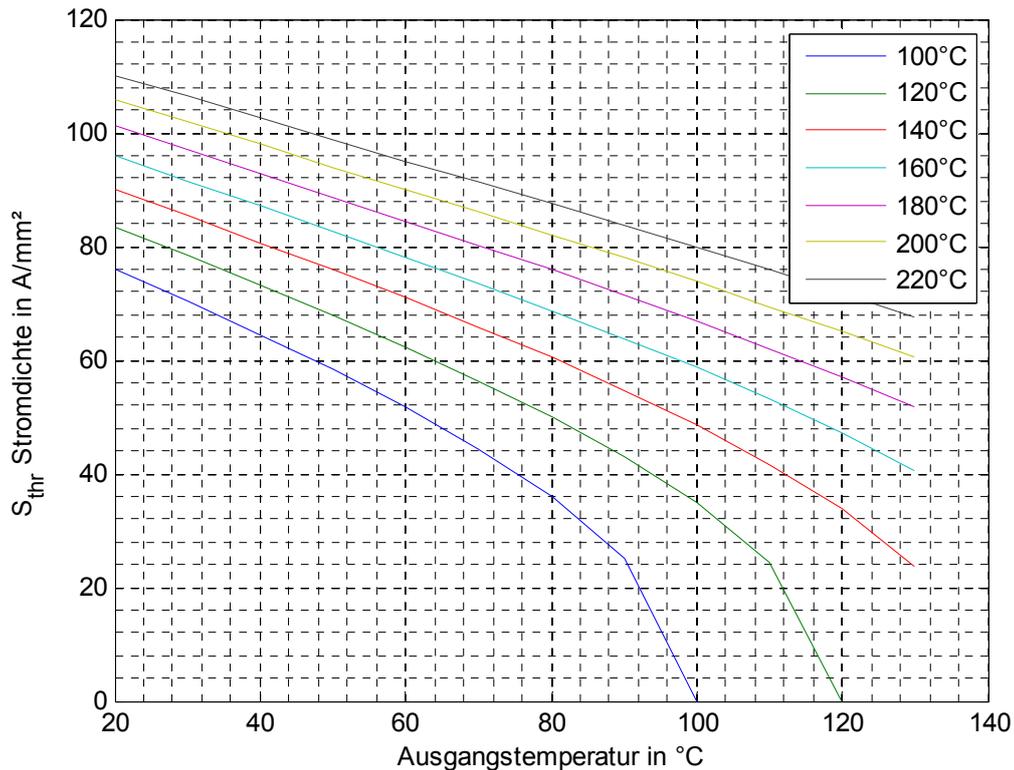


Abbildung 10-1: Kurzzeitstromdichte S_{thr} von Aluminium-Stahl Seile

Um den Umgang mit Abbildung 10-1 zu erklären, wird ein kurzes Beispiel gegeben:

Bei einer Ausgangstemperatur von 100°C und einer zulässigen Endtemperatur von 180°C darf eine Kurzzeitstromdichte von $S_{thr} = 66,79 \text{ A/mm}^2$ für eine Sekunde auftreten, dann ist die zulässige Endtemperatur erreicht.

Die zu Grunde liegende Berechnungsmethode bezieht die spezifische Wärmekapazität, den Temperaturbeiwert, die elektrische Leitfähigkeit sowie Anfangs und Endtemperatur mit ein.

$$S_{thr} = \sqrt{\frac{\gamma_{20} \cdot c}{t_{kr} \cdot \alpha_{20}} \cdot \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_{max} - 20^{\circ}\text{C})}{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_{\infty} - 20^{\circ}\text{C})} \right\}} ; \text{ lt. [12]} \quad (10-1)$$

γ_{20}	Leitwert bei 20°C
c	spezifische Wärmekapazität
t_{kr}	Kurzschlusszeit, 1 Sekunde
α_{20}	Temperaturbeiwert des Leiterwerkstoffes bei 20°C
ϑ_{max}	Grenztemperatur
ϑ_{∞}	Ausgangstemperatur

10.3 Modellbildung

In der Modellierung werden folgende Parameter für die Temperatur berücksichtigt:

- Ausgangstemperatur ϑ_{∞}
 - Stationäre Endtemperatur $\Delta\vartheta_{\infty}$
 - Stromwärmeverluste im Betriebsfall
 - Anfangstemperatur ϑ_0
 - Umgebungsbedingungen
- Grenztemperatur ϑ_{max}
 - Maximale Leiterseiltemperatur
 - Aufbau des Seiles
 - Materialeigenschaften des Leiterseiles

Die stationäre Endtemperatur $\Delta\vartheta_{\infty}$ bei gegebenen Stromwärmeverlusten berechnet sich aus der Verlustleistung P_V , dem Temperaturbeiwert α und der Oberfläche $A_{Oberfläche}$. Die Verlustleistung kann wiederum in den fließenden Strom und dem spezifischen Widerstand eingeteilt werden.

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{P_V}{\alpha * A_{Oberfläche}} = \frac{I^2 * l}{\gamma_{20} * A * \alpha * A_{Oberfläche}} ; lt. [8] \quad (10-2)$$

Die Ausgangstemperatur ϑ_{∞} ergibt sich aus den Umgebungsbedingungen und den Stromwärmeverlusten. Hierfür wird in der EN 50341-1,2,3 [6] eine Temperatur von 35°C angegeben. Diese ist jedoch im Programm individuell einstellbar.

$$\vartheta_{\infty} = 35^{\circ}C \quad (10-3)$$

Somit ergibt sich die Ausgangstemperatur ϑ_{∞} vor dem Kurzschluss, durch die Summation der Anfangstemperatur und der stationären Endtemperatur.

$$\vartheta_{\infty} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\infty} ; lt. [8] \quad (10-4)$$

Die maximale Temperatur ϑ_{max} (Grenztemperatur,) die im Falle eines Kurzschlusses nicht überschritten werden darf, ist wiederum vom Aufbau und Material abhängig. Diese Temperatur wird meistens vom Hersteller angegeben. In vorliegendem Fall wird ϑ_{max} für Aluminium/Stahl-Seile mit 200°C angenommen. Diese Temperatur wird vor allem zum Schutz der Befestigungsverbindungen des Erdseiles ausgelegt.

Da der Alterungsprozess mit höheren Temperaturen schneller fortschreitet, kann die Wahl einer Temperaturobergrenze in Bezug auf die Lebensdauer getroffen werden.

Die Berechnung bis die Grenztemperatur erreicht ist, wird folgendermaßen umgesetzt: Ausgehend von Energiespeichervermögen, dem I^2t -Wert laut (10-5).

$$m * c * (\vartheta_{max} - \vartheta_{\infty}) = I^2 * R(\vartheta) * t ; lt. [8] \quad (10-5)$$

Die Masse und der temperaturabhängige Widerstand können wiederum durch andere Größen ersetzt werden.

$$A^2 * \rho * \gamma(\vartheta) * c * (\vartheta_{max} - \vartheta_{\infty}) = I^2 * t = \int i^2 * t ; lt. [8] \quad (10-6)$$

Nimmt man nun (10-6) und dividiert diese durch den Strom, so ergibt sich die Zeit.

Diese Zeit gibt an, wie lange es dauert bis sich das Seil von der Ausgangstemperatur bis zur Endtemperatur erwärmt, bei gegebenen Kenngrößen des Seiles.

$$t = \frac{A^2 * \rho * \gamma(\vartheta) * c * (\vartheta_{max} - \vartheta_{\infty})}{I^2} ; lt. [8] \quad (10-7)$$

ρ	spezifische Dichte des Werkstoffes
I	Strom, Kurzschlussstrom
t	Zeit bis Endtemperatur erreicht wird
A	Fläche des Leiters
m	Masse des Leiters
ϑ_{max}	Grenztemperatur
ϑ_{∞}	Ausgangstemperatur
c	spezifische Wärmekapazität
γ	Leitwert bei 20°C, 35 m/($\Omega * mm^2$)

Für den Strom, kann hier der fließende Kurzschlussstrom eingesetzt werden.

Somit erhält man die Zeit, die der Kurzschlussstrom fließen darf, bevor eine Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur des Leiter-/Erdseiles eintritt. Diese Zeit ist vor allem für die Schutzeinstellungen und für die thermische Festigkeit der Schraubverbindungen von Bedeutung.

Ein Beispiel zur Berechnung der Zeit bis zum Erreichen der Leiterseiltemperatur ist angeführt. Es wurde hierbei von einem Aluminium/Stahl-Seil ausgegangen:

ρ	spezifische Dichte des Werkstoffes, $2,7 \frac{kg}{dm^3}$
I	Strom, Kurzschlussstrom, 8 kA
γ	Leitwert bei 20°C, 35 m/($\Omega * mm^2$)
A	Fläche des Leiters, 50 mm ²
c	spezifische Wärmekapazität, 0.92 Ws/(g * K)
ϑ_{max}	Grenztemperatur, 200°C
ϑ_{∞}	Ausgangstemperatur, 35°C

$$t = \frac{A^2 * \rho * \gamma(\vartheta) * c * (\vartheta_{max} - \vartheta_{\infty})}{I^2} \quad (10-8)$$

$$= \frac{(50 * 10^{-6})^2 * 2.7 * 10^3 * 35 * 10^6 * 0.92 * 10^3 * (200 - 35)}{(8 * 10^3)^2} = 0.56 ; lt. [8]$$

Die Erwärmung des Seiles von 35°C auf 200°C benötigt bei erwähnten Kenndaten 0.56 s.

Die wichtigsten Faktoren sind die Höhe des Kurzschlussstromes und der Querschnitt des Leitungsseiles, da diese Quadratisch in (10-7) eingehen. Halber Kurzschlussstrom bedeutet vierfache Zeit. Halbe Fläche des Leiterseiles bedeutet ein Viertel der Zeit.

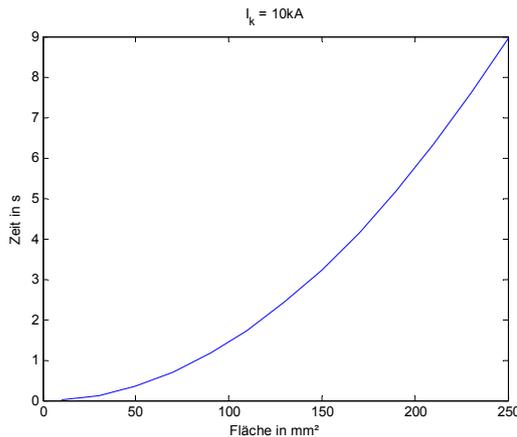


Abbildung 10-2: Zeit in Abhängigkeit des Leitungsquerschnittes bei einem Kurzschlussstrom von 10 kA und einer Temperaturdifferenz von 165°C

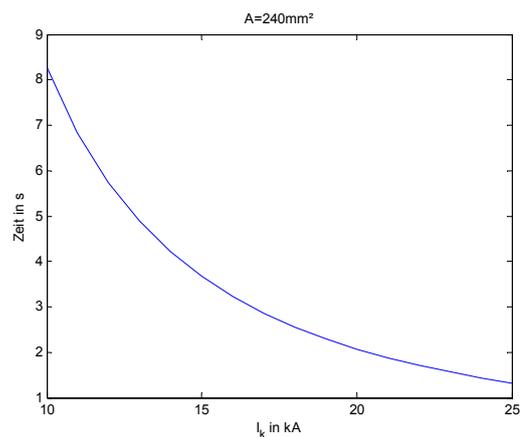


Abbildung 10-3: Variation des Kurzschlussstromes bei konstanter Fläche 240mm² und einer Temperaturdifferenz von 165°C

In Abbildung 10-2 bzw. Abbildung 10-3 ist der Quadratische Zusammenhang ersichtlich. Diese Abbildungen beziehen sich auf ein Aluminium/Stahlseil mit der Ausgangstemperatur von 35°C und einer Endtemperatur von 200°C.

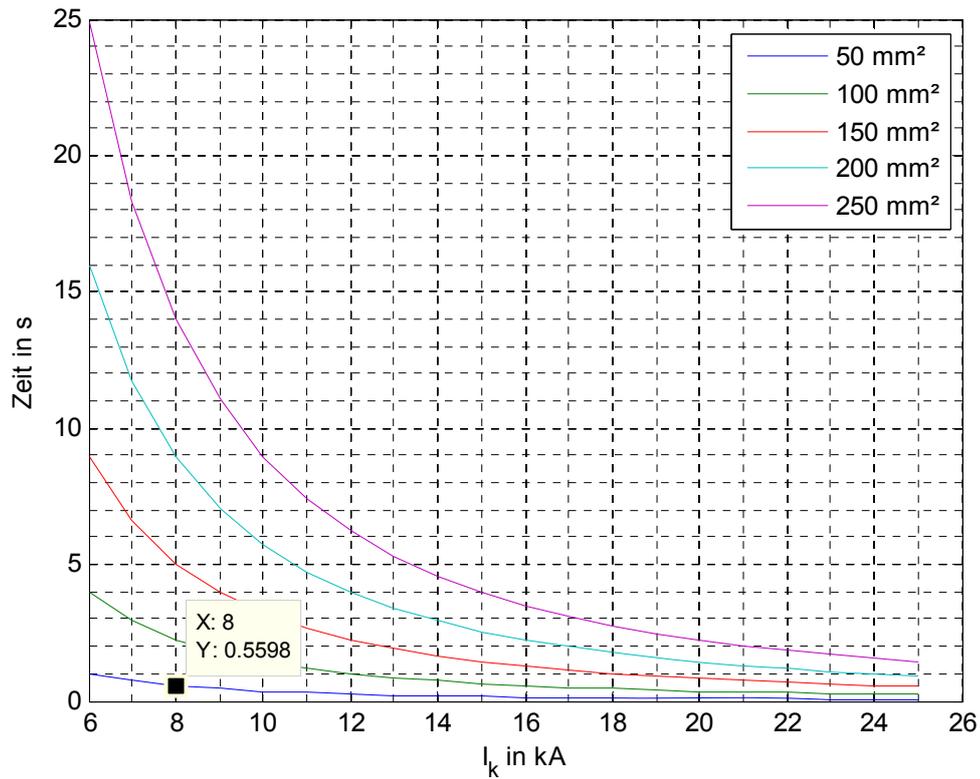


Abbildung 10-4: Zusammenhang zwischen Fläche und Kurzschlussstrom bei einer Temperaturdifferenz von 165°C

In Abbildung 10-4 wird davon ausgegangen dass die Anfangstemperatur 35°C beträgt, die Grenztemperatur 200°C. Bei einer Fläche von nur 50 mm² und einem Kurzschlussstrom von 8 kA beträgt die Zeit bis die Grenztemperatur erreicht ist nur 0.56 Sekunden.

11 Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden eine kurze Zusammenfassung, eine kritische Betrachtung der Ergebnisse sowie ein weiterführender Ausblick angeführt.

11.1 Zusammenfassung

Die Berechnung der für die induktive Beeinflussung maßgeblichen Kurzschlussströme wird heute üblicherweise mit dem Erdseilreduktionsfaktor durchgeführt. Dieser Faktor hängt von einigen Parametern ab, wobei dessen Bestimmung nur eine Näherung für die tatsächlichen Verhältnisse darstellt. Bei Verwendung der Symmetrischen Komponenten wird das Erdseil reduziert und somit verliert man die Ströme im Erdseil. Da bei unsymmetrischen Kurzschlüssen und unterschiedlichen Masterdungswiderständen diese Informationen nicht vorhanden sind, ist das angeführte Modell in Phasenschreibweise mit Berücksichtigung des Erdseiles umgesetzt worden.

Mit Hilfe des Modells ist man nicht mehr auf den Erdseilreduktionsfaktor angewiesen. Die induktive Kopplung der Leiterseile wurde mit der Ersatzschaltung nach E. Clarke [1] realisiert. Mit der Variation der Verdrillung, Belegung der Phasenseile, unterschiedlichen Masterdungswiderständen und Materialeigenschaften der Leiter kann ein beliebiges Fehlerszenario nachgebildet werden. Es können ebenso Mehrfachfehler im Hochspannungsnetz simuliert werden.

Es kann der Stromfluss in den einzelnen Leitern über die gesamte Leitung ermittelt werden. Der Stromfluss über den Mast und in den angrenzenden Erdseilen, bei Variation des Kurzschlussortes kann ebenfalls dargestellt werden. Die Summenanfangskurzschlusswechselstromleistung der Stationen ergibt den maximalen Kurzschlussstrom im Netz. Die Aufteilung dieses Stromes, der im Falle eines Erdkurzschlusses fließt, ist von den jeweiligen Masterdungswiderständen und Kettenleiterwiderständen der angrenzenden Seile abhängig.

11.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Die Leiterschleifenberechnung basiert nach dem Verfahren von Carson [13] und Pollaczek [14], die für parallele unendliche lange Leiter gilt, somit ergibt sich zwangsweise durch Abbruch der Reihenentwicklung eine Näherung die jedoch ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

Ebenso wurde der Durchhang der Leitungen gemittelt und die resultierenden Abstände zur Berechnung der induktiven Kopplung herangezogen.

Die Kurzschlussleistungen je Station sind dem Netzbetreiber bekannt, jedoch ändert sich diese zeitlich. Die Kurzschlussleistung kann somit nicht als konstant angenommen werden,

vor allem nicht, wenn damit auf die zulässige Zeit der Wechselstromerwärmung zurückgerechnet wird. Somit wird bei Annahme der Anfangskurzschlusswechselstromleistung je Station eine „worst case“ Abschätzung durchgeführt.

Der Fehlerwiderstand im Fehlerfall kann variiert werden. Dies ist abhängig von der Art des Kurzschlusses und den Bedingungen wie der Fehler zustande gekommen ist.

Wie gezeigt werden kann, kann in der Mitte der Leitung bei 1-poligem Erdkurzschluss, der Strom im Erdseil hohe Werte aufweisen. Die Einbindung der Stationen mit den dazugehörigen Kurzschlussleistungen ist ebenfalls für den Summenkurzschlussstrom relevant.

11.3 Ausblick

Die Kapazitive Kopplung der Seile zueinander und gegen Erde kann im Model noch Berücksichtigung finden. Somit könnten Effekte wie kapazitive Ströme bei leerlaufenden Leitungen betrachtet werden.

Die Implementierung von Transformatoren und unterschiedlichen Erdungsarten der Stationen kann durchgeführt werden um ein Netz zum Beispiel gelöscht oder isoliert zu betreiben.

Die Quellen bzw. Stromvorgabe könnte man zeitlich variieren um somit bei gegebener Kurzschlussleistung den zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstromes sowie die Spannungen im Kurzschlussfall zu bestimmen.

Bei Schutzversagen in der ersten Zone kann bei geringem Querschnitt des Erdseiles eine Überschreitung der zulässigen Höchsttemperatur eintreten.

Die Höchstzulässige Endtemperatur der Erdseile wird auch von den Befestigungspunkten bestimmt. Da dies meist Schraubverbindungen sind und stark belastet werden reduzieren sie somit die Höchsttemperatur die im Erdseil auftreten darf.

Bei Einbindung der Seile in Innenraumschaltanlagen ist die höchstzulässige Temperatur aufgrund der schlechten Energieabfuhr geringer, dies muss berücksichtigt werden.

Das Temperaturmodell ist rein adiabatisch implementiert worden. Dies bedeutet, dass während des Kurzschlussstromes keine Energieabfuhr möglich ist. Die Temperatur vor dem Kurzschluss ist vor allem von den Umgebungsbedingungen abhängig und deshalb auch frei wählbar, wobei von 35°C lt. EN 50341, [6] ausgegangen wird.

12 Literaturverzeichnis

- [1] E. Clarke, *Circuit analysis of A-C power systems*, New York, 1950.
- [2] D. EN 60909-1-2-3, „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen- Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde (IEC 60909-3:2003),“ VDE Verlag GMBH, Berlin, 2003.
- [3] D. O. B. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Ober-Ramstadt, Hannover: Springer, 2011.
- [4] B. E. Prof. Dr. Rainer, „*Signale und Systeme 2*,“ Zürich, 1999.
- [5] A. S. GmbH, *ABB Schaltanlagenbuch*, Mannheim, 1992.
- [6] ÖNORM, „EN 50341-1,2,3 2001,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2002.
- [7] V. P. D. Renner, *Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme*.
- [8] R. Muckenhuber, „*Elektrische Anlagen 2, Teil 1&2, Vorlesungsunterlagen*,“ Graz, 1987.
- [9] ITU-T, „*Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*,“ 1998.
- [10] A. Steinkellner, „*DA: Der Einfluss der Verdrillung auf die Stromunsymmetrie bei induktiv gekoppelten Hochspannungsfreileitungssystemen*,“ Graz, 2012.
- [11] D. C. Raunig, „*Kapazitive und induktive Beeinflussung von Hochspannungsfreileitungen*,“ Graz, 2010.
- [12] H. H. D.-I. D. Hauer, „*Vorlesungsskriptum Hochstromtechnik*,“ Graz, 2009.
- [13] J. Carson, „*Wave propagation in overhead wires with ground return*, in *Bell Systems Technical Journal*, Vol 5, Seite 539-554,“ 1926.
- [14] F. Pollaczek, „*Über das Feld einer unendlich lagen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung*, in *Elektrische Nachrichtentechnik(E.N.T.)*, Heftnr.: 9, Band 3,“ 1926.
- [15] E. Schmutzer, „*Technischer Bericht Nr.: 119*,“ TU Graz, Graz, 1990.
- [16] W. Wagner, „*Symmetrische Komponenten für Mehrphasensysteme*,“ *Archiv für Elektrotechnik* Band XXIX, Heft 10, 1935.

13 Anhang

Aufgeführt sind die Masterdungswiderstände für das Szenario 1, 9.1.4 und Szenario 3, 9.3.1.

Szenario 1		Szenario 3	
Masterdungswiderstände		Masterdungswiderstände	
Mast Nr.	Ω	Mast Nr.	Ω
1	5,80	1	9,97
2	5,19	2	3,14
3	11,86	3	3,59
4	9,18	4	5,56
5	6,13	5	10,48
6	2,99	6	7,83
7	9,35	7	7,86
8	8,37	8	11,26
9	2,74	9	7,75
10	3,21	10	2,10
11	11,82	11	10,09
12	6,97	12	8,09
13	2,22	13	6,80
14	2,54	14	4,68
15	3,41	15	4,58
16	10,93	16	6,81
17	6,66	17	4,27
18	7,61	18	2,49
19	6,94	19	3,69
20	2,68	20	4,58
21	10,98	21	3,98
22	4,89	22	8,06
23	4,69	23	10,24
24	7,94	24	10,11
25	6,76	25	10,02
26	5,68	26	9,08
27	8,56	27	10,59
28	11,38	28	9,81
29	8,20	29	4,04
30	4,83	30	11,93
31	4,05	31	2,94
32	6,39	32	8,51
33	2,27	33	4,15
34	10,76	34	4,44
35	8,10	35	5,40
36	4,04	36	3,98
37	7,20	37	7,07

38	2,54	38	11,51
39	10,62	39	5,95
40	6,43	40	7,84
41	7,48	41	8,07
42	7,67	42	9,15
43	8,80	43	6,02
44	5,71	44	10,59
45	2,78	45	11,20
46	6,56	46	9,51
47	2,48	47	4,86
48	9,38	48	9,97
49	2,38	49	3,43
50	11,54	50	7,05
51	9,42	51	8,11