Dipl.-Ing. Manfred Wurm

Vergleich der Bestimmungsmethoden der Fehlerortentfernung beim einpoligen Fehler und Nachweis im praktischen Netzbetrieb

Dissertation

Technische Universität Graz

Institut für Elektrische Anlagen
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Graz, Juni 2013

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am ______________________ ______________________________

Datum Unterschrift

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, ______________________ ______________________________

Date Signature

Vorwort und Danksagung

Der Gedanke, nach langjähriger, einschlägiger Berufstätigkeit sich erneut wissenschaftlich mit grundlegenden Fragen seines Fachgebietes zu befassen, entstand, nach dem bekannt wurde, dass Themen wie Schutztechnik, Sternpunkterdung, Fehlerortung usw. wiederum ein Forschungsschwerpunkt eines Institutes für Elektrische Anlagen an einer österreichischen Technischen Universität, konkret an der TU Graz, geworden sind. Meine bekannte Begeisterung für genau diesen Themenkomplex, verbunden mit der Vorliebe, stets den Zusammenhang von praktischer Umsetzung und theoretischem Hintergrund zu verifizieren, gab schlussendlich den Ausschlag, sich diesem Thema im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit zu widmen.

Mein Vorhaben hätte sicherlich nicht zu einer tatsächlichen Umsetzung geführt, wenn nicht *Herr Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert*, Vorstand des Institutes für Elektrische Anlagen an der TU Graz, in seiner bekannt begeisternden Art den entscheidenden Ausschlag gegeben hätte. Ihm möchte ich an allererster Stelle vielmals danken! Zuerst dafür, dass er persönlich die Betreuung dieser Arbeit übernommen hat und im Zuge dessen nicht nur der bekannt anerkannte Fachmann war, der wertvolle und hilfreiche Denkanstöße gegeben hat. Er hat darüber hinaus den notwendigen kreativen Freiraum bei der Gestaltung gegeben und war ein guter Zuhörer, wenn es darum ging, auch unvorhergesehene Wege anzuerkennen.

Ein beachtenswertes Ergebnis des eingangs erwähnten Forschungsschwerpunktes war die wertvolle Dissertation von *Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Achleitner* mit dem Titel „Earth Fault Distance Protection“ [Ach08]. Diese Arbeit, sein Engagement für eine Fortführung seiner Untersuchungen und sein vorsichtiger Druck, meine Gedanken hierzu auf wissenschaftlicher Basis zu formulieren, waren weiters eine wesentliche Entscheidungsgrundlage. Dafür möchte ich ihm sehr herzlich danken.

Bei den beiden Zweitbegutachtern, *Herrn em. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Eltschka* und *Herrn em. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Hadrian*, möchte ich mich sehr herzlich bedanken, dass sie dieses Engagement übernommen haben und mit hilfreichen Hinweisen das Gelingen dieser Arbeit unterstützt haben.

Das Zustandekommen der vorliegenden Arbeit wäre sicher nicht möglich gewesen, wenn nicht viele, mir wohlgesinnte Menschen mir ihre hilfreiche Hand entgegen gestreckt hätten. Es würde den Rahmen des zur Verfügung stehenden Raumes bei weitem sprengen, die vielfältigen und aufwändigen Hilfestellungen jedes einzelnen Beteiligten in ihrem vollen Umfang aufzuzählen und zu würdigen. Jede und Jeder, der nachfolgend herzlichst bedankt wird, möge sich sicher sein, dass ihr oder sein Anteil gleichsam wie der Faktor in einem Produkt – das bekanntlich nur dann einen Wert ungleich Null annehmen kann, wenn jeder einzelne Faktor ungleich Null ist – in dieser Arbeit lebt. Ich bin mir jedes einzelnen Beitrages sehr deutlich bewusst und werde sie und ihn daher dankend in meiner Erinnerung aufbewahren:

- *Herrn Dipl.-Ing. Günther Frank* für seine Initiative und *Herrn Dipl.-Ing. Herbert Haidvogl* von der EVN Netz GmbH;
- *Herrn Dipl.-Ing. Roman Lechner* und *Herrn Manfred Steinhauser* (EVN Netz GmbH) für ihre tatkräftige Unterstützung;
- die Fachkollegen *Herr Ing. Karl Fembek* (EVN Netz GmbH), *Herr Ing. Oliver Gludowatz* und *Herr Dipl.-Ing. Dr.Ing. Rudolf Simon* (Schneider Electric Energy, vormals Areva), *Herr Dipl.-Ing. Detlef Sam* (Sprecher Automation GmbH) und *Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Salomon* (Siemens Österreich AG);
- *Herrn Franz Hirschböck*, *Herrn Ing. Ludwig Linzer* und *Herrn Ing. Kurt Payr* (EVN Netz GmbH) sowie
- *Frau Mag. Jutta Ritsch* (ÖVE, Geschäftsstelle Graz).

Ein besonderer Dank gilt meinem Sohn *Stefan Wurm*, Student der Technischen Mathematik an der TU Wien. Er hat mich fachlich höchst kompetent bei Fragen zur numerischen Berechnung meiner Untersuchungen (aber nicht nur dabei!) ganz maßgeblich und tatkräftig unterstützt!

Zum Abschluss ist es mir eine Herzensanliegen, meiner lieben Frau *Sabine* und meinen Söhnen *Stefan*, *Alexander* und *Tobias* ein tiefempfundenes „Danke!“ zu sagen, dass sie es ertragen haben, die Entbehrungen, die durch diese Art meiner Freizeitgestaltung entstanden sind, auf sich zu nehmen und mich nach besten Kräften mit Geduld und Ermutigung unterstützt haben.

Manfred Wurm

Wien, im Juni 2013

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Bestimmung der Fehlerentfernung beim einpoligen Fehler mittels Distanzschutzgerät mit anderen Bestimmungsmethoden verglichen. Die hierfür benötigten Berechnungsgrundlagen werden theoretisch genau untersucht und hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung mit wissenschaftlichen Methoden überprüft. Abschließend wird ihre Einsatztauglichkeit im praktischen Netzbetrieb anhand eines Feldversuches gezeigt.

Die Untersuchungen gehen aus von der bekannten Modellierung eines Erdschlusses mittels des Kalküls der Symmetrischen Komponenten nach Fortescue. Darin werden jedoch üblicherweise Querimpedanzen, wie z.B. die Erdkapazitäten, vernachlässigt. Wenn diese jedoch eine nicht mehr vernachlässigbare Größenordnung erreichen, dann werden die Fehlergrößen fehlerbehaftet gerechnet und das Berechnungsergebnis wird unbrauchbar. Daher wird der Erdschluss in einem Strahlennetz unter Berücksichtigung der Erdkapazitäten des fehlerbehafteten Abzweiges und des Restnetzes, mit Annahme eines widerstandsbehafteten Fehlers sowie für beliebige Art der Sternpunkterdung des Netzes exakt modelliert und die Fehlergrößen (Ströme und Spannungen im Originalsystem und in den Komponentensystemen) sowohl am Anfang der fehlerbehafteten Leitung als auch an der Fehlerstelle werden analytisch bestimmt. Es wird gezeigt, dass bei exakter Berücksichtigung des Gegensystems der Gegenstrom am Anfang der fehlerbehaftete Leitung — typischerweise zugleich der Einbauort eines Schutzgerätes – dem Fehlerstrom an der Fehlerstelle entspricht! In den bekannten Modellierungen ist es auch üblich, dass bei der Ermittlung der Fehlergrößen die Fehlerstelle mit dem Ende der fehlerbehafteten Leitung gleichgesetzt wird. Tatsächlich ist diese Vorgangsweise nur bei Vernachlässigung von Querimpedanzen zulässig, denn bei exakter Modellierung bildet sich die Erdkapazität der restlichen, fehlerbehafteten Leitung im Fehlerstrom ab und hat somit Einfluss auf die Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung. Diese Fehlergrößen werden daher auch für den Fehler im Leitungsverlauf (definitionsgemäß ein Fehler an einer beliebigen Stelle im Leitungszug) bestimmt.

In der wertvollen Arbeit von G. Achleitner [Ach08] wird die Bestimmung der Fehlerentfernung weiterentwickelt: ausgehend von der konventionellen Fehlerortformel wird diese um Korrekturterme erweitert und die hiermit erzielbaren Ergebnisse dargestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Fehlergrößen speziell am Anfang der fehlerbehafteten Leitung genau berechnet und basierend auf diesen analytisch bestimmten Fehlergrößen werden zwei neue Algorithmen zur Fehlerortbestimmung angegeben, und zwar sowohl für den Leitungsende- als auch für den Fehler im Leitungsverlauf, wobei letztere exakt nur für die homogene Leitung gilt und nur mittels erhöhtem Rechenaufwand möglich ist.

Ungeachtet dessen war es im Rahmen dieser Arbeit von Interesse, in welcher Weise die nun exakt bestimmbaren Fehlerentfernungen sowohl für den Leitungsmitte- als auch für den Fehler im Leitungsverlauf verifiziert werden können. Unter Annahme realistischer Verhältnisse wurde ein Strahlennetz simuliert, das auf den fehlerbehafteten Abzweig sowie das verbleibende Restnetz reduziert wurde. Für verschiedene Arten der Sternpunkterdung wurden die Fehlergrößen ermittelt und die Ergebnisse mittels unterschiedlicher Rechenmethoden verglichen. Insbesondere kann damit gezeigt werden, dass der Gegenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung dem Fehlerstrom an der Fehlerstelle entspricht!

Somit ist nun ganz allgemein nachgewiesen, dass mittels des beschriebenen Weges tatsächlich ein verbessertes Verfahren zur Erdfehlerortung mit Distanzschutzgeräten zur Verfügung steht. In weiterer Folge wird dieses verbesserte Verfahren auf seine praktische Anwendbarkeit numerisch überprüft, und zwar anhand der Topologie eines realtypischen Mittelspannungsnetzes. Als Fehlerort wird jeweils ein Erdschluss mit kontinuierlich variierender Entfernung angenommen. Aus den auf analytischem Wege exakt ermittelten Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung wird nun sowohl die Fehlerentfernung als auch die Abweichung zum tatsächlichen Wert nach verschiedenen Bestimmungsmethoden (konventionell, Verfahren nach Achleitner sowie gemäß der exakten Formeln für den Leitungsende- und den Fehler im Leitungsverlauf einer homogenen Leitung) berechnet. Diese Gegenüberstellung soll es ermöglichen zu beurteilen und zu entscheiden, welches der gezeigten Verfahren numerisch die besten Werte liefert.

Zur praktischen Untermauerung der Fehlerortformeln wurde in einem 20-kV-Netz für die öffentliche Stromversorgung ein Pilotversuch durchgeführt:

- Primärseitig wurde parallel zur Petersenspule ein schaltbarer 20-kV-Sternpunktwiderstand aufgebaut.
- Sekundärtechnisch wurden in drei von vier Leitungsabzweigen jeweils drei Testgeräte eingesetzt, die für die Ermittlung der Fehlerentfernung beim Erdschluss einen modifizierten Algorithmus implementiert haben.
- Mittels eines separaten Transientenrecorders wurden alle Ströme der Versuchsabzweige, die Sammelschienenspannungen sowie die Ströme durch die Petersenspule und den Sternpunktwiderstand bei jedem Erdschluss aufgezeichnet, so dass damit zusätzlich zu den Störschriebaufzeichnungen der Versuchsgeräte Daten verfügbar sind, mit denen im Nachhinein einerseits die Fehlerentfernung berechnet werden kann und die andererseits den Versuchsgeräten mittels geeigneter Prüfeinrichtung erneut aufgeprägt werden können, um deren Reaktion zu studieren.

Die Fehlerentfernung jedes andauernden Erdschlusses wird gemäß den oben genannten Fehlerortformeln berechnet und jenen Werten, die die Versuchsgeräte ermittelt haben, gegenübergestellt und mit der tatsächlichen Fehlerentfernung, die vom Betriebspersonal dem System Operator übermittelt wurde, verglichen.

Abstract

In this thesis the method of the fault distance calculation of a ground fault by means of distance protection relays will be compared with other methods. The relevant basics for the calculation will be analyzed theoretically and checked regarding to their practical use with scientific methods. Finally its usable in the utility pratice will be shown at the example of a field test.

The investigations start with the well-known modelling of a ground fault by means of the calculation of Fortescue's Symmetrical Components. Usually all shunt impedances e.g. phase-to-earth capacities are neglected. If they reach a non neglectible size the fault quantities will be calculated incorrect and the result is insufficient. Therefore the earth fault will be modelled exactly with respect of the phase-to-earth capacities of the faulty feeder and the residual grid, with assumption of an existing fault resistance and for any kind of neutral grounding of the network. All fault quantities – currents and voltages in the original system and in the sequence systems – as well at the beginning of the faulty line and at the fault point will be determined analytically. It will be shown that with exact consideration of the negative sequence system the negative sequence current at the beginning of the faulty line – what is usually the location of a distance protection relay – correspondes with the fault current at the fault point! In the well-known models of fault calculation it's also common use to equate the fault point to the end of the faulty line. This procedure is only acceptable if shunt impedances are neglectible. With respect to the exact model the phase-to-earth capacities of the residual line cause an additional part of the fault current given at the beginning of this line. Therefore the fault quantities will be determined for fault points within a line also.

In another thesis for determination of the fault distance the author adds a correction term in the formula for its conventional calculation. Due to the fact that in the current thesis the fault quantities especially at the beginning of a faulty line can be calculated exactly two additional algorithms for the fault distance calculation will be developed: one for the fault point at the end of the line and the other for the fault point at an arbitrary position within the line. The latter one is valid only for the homogeneous line and can be realized only with an increased effort of calculation.

Regardless of this fact it was of interest in which way the calculation of the fault distance by means of the exact algorithms can be verified for the fault point at the end of the line as well as for a fault point at an arbitrary position within the line. Assuming realistic conditions a radial distribution system was simulated which was reduced to two feeders, the faulty line and the residual network. For different kinds of system grounding the fault quantities were calculated and the results were compared by means of different calculation methods.

In that way it can be shown especially that the negative sequence current at the beginning of the faulty line correspondes with the fault current at the fault point.

Thus it is verified that according to the given methods an improved procedure for earth fault distance determination is available, indeed. Subsequently these improved procedures will be tested with respected to their practical use by means on a typical medium voltage grid. The earth fault point variies along the faulty line. The fault quantities at the beginning of the faulty line will be calculated analytically and with these values the fault distance and the deviation from the exact value will be determined by means of the four methods stated above (conventionally, algorithm according Achleitner as well as exact formula for the fault point at the end of the line and within the line). This comparison should help to decide which method gives the best practice.

In order to support the theoretical understanding practically a field test in a public radial distribution grid was established:

- On primary side a switchable resistor in the 20 kV neutral was put in parallel with the Petersen reactor.
- Three of four feeders were equipped with three test distance protection relays each (of three different manufacturers) which have implemented the improved earth fault distance calculation algorithm.
- By means of a transient recorder currents of the test feeders, busbar voltages and currents of the Petersen reactor and the neutral resistor will be recorded at every ground fault. They create fault quantities which are independent from the records of the distance relays. With this fault values it is possible to calculate the fault distance by means of the formulas given above or to replay them to the test relays by means of a special test device in order to study their reaction.

Die calculated fault distance will be compared to the fault value which the test relays determined as well as to the real fault distance which the system operator of the utility got from its service personel.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

$\underline{a}$	komplexer Drehoperator; $\underline{a} = e^{j \cdot 120°}$
α	auf die Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung bezogene Fehlerentfernung
$C_{E,Abg}$	Erdkapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
$c'_{E,Abg}$	längenbezogene Erdkapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
$C_{E,Rest}$	Erdkapazität des Restnetzes
d	Entfernung bis zur Fehlerstelle, Fehlerentfernung
F	Index für Fehlerstelle
$\underline{I}_F$	Fehlerstrom (an der Fehlerstelle)
$\underline{I}_F^k$	Komponentenströme am Fehlerort
$\underline{I}_R^k$	Komponentenströme durch das Schutzgerät
$\underline{I}_{x,F}$	Leiterströme am Fehlerort
$\underline{I}_{x,R}$	Leiterströme durch das Schutzgerät
$\underline{I}_{\Sigma}$	Summenstrom
k	Hochzahl des Komponentensystems; k=1,2,0
$\underline{k}_0$	komplexer Erdfaktor
l	Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung
R	Index für Einbauort eines Schutzgerätes
R_F	Fehlerwiderstand
X_{CEAbg}	Reaktanz der Kapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
X_{CEAbg2}	Reaktanz der Kapazität des halben fehlerbehafteten Abzweiges
X_{CERest}	Reaktanz der Kapazität des Restnetzes
x	Index der Phase des Dreiphasensystems; x=1,2,3
$\underline{U}_F^k$	Komponentenspannungen an der Fehlerstelle
$\underline{U}_R^k$	Komponentenspannungen am Einbauort des Schutzgerätes
$\underline{U}_{xE,F}$	Leiter-Erde-Spannungen an der Fehlerstelle

$\underline{U}_{xE,R}$	Leiter-Erde-Spannungen am Einbauort des Schutzgerätes
$\underline{Z}_E$	Erdimpedanz
$\underline{Z}_L$	Leitungsimpedanz
$\underline{z}_L^{'}$	längenbezogene Leitungsimpedanz
$\underline{Z}_N$	Netzimpedanz
$\underline{Z}_{SPE}$	Sternpunktimpedanz
$\underline{Z}_T$	Transformatorimpedanz
$\underline{Z}_{Fehl}^1$	Leitungs-Mitimpedanz vom Einbauort des Schutzgerätes bis zum Fehlerort, „Fehlerentfernung“
KNOSPE	kurzzeitige niederohmige Sternpunkterdung
NOSPE	niederohmige Sternpunkterdung
RESPE	Resonanzsternpunkterdung, induktive Sternpunkterdung, „Erdschlusslöschung“

1. Einleitung und Stand der Technik

1.1. Überblick

Die Art der Sternpunkterdung bestimmt das Fehlergeschehen beim einpoligen Fehler. Statistisch gesehen ist der einpolige Fehler (auch „Erdschluss“ oder „Erdfehler“) der häufigste Fehler, so dass die Art der Sternpunkterdung das Betriebsgeschehen in einem elektrischen Netz ganz maßgeblich beeinflusst. Es zählt daher zu den Aufgaben der Betriebsführung des Netzes, im Falle eines Erdschlusses die fehlerbehaftete Stelle zu orten und entsprechende Maßnahmen zu treffen. Die Erdschlussortung war und ist somit ein zentrales Thema in der elektrischen Energieversorgung; sie ist daher ein aktuelles Forschungs- und Entwicklungsgebiet sowohl an Technischen Universitäten als auch von einschlägig befassten Firmen sowie Energieversorgungsunternehmen. Denn je nach zu setzender Maßnahme des System Operators eines elektrischen Netzes können mit dem Auftreten eines Erdfehlers Versorgungsunterbrechungen verbunden sein, die zu einer Beeinträchtigung der Versorgungsqualität führen, weshalb es im Interesse von Netzbetreibern liegt, die Zeiten für die Auffindung von Fehlerstellen zu verkleinern.

Ganz allgemein sind folgende Arten der Sternpunkterdung verbreitet:

- isolierter Sternpunkt,
- niederohmig geerdeter Sternpunkt, in Literatur und Sprachgebrauch abgekürzt auch als „NOSPE“ eingeführt,
- induktiv geerdeter Sternpunkt, auch „Erdschlusslöschung“ oder „Resonanzsternpunkterdung“ oder abgekürzt „RESPE“ genannt,
- kurzzeitig niederohmige Sternpunkterdung, in Literatur und Sprachgebrauch abgekürzt auch als „KNOSPE“ bekannt sowie die
- starre oder direkte Sternpunkterdung oder teilstarre Sternpunkterdung, wenn nur einzelne Sternpunkte des Netzes direkt geerdet sind.
- Die „Polerdung“ oder „Phasenerdung“, auch als „KNOPE“ bezeichnet, zählt nicht unmittelbar zu einer Art der Sternpunkterdung. Da aber hierdurch auch der Ablauf des Fehlergeschehens beim Erdschluss bestimmt wird, sei diese Methode ebenfalls in diesem Zusammenhang erwähnt.

Die Frage, welche der angeführten Methoden für ein konkretes Netz angewendet und ausgeführt werden soll, ist Gegenstand vielfältiger Aspekten und fast immer im Sinne der Lösung eines klassischen Zielkonfliktes zu beantworten. Regelmäßige Tagungen befassen sich ausschließlich mit dieser Frage, so dass es den Rahmen der vorliegenden Arbeit bei Weitem überschreiten würde, darauf einzugehen. [11609] [13211]

- Weiterbetrieb im Falle eines Erdfehlers und damit verbunden die Einhaltung der Berührungsspannung,
- Anteil von Freileitung zu Kabel,
- Möglichkeit der Ausweitung des Fehlergeschehens in Form von Doppelerdschlüssen

sind nur einige, wenngleich auch zentrale Aspekte, nach denen die Art der Sternpunkterdung zu betrachten ist.

1.2. Methoden der Erdschlusserfassung und -ortung

Die Methoden der Erdschlusserfassung sind abhängig von der Art der Sternpunkterdung und sehr umfassend in der einschlägigen Literatur [CR91] [Sti85] [Hub93] [Fic99] [Wur+04] und in Betriebsanleitungen von Schutzgeräteherstellern [NN10a] beschrieben sowie Gegenstand von einschlägigen Tagungen [11609] [13211], so dass es ebenfalls den Rahmen der vorliegenden Arbeit bei Weitem überschreiten würde, näher darauf einzugehen. Die nachstehende Aufzählung soll nur einen groben Überblick geben:

1. bei isoliertem Sternpunkt
   - amplitudisches Verfahren,
   - Richtungserkennung des Summenstromes am Anfang der fehlerbehafteten Leitung in bezug auf die Nullspannung des Netzes nach der „$sin\varphi$“-Methode;
2. bei NOSPE, KNOSPE und KNOPE
   - Nullstrom/Zeit-Schutz ohne oder mit Richtungsbestimmung,
3. bei RESPE
   - Richtungserkennung des Summenstromes am Anfang der fehlerbehafteten Leitung in bezug auf die Nullspannung des Netzes nach der „$cos\varphi$“-Methode, zur Verbesserung der Erfassung auch mit Vergrößerung des natürliches Wattreststromes („Wattreststromvermehrung“),
   - Oberschwingungsverfahren durch Ausnützung der 5. Oberschwingung in der Nullspannung des Netzes und Richtungserkennung der 5. Oberschwingung im Summenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung in bezug auf die 5. Oberschwingung in der Nullspannung nach der „$sin\varphi$“-Methode;
   - Erdschlusswischerverfahren durch Auswertung des Einschwingvorganges des Summenstromes am Anfang der fehlerbehafteten Leitung in bezug auf die Nullspannung,
   - Pulsortungsverfahren durch Feststellung der Änderung in den Summenströmen am Leitungsanfang, wenn in das Nullsystem ein pulsierender Strom eingespeist wird,
   - Admittanzverfahren durch Änderung des Kompensationsgrades und des Nullsystemes durch Verstimmmung der Petersenspule und laufende Überprüfung der Unsymmetriewerte der einzelnen Abzweige.

Je nach Art der Sternpunkterdung und den damit zusammenhängenden Methoden der Erdschlussortung ist eine automatische Abschaltung oder – im Falle eines Weiterbetriebes – eine Anzeige des fehlerbehafteten Abzweiges verbunden: die Erdschlussortung ist im Idealfall auf die Meldung des jeweiligen Abzweiges im Umspannwerk beschränkt, das bedeutet, dass der tatsächliche Erdschlussort durch zumeist händische Suchschaltungen eingegrenzt werden muss. Eine direkte Anzeige einer Fehlerort*entfernung* in Ohm vom Einbauort des Schutzgerätes bis zur Fehlerstelle, wie sie bei Phase-Phase-Fehlern durch Ausgabe der Fehlerreaktanz durch das (Distanz-)Schutzgerät standardmäßig erfolgt, ist nicht möglich. Es wäre daher wünschenswert, den Erdschlussort ebenfalls durch Angabe einer Fehlerreaktanz vom Einbauort des Schutzgerätes bis zur Fehlerstelle bestimmen zu können.

1.3. Weiterentwicklung

1.3.1. Grundgedanken

Bestimmte Netztypen, insbesondere Netze mit entweder kilometermäßig nennenswertem Freileitungsanteil oder mit Freileitungstrassen durch atmosphärisch schwieriges Gebiet, werden nach wie vor gerne mit RESPE betrieben. Die im vorigen Abschnitt angeführten Erdschlusserfassungsmethoden für diese Art der Sternpunkterdung haben gemeinsam, dass der erdschlussbehaftete Abzweig im Umspannwerk *gemeldet* wird. Eine sogenannte „Tiefenortung“ – man versteht darunter die Bestimmung der Fehlerentfernung ab der Messstelle – wird jedoch vielfach vom System Operator als wünschenswert gesehen. Wegen des Freileitungsanteiles werden in den Umspannwerksabzweigen üblicherweise Distanzschutzgeräte eingesetzt; ausgenommen sind hiervon beispielsweise Abzweige mit kurzen Kabelstrecken. Die Distanzschutzgeräte gängiger Hersteller haben die Schutzfunktion „empfindliche Erdschlussrichtungserfassung“ (ANSI-Code 67Ns) standardmäßig in ihrem Funktionsumfang enthalten, so dass aus ökonomischen Erwägungen für die Erdschlussortung standardmäßig die Methode nach dem Prinzip der $cos\varphi$-Methode nahe liegt. Handelt es sich dabei um Mittelspannungsnetze, sind diese zumeist als Ringnetze aufgebaut, die betrieblich in Form offener Ringe als Strahlennetze betrieben werden. Im Falle eines Erdschlusses ist es wegen der Versorgungsunterbrechung nicht gewünscht, den fehlerbehafteten Abzweig abzuschalten. Um die Anzahl und Dauer der händischen Suchschaltungen minimieren zu können, wäre eine – wenn auch nur annähernde – Kenntnis des Fehlerortes (z.B. auf ein Drittel der Leitungslänge genau) betrieblich wünschenswert.

1.3.2. Idee und Prinzip

Im Zuge eines Arbeitsschwerpunktes am Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz wurde ein Verfahren angegeben, das mithilfe eines Distanzschutzgerätes eine Tiefenortung bei einem Erdfehler ermöglicht [AF07] [Ach08]. Die Grundidee entspricht in etwa einer Kombination der Methoden „Wattreststromvermehrung“ und KNOS-

PE, ohne jedoch mit dem KNOSPE-Strom den erdfehlerbehafteten Abzweig abzuschalten:

1. Eine gewisse Zeit t_1 nach Eintreten eines Erdschlusses wird im Sternpunkt des induktiv geerdeten Netzes (Transformatorsternpunkt oder Sternpunktbildner) für eine kurze Zeit t_2 ein ohmscher Widerstand R_{SPE} parallel zur Petersenspule eingeschaltet.
2. Durch das Auftreten eines Zusatzstromes infolge des Sternpunktwiderstandes R_{SPE} („Pilotstrom") wird das Distanzschutzgerät DIST des erdfehlerbehafteten Abzweiges zur Fehlerortung angeregt und muss während dieser Zeit zur Umschaltung der Messschleife auf „Erdfehler" erkennen.
3. Durch eine Modifikation der konventionellen Berechnungsformel für die Fehlerentfernung (siehe Abschnitte 3.3.1 und 6) lässt sich auch bei höherohmigen Fehlern der Fehlerwiderstand R_F eliminieren, wodurch sich die Angabe der Fehlerentfernung — typischerweise durch Ausgabe der Fehlerreaktanz X^1_{Fehl} — verbessert.
4. Der Sternpunktwiderstand und somit der Pilotstrom sind nur für eine kurze Zeit eingeschaltet, so dass es nicht zu Problemen mit der einzuhaltenden Berührungsspannung kommt.

Das oben beschriebene Verfahren ist in der nachstehenden Abbildung 1.1 dargestellt:

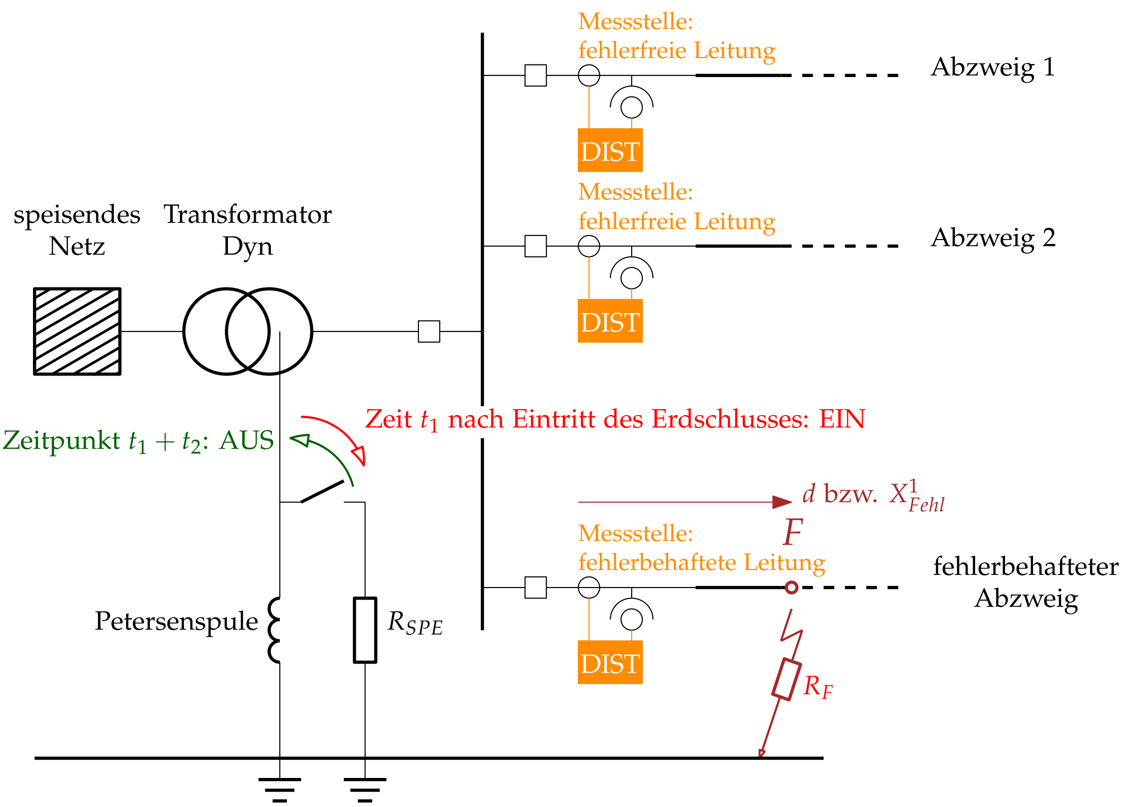


Abbildung 1.1.: Prinzipschaltung für das Verfahren der Erdschluss-Tiefenortung mittels Distanzschutzgeräte

1.3.3. Berechnung der Fehlerentfernung

Das angegebene Verfahren wurde an der TU Graz sowohl in Form von Simulationsrechnungen als auch durch das Abspielen von Fehlergrößen, die aus Erdschlussversuchen erhalten wurden, erprobt und schwerpunktmäßig in der Dissertation von G. Achleitner [Ach08] publiziert.

Standardmäßig haben handelsübliche Distanzschutzgeräte Algorithmen für die Berechnung der Fehlerentfernung implementiert und zwar üblicherweise in der einfachen Form

$$X^1_{Fehl} = \mathrm{Im}(\underline{Z}^1_{Fehl}) = \mathrm{Im}\left(\frac{\underline{U}_{LE}}{\underline{I}_L + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_\Sigma}\right), \tag{1.1}$$

d.h. ohne Berücksichtigung der Betriebs- und Erdkapazitäten der einzelnen Abzweige oder des Fehlerwiderstandes R_F. Es sind aber genau diese beiden Einflussgrößen, die das Ergebnis der Fehlerortberechnung gemäß obiger Gleichung vom wahren Wert beträchtlich abweichen lassen:

- Durch die zunehmende Verkabelung insbesondere in Mittelspannungsnetzen steigen auch die Kapazitäten der Netze.
- Erdschlüsse sind zumeist mit dem Auftreten eines nicht niederohmigen Fehlerwiderstandes verbunden.

In der Dissertation [Ach08] wird eine Modifikation dieses Algorithmus vorgestellt, mit dessen Anwendung eine Verbesserung der Genauigkeit bei der Bestimmung der Fehlerentfernung erzielt werden kann. Sowohl die oben angegebene einfache Form der Fehlerortbestimmung als auch die Modifikation werden in den Abschnitten 3.3.1 und 6 ausführlich dargestellt.

1.3.4. Praktische Umsetzung

Eine Implementierung dieses Verfahrens in handelsübliche Distanzschutzgeräte sowie dessen Anwendung in einem realen Mittelspannungsnetz, mit dem die alltägliche Kundenversorgung bewerkstelligt wird, fand noch nicht statt. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher auch mit seiner praktischen Umsetzung in Form eines Pilotversuches, dessen Ergebnisse in Abschnitt 9 untersucht werden.

2. Forschungsfragen

1. Können für das Strahlennetz unter Berücksichtigung der Kapazitäten des fehlerbehafteten Abzweiges und des Restnetzes sowie für jede Art der Sternpunkterdung und für beliebigen Fehlerwiderstand auf analytischem Wege exakte Formeln für die Fehlerentfernung beim einpoligen Fehler angegeben werden? ... Abschnitt 5 und 6

2. Inwieweit wird in diesen Gleichungen der Fehlerort berücksichtigt (Leitungsende-Fehler versus Fehler im Leitungsverlauf)? ... Abschnitt 6

3. Auf welche Weise lassen sich verlässliche Fehlergrößen erzeugen, mit denen die entwickelten Fehlerortformeln verifiziert werden können? ... Abschnitt 7

4. Gibt es eine Möglichkeit, den Fehlerstrom an der Fehlerstelle durch eine Messgröße am Anfang der fehlerbehafteten Leitung auszudrücken? ... Abschnitt 5, 7 und 8

5. In welchen Grenzen bewegt sich die Abweichung der berechneten Fehlerentfernung im Vergleich zum tatsächlichen Fehlerort in Abhängigkeit
   a) von der Art der Sternpunkterdung und
   b) von der Höhe der Sternpunktimpedanz

   ... Abschnitt 8

6. In welcher Größenordnung liegen die Unterschiede in der Fehlerortung bei Anwendung der exakten Fehlerortformel im Vergleich zu der in [Ach08] angegebenen Fehlerortformel?

7. Lassen sich mit den exakten Fehlerortformel, die für die homogene Leitung entwickelt wurden, auch Aussagen über ihre Verwendung bei stückweise zusammengesetzten Leitungen treffen? ... Abschnitt 8

8. In welcher Form sind die theoretisch ausgearbeiteten Fehlerortformeln in der praktischen Anwendung umsetzbar und eignet sich das in [Ach08] angegebene Verfahren für die praktische Fehlerortung in einem realen Verteilernetz? ... Abschnitt 9

3. Grundlegendes

3.1. Der Erdschluss im Dreiphasensystem in Symmetrischen Komponenten nach Fortescue

Die Berechnung der Fehlergrößen eines Erdschlusses im Symmetrischen Komponentensystem nach Fortescue ist hinreichend geläufig. [Elt84] [Roe84] [Sti85] Zur Einführung wird die Berechnung am Beispiel eines einfachen, strahlenförmigen Netzes gezeigt:

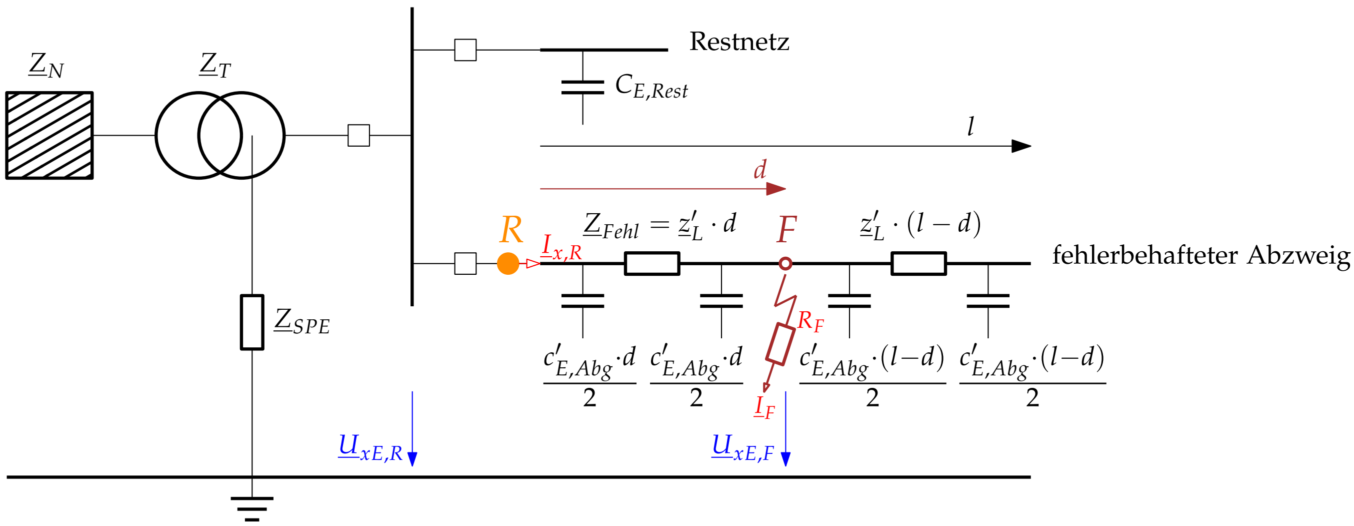


Abbildung 3.1.: einfaches Strahlennetz im Originalsystem

$\underline{Z}_N$	Netz
$\underline{Z}_T$	Transformator
$\underline{Z}_{SPE}$	Sternpunktimpedanz
$\underline{Z}_{Fehl}$	Längsimpedanz des fehlerbehafteten Abzweiges bis zur Fehlerstelle
$\underline{z}'_L$	bezogene Längsimpedanz des fehlerbehafteten Abzweiges
$c'_{E,Abg}$	bezogene Erdkapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
$C_{E,Rest}$	Erdkapazität des Restnetzes
R_F	Fehlerwiderstand
d	Entfernung bis zur Fehlerstelle
l	Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung
R	Einbauort eines Schutzgerätes
F	Fehlerstelle
$\underline{U}_{xE,R}$	Leiter-Erde-Spannungen am Einbauort des Schutzgerätes
$\underline{I}_{x,R}$	Leiterströme durch das Schutzgerät
$\underline{U}_{xE,F}$	Leiter-Erde-Spannungen an der Fehlerstelle
$\underline{I}_F$	Fehlerstrom
	$x = 1,2,3$

Das zugehörige Komponenten-Ersatzschaltbild ist nachstehend dargestellt:

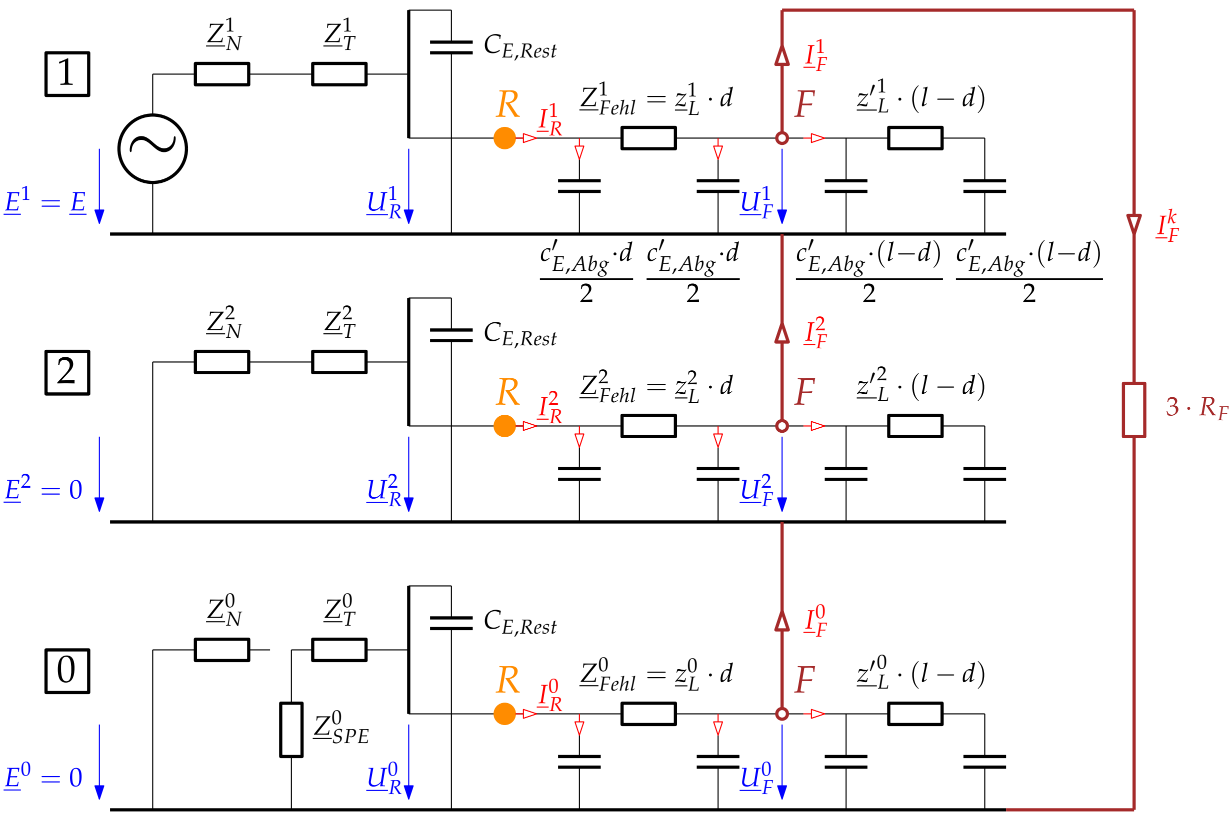


Abbildung 3.2.: Komponenten-Ersatzschaltbild eines einfaches Strahlennetzes

$\underline{U}_R^k$	Spannungen des Mit-, Gegen- und Nullsystems (k=1,2,0) am Einbauort des Schutzgerätes
$\underline{U}_F^k$	Spannungen des Mit-, Gegen- und Nullsystems (k=1,2,0) an der Fehlerstelle
$\underline{I}_R^k$	Ströme des Mit-, Gegen- und Nullsystems (k=1,2,0) am Einbauort des Schutzgerätes
$\underline{I}_F^k$	Ströme des Mit-, Gegen- und Nullsystems (k=1,2,0) an der Fehlerstelle

Für die beteiligten Betriebsmittel (Netz, Transformatoren und Leitungen) wird angenommen, dass deren Mit- und Gegenimpedanz gleich groß ist ($\underline{Z}^1 = \underline{Z}^2$). Beim speisenden Transformator mögen lediglich jene Schaltgruppen berücksichtigt werden, bei denen die Nullsysteme von Ober- und Unterspannungsseite entkoppelt sind - also etwa Dyn oder YNyn(d), wobei der oberspannungsseitige Sternpunkt nicht geerdet ist.

Dieses exakte Komponenten-Ersatzschaltbild eines einfachen Strahlennetzes zeigt sehr deutlich, dass der Strom an der Fehlerstelle F (Fehlerstrom) $\underline{I}_F^k$ nicht gleich ist jenem Strom, der von einem Schutzgerät R am Anfang der Leitung gemessen wird. Durch die Kapazitäten werden zusätzliche Ströme verursacht, die sich dem eigentlichen Fehlerstrom $\underline{I}_F^k$ überlagern: Das Schutzgerät R am Anfang der Leitung misst somit nicht (nur) den Fehlerstrom. Dieser Umstand beeinflusst jedoch die Berechnung der Fehlerentfernung, wie in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich gezeigt werden wird.

Um die Berechnung zu vereinfachen, wird üblicherweise angenommen, dass Querimpedanzen, das sind in Hinblick auf ihre praktische Bedeutung die Erdkapazitäten aller Leitungen, im Verhältnis zu den Längsimpedanzen vernachlässigbar sind. Dadurch vereinfacht sich auch das Komponenten-Ersatzschaltbild ganz wesentlich:

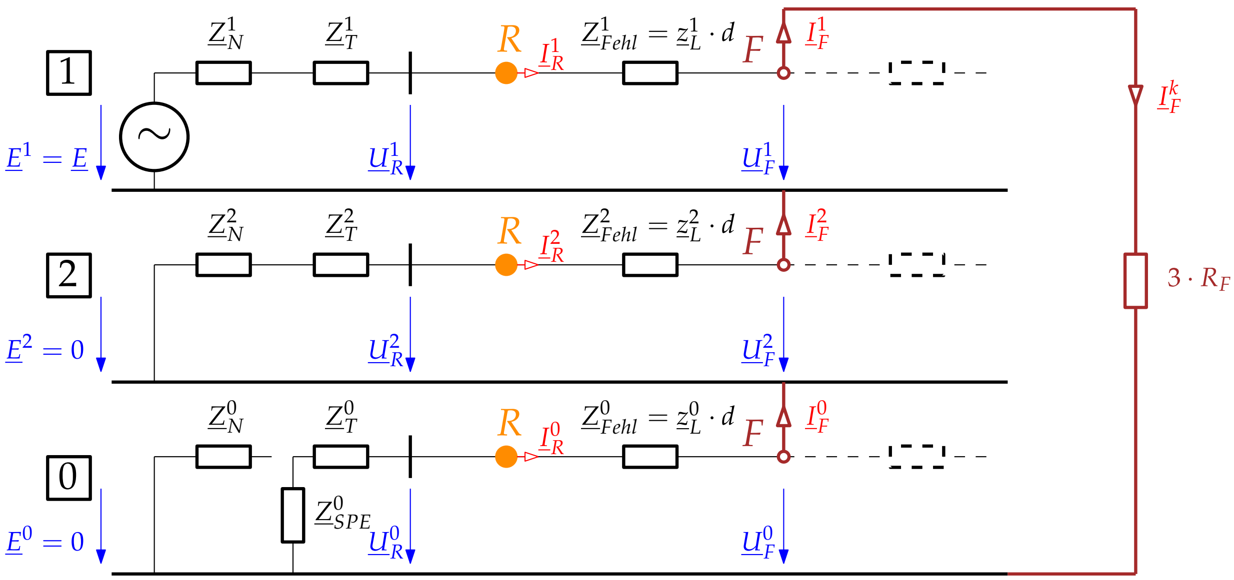


Abbildung 3.3.: vereinfachtes Komponenten-Ersatzschaltbild eines einfaches Strahlennetzes

Wegen der vernachlässigten Kapazitäten ist die restliche Leitung des fehlerbehafteten Abzweiges $\underline{z}'_L \cdot (l - d)$ nicht mehr stromdurchflossen, so dass beim einfachen strahlenförmigen Netz jeder Fehlerort an beliebiger Stelle der Leitung ($0 \leq \alpha \leq 1$, $\alpha = d/l$) wie ein Fehler am Leitungsende behandelt werden kann. Insbesondere wird dadurch aber auch ersichtlich, dass der Strom an der Fehlerstelle F (Fehlerstrom) $\underline{I}_F^k$ gleich ist dem Strom, der von einem Schutzgerät R am Anfang der Leitung gemessen wird ($\underline{I}_F^k = \underline{I}_R^k$).

Anhand des vereinfachten Komponenten-Ersatzschaltbildes eines einfaches Strahlennetzes werden die Bestimmungsgleichungen für die Fehlergrößen aufgestellt.

Fehlerstrom:

$$\underline{I}_F^1 = \underline{I}_F^2 = \underline{I}_F^0 = \underline{I}_F^k = \frac{\underline{E}}{\sum \underline{Z}^1 + \sum \underline{Z}^2 + \sum \underline{Z}^0 + 3 \cdot R_F} \quad (k = 1, 2, 0) \tag{3.1}$$

Impedanzen:

$$\sum \underline{Z}^1 = \underline{Z}_N^1 + \underline{Z}_T^1 + \underline{Z}_{Fehl}^1 \tag{3.2}$$
$$\sum \underline{Z}^2 = \underline{Z}_N^2 + \underline{Z}_T^2 + \underline{Z}_{Fehl}^2 \tag{3.3}$$
$$\sum \underline{Z}^0 = \underline{Z}_{SPE}^0 + \underline{Z}_T^0 + \underline{Z}_{Fehl}^0 \tag{3.4}$$

Spannungen an der Fehlerstelle F:

$$\underline{U}_F^1 = \underline{E} - \underline{I}_F^k \cdot \sum \underline{Z}^1 \tag{3.5}$$
$$\underline{U}_F^2 = -\underline{I}_F^k \cdot \sum \underline{Z}^2 \tag{3.6}$$
$$\underline{U}_F^0 = -\underline{I}_F^k \cdot \sum \underline{Z}^0 \tag{3.7}$$

Spannungen am Einbauort des Schutzgerätes R:

$$\underline{U}_R^1 = \underline{I}_F^1 \cdot \underline{Z}_F^1 + \underline{U}_F^1 \tag{3.8}$$
$$\underline{U}_R^2 = \underline{I}_F^2 \cdot \underline{Z}_F^2 + \underline{U}_F^2 \tag{3.9}$$
$$\underline{U}_R^0 = \underline{I}_F^0 \cdot \underline{Z}_F^0 + \underline{U}_F^0 \tag{3.10}$$

Mithilfe der Entsymmetrierungsmatrix

$$\underline{\boldsymbol{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

erhält man die Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und die Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$ im Originalsystem am Einbauort der Schutzgerätes ($x = 1, 2, 3$ und $k = 0, 1, 2$):

$$\underline{\boldsymbol{I}}_{x,R} = \underline{\boldsymbol{T}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}_R^k = \underline{\boldsymbol{T}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}_F^k \tag{3.12}$$
$$\underline{\boldsymbol{U}}_{xE,R} = \underline{\boldsymbol{T}} \cdot \underline{\boldsymbol{U}}_R^k \tag{3.13}$$

3.2. Nullimpedanzen

3.2.1. Drehstromleitung mit unabhängigen Phasenimpedanzen und Erdrückleitung; Erdfaktor

Für die in Abbildung 3.4 gezeigte Drehstromleitung, bestehend aus drei gleich großen, unabhängigen Phasenimpedanzen Z_L und einer Impedanz für die Erdrückleitung Z_E, wird die Nullimpedanz bestimmt.

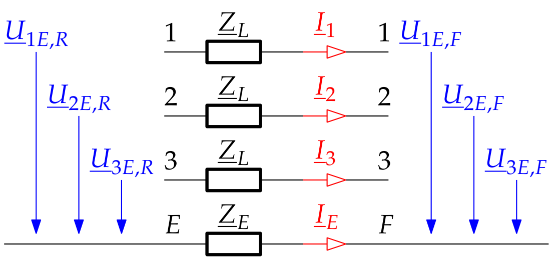


Abbildung 3.4.: Drehstromleitung mit unabhängigen Phasenimpedanzen und Erdrückleitung

Die beiden Spannungssysteme - $\underline{U}_{xE,E}$ an der Stelle E und $\underline{U}_{xE,F}$ an der Stelle F - sind nicht auf den selben Nullpunkt bezogen. Die Spannungsgleichungen lauten daher:

$$\underline{U}_{1E,E} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{1E,F} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E \tag{3.14}$$
$$\underline{U}_{2E,E} = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{2E,F} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E \tag{3.15}$$
$$\underline{U}_{3E,E} = \underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{3E,F} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E \tag{3.16}$$

Für die Ströme gilt:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_E = 0 \tag{3.17}$$

Drückt man nun die Ströme und Spannungen des Originalsystems durch ihre Komponentengrößen aus (vgl. (3.12) und (3.13)), lassen sich die obigen Gleichungen wie folgt ausdrücken:

$$3 \cdot \underline{I}^0 + \underline{I}_E = 0 \tag{3.18}$$

oder

$$\underline{I}_E = -3 \cdot \underline{I}^0 \tag{3.19}$$

und (3.14) bis (3.16)

$$(\underline{U}_E^0 + \underline{U}_E^1 + \underline{U}_E^2) = (\underline{I}^0 + \underline{I}^1 + \underline{I}^2) \cdot \underline{Z}_L + (\underline{U}_F^0 + \underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2) + 3 \cdot \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}_E \tag{3.20}$$

$$(\underline{U}_E^0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_E^1 + \underline{a} \cdot \underline{U}_E^2) = (\underline{I}^0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^1 + \underline{a} \cdot \underline{I}^2) \cdot \underline{Z}_L + (\underline{U}_F^0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_F^1 + \underline{a} \cdot \underline{U}_F^2) + 3 \cdot \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}_E \tag{3.21}$$

$$(\underline{U}_E^0 + \underline{a} \cdot \underline{U}_E^1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_E^2) = (\underline{I}^0 + \underline{a} \cdot \underline{I}^1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^2) \cdot \underline{Z}_L + (\underline{U}_F^0 + \underline{a} \cdot \underline{U}_F^1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_F^2) + 3 \cdot \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}_E \tag{3.22}$$

Werden diese drei Gleichungen addiert, erhält man entsprechend dem Fundamentalsatz des Rechnens mit Symmetrischen Komponenten [Hoc57, S. 71] eine Definitionsgleichung für die Nullimpedanz:

$$\underline{U}_E^0 = \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_F^0 + 3 \cdot \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}_E \tag{3.23}$$

oder

$$\underline{U}_E^0 = \underline{I}^0 \cdot (\underline{Z}_L + 3 \cdot \underline{Z}_E) + \underline{U}_F^0 \tag{3.24}$$

und

$$\underline{Z}_L^0 = \underline{Z}_L + 3 \cdot \underline{Z}_E \tag{3.25}$$

Mit Einführung des komplexen Erdfaktors [Fic+04, S. 64]

$$\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L} \tag{3.26}$$

und der Kenntnis, dass Mit- und Gegenimpedanz einer Drehstromleitung ihrer Betriebsimpedanz entsprechen ($\underline{Z}_L^1 = \underline{Z}_L^2 = \underline{Z}_L$), ist die Nullimpedanz einer Drehstromleitung wie folgt bestimmt:

$$\underline{Z}_L^0 = (1 + 3 \cdot \underline{k}_0) \cdot \underline{Z}_L^1 \tag{3.27}$$

3.2.2. Impedanz im Sternpunkt

In analoger Weise lässt sich für die Berechnung ihrer Nullimpedanz zeigen:

$$\underline{Z}^0_{SPE} = 3 \cdot \underline{Z}_{SPE} \tag{3.28}$$

3.3. Fehlerentfernung

3.3.1. Konventionelle Berechnung

Bestimmungsgemäß müssen Distanzschutzgeräte im Fehlerfalle die Fehlerentfernung berechnen und üblicherweise geben sie diese als sogenannten „XPrim-Wert“ aus. Gemeint ist damit der Imaginärteil der eingemessenen Fehlerimpedanz als Primärwert:

$$X_{Prim} = X_{Fehl} = Im(\underline{Z}^1_{Fehl}) \tag{3.29}$$

Die konventionelle Berechnung der Fehlerentfernung erfolgt unter der Annahme, dass der Fehlerwiderstand R_F vernachlässigt wird ($R_F = 0$). Werden die Gleichungen (3.8) bis (3.10) addiert, erhält man:

$$\underline{U}^1_R + \underline{U}^2_R + \underline{U}^0_R = \underline{I}^1_R \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} + \underline{I}^2_R \cdot \underline{Z}^2_{Fehl} + \underline{I}^0_R \cdot \underline{Z}^0_{Fehl} + \underline{U}^1_F + \underline{U}^2_F + \underline{U}^2_F \tag{3.30}$$

Beachtet man, dass für $R_F = 0$

$$\underline{U}^1_F + \underline{U}^2_F + \underline{U}^0_F = 0 \tag{3.31}$$

ist, und wird $\underline{Z}^0_{Fehl}$ durch den Erdfaktor $\underline{k}_0$ ausgedrückt (3.27), dann lautet diese Summe

$$\underline{U}^1_R + \underline{U}^2_R + \underline{U}^0_R = \underline{I}^1_R \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} + \underline{I}^2_R \cdot \underline{Z}^2_{Fehl} + \underline{I}^0_R \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} \cdot (1 + 3 \cdot \underline{k}_0) \tag{3.32}$$

Unter der Bedachtnahme, dass für Leitungen $\underline{Z}^1 = \underline{Z}^2$ gilt, wird

$$\underline{U}^1_R + \underline{U}^2_R + \underline{U}^0_R = (\underline{I}^1_R + \underline{I}^2_R + \underline{I}^0_R) \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} + 3 \cdot \underline{k}_0 \cdot \underline{I}^0_R \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} \tag{3.33}$$

Rücktransformation in das Originalsystem mittels (3.12) und (3.13) ergibt

$$\underline{U}_{1E,R} = (\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}) \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} \tag{3.34}$$

Daraus erhält man die gesuchte Fehlerreaktanz als Imaginärteil der Fehlerimpedanz:

$$X_{Fehl} = \mathrm{Im}(\underline{Z}^1_{Fehl}) = \mathrm{Im}\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}}\right) \tag{3.35}$$

Es ist daher möglich, aus den am Anfang der fehlerbehafteten Leitung (zugleich der Einbauort R des Schutzgerätes) gemessenen Werten

- Leiter-Erde-Spannung der fehlerbehafteten Phase $\underline{U}_{1E,R}$,
- Leiterstrom der fehlerbehafteten Phase $\underline{I}_{1,R}$ und
- Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R}$

sowie aus der Kenntnis des Erdfaktors $\underline{k}_0$ die Fehlerentfernung zu berechnen.

3.3.2. Anwendung und Grenzen der konventionellen Fehlerortformel

Distanzschutzgeräte haben standardmäßig die konventionelle Fehlerortformel (3.35) implementiert. Zusammengefasst wird diese Fehlerortbestimmung mit einer Genauigkeit, die für den praktischen Netzbetrieb ausreichend ist, unter folgenden Voraussetzungen genügen:

1. im Vergleich zum Fehlerstrom vernachlässigbare kapazitive Ströme,
2. kleiner Fehlerwiderstand ($R_F \approx 0$) und
3. geringer Oberschwingungsanteil.

Voraussetzung 1. trifft am ehesten in Netzen mit hinreichend niederohmiger Sternpunkterdung (NOSPE) oder in Netzen mit starrer Sternpunkterdung ($\underline{Z}_{SPE} \approx 0$) zu. In diesen Fällen wird das vereinfachte Komponenten-Ersatzschaltbild (Abbildung 3.3) die realen Verhältnisse geeignet abbilden. Nur unter diesen Voraussetzungen ist jeder Fehler an einer beliebigen Stelle im Leitungsverlauf als Leitungsende-Fehler darstellbar.

In induktiv geerdeten Netzen (RESPE) trifft die o.a. Voraussetzung 1. nicht mehr zu, so dass die Bestimmung der Fehlerentfernung mit dem Komponenten-Ersatzbild gemäß Abbildung 3.2 erfolgen muss.

4. Methodik

Abschnitt 5:

Berechnung der Fehlergrößen eines einpoligen Fehlers

- unter Berücksichtigung der Kapazitäten des fehlerbehafteten Abzweiges und des Restnetzes,
- für beliebige Art der Sternpunkterdung (NOSPE, RESPE, KNOSPE),
- für beliebigen Fehlerwiderstand

jeweils

- für den Leitungsende-Fehler und
- für den Fehler im Leitungsverlauf

↓

Abschnitt 6:

Ermittlung der Fehlerentfernung aus den zuvor berechneten Fehlergrößen durch Entwicklung der Fehlerortformel

- für den Leitungsende-Fehler und
- für den Fehler im Leitungsverlauf

↓

Abschnitt 7:

Erzeugung und Verifizierung verlässlicher Fehlergrößen

- auf analytischem Weg (Berechnungen des Abschnittes 5 und Verwendung eines Rechentools, z.B. MATLAB,
- mittels Netzberechnungsprogramm, z.B. NEPLAN und INTEGRAL,
- durch Labormessungen an einem Modellnetz

↓

Abschnitt 8:

Numerische Überprüfung und Vergleich der Fehlerortformeln

- konventionell,
- gemäß [Ach08],
- für den Leitungsende-Fehler,
- für den Fehler im Leitungsverlauf

einer realtypischen Verteilernetzstruktur, jeweils

- für verschiedene Arten der Sternpunkterdung (NOSPE, RESPE, KNOSPE)

↓

Abschnitt 9:

Praktische Anwendung in einem Feldversuch:

- Umsetzung in einem Verteilernetz unter realitätsnahen Verhältnissen sowie Implementierung des Verfahrens in handelsübliche Distanzschutzgeräte,
- Auswertung der erhaltenen Fehlergrößen und Vergleich mit dem tasächlichen Fehlerort

↓

Abschnitt 10:

Zusammenfassung und Ausblick

5. Erdschlussberechnung mit nicht vernachlässigbaren Queradmittanzen

Wie in Abschnitt 3.1 bereits gezeigt, bedarf es zur exakten Bestimmung der Fehlerentfernung in einem Strahlennetz mit beliebiger Art der Sternpunkterdung der exakten Modellierung des erdschlussbehafteten Netzes, denn nur auf diese Weise ist es möglich, sämtliche Ströme und Spannungen zu erfassen, die für die Berechnung der Fehlergrößen maßgeblich sind. Es ist daher erforderlich, für sämtliche Ströme und Spannungen in den Komponentensystemen aus Abbildung 3.2 das bestimmende Gleichungssystem aufzustellen. Die Modellbildung soll insoweit universell erfolgen, als dass die Berechnung der Fehlergrößen

- für jede Art der Sternpunkterdung (insbesondere für RESPE, NOSPE und KNOSPE) sowie
- für beliebigen Fehlerwiderstand $R_F \geq 0$

gültig ist.

5.1. Berechnung des Leitungsende-Fehlers

Zunächst werden die Fehlergrößen anhand des Leitungsende-Fehlers gezeigt:

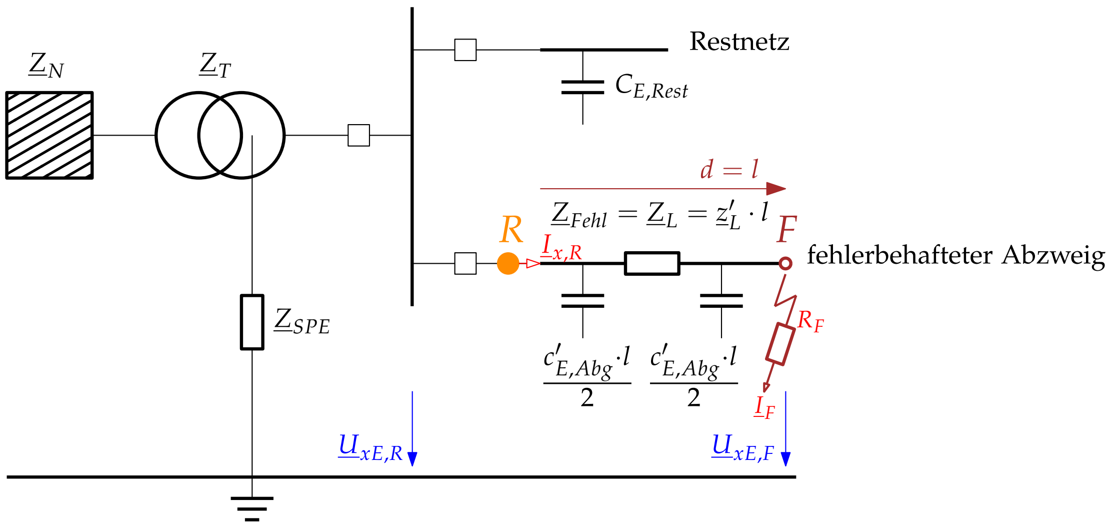


Abbildung 5.1.: Leitungsende-Fehler in einem einfachen Strahlennetz im Originalsystem
Legende wie in Abbildung 3.1

In dem zugehörigen Komponenten-Ersatzschaltbild werden die Queradmittanzen nicht mehr vernachlässigt:

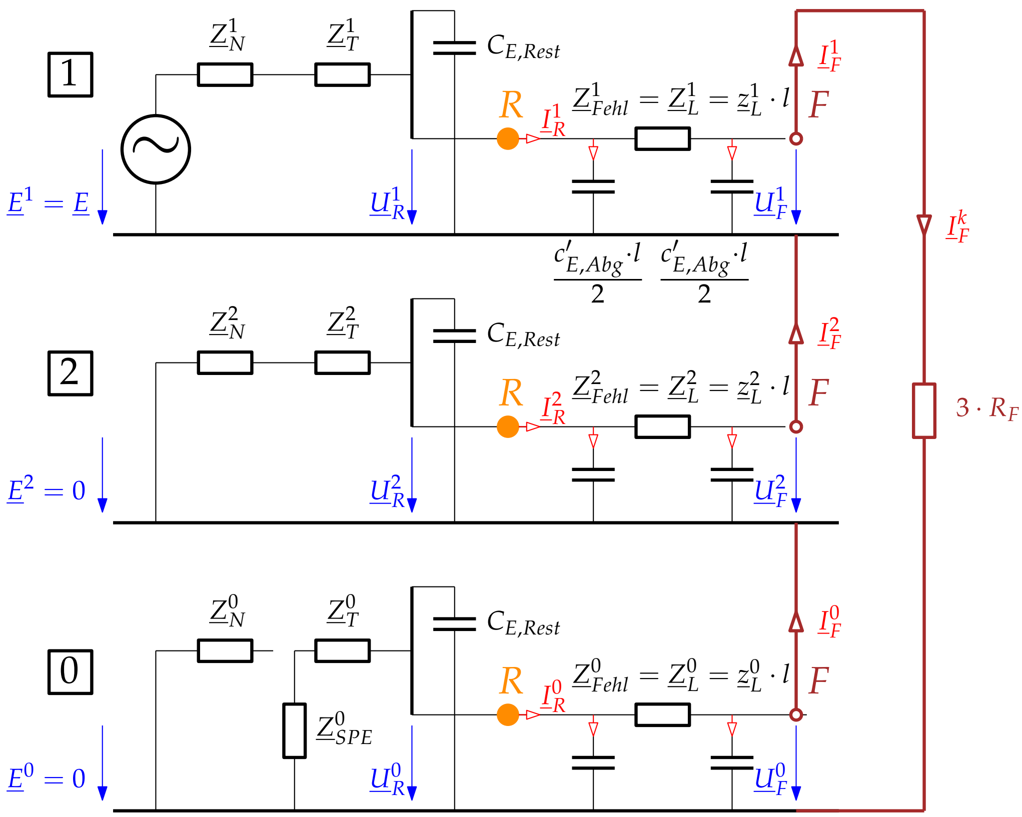


Abbildung 5.2.: Komponenten-Ersatzschaltbild eines Leitungsende-Fehlers in einem einfachen Strahlennetz
Legende wie in Abbildung 3.2

Zur Berechnung der Fehlergrößen ist es erforderlich, in den Komponentensystemen weitere Teilströme und -spannungen zu definieren:

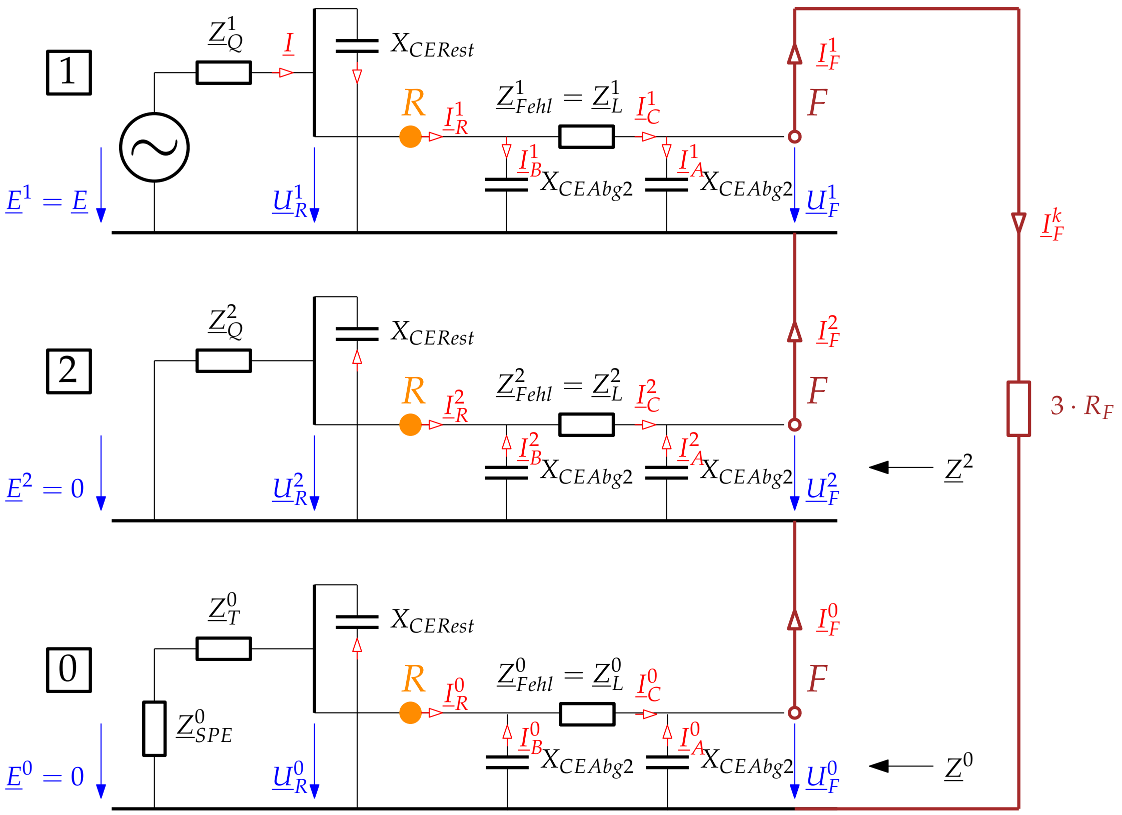


Abbildung 5.3.: Komponenten-Ersatzschaltbild mit vollständigen Fehlergrößen

$\underline{Z}^1_Q = \underline{Z}^1_N + \underline{Z}^1_T = \underline{Z}^2_Q$ ... Mit- und Gegenimpedanz der speisenden Quelle
$X_{CERest} = \frac{1}{\omega \cdot C_{E,Rest}}$ ... Reaktanz der Kapazität des Restnetzes
$X_{CEAbg} = \frac{1}{\omega \cdot C_{E,Abg}}$ ... Reaktanz der Kapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
$X_{CEAbg2} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{E,Abg} \cdot \frac{1}{2}} = 2 \cdot X_{CEAbg}$ ... Reaktanz der Kapazität des halben fehlerbehafteten Abzweiges
$\underline{Z}^2$ ... gesamte Gegenimpedanz, von der Fehlerstelle aus gesehen
$\underline{Z}^0$ ... gesamte Nullimpedanz, von der Fehlerstelle aus gesehen
restliche Bezeichnungen wie in Legende zu Abbildung 3.1 und 3.2

Somit können nun die Fehlergrößen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F und am Einbauort des Schutzgerätes R berechnet werden:

$$\underline{U}_R^1 = \underline{E} - \underline{I} \cdot \underline{Z}_Q^1 \tag{5.1}$$

$$\underline{I}_R^1 = \underline{I} - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CERest}} \tag{5.2}$$

$$\underline{I}_L^1 = \underline{I}_R^1 - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CEAbg2}} \tag{5.3}$$

$$\underline{U}_F^1 = \underline{U}_R^1 - \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}_L^1 \tag{5.4}$$

$$\underline{I}_F^k = \underline{I}_L^1 - \left(\frac{-\underline{U}_F^1}{-jX_{CEAbg2}} \right) \tag{5.5}$$

$$\underline{U}_F^2 = -\underline{I}_F^k \cdot \underline{Z}^2 \tag{5.6}$$

$$\underline{I}_L^2 = \underline{I}_F^k - \left(\frac{-\underline{U}_F^2}{-jX_{CEAbg2}} \right) \tag{5.7}$$

$$\underline{U}_R^2 = \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}_L^2 + \underline{U}_F^2 \tag{5.8}$$

$$\underline{I}_R^2 = \underline{I}_L^2 - \left(\frac{-\underline{U}_R^2}{-jX_{CEAbg2}} \right) \tag{5.9}$$

$$\underline{U}_F^0 = -\underline{I}_F^k \cdot \underline{Z}^0 \tag{5.10}$$

$$\underline{I}_L^0 = \underline{I}_F^k - \left(\frac{-\underline{U}_F^0}{-jX_{CEAbg2}} \right) \tag{5.11}$$

$$\underline{U}_R^0 = \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}_L^0 + \underline{U}_F^0 \tag{5.12}$$

$$\underline{I}_R^0 = \underline{I}_L^0 - \left(\frac{-\underline{U}_R^0}{-jX_{CEAbg2}} \right) \tag{5.13}$$

Die numerische Lösung dieses Gleichungssystems ist in Anhang A.1 dargestellt.

Aus diesen Gleichungen erhält man mithilfe der Entsymmetrierungsmatrix (3.11) die Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und die Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$ am Einbauort des Schutzgerätes R im Originalsystem ($x = 1, 2, 3$ und $k = 0, 1, 2$):

$$\underline{\boldsymbol{I}}_{x,R} = \underline{\boldsymbol{T}} \cdot \underline{\boldsymbol{I}}_R^k \tag{5.14}$$

$$\underline{\boldsymbol{U}}_{xE,R} = \underline{\boldsymbol{T}} \cdot \underline{\boldsymbol{U}}_R^k \tag{5.15}$$

5.2. Berechnung des Fehlers im Leitungsverlauf

In der Realität sind insbesondere im Kabelnetz die Betriebs- und Erdkapazität des Leitungsabschnittes nach der Fehlerstelle F nicht mehr vernachlässigbar. Die vollständigen Schaltbilder mit allen beteiligten Elementen sind in Abschnitt 3.1 dargestellt, und zwar

- für das Originalsystem in Abbildung 3.1 und

- für das Komponenten-Ersatzschaltbild in Abbildung 3.2.

Somit müssen für die Berechnung der Fehlergrößen die Elemente des restlichen Leitung im Komponenten-Ersatzschaltbild hinzugefügt werden, siehe Abbildung 3.2. Bei der *homogenen* Leitungen können die Kapazitäten an der Fehlerstelle F vereinfachend zusammengefasst werden; somit hat das Komponenten-Ersatzschaltbild für den Fehler im Leitungsverlauf das folgende Aussehen:

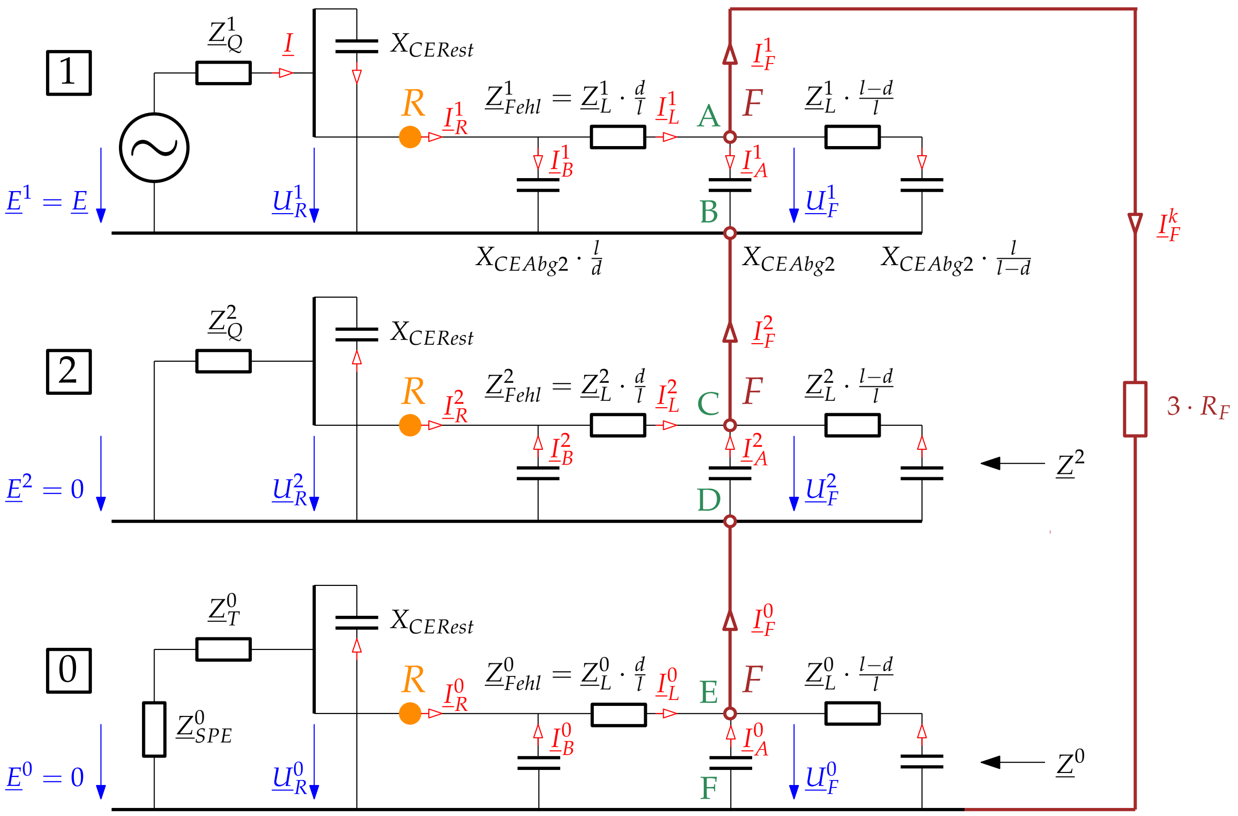


Abbildung 5.4.: Komponenten-Ersatzschaltbild des Fehlers im Leitungsverlauf

$\underline{Z}^1_{Fehl} = \underline{z}^1_L \cdot d = \underline{z}^1_L \cdot \frac{l}{l} \cdot d = \underline{Z}^1_L \cdot \frac{d}{l}$ ... Fehlerentfernung
$\underline{z}^1_L \cdot (l-d) = \underline{z}^1_L \cdot \frac{l}{l} \cdot (l-d) = \underline{Z}^1_L \cdot \frac{(l-d)}{l}$ ... Impedanz der restlichen Leitung
restliche Bezeichnungen wie in Legende zu Abbildung 3.1, 3.2 und 5.3

Die Reaktanzen der Teilkapazitäten berechnen sich zu:

- am Anfang der Leitung:

$$\frac{1}{\omega \cdot \frac{c'_{E,Abg}}{2} \cdot d} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{c'_{E,Abg} \cdot l}{2} \cdot \frac{d}{l}} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2} \cdot \frac{d}{l}} = X_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d} \tag{5.16}$$

- in der Mitte der Leitung:

Kapazität:

$$\frac{c'_{E,Abg} \cdot d}{2} + \frac{c'_{E,Abg} \cdot (l-d)}{2} = \frac{c'_{E,Abg} \cdot l}{2} = \frac{C_{E,Abg}}{2} \tag{5.17}$$

Reaktanz:

$$\frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{E,Abg} \cdot \frac{1}{2}} = X_{CEAbg2} = 2 \cdot X_{CEAbg} \tag{5.18}$$

- am Ende der Leitung:

$$\frac{1}{\omega \cdot \frac{c'_{E,Abg}}{2} \cdot (l-d)} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{c'_{E,Abg} \cdot l}{2} \cdot \frac{l-d}{l}} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2} \cdot \frac{l-d}{l}} = X_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{l-d} \tag{5.19}$$

Um für das Gleichungssystem besser überschaubare Ausdrücke zu erhalten, werden die Impedanzen der Leitung an der Fehlerstelle F weiter zusammen gefasst:

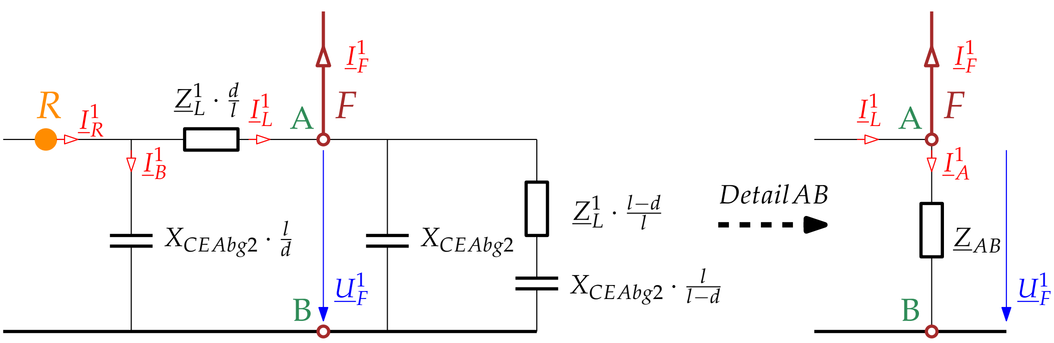


Abbildung 5.5.: Leitungsende-Fehler in einem einfachen Strahlennetz im Originalsystem
Die Zusammenfassung zur Impedanz $\underline{Z}_{AB}$ gilt in dieser Abbildung für das Mitsystem. Für das Gegen- und Nullsystem erfolgt die Zusammenfassung zu $\underline{Z}_{CD}$ und $\underline{Z}_{EF}$ analog.

Somit können nun die Fehlergrößen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F und am Einbauort des Schutzgerätes R berechnet werden:

$$\underline{U}_R^1 = \underline{E} - \underline{I} \cdot \underline{Z}_Q^1 \tag{5.20}$$

$$\underline{I}_R^1 = \underline{I} - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CERest}} \tag{5.21}$$

$$\underline{I}_L^1 = \underline{I}_R^1 - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CEAbg} \cdot \frac{l}{d}} \tag{5.22}$$

$$\underline{U}_F^1 = \underline{U}_R^1 - \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}_L^1 \cdot \frac{d}{l} \tag{5.23}$$

$$\underline{I}_F^k = \underline{I}_L^1 - \left(\frac{-\underline{U}_F^1}{\underline{Z}_{AB}}\right) \tag{5.24}$$

$$\underline{U}_F^2 = -\underline{I}_F^k \cdot \underline{Z}^2 \tag{5.25}$$

$$\underline{I}_L^2 = \underline{I}_F^k - \left(\frac{-\underline{U}_F^2}{\underline{Z}_{CD}}\right) \tag{5.26}$$

$$\underline{U}_R^2 = \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}_L^2 \cdot \frac{d}{l} + \underline{U}_F^2 \tag{5.27}$$

$$\underline{I}_R^2 = \underline{I}_L^2 - \left(\frac{-\underline{U}_R^2}{-jX_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}}\right) \tag{5.28}$$

$$\underline{U}_F^0 = -\underline{I}_F^k \cdot \underline{Z}^0 \tag{5.29}$$

$$\underline{I}_L^0 = \underline{I}_F^k - \left(\frac{-\underline{U}_F^0}{\underline{Z}_{EF}}\right) \tag{5.30}$$

$$\underline{U}_R^0 = \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}_L^0 \cdot \frac{d}{l} + \underline{U}_F^0 \tag{5.31}$$

$$\underline{I}_R^0 = \underline{I}_L^0 - \left(\frac{-\underline{U}_R^0}{-jX_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}}\right) \tag{5.32}$$

Die numerische Lösung dieses Gleichungssystems ist in Anhang A.2 dargestellt.

Aus diesen Gleichungen erhält man wieder mithilfe der Entsymmetrierungsmatrix (3.11) die Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und die Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$ am Einbauort des Schutzgerätes R im Originalsystem ($x = 1, 2, 3$ und $k = 0, 1, 2$).

6. Ermittlung der Fehlerentfernung durch Entwicklung der Fehlerortformel

Die Bestimmung der Fehlerentfernung erfolgt - wie bereits in Abschnitt 3.3 gezeigt - durch Ermittlung der Fehlerimpedanz vom Einbauort des Schutzgerätes R bis zur Fehlerstelle F. Die allgemein bekannte Fehlerortformel 3.35, die in Abschnitt 3.3.1 ermittelt wurde, berücksichtigt allerdings weder die Queradmittanzen des Netzes noch einen real existierenden Fehlerwiderstand $R_F > 0$.

6.1. Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler

In diesem Abschnitt wird die Fehlerentfernung für den Leitungsende-Fehler ermittelt. Grundlage hierfür sind die in Abschnitt 5.1 ermittelten Fehlergrößen (Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$) am Einbauort der Schutzgerätes R (Index „R" und $x = 1, 2, 3$).

6.1.1. Allgemein

Grundlage ist der Zusammenhang zwischen den Leiter-Erde-Spannungen am Einbauort des Schutzgerätes R und der Fehlerstelle F, wie in Abbildung 5.3 dargestellt:

$$\underline{U}_R^1 = \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + \underline{U}_F^1 \tag{6.1}$$

$$\underline{U}_R^2 = \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}_{Fehl}^2 + \underline{U}_F^2 \tag{6.2}$$

$$\underline{U}_R^0 = \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}_{Fehl}^0 + \underline{U}_F^0 \tag{6.3}$$

Die Komponentenströme $\underline{I}_L^k$ durch die Fehlerimpedanzen $\underline{Z}_{Fehl}^k$ müssen nun durch die Komponentenströme $\underline{I}_R^k$ ($k = 0, 1, 2$) am Einbauort des Schutzgerätes R ausgedrückt werden:

$$\underline{I}_L^1 = \underline{I}_R^1 - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CEAbg2}} = \underline{I}_R^1 - j \cdot \frac{\underline{U}_R^1}{\frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2}}} = \underline{I}_R^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_R^1 \tag{6.4}$$

$$\underline{I}_L^2 = \underline{I}_R^2 + \frac{-\underline{U}_R^2}{-jX_{CEAbg2}} = \underline{I}_R^2 - j \cdot \frac{\underline{U}_R^2}{\frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2}}} = \underline{I}_R^2 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_R^2 \tag{6.5}$$

$$\underline{I}_L^0 = \underline{I}_R^0 + \frac{-\underline{U}_R^0}{-jX_{CEAbg2}} = \underline{I}_R^0 - j \cdot \frac{\underline{U}_R^0}{\frac{1}{\omega \cdot \frac{C_{E,Abg}}{2}}} = \underline{I}_R^0 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_R^0 \tag{6.6}$$

Werden die Gleichungen (6.1) bis (6.3) addiert, erhält man mit den Gleichungen (6.4) bis (6.6):

$$\underline{U}_R^1 + \underline{U}_R^2 + \underline{U}_R^0 = \\ = \left(\underline{I}_R^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^1\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + \left(\underline{I}_R^2 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^2\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^2 + \left(\underline{I}_R^0 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^0\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^0 + \\ + \underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2 + \underline{U}_F^2 \tag{6.7}$$

Weiters ist

$$\underline{U}_R^1 + \underline{U}_R^2 + \underline{U}_R^0 = \underline{U}_{1E,R} \tag{6.8}$$

$$\underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2 + \underline{U}_F^0 = 3 \cdot \underline{I}_F^k \cdot R_F\,, \tag{6.9}$$

so dass

$$\underline{U}_{1E,R} = \\ = \left(\underline{I}_R^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^1\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + \left(\underline{I}_R^2 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^2\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^2 + \left(\underline{I}_R^0 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^0\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^0 + \\ + 3 \cdot \underline{I}_F^k \cdot R_F \tag{6.10}$$

Unter der Bedachtnahme, dass für Leitungen $\underline{Z}^1 = \underline{Z}^2$ gilt, und wird $\underline{Z}_{Fehl}^0$ durch den Erdfaktor $\underline{k}_0$ ausgedrückt (3.27), dann lautet diese Summe

$$\underline{U}_{1E,R} = \\ = \left(\underline{I}_R^1 + \underline{I}_R^2 + \underline{I}_R^0\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \left(\underline{U}_R^1 + \underline{U}_R^2 + \underline{U}_R^0\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + \\ + 3 \cdot \left(\underline{I}_R^0 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2}\underline{U}_R^0\right) \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 \cdot \underline{k}_0 + 3 \cdot \underline{I}_F^k \cdot R_F \tag{6.11}$$

Rücktransformation in das Originalsystem mittels (3.12) und (3.13) ergibt

$$\underline{U}_{1E,R} = \\ = \underline{I}_{1,R} \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_{1E,R} \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + 3\underline{I}_R^0 \cdot \underline{k}_0 \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot 3\underline{U}_R^0 \cdot \underline{k}_0 \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 + 3 \cdot \underline{I}_F^k \cdot R_F \tag{6.12}$$

oder

$$\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}_F^k \cdot R_F = \left[\left(\underline{I}_{1,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_{1E,R}\right) + \left(\underline{I}_{\Sigma,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot 3\underline{U}_{NE,R}\right) \cdot \underline{k}_0\right] \cdot \underline{Z}_{Fehl}^1 \tag{6.13}$$

Daraus erhält man die gesuchte Fehlerreaktanz als Imaginärteil der Fehlerimpedanz:

$$\boxed{\underline{Z}^1_{Fehl} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}^k_F \cdot R_F}{\left(\underline{I}_{1,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_{1E,R}\right) + \left(\underline{I}_{\Sigma,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot 3\underline{U}_{NE,R}\right) \cdot \underline{k}_0}} \tag{6.14}$$

und

$$X_{Fehl} = \mathrm{Im}(\underline{Z}^1_{Fehl}) = \mathrm{Im}(\underline{Z}^1_L) \tag{6.15}$$

Verglichen mit der konventionellen Fehlerformel (3.35) muss (6.14) mehr Parameter enthalten, die man wie folgt erhält:

1. Am Anfang der fehlerbehafteten Leitung, dem Einbauort des Schutzgerätes R, sind messbar (vergleiche Abbildung 5.3):
   - Leiter-Erde-Spannung der fehlerbehafteten Phase $\underline{U}_{1E,R}$,
   - Sternpunkt-Erde-Spannung des Netzes $\underline{U}_{NE,R}$,
   - Leiterstrom der fehlerbehafteten Phase $\underline{I}_{1,R}$ und
   - Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R}$.
   - Der Fehlerstrom an der Fehlerstelle $\underline{I}^k_F$ ist am Anfang der fehlerbehafteten Leitung naturgemäß nicht direkt messbar. Wie später in Abschnitt 7 numerisch gezeigt werden wird, entspricht der Gegenstrom $\underline{I}^2_R$, welcher jedoch durch das am Leitungsanfang eingebaut Schutzgerät R direkt messbar ist, dem Fehlerstrom an der Fehlerstelle $\underline{I}^k_F$ mit technisch hinreichender Genauigkeit:

   $$\underline{I}^k_F \approx \underline{I}^2_R \tag{6.16}$$

   Diese gute Näherung ist damit erklärbar, dass die Störströme $\underline{I}^2_A$ und $\underline{I}^2_B$, die den Unterschied $\underline{I}^k_F \neq \underline{I}^2_R$ verursachen, aufgrund der wegen $\underline{E}^2 = 0$ kleinen Spannungen $\underline{U}^2_R$ und $\underline{U}^2_F$ im Gegensystem gegenüber dem Fehlerstrom $\underline{I}^k_F \approx \underline{I}^2_R$ vernachlässigbar klein sind.
2. Folgende Werte können aus den Netzdaten bestimmt werden:
   - Erdfaktor $\underline{k}_0$ und
   - Kapazität des fehlerbehafteten Abzweiges $C_{E,Abg}$
3. Lediglich der Fehlerwiderstand R_F entzieht sich einer direkten Bestimmung - sowohl messtechnisch am Anfang der Leitung als auch aus den Netzdaten. In der Arbeit von Achleitner wird eine Näherungsformel (7.5) angegeben [Ach08, S. 45], die sich nachgewiesenermaßen auch praktisch bewährt und die in weiterer Folge auch im Rahmen dieser Arbeit für die Bestimmung des Fehlerwiderstandes herangezogen wird:

$$R_F = \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right) \tag{6.17}$$

Somit ist es möglich, aus den am Anfang der fehlerbehafteten Leitung (zugleich der Einbauort R des Schutzgerätes) gemessenen Werten die Fehlerentfernung zu berechnen.

6.1.2. Modifizierte Fehlerortformel nach [Ach08]

In der Dissertation [Ach08] wird eine modifizierte Fehlerortformel angegeben [Ach08, S. 36]:

$$\underline{Z}^1_{Line} = \frac{\underline{U}_{L1} - \underline{I}_F \cdot \underline{Z}_F - \underline{I}_{TR} \cdot \underline{Z}_E}{\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{\Sigma} \cdot \underline{k}_0} = \underline{z}^{1'}_{Line} \cdot l \,, \tag{6.18}$$

$\underline{Z}^1_{Line}$	Mitimpedanz der Leitung
$\underline{z}^{1'}_{Line}$	bezogene Mitimpedanz der Leitung
$\underline{U}_{L1}$	gemessene Leiter-Erde-Spannung der Phase L1
$\underline{I}_{L1}$	gemessener Leiterstrom in Phase L1
$\underline{I}_{\Sigma}$	gemessener Summenstrom
$\underline{I}_F$	Fehlerstrom
$\underline{I}_{TR}$	Sternpunktstrom des Transformators
$\underline{k}_0$	Erdfaktor
$\underline{Z}_F$	Fehlerimpedanz
$\underline{Z}_E$	Erdungsimpedanz im Umspannwerk
l	Fehlerentfernung

Als Fehlerstrom $\underline{I}_F$ wird der um den kapazitiven Erdschlussstrom korrigierte gemessene Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma}$ verwendet [Ach08, S. 47]:

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{\Sigma} + \underline{I}_{cap1} \cdot \left| \frac{U^0_{meas}}{U_{L1Enominal}} \right| , \tag{6.19}$$

$\underline{I}_{cap1}$	kapazitiver Strom des fehlerbehafteten Abzweiges
$U_{L1Enominal}$	Nennwert der Leiter-Erde-Spannung
U^0_{meas}	gemessene Sternpunkt-Erde-Spannung

Ist nun $\underline{I}_{cap1}$ der beim Nennwert der Leiter-Erde-Spannung $U_{L1Enominal}$ gegebene kapazitive Strom des fehlerbehafteten Abzweiges, so stellt der Quotient $\frac{\underline{I}_{cap1}}{U_{L1Enominal}}$ die komplexe Admittanz $\underline{Y}_{cap1} = \underline{Y}_{CE,Abg}$ des fehlerbehafteten Abzweiges dar, die mit der gemessenen Sternpunkt-Erde-Spannung U^0_{meas} multipliziert werden muss, um den tatsächlich auftretenden kapazitiven Strom des fehlerbehafteten Abzweiges zu erhalten. Um auf diese Weise den Fehlerstrom $\underline{I}_F$ an der Messstelle = dem Einbauort der Schutzgerätes zu erhalten, muss mithin die Kapazität oder der kapazitive Strom des fehlerbehafteten Abzweiges bekannt sein. Dieser wird sich mit jeder Änderung des Schaltzustandes des Netzes ändern, was die praktische Brauchbarkeit dieser Art der Berechnung des Fehlerstromes stark einschränkt.

Damit und unter Verwendung der Näherungsformel für den Fehlerwiderstand ([Ach08, S. 45] Gleichung (7.5) oder Gleichung (6.17)) lautet nun die Bestimmungsgleichung für die Fehlerentfernung:

$$\underline{Z}^1_{Line} = \frac{\underline{U}_{L1} - \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right) \cdot \left(\underline{I}_{\Sigma} + \underline{I}_{cap1} \cdot \frac{U^0_{meas}}{U_{L1Enominal}}\right) - \underline{I}_{TR} \cdot \underline{Z}_E}{\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{\Sigma} \cdot \underline{k}_0} = \underline{z}^{1'}_{Line} \cdot l \,, \tag{6.20}$$

Wie weiter oben angenommen wurde (Gleichung 6.16) und wie später noch gezeigt werden wird (Abschnitt 7), entspricht der Fehlerstrom an der Fehlerstelle mit technisch hinreichender Genauigkeit dem dreifachen Gegenstrom am Einbauort des Schutzgerätes:

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}_F^k \approx 3 \cdot \underline{I}_R^2 \tag{6.21}$$

Unter der Bedachtnahme,

- dass die Erdungsimpedanz im Umspannwerk $\underline{Z}_E$ klein ist und dadurch das Produkt $\underline{I}_{TR} \cdot \underline{Z}_E$ vernachlässigt werden kann und
- für den Fehlerstrom an der Fehlerstelle der dreifache Gegenstrom $3 \cdot \underline{I}_R^2$ am Einbauort des Schutzgerätes R eingesetzt wird,

lautet die modifizierte Fehlerortformel nach Achleitner

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Ach} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - \underline{I}_F \cdot R_F}{\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)}{\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}} \tag{6.22}$$

6.2. Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf

In diesem Abschnitt wird die Fehlerentfernung für den Fehler im Leitungsverlauf ermittelt. Grundlage hierfür sind die in Abschnitt 5.2 ermittelten Fehlergrößen (Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$) am Einbauort der Schutzgerätes R (Index „R“ und $x = 1, 2, 3$).

Grundlage ist wiederum der Zusammenhang zwischen den Leiter-Erde-Spannungen am Einbauort des Schutzgerätes R und der Fehlerstelle F, wie in Abbildung 5.4 dargestellt:

$$\underline{U}_R^1 = \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}^1_{Fehl} + \underline{U}_F^1 = \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}_L^1 \cdot \frac{d}{l} + \underline{U}_F^1 \tag{6.23}$$

$$\underline{U}_R^2 = \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}^2_{Fehl} + \underline{U}_F^2 = \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}_L^2 \cdot \frac{d}{l} + \underline{U}_F^2 \tag{6.24}$$

$$\underline{U}_R^0 = \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}^0_{Fehl} + \underline{U}_F^0 = \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}_L^0 \cdot \frac{d}{l} + \underline{U}_F^0 \tag{6.25}$$

Die Komponentenströme $\underline{I}_L^k$ durch die Fehlerimpedanz $\underline{Z}_L^k \cdot \frac{d}{l}$ müssen nun durch die Komponentenströme $\underline{I}_R^k$ ($k = 0, 1, 2$) am Einbauort des Schutzgerätes R ausgedrückt werden:

$$\underline{I}_L^1 = \underline{I}_R^1 - \frac{\underline{U}_R^1}{-jX_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} = \underline{I}_R^1 - j\frac{\underline{U}_R^1}{X_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} \tag{6.26}$$

$$\underline{I}_L^2 = \underline{I}_R^2 + \frac{-\underline{U}_R^2}{-jX_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} = \underline{I}_R^2 - j\frac{\underline{U}_R^2}{X_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} \tag{6.27}$$

$$\underline{I}_L^0 = \underline{I}_R^0 + \frac{-\underline{U}_R^0}{-jX_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} = \underline{I}_R^0 - j\frac{\underline{U}_R^0}{X_{CEAbg2} \cdot \frac{l}{d}} \tag{6.28}$$

Werden die Gleichungen (6.18) bis (6.20) addiert, erhält man mit den Gleichungen (6.21) bis (6.23) sowie (6.8) und (6.9):

$$\begin{aligned}&\underline{U}_{1E,R} = \\ &= \left(\underline{I}_R^1 - j\frac{\underline{U}_R^1}{X_{CEAbg2}\cdot\frac{l}{d}}\right)\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\frac{d}{l} + \left(\underline{I}_R^2 - j\frac{\underline{U}_R^2}{X_{CEAbg2}\cdot\frac{l}{d}}\right)\cdot\underline{Z}_L^2\cdot\frac{d}{l} + \\ &+ \left(\underline{I}_R^0 - j\frac{\underline{U}_R^0}{X_{CEAbg2}\cdot\frac{l}{d}}\right)\cdot\underline{Z}_L^0\cdot\frac{d}{l} + 3\cdot\underline{I}_F^k\cdot R_F\end{aligned} \tag{6.29}$$

Unter der Bedachtnahme, dass für Leitungen $\underline{Z}^1 = \underline{Z}^2$ gilt, und wird $\underline{Z}_L^0$ durch den Erdfaktor $\underline{k}_0$ ausgedrückt (3.27), dann lautet diese Summe

$$\begin{aligned}&\underline{U}_{1E,R} = \\ &= \left(\underline{I}_R^1 + \underline{I}_R^2 + \underline{I}_R^0\right)\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\frac{d}{l} - j\frac{\underline{U}_R^1 + \underline{U}_R^2 + \underline{U}_R^0}{X_{CEAbg2}}\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\left(\frac{d}{l}\right)^2 + \\ &+ 3\cdot\left(\underline{I}_R^0 - j\frac{\underline{U}_R^0}{X_{CEAbg2}}\cdot\frac{d}{l}\right)\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\underline{k}_0\cdot\frac{d}{l} + 3\cdot\underline{I}_F^k\cdot R_F\end{aligned} \tag{6.30}$$

Rücktransformation in das Originalsystem mittels (3.12) und (3.13) ergibt

$$\begin{aligned}&\underline{U}_{1E,R} = \\ &= \underline{I}_{1,R}\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\frac{d}{l} - j\frac{\underline{U}_{1E,R}}{X_{CEAbg2}}\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\left(\frac{d}{l}\right)^2 + \underline{I}_{\Sigma,R}\cdot\underline{k}_0\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\frac{d}{l} - j\frac{3\underline{U}_{NE,R}}{X_{CEAbg2}}\cdot\underline{k}_0\cdot\underline{Z}_L^1\cdot\left(\frac{d}{l}\right)^2 + \\ &+ 3\cdot\underline{I}_F^k\cdot R_F\end{aligned} \tag{6.31}$$

oder

$$\left(\frac{d}{l}\right)^2 j\cdot\frac{\underline{U}_{1E,R} + 3\underline{U}_{NE,R}\cdot\underline{k}_0}{X_{CEAbg2}} - \left(\frac{d}{l}\right)\cdot\left(\underline{I}_{1,R} + \underline{I}_{\Sigma,R}\cdot\underline{k}_0\right) + \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3\cdot\underline{I}_F^k\cdot R_F}{\underline{Z}_L^1} = 0 \tag{6.32}$$

Üblicherweise wird die auf die Leitungslänge l bezogene Fehlerentfernung d mit

$$\alpha = \frac{d}{l} \tag{6.33}$$

bezeichnet, so dass für die Bestimmung der gesuchten Fehlerimpedanz $\underline{Z}_{Fehl}^1$ eine quadratische Gleichung in $\alpha = \frac{d}{l}$ vorliegt:

$$\boxed{\left(\frac{d}{l}\right)^2\cdot j\frac{\underline{U}_{1E,R} + 3\underline{U}_{NE,R}\cdot\underline{k}_0}{X_{CEAbg2}} - \left(\frac{d}{l}\right)\cdot\left(\underline{I}_{1,R} + \underline{I}_{\Sigma,R}\cdot\underline{k}_0\right) + \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3\cdot\underline{I}_F^k\cdot R_F}{\underline{Z}_L^1} = 0 \quad (6.34)}$$

und daraus

$$\underline{Z}^1_{Fehl} = \alpha \cdot \underline{Z}^1_L = \frac{d}{l} \cdot \underline{Z}^1_L \tag{6.35}$$

beziehungsweise

$$X_{Fehl} = \mathrm{Im}(\underline{Z}^1_{Fehl}) = \mathrm{Im}(\alpha \cdot \underline{Z}^1_L) \tag{6.36}$$

Verglichen mit der konventionellen Fehlerortformel (3.35) und der Fehlerortformel (6.14) muss (6.34) einen weiteren, bekannten Parameter enthalten:

- Aus den Netzdaten ist die Impedanz der fehlerbehafteten Leitung, $\underline{Z}^1_L$, bekannt.

Diese Angabe ergänzt Punkt 2. der erforderlichen Angaben in der Aufzählung unter Abschnitt 6.1.1.

Für den Leitungsende-Fehler – also für $d \to l$, gleichbedeutend mit $\alpha \to 1$ – geht Gleichung (6.34) in Gleichung (6.14) über.

Eine quadratische Gleichung der Form $\underline{a} \cdot \underline{\alpha}^2 + \underline{b} \cdot \underline{\alpha} + \underline{c} = 0$ mit komplexen Koeffizienten $\underline{a}, \underline{b}, \underline{c} \in \mathbb{C}$ hat ganz allgemein zwei Lösungen $\underline{\alpha}_1, \underline{\alpha}_2 \in \mathbb{C}$, die – anders als im Falle reeller Koeffizienten $a, b, c \in \mathbb{R}$ – nicht konjugiert komplex sind. Bei der numerischen Berechnung von Gleichung (6.34) ist daher jene Lösungsvariable $\alpha = \frac{d}{l}$ auszuwählen, die für diese Problemstellung physikalisch zutreffend ist:

1. Im theoretisch-idealen Fall ist $\underline{\alpha}$ reell.
2. Real wird jenes $\underline{\alpha}$ auszuwählen sein, das nach Multiplikation mit der Leitungsimpedanz eine physikalisch sinnvolle Fehlerimpedanz $\underline{Z}^1_{Fehl} = \underline{\alpha} \cdot \underline{Z}^1_L$ ergibt:
   a) sowohl Real- als auch Imaginärteil von $\underline{Z}^1_{Fehl}$ sind positiv ... $Re(\underline{Z}^1_{Fehl}) > 0 \wedge Im(\underline{Z}^1_{Fehl}) > 0$;
   b) der Betrag der Fehlerimpedanz übersteigt nicht den Betrag der Leitungsimpedanz ... $|\underline{Z}^1_{Fehl}| < |\underline{Z}^1_L|$.

7. Numerische Überprüfung der Fehlergrößen

Für die praktische Anwendung der in Abschnitt 6 ermittelten Fehlerortformel ist es erforderlich, die Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung, dem Einbauort des Schutzgerätes R, für ein beliebiges Strahlennetz mit beliebiger Art der Sternpunkterdung (RESPE, NOSPE, KNOSPE) zu kennen. Die Ermittlung kann auf verschiedene Arten erfolgen:

1. auf analytischem Wege durch numerische Lösung des in Abschnitt 5 gezeigten Gleichungssystems (5.20) bis (5.32) mittels eines mathematischen Rechentools, z.B. MATLAB, oder
2. mittels eines Netzberechnungsprogrammes, z.B. NEPLAN oder INTEGRAL, das in einem geeigneten Berechnungsmodus die Berechnung des einpoligen Fehlers mit Lastflussrechnung davor durchführt, oder
3. durch Messungen an einem Modellnetz.

In diesem Abschnitt werden beispielhaft folgende typische Netzkonfigurationen mittels der unter 1. bis 3. genannten Methoden behandelt und die Ergebnisse gegenüber gestellt:

1. Strahlennetz mit realtypischen Elementen, KNOSPE, Leitungsende-Fehler, Variation des Fehlerwiderstandes:
   Berechnung mit
   - analytische Berechnung mittels MATLAB
   - Netzberechnungsprogramm NEPLAN
   - Netzberechnungsprogramm INTEGRAL
2. Strahlennetz analog 1., NOSPE, Fehler im Leitungsverlauf:
   Berechnung mit
   - analytische Berechnung mittels MATLAB
   - Netzberechnungsprogramm NEPLAN
3. Strahlennetz analog 1. in einem Laborversuch, KNOSPE, Leitungsende-Fehler:
   - messtechnische Bestimmung an einem Netzmodell und
   - Gegenüberstellung der Messergebnisse mit der Netzberechnung (NEPLAN)

Der Vergleich der Ergebnisse soll zeigen, dass sowohl mittels der analytischen Rechnung als auch mittels Netzberechnungsprogramm (z.B. NEPLAN oder INTEGRAL) die für die weiteren Berechnungen notwendigen Fehlergrößen richtig bestimmt werden können. Das Ergebnis bildet die Grundlage für die spätere Berechnung der Fehlerreaktanz $X_{Fehl} = Im(\underline{Z}^1_{Fehl})$, siehe Abschnitt 6.

7.1. Strahlennetz mit realtypischen Elementen

7.1.1. Leitungsende-Fehler

Für das in Abbildung 7.1 dargestellte 20-kV-Netz, bestehend aus zwei Abzweigen (dem fehlerbehafteten Abzweig und dem Restnetz), werden die Fehlergrößen am Anfang der Leitung (Leiterströme $\underline{I}_{x,R}$ und Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE,R}$; $x = 1,2,3$) für drei verschiedene Fehlerwiderstände R_F auf den vorstehend beschriebene Wegen ermittelt. Die Werte für R_F wurden mit 0, $90\,\Omega$ und $300\,\Omega$ so gewählt, dass dadurch der „satte", mittel- und hochohmige Fehlerfall repräsentiert wird.

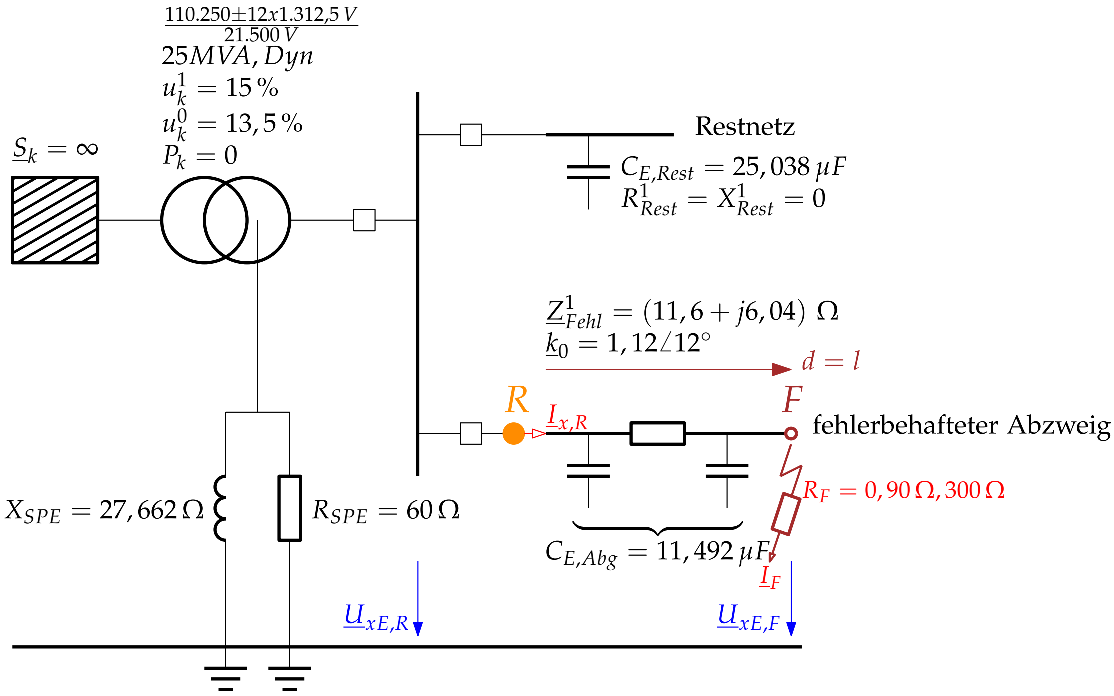


Abbildung 7.1.: 20-kV-Netz für die Berechnung eines Leitungsende-Fehlers L1-E und variierendem Fehlerwiderstand R_F

Charakteristika des Netzes:

- kurzzeitige niederohmige Sternpunkterdung
- kapazitiver Erdschlussstrom des Gesamtnetzes bei einer Leiter-Leiter-Spannung von $21{,}3\,kV$: $423\,A$
- kapazitiver Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abzweiges: $133\,A$
- Die Petersenspule im Sternpunkt ist auf $\approx 5\%$ Überkompensation eingestellt.
- Die Berechnung der Fehlergrößen erfolgt für den eingeschwungenen Zustand in jener Zeitdauer, während der der ohmsche Sternpunktwiderstand R_{SPE} eingeschaltet ist.

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse für jeden der drei Fehlerwiderstände ($R_F = 0$, $90\,\Omega$ und $300\,\Omega$) angeführt.

1. **Fehlerwiderstand** $R_F = 0$
   a) Analytische Rechnung:

   - Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F:
     U1,F = 12272.98 V / -2.90 °
     U2,F = 675.40 V / -149.09 °
     U0,F = 11717.77 V / 175.27 °
     I1,F = 45.48 A / -5.34 °
     I2,F = 45.48 A / -5.34 °
     I0,F = 45.48 A / -5.34 °
     3I0,F = 136.45 A / -5.34 °
   - Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle F:
     U1E,F = 0.00 V / 117.35 °
     U2E,F = 20214.38 V / -151.43 °
     U3E,F = 21366.89 V / 143.97 °
     UNE,F = 11717.77 V / 175.27 °
     IL1,F = 136.45 A / -5.34 °
     IL2,F = 0.00 A / 0.00 °
     IL3,F = 0.00 A / 0.00 °
     Isum,F = 136.45 A / -5.34 °
   - Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten am Relaiseinbauort R:
     U1,R = 12688.20 V / -0.60 °
     U2,R = 131.71 V / -96.56 °
     U0,R = 8930.43 V / 171.66 °
     I1,R = 61.97 A / 41.18 °
     I2,R = 46.45 A / -6.56 °
     I3,R = 58.31 A / -45.05 °
     3I0,R = 174.94 A / -45.05 °
   - Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort R:
     U1E,R = 3972.84 V / 15.06 °
     U2E,R = 17941.48 V / -147.75 °
     U3E,R = 19611.24 V / 140.68 °
     UNE,R = 8930.43 V / 171.66 °
     IL1,R = 134.11 A / -2.47 °
     IL2,R = 68.84 A / -59.70 °
     IL3,R = 73.94 A / -127.60 °
     Isum,R = 174.94 A / -45.05 °

b) NEPLAN:

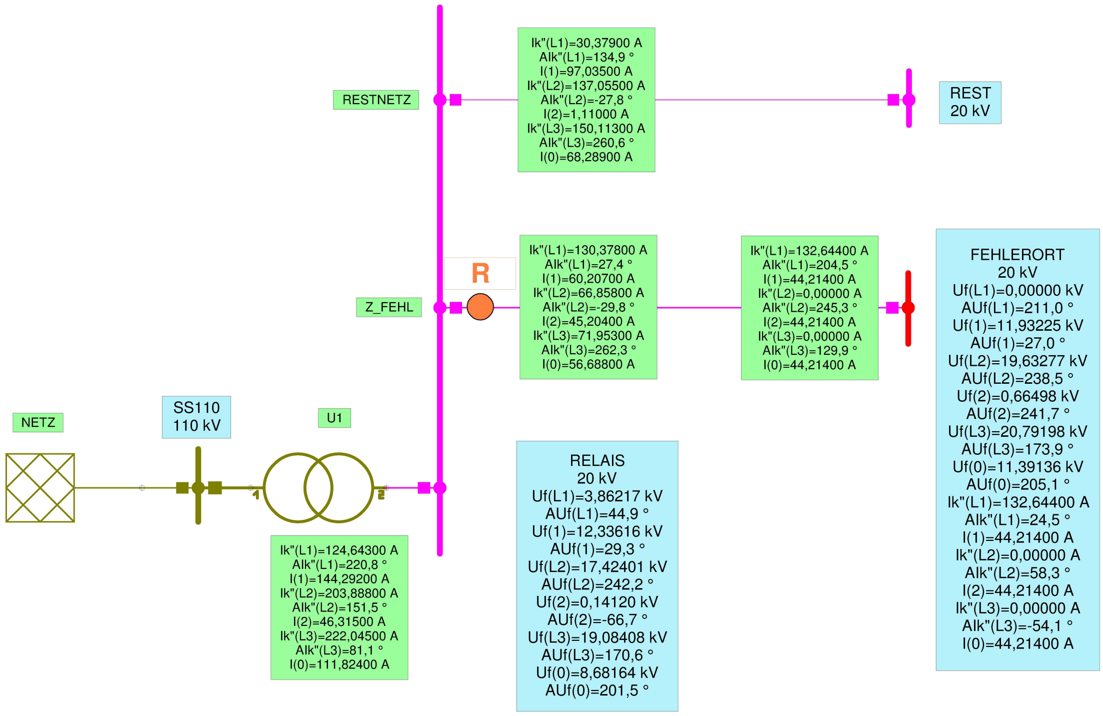


Abbildung 7.2.: Netzberechnung von (7.1) mittels NEPLAN für $R_F = 0$

Legende:

Uf(Lx) und AUf(Lx)	Betrag und Winkel der Leiter-Erde-Spannung $\underline{U}_{xE}$ $(x = 1, 2, 3)$
Ik“(Lx) und AIk“(Lx)	Betrag und Winkel des Leiterstromes $\underline{I}_{Lx}$ $(x = 1, 2, 3)$
Uf(k) und AUf(k)	Betrag und Winkel der Komponentenspannung $\underline{U}^k$ $(k = 0, 1, 2)$
I(k)	Betrag des Komponentenstromes $\underline{I}^k$ $(k = 0, 1, 2)$

Der Winkel des Komponentenstromes $\underline{I}^k$ $(k = 0, 1, 2)$ kann in der hier verwendeten Version NEPLAN 5.2.1 nicht in die Grafik eingeblendet werden und muss daher entweder der Ergebnistabelle entnommen oder händisch aus den Leiterströmen $\underline{I}_{Lx}$ $(x = 1, 2, 3)$ berechnet werden.

c) INTEGRAL:

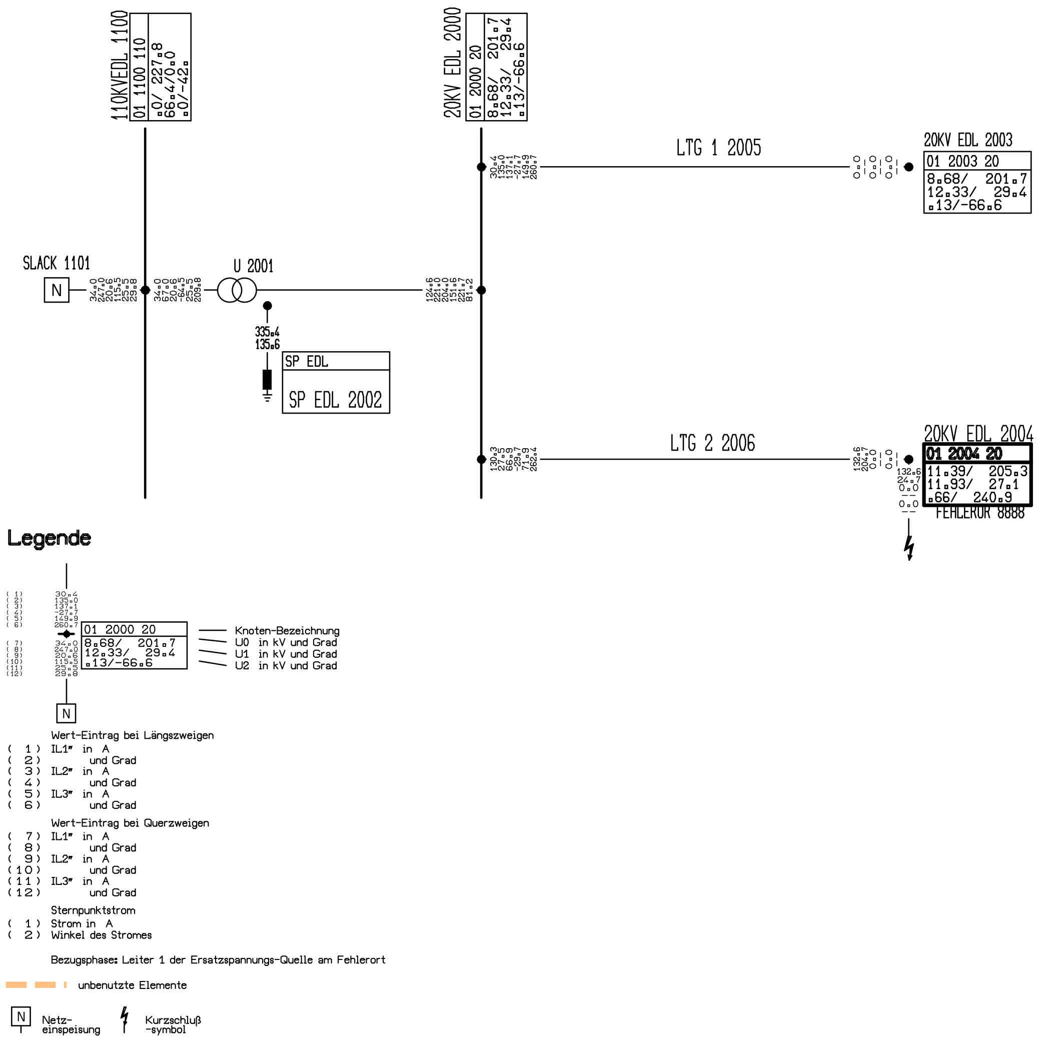


Abbildung 7.3.: Netzberechnung von (7.1) mittels INTEGRAL für $R_F = 0\,\Omega$

d) Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 0$:
Um die Abweichungen in den Ergebnissen der drei Berechnungen vergleichen zu können ist es erforderlich, die erhaltenen Werte auf *eine* Bezugsgröße zu normieren. Willkürlich wurde hierfür der Spannungszeiger $\underline{U}_F^1$ (= Spannung des Mitsystems an der Fehlerstelle F) gewählt. Da es sich um ein lineares System handelt, können alle Fehlergrößen proportional mit dieser Bezugsgröße umgerechnet werden.

	analytische Rechnung				NEPLAN				INTEGRAL			
Bezugsgroesse = U1,F = 21300/√3 V =			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00
Fehlergroessen in S.K. an der Fehlerstelle:												
U1,F	12.272,98	-2,90	12.297,56	0,00	11.932,25	27,00	12.297,56	0,00	11.926,98	27,10	12.297,56	0,00
U2,F	675,40	-149,09	676,75	-146,19	664,98	241,70	685,34	-145,30	656,45	240,91	676,85	-146,19
U0,F	11.717,77	175,27	11.741,24	178,17	11.391,36	205,10	11.740,11	178,10	11.387,39	205,27	11.741,21	178,17
I1,F	45,48	-5,34	45,57	-2,44	44,21	24,50	45,57	-2,50	44,20	204,65	45,57	177,55
I2,F	45,48	-5,34	45,57	-2,44	44,21	24,50	45,57	-2,50	44,20	204,65	45,57	177,55
I0,F	45,48	-5,34	45,57	-2,44	44,21	24,50	45,57	-2,50	44,20	204,65	45,57	177,55
3I0,F	136,45	-5,34	136,72	-2,44								
Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:												
U1E,F	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
U2E,F	20.214,38	-151,43	20.254,87	-148,53	19.632,77	238,50	20.233,84	-148,50	19.644,30	238,57	20.254,66	-148,53
U3E,F	21.366,89	143,97	21.409,68	146,87	20.791,98	173,90	21.428,54	146,90	20.764,66	173,97	21.409,83	146,87
UNE,F	11.717,77	175,27	11.741,24	178,17								
IL1,F	136,45	-5,34	136,72	-2,44	132,64	24,50	136,70	-2,50	132,59	204,65	136,71	177,55
IL2,F	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
IL3,F	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Isum,F	136,45	-5,34	136,72	-2,44								
Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:												
U1,R	12.688,20	-0,60	12.713,61	2,30	12.336,16	29,30	12.713,84	2,30	12.330,49	29,40	12.713,61	2,30
U2,R	131,71	-96,56	131,97	-93,66	141,20	-66,70	145,52	-93,70	128,18	-66,58	132,16	-93,68
U0,R	8.930,43	171,66	8.948,32	174,56	8.681,64	201,50	8.947,43	174,50	8.678,64	201,66	8.948,29	174,56
I1,R	61,97	41,18	62,09	44,08	60,21	71,07	62,05	44,07	60,21	71,17	62,08	44,07
I2,R	46,45	-6,56	46,54	-3,66	45,20	23,31	46,59	-3,69	45,14	23,43	46,54	-3,67
I0,R	58,31	-45,05	58,43	-42,15	56,69	-15,18	58,42	-42,18	56,67	-15,05	58,43	-42,15
3I0,R	174,94	-45,05	175,29	-42,15								
Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:												
U1E,R	3.972,84	15,06	3.980,80	17,96	3.862,17	44,90	3.980,41	17,90	3.860,66	45,05	3.980,61	17,95
U2E,R	17.941,48	-147,75	17.977,41	-144,85	17.424,01	242,20	17.957,45	-144,80	17.435,64	242,25	17.977,38	-144,85
U3E,R	19.611,24	140,68	19.650,52	143,58	19.084,08	170,60	19.668,35	143,60	19.058,39	170,68	19.650,55	143,58
UNE,R	8.930,43	171,66	8.948,32	174,56								
IL1,R	134,11	-2,47	134,38	0,43	130,38	27,40	134,37	0,40	130,33	27,53	134,38	0,43
IL2,R	68,84	-59,70	68,98	-56,80	66,86	-29,80	68,90	-56,80	66,90	-29,70	68,98	-56,80
IL3,R	73,94	-127,60	74,09	-124,70	71,95	262,30	74,16	-124,70	71,86	262,39	74,09	-124,71
Isum,R	174,94	-45,05	175,29	-42,15								

Tabelle 7.1.: Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 0$

Einheit für Spannung $\underline{U}$:	V $\angle$ °
Einheit für Strom $\underline{I}$:	A $\angle$ °
schwarz:	Rohergebnis aus der jeweiligen Berechnung (analytisch / NEPLAN / INTEGRAL)
rot:	auf die Bezugsgröße $\underline{U}_F^1$ umgerechnete Ergebnisse

2. **Fehlerwiderstand $R_F = 90\,\Omega$**

   a) Analytische Rechnung:

   - `Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F:`
     ```
     U1,F = 12555.29 V / -2.10 °
     U2,F = 345.44 V / -147.08 °
     U0,F = 5993.28 V / 177.28 °
     I1,F = 23.26 A / -3.33 °
     I2,F = 23.26 A / -3.33 °
     I0,F = 23.26 A / -3.33 °
     3I0,F = 69.79 A / -3.33 °
     ```
   - `Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle F:`
     ```
     U1E,F = 6280.90 V / -3.33 °
     U2E,F = 16216.88 V / -139.61 °
     U3E,F = 16690.88 V / 135.37 °
     UNE,F = 5993.28 V / 177.28 °
     ```

IL1,F = 69.79 A / -3.33 °
IL2,F = 0.00 A / 0.00 °
IL3,F = 0.00 A / 0.00 °
Isum,F = 69.79 A / -3.33 °

- Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten am Relaiseinbauort R:
  U1,R = 12697.40 V / -0.31 °
  U2,R = 67.36 V / -94.55 °
  U0,R = 4567.64 V / 173.68 °
  I1,R = 50.40 A / 61.33 °
  I2,R = 23.76 A / -4.55 °
  I3,R = 29.83 A / -43.03 °
  3I0,R = 89.48 A / -43.03 °
- Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort R:
  U1E,R = 8160.31 V / 2.58 °
  U2E,R = 15076.71 V / -136.23 °
  U3E,R = 15886.41 V / 133.25 °
  UNE,R = 4567.64 V / 173.68 °
  IL1,R = 73.05 A / 17.52 °
  IL2,R = 56.47 A / -47.98 °
  IL3,R = 58.80 A / -135.66 °
  Isum,R = 89.48 A / -43.03 °

b) NEPLAN:

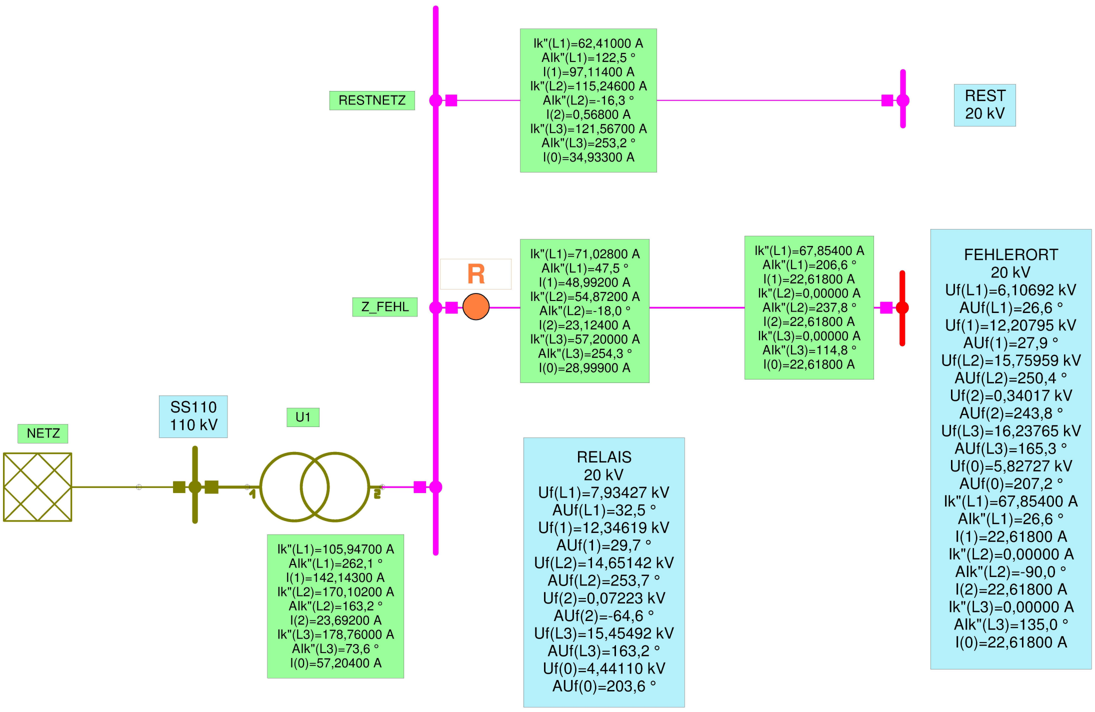


Abbildung 7.4.: Netzberechnung von (7.1) mittels NEPLAN für $R_F = 90\,\Omega$
Legende wie Abbildung 7.2

c) INTEGRAL:

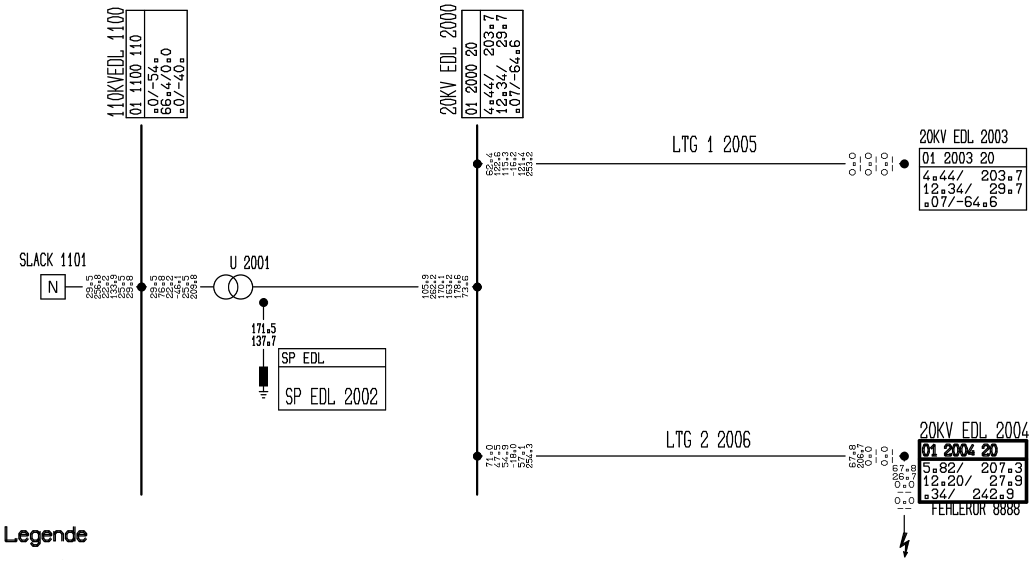


Abbildung 7.5.: Netzberechnung von (7.1) mittels INTEGRAL für $R_F = 90\,\Omega$

Legende wie Abbildung 7.3

d) Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 90\,\Omega$:
Bezugsgröße ist wieder der Spannungszeiger $\underline{U}_F^1$ (= Spannung des Mitsystems an der Fehlerstelle F).

	analytische Rechnung				NEPLAN				INTEGRAL			
Bezugsgroesse = U1,F = 21.300/√3 V =			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00
Fehlergroessen in S.K. an der Fehlerstelle:												
U1,F	12.555,29	-2,10	12.297,56	0,00	12.207,95	27,90	12.297,56	0,00	12.201,36	27,90	12.297,56	0,00
U2,F	345,44	-147,08	338,35	-144,98	340,17	243,80	342,67	-144,10	335,77	242,93	338,42	-144,97
U0,F	5.993,28	177,28	5.870,25	179,38	5.827,27	207,20	5.870,04	179,30	5.824,51	207,28	5.870,43	179,38
I1,F	23,26	-3,33	22,78	-1,23	22,62	26,60	22,78	-1,30	22,61	206,67	22,79	178,77
I2,F	23,26	-3,33	22,78	-1,23	22,62	26,60	22,78	-1,30	22,61	206,67	22,79	178,77
I0,F	23,26	-3,33	22,78	-1,23	22,62	26,60	22,78	-1,30	22,61	206,67	22,79	178,77
3I0,F	69,79	-3,33	68,36	-1,23								
Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:												
U1E,F	6.280,90	-3,33	6.151,97	-1,23	6.106,92	26,60	6.151,75	-1,30	6.103,65	26,67	6.151,77	-1,23
U2E,F	16.216,88	-139,61	15.883,99	-137,51	15.759,59	250,40	15.875,27	-137,50	15.759,96	250,39	15.884,22	-137,51
U3E,F	16.690,88	135,37	16.348,26	137,47	16.237,65	165,30	16.356,84	137,40	16.220,42	165,70	16.348,31	137,80
UNE,F	5.993,28	177,28	5.870,25	179,38								
IL1,F	69,79	-3,33	68,36	-1,23	67,85	26,60	68,35	-1,30	67,82	206,67	68,35	178,77
IL2,F	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
IL3,F	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Isum,F	69,79	-3,33	68,36	-1,23								
Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:												
U1,R	12.697,40	-0,31	12.436,75	1,79	12.346,19	29,70	12.436,82	1,80	12.339,47	29,69	12.436,76	1,79
U2,R	67,36	-94,55	65,98	-92,45	72,23	-64,60	72,76	-92,50	65,56	-64,56	66,08	-92,46
U0,R	4.567,64	173,68	4.473,88	175,78	4.441,10	203,60	4.473,70	175,70	4.439,02	203,68	4.474,02	175,78
I1,R	50,40	61,33	49,37	63,43	48,99	91,31	49,35	63,41	48,98	91,33	49,37	63,43
I2,R	23,76	-4,55	23,27	-2,45	23,12	25,43	23,29	-2,47	23,09	25,45	23,27	-2,45
I0,R	29,83	-43,03	29,22	-40,93	29,00	-13,07	29,21	-40,97	28,99	-13,03	29,22	-40,93
3I0,R	89,48	-43,03	87,64	-40,93								
Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:												
U1E,R	8.160,31	2,58	7.992,80	4,68	7.394,27	32,50	7.448,55	4,60	7.930,06	32,58	7.992,58	4,68
U2E,R	15.076,71	-136,23	14.767,22	-134,13	14.651,42	253,70	14.758,97	-134,20	14.651,96	253,77	14.767,48	-134,13
U3E,R	15.886,41	133,25	15.560,30	135,35	15.454,92	163,20	15.568,36	135,30	15.438,56	163,25	15.560,28	135,35
UNE,R	4.567,64	173,68	4.473,88	175,78								
IL1,R	73,05	17,52	71,55	19,62	71,03	47,50	71,55	19,60	70,99	47,51	71,55	19,61
IL2,R	56,47	-47,98	55,31	-45,88	54,87	-18,00	55,27	-45,90	54,87	-17,98	55,30	-45,88
IL3,R	58,80	-135,66	57,59	-133,56	57,20	254,30	57,62	-133,60	57,14	254,34	57,59	-133,56
Isum,R	89,48	-43,03	87,64	-40,93								

Tabelle 7.2.: Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 90\,\Omega$

Legende wie Tabelle 7.1

3. **Fehlerwiderstand** $R_F = 300\,\Omega$

a) Analytische Rechnung:

- `Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F:`
  `U1,F = 12708.31 V / -1.64 °`
  `U2,F = 161.34 V / -145.96 °`
  `U0,F = 2799.22 V / 178.40 °`
  `I1,F = 10.87 A / -2.20 °`
  `I2,F = 10.87 A / -2.20 °`
  `I0,F = 10.87 A / -2.20 °`
  `3I0,F = 32.60 A / -2.20 °`
- `Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle F:`
  `U1E,F = 9778.52 V / -2.20 °`
  `U2E,F = 14274.24 V / -130.76 °`
  `U3E,F = 14446.98 V / 127.76 °`
  `UNE,F = 2799.22 V / 178.40 °`
  `IL1,F = 32.60 A / -2.20 °`

```
IL2,F = 0.00 A / 0.00 °
IL3,F = 0.00 A / 0.00 °
Isum,F = 32.60 A / -2.20 °
```

- `Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten am Relaiseinbauort R:`

```
U1,R = 12700.72 V / -0.15 °
U2,R = 31.46 V / -93.42 °
U0,R = 2133.36 V / 174.80 °
I1,R = 46.89 A / 75.71 °
I2,R = 11.10 A / -3.42 °
I3,R = 13.93 A / -41.91 °
3I0,R = 41.79 A / -41.91 °
```

- `Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort R:`

```
U1E,R = 10575.01 V / 0.70 °
U2E,R = 13708.93 V / -128.19 °
U3E,R = 14064.70 V / 127.04 °
UNE,R = 2133.36 V / 174.80 °
IL1,R = 48.46 A / 47.06 °
IL2,R = 50.50 A / -39.50 °
IL3,R = 51.47 A / -142.59 °
Isum,R = 41.79 A / -41.91 °
```

b) NEPLAN:

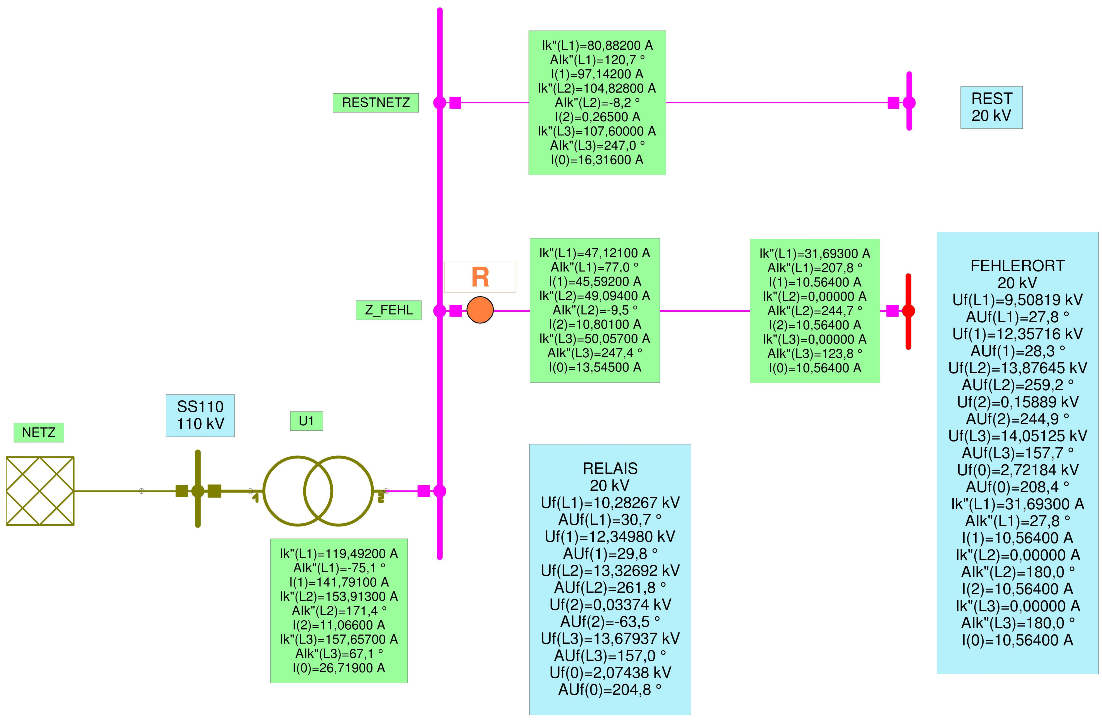


Abbildung 7.6.: Netzberechnung von (7.1) mittels NEPLAN für $R_F = 300\,\Omega$
Legende wie Abbildung 7.2

c) INTEGRAL:

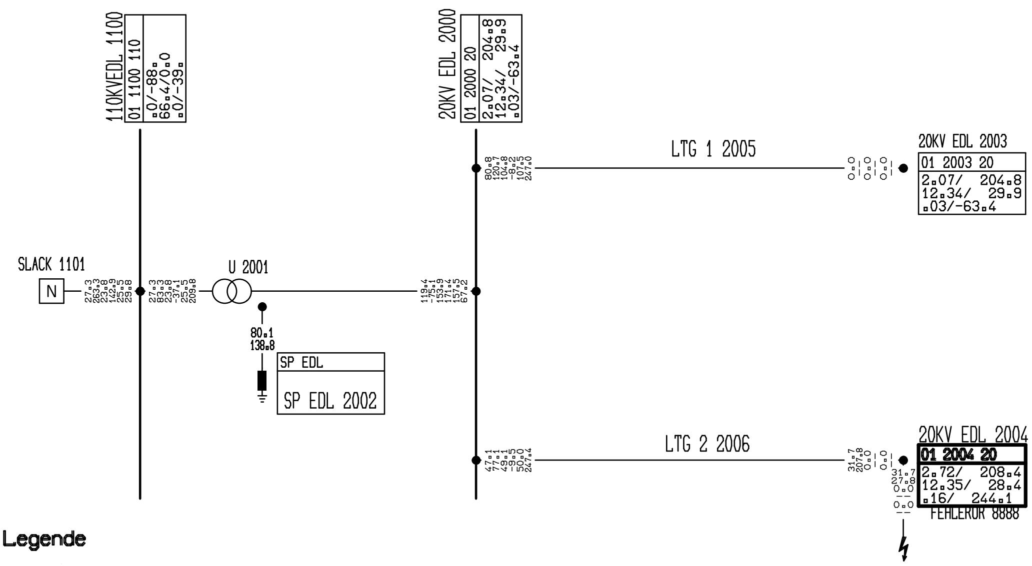


Abbildung 7.7.: Netzberechnung von (7.1) mittels INTEGRAL für $R_F = 300\,\Omega$

Legende wie Abbildung 7.3

d) Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 300\,\Omega$:
Bezugsgröße ist wieder der Spannungszeiger $\underline{U}_F^1$ (= Spannung des Mitsystems an der Fehlerstelle F).

	analytische Rechnung				NEPLAN				INTEGRAL			
Bezugsgroesse = U1,F = 21.300/√3 V			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00			12.297,56	0,00
Fehlergroessen in S.K. an der Fehlerstelle:												
U1,F	12.708,31	-1,64	12.297,56	0,00	12.357,16	28,30	12.297,56	0,00	12.350,08	28,36	12.297,56	0,00
U2,F	161,34	-145,96	156,13	-144,32	158,89	244,90	158,12	-143,40	156,83	244,05	156,16	-144,31
U0,F	2.799,22	178,40	2.708,75	180,04	2.721,84	208,40	2.708,71	180,10	2.720,44	208,41	2.708,87	180,05
I1,F	10,87	-2,20	10,52	-0,56	10,56	27,80	10,51	-0,50	10,56	207,80	10,52	179,44
I2,F	10,87	-2,20	10,52	-0,56	10,56	27,80	10,51	-0,50	10,56	207,80	10,52	179,44
I0,F	10,87	-2,20	10,52	-0,56	10,56	27,80	10,51	-0,50	10,56	207,80	10,52	179,44
3I0,F	32,60	-2,20	31,55	-0,56								
Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:												
U1E,F	9.778,52	-2,20	9.462,47	-0,56	9.508,19	27,80	9.462,33	-0,50	9.502,73	27,80	9.462,32	-0,56
U2E,F	14.274,24	-130,76	13.812,88	-129,12	13.876,45	259,20	13.809,52	-129,10	13.872,07	259,24	13.813,08	-129,12
U3E,F	14.446,98	127,76	13.980,03	129,40	14.051,25	157,70	13.983,48	129,40	14.039,71	157,76	13.980,01	129,40
UNE,F	2.799,22	178,40	2.708,75	180,04								
IL1,F	32,60	-2,20	31,55	-0,56	31,69	27,80	31,54	-0,50	31,68	207,80	31,55	179,44
IL2,F	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
IL3,F	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Isum,F	32,60	-2,20	31,55	-0,56								
Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:												
U1,R	12.700,72	-0,15	12.290,22	1,49	12.349,80	29,80	12.290,24	1,50	12.342,71	29,85	12.290,22	1,49
U2,R	31,46	-93,42	30,44	-91,78	33,74	-63,50	33,58	-91,80	30,62	-63,43	30,49	-451,79
U0,R	2.133,36	174,80	2.064,41	176,44	2.074,38	204,80	2.064,38	176,50	2.073,32	204,81	2.064,50	176,45
I1,R	46,89	75,71	45,37	77,35	45,59	105,69	45,37	77,39	45,57	105,71	45,38	77,35
I2,R	11,10	-3,42	10,74	-1,78	10,80	26,52	10,75	-1,78	10,78	26,58	10,73	-1,78
I0,R	13,93	-41,91	13,48	-40,27	13,55	-11,93	13,48	-40,23	13,54	-11,91	13,48	-40,27
3I0,R	41,79	-41,91	40,44	-40,27								
Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:												
U1E,R	10.575,01	0,70	10.233,21	2,34	10.282,67	30,70	10.233,08	2,40	10.276,79	30,70	10.233,09	2,34
U2E,R	13.708,93	-128,19	13.265,84	-126,55	13.326,92	261,80	13.262,64	-126,50	13.322,70	261,81	13.266,04	-126,55
U3E,R	14.064,70	127,04	13.610,11	128,68	13.679,37	157,00	13.613,39	128,70	13.668,19	157,04	13.610,07	128,68
UNE,R	2.133,36	174,80	2.064,41	176,44								
IL1,R	48,46	47,06	46,89	48,70	47,12	77,00	46,89	48,70	47,09	77,05	46,89	48,69
IL2,R	50,50	-39,50	48,87	-37,86	49,09	-9,50	48,85	-37,80	49,08	-9,50	48,87	-37,86
IL3,R	51,47	-142,59	49,81	-140,95	50,06	247,40	49,82	-140,90	50,02	247,41	49,81	-140,95
Isum,R	41,79	-41,91	40,44	-40,27								

Tabelle 7.3.: Gegenüberstellung der Rechenergebnisse für $R_F = 300\,\Omega$

Legende wie Tabelle 7.1

7.1.2. Fehler im Leitungsverlauf

Zur Ermittlung der Fehlergrößen in einem Strahlennetz bei einem Fehler im Leitungsverlauf (Abbildung 7.8) wird die selbe Vorgangsweise eingeschlagen wie im vorangegangenen Abschnitt für den Leitungsende-Fehler.

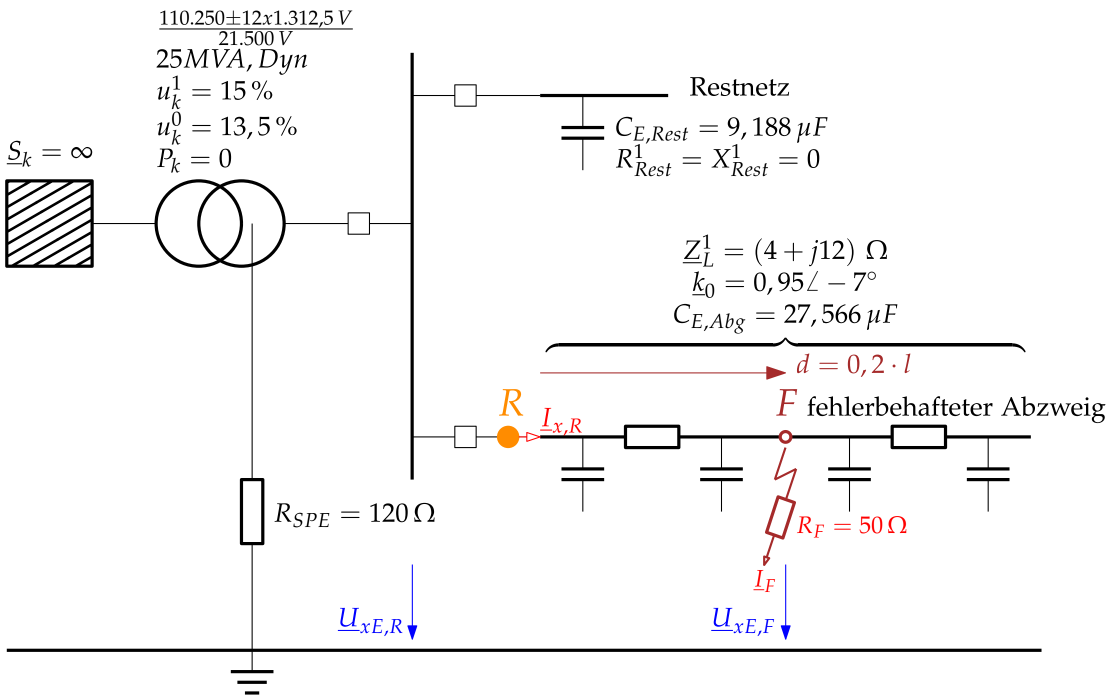


Abbildung 7.8.: 20-kV-Netz für die Berechnung eines Fehlers L1-E im Leitungsverlauf

Charakteristika des Netzes:

- niederohmige Sternpunkterdung
- kapazitiver Erdschlussstrom des Gesamtnetzes bei einer Leiter-Leiter-Spannung von $21{,}3\,kV$: $426\,A$
- kapazitiver Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abzweiges: $319\,A$

Fehlerwiderstand $R_F = 50\,\Omega$
a) Analytische Rechnung:

- `Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F:`
```
U1,F = 12249.22 V / -2.04 °
U2,F = 360.43 V / -78.32 °
U0,F = 5297.05 V / 125.93 °
I1,F = 65.66 A / 20.82 °
I2,F = 65.66 A / 20.82 °
I0,F = 65.66 A / 20.82 °
3I0,F = 196.98 A / 20.82 °
```

- Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle F:
  U1E,F = 9848.76 V / 20.82 °
  U2E,F = 11021.39 V / -147.91 °
  U3E,F = 17782.78 V / 121.13 °
  UNE,F = 5297.05 V / 125.93 °
  IL1,F = 196.98 A / 20.82 °
  IL2,F = 0.00 A / 0.00 °
  IL3,F = 0.00 A / 0.00 °
  Isum,F = 196.98 A / 20.82 °
- Fehlergroessen in Symmetrischen Komponenten am Relaiseinbauort R:
  U1,R = 12006.68 V / -0.87 °
  U2,R = 191.91 V / -69.57 °
  U0,R = 5414.31 V / 123.63 °
  I1,R = 146.08 A / 63.37 °
  I2,R = 68.64 A / 20.43 °
  I3,R = 21.62 A / -10.46 °
  3I0,R = 64.85 / -10.46 °
- Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort R:
  U1E,R = 9975.51 V / 24.55 °
  U2E,R = 10658.09 V / -147.99 °
  U3E,R = 17533.68 V / 121.01 °
  UNE,R = 5414.31 V / 123.63 °
  IL1,R = 213.32 A / 44.91 °
  IL2,R = 95.53 A / -59.36 °
  IL3,R = 157.87 A / -149.47 °
  Isum,R = 64.85 A / -10.46 °

b) NEPLAN:
Die verwendete Version NEPLAN 5.2.1 unterstützt nicht die Berechnung eines Fehlers im Leitungsverlauf mit einem Fehlerwiderstand $R_F > 0$. Somit konnte dieser Fehlerfall nur durch tatsächliche Aufteilung der fehlerbehafteten Leitung im Verhältnis des angenommenen Fehlerortes modelliert werden.

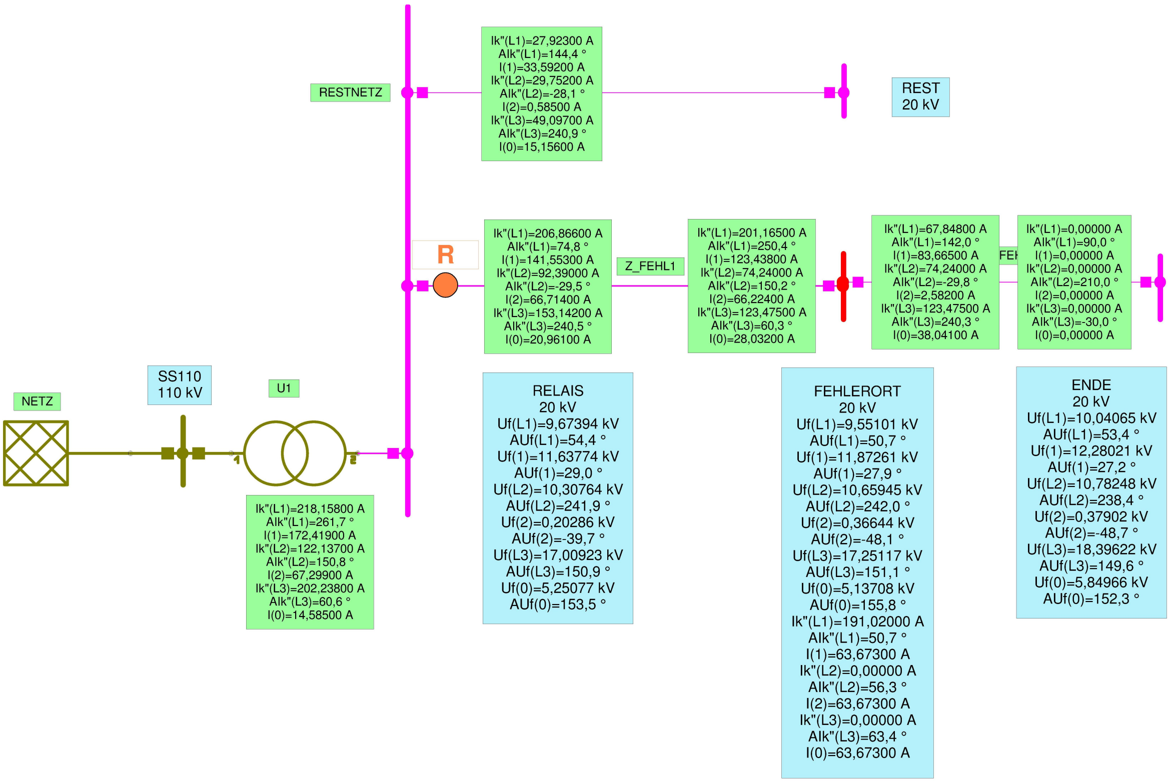


Abbildung 7.9.: Netzberechnung von (7.8) mittels NEPLAN

Legende wie Abbildung 7.2

c) Gegenüberstellung der Rechenergebnisse:
Bezugsgröße ist wieder der Spannungszeiger $\underline{U}_F^1$ (= Spannung des Mitsystems an der Fehlerstelle F).

	analytische Rechnung				NEPLAN			
Bezugsgroesse = U1,F = 20.000/√3 V =			11.547,01	0,00			11.547,01	0,00
Fehlergroessen in S.K. an der Fehlerstelle:								
U1,F	12.249,22	-2,04	11.547,01	0,00	11.872,61	27,90	11.547,01	0,00
U2,F	360,43	-78,32	339,77	-76,28	366,44	-48,10	356,39	-76,00
U0,F	5.297,05	125,93	4.993,38	127,97	5.317,08	155,80	5.171,26	127,90
I1,F	65,66	20,82	61,90	22,86	63,67	50,70	61,93	22,80
I2,F	65,66	20,82	61,90	22,86	63,67	50,70	61,93	22,80
I0,F	65,66	20,82	61,90	22,86	63,67	50,70	61,93	22,80
3I0,F	196,98	20,82	185,69	22,86				
Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:								
U1E,F	9.848,76	20,82	9.284,16	22,86	9.551,01	50,70	9.289,07	22,80
U2E,F	11.021,39	-147,91	10.389,56	-145,87	10.659,45	242,00	10.367,12	-145,90
U3E,F	17.782,78	121,13	16.763,34	123,17	17.251,17	151,10	16.778,06	123,20
UNE,F	5.297,05	125,93	4.993,38	127,97				
IL1,F	196,98	20,82	185,69	22,86	191,02	50,70	185,78	22,80
IL2,F	0,00	0,00	0,00	2,04	0,00		0,00	
IL3,F	0,00	0,00	0,00	2,04	0,00		0,00	
Isum,F	196,98	20,82	185,69	22,86				
Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:								
U1,R	12.006,68	-0,87	11.318,37	1,17	11.637,74	29,00	11.318,58	1,10
U2,R	191,91	-69,57	180,91	-67,53	202,86	-39,70	197,30	-67,60
U0,R	5.414,31	123,63	5.103,92	125,67	5.250,77	153,50	5.106,77	125,60
I1,R	146,08	63,37	137,71	65,41	141,55	93,25	137,67	65,35
I2,R	68,64	20,43	64,71	22,47	66,71	50,27	64,88	22,37
I0,R	21,62	-10,46	20,38	-8,42	20,96	19,39	20,39	-8,51
3I0,R	64,85	-10,46	61,13	-8,42				
Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:								
U1E,R	9.975,51	24,55	9.403,64	26,59	9.673,94	54,40	9.408,63	26,50
U2E,R	10.658,09	-147,99	10.047,09	-145,95	10.307,64	241,90	10.024,95	-146,00
U3E,R	17.533,68	121,01	16.528,52	123,05	17.009,23	150,90	16.542,75	123,00
UNE,R	5.414,31	123,63	5.103,92	125,67				
IL1,R	213,32	44,91	201,09	46,95	206,87	74,80	201,19	46,90
IL2,R	95,53	-59,36	90,05	-57,32	92,39	-29,50	89,86	-57,40
IL3,R	157,87	-149,47	148,82	-147,43	153,14	240,50	148,94	-147,40
Isum,R	64,85	-10,46	61,13	-8,42				

Tabelle 7.4.: Gegenüberstellung der Rechenergebnisse

Legende wie Tabelle 7.1

7.1.3. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der analytischen Rechnung und der Netzberechnungen mittels NEPLAN und INTEGRAL sind in den Tabellen 7.1, 7.2 und 7.3 sowie in Tabelle 7.4 gegenüber gestellt. Vergleicht man die auf die jeweilige Bezugsgröße normierten Werte (rote Eintragungen), dann ist ersichtlich, dass sämtliche, auf verschiedenen Wegen ermittelten Fehlergrößen sich praktisch nicht unterscheiden. Die Differenzen liegen im Promille-Bereich. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die sowohl mittels analytischer Rechnung als auch die mittels Netzberechnungsprogramm erhaltenen Fehlergrößen vertrauenswürdig sind und somit als Grundlage für weiterführende Rechnungen und Auswertungen herangezogen werden können.

7.2. Laborversuch

Nachdem im vorigen Abschnitt 7.1 nachgewiesen wurde, dass die analytische Rechnung und die Rechnung mittels Netzberechnungsprogramm praktisch identisch sind, soll nun in einem Laborversuch die Gleichheit von Modellmessung und Rechnung gezeigt werden. In Abbildung 7.10 ist ein 20-kV-Modellnetz dargestellt, an dem in einem Laborversuch ein Leitungsende-Fehler L1-E simuliert wird. Von den durchgeführten Versuchen sei hier exemplarisch jener mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 101\,\Omega$ angeführt. Bezogen auf den Vergleich mit einer Netzberechnung zeigten die Messungen mit anderen Fehlerwiderständen analoge Ergebnisse.

Wählt man das Übersetzungsverhältnis

- der Stromwandler mit $200\,A/1\,A$ und
- der Spannungswandler mit $\frac{20.000}{\sqrt{3}}V/\frac{100}{\sqrt{3}}V$,

so sind die Impedanzen des Originalnetzes und die Impedanzen des Modellnetzes gleich groß. Wird für das Modellnetz eine speisende Spannungsquelle mit $\underline{E}^1 = \frac{100}{\sqrt{3}}V$ gewählt, so entsprechen die gemessenen Laborwerte genau den Sekundärwerten des Originalnetzes, wenn dieses mit den oben angeführten Strom- und Spannungswandlern ausgerüstet ist.

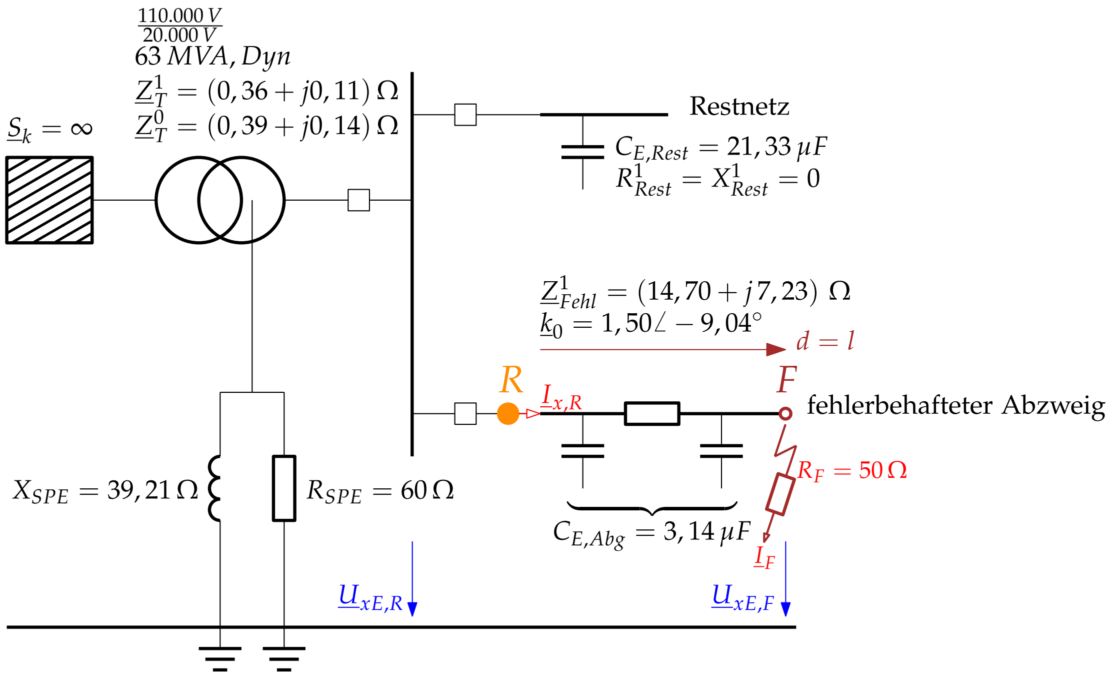


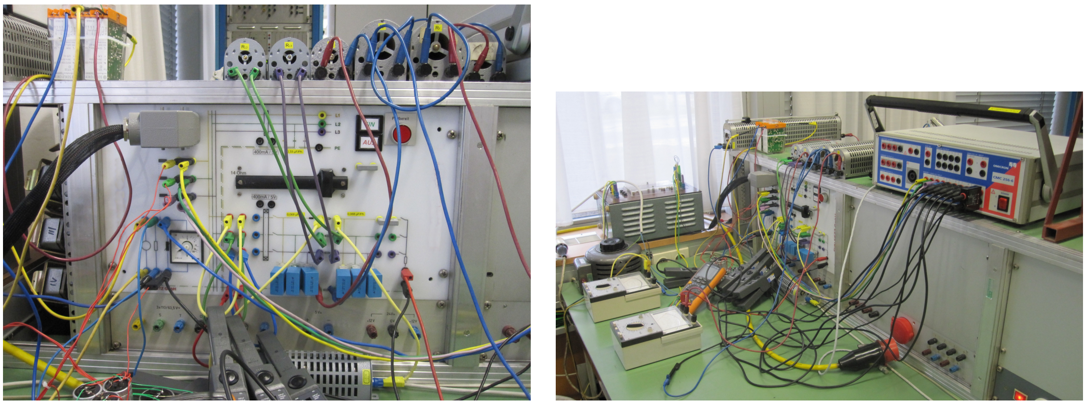
Abbildung 7.10.: 20-kV-Modellnetz für die Simulation eines Leitungsende-Fehlers L1-E

Charakteristika des Netzes:

- niederohmige Sternpunkterdung
- kapazitiver Erdschlussstrom des Gesamtnetzes bei einer Leiter-Leiter-Spannung von $20,0\,kV$: $266\,A$
- kapazitiver Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abzweiges: $34\,A$
- Die Petersenspule im Sternpunkt ist auf $\approx 5\%$ Überkompensation eingestellt.
- Messung und Berechnung der Fehlergrößen erfolgt für den eingeschwungenen Zustand.

a) Messung:

- Schaltung:



(a) Messaufbau (b) Messgrößenaufzeichnung

Abbildung 7.11.: 20-kV-Modellnetz

- Die Messgrößenaufzeichnung erfolgte mit der Transientenrecorderfunktion (Modul „EnerLyzer“, [OMI13]) einer Mess- und Prüfeinrichtung Omicron CMC 256-6:
- Messergebnisse: Die aufgezeichneten Fehlergrößen wurden zu einem Zeitpunkt des eingeschwungenen Zustandes in jener Zeitdauer, während der der ohmsche Sternpunktwiderstand R_{SPE} eingeschaltet ist, ausgewertet.

Meßsignal	Effektiv	Wert	Leiter	Wirk	Imag	3.Harmon.	5.Harmon.
IL1	306,32 mA	303,12 mA	-174,5°	-301,75 mA	-28,809 mA	1,2%	0,7%
IL2	90,403 mA	72,411 mA	138,8°	-54,507 mA	47,669 mA	1,5%	3,0%
IL3	92,782 mA	69,937 mA	47,2°	47,504 mA	51,328 mA	1,9%	4,4%
U1E	43,649 V	43,565 V	-175,9°	-43,451 V	-3,1449 V	1,3%	0,8%
U2E	66,982 V	66,927 V	51,1°	42,051 V	52,067 V	0,6%	0,7%
U3E	67,738 V	67,692 V	-46,5°	46,609 V	-49,090 V	0,7%	0,7%
UNE	15,034 V	15,027 V	0,0°	15,027 V	0,00000 V	2,2%	0,4%
IF	301,77 mA	300,71 mA	178,3°	-300,59 mA	8,6972 mA	1,3%	0,6%

Abbildung 7.12.: Messtabelle des Modellnetzes (7.10)

b) Berechnungsergebnis NEPLAN:

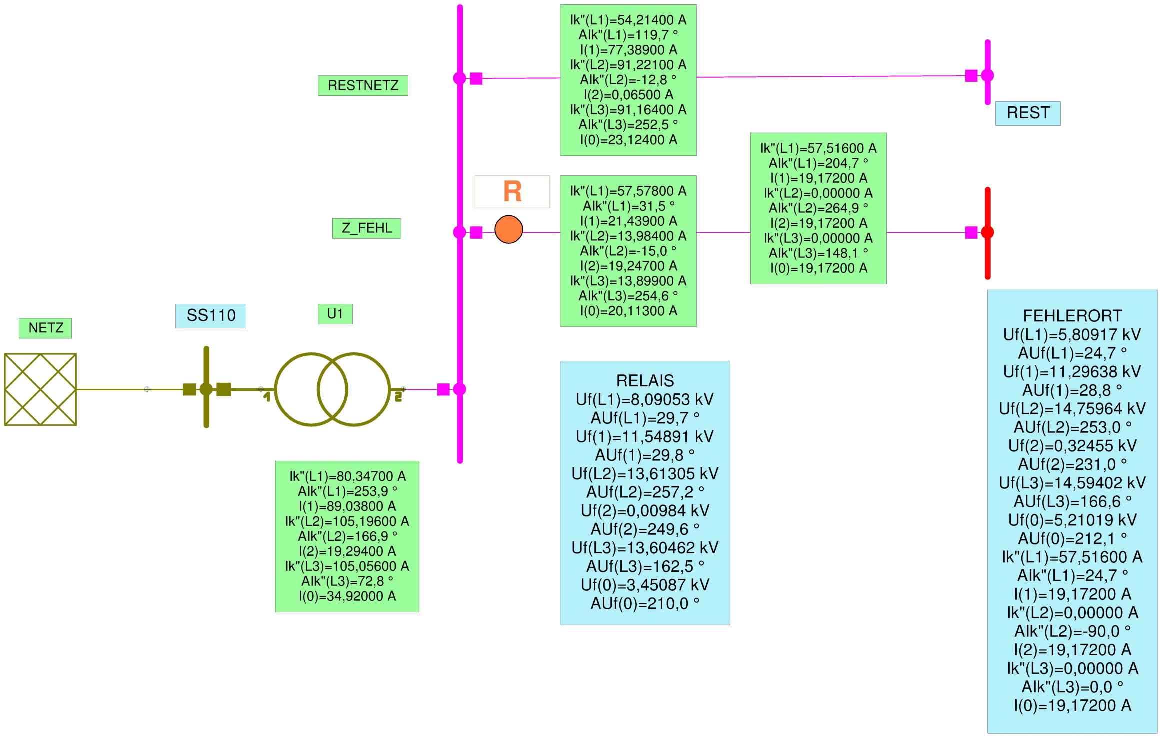


Abbildung 7.13.: Netzberechnung des Modellnetzes (7.10) mittels NEPLAN

Legende wie Abbildung 7.2

c) Gegenüberstellung Messung – Rechnung:
Die gemessenen Werte des Laborversuches werden nachstehend mit der Netzberechnung mittels NEPLAN verglichen. Bezugsgröße ist der Spannungszeiger $\underline{U}_R^1$ (= Spannung des Mitsystems am Einbauort des Schutzgerätes R).

	Messung				NEPLAN					Differenz	
Bezugsgroesse = U1,R = 100/√3 V =			57,74	0,00				57,74	0,00	Betrag	Winkel
	Betrag	Winkel	Betrag	Winkel	Betrag(20kV)	Betrag	Winkel	Betrag	Winkel	%	°
Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:											
IL1,F	0,301	178,4	0,30	-4,40	57,52	0,29	24,7	0,29	-5,10	-3,1%	0,7
Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:											
U1,R	*58,6*	*-177,2*	57,74	0,00	11.548,91	57,74	29,8	57,74	0,00	0,0%	
U2,R	*0,3*	*-106,4*	0,28	70,80	9,48	0,05	249,6	0,05	-140,20	-83,4%	211,0
U0,R	15,1	-0,3	14,88	176,91	3.450,87	17,25	210,0	17,25	180,20	16,0%	-3,3
I1,R	*0,113*	*-150,8*	0,11	26,40	21,44	0,11	56,3	0,11	26,48	-3,8%	-0,1
I2,R	*0,101*	*178,2*	0,10	-4,60	19,25	0,10	24,3	0,10	-5,55	-3,2%	0,9
I0,R	*0,106*	*167,2*	0,10	-15,60	20,11	0,10	12,5	0,10	-17,29	-3,6%	1,7
Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:											
U1E,R	43,6	-175,8	42,99	1,40	8.090,53	40,45	29,7	40,45	-0,10	-5,9%	
U2E,R	67,0	51,0	66,06	-131,80	13.613,05	68,07	257,2	68,05	-132,60	3,0%	0,8
U3E,R	67,7	-46,5	66,75	130,70	13.604,62	68,02	162,5	68,01	132,70	1,9%	-2,0
IL1,R	0,304	-174,6	0,30	2,60	57,58	0,29	31,5	0,29	1,70	-4,0%	0,9
IL2,R	0,072	138,5	0,07	-44,30	13,98	0,07	-15,0	0,07	-44,80	-1,7%	0,5
IL3,R	0,070	47,3	0,07	-135,50	13,90	0,07	254,6	0,07	-135,20	1,1%	-0,3

Tabelle 7.5.: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Laborversuch und Netzberechnung

Einheit für Spannung $\underline{U}$:	V $\angle$°
Einheit für Strom $\underline{I}$:	A $\angle$°
schwarz:	Rohergebnis aus der jeweiligen Berechnung (analytisch / NEPLAN)
rot:	auf die Bezugsgröße $\underline{U}_R^1$ umgerechnete Ergebnisse

Der Modellierung wurde ein Stromwandler-Übersetzungsverhältnis von $200\,A/1\,A$ und ein Spannungswandler-Übersetzungsverhältnis von $\frac{20.000}{\sqrt{3}}V\,/\,\frac{100}{\sqrt{3}}V$ zugrunde gelegt. Um das Messergebnis mit dem Berechnungsergebnis direkt vergleichen zu können (Tabelle 7.5), müssen die Fehlergrößen aus der Netzberechnung („Betrag(20kV)“ in Tabelle 7.5) zuerst mit den Wandlerübersetzungsverhältnissen auf die jeweilige Sekundärseite umgerechnet werden. Diese Sekundärwerte werden nun mit der Bezugsgröße (hier: $\underline{U}_R^1$) normiert und können daraufhin unmittelbar miteinander verglichen werden („Differenz“ in Tabelle 7.5).

Anders als beim Vergleich von Rechenergebnissen – wenngleich auch von unterschiedlichen Verfahren – ist die zahlenmäßige Übereinstimmung zwischen einer Messung und einer Berechnung erwartungsgemäß weniger präzise. Die in Tabelle 7.5 ausgewiesenen Differenzen weisen lediglich Abweichungen im unteren einstelligen Prozentbereich auf; von zwei Ausnahmen abgesehen, die möglicherweise wegen der Kleinheit der zu messenden Größe mit geringerer Genauigkeit behaftet sind.

7.3. Resümee

Die Grundgedanken dieses Abschnittes waren:

1. Die für die weiteren Berechnungen benötigten Fehlergrößen können sowohl durch Rechnung, wie z.B.

   - durch die analytische Berechnung aus dem Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten oder
   - mittels Netzberechnungsprogramm,

   als auch

   - durch die Messung an einem Modellnetz

   bestimmt werden. Die so gewonnenen Fehlergrößen können als Ausgangspunkt für die spätere Berechnung der Fehlerreaktanz $X_{Fehl} = Im(\underline{Z}^1_{Fehl})$, siehe Abschnitt 6, herangezogen werden.
   Bei der Bestimmung von Fehlergrößen mittels Rechnung war es wichtig darauf Wert zu legen, dass diese durch verschiedene Rechenverfahren, die nicht vom gleichen Autor stammen, ermittelt wurden. Erst diese Diversifikation stellt sicher, dass den erhaltenen Ergebnissen vertraut und nachfolgende Rechnungen darauf aufgebaut werden dürfen.
   Bei der Verwendung von Netzberechnungsprogrammen muss der für diese Art der Fehlerberechnung – hier: Berechnung eines Erdfehlers – geeignete Berechnungsmodus eingestellt werden:

   - im Netzberechnungsprogramm NEPLAN ist dies der Modus „Kurzschluss - Superpositionsverfahren mit Lastfluss“ und
   - im Netzberechnungsprogramm INTEGRAL ist dies der Modus „UNIFEH mit Vorbelastung“.

2. In Abschnitt 6.1.1 wurde theoretisch gezeigt, dass der Fehlerstrom $\underline{I}_F$ an der Fehlerstelle F, welcher am Anfang der fehlerbehafteten Leitung naturgemäß nicht direkt messbar ist, durch den Gegenstrom $\underline{I}^2_R$, welcher jedoch durch das am Leitungsanfang eingebaut Schutzgerät R direkt messbar ist, mit technisch hinreichender Genauigkeit ausgedrückt werden darf, siehe Gleichung (6.16):

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}^k_F \approx 3 \cdot \underline{I}^2_R \tag{7.1}$$

   Die numerischen Vergleiche der in den Abschnitten 7.1.1 und 7.1.2 gerechneten und in Abschnitt 7.2 auch gemessenen Werte bestätigen diese Annahme:

R_F	$0\,\Omega$	$90\,\Omega$	$300\,\Omega$
$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F}$	$136,72A\angle - 2,44°$	$68,36A\angle - 1,23°$	$31,55A\angle - 0,56°$
$3\underline{I}^2_R$	$139,62A\angle - 3,66°$	$69,81A\angle - 2,45°$	$32,22A\angle - 1,78°$
$3\underline{I}^0_R$	$174,94A\angle - 42,15°$	$87,64A\angle - 40,93°$	$40,44A\angle - 40,27°$

Tabelle 7.6.: Vergleich der Rechenergebnisse für einen Leitungsende-Fehler mit unterschiedlichen Fehlerwiderständen; siehe 7.1.1

R_F	$50\,\Omega$
$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F}$	$185,69A\angle 22,86°$
$3\underline{I}_R^2$	$194,13A\angle 22,47°$
$3\underline{I}_R^0$	$61,13A\angle -8,42°$

Tabelle 7.7.: Vergleich der Rechenergebnisse für einen Fehler im Leitungsverlauf; siehe 7.1.2

$R_F = 101\,\Omega$	Messung	Netzberechnung
$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F}$	$0,30A\angle -4,40°$	$0,29A\angle -5,10°$
$3\underline{I}_R^2$	$0,30A\angle -4,60°$	$0,30A\angle -5,55°$
$3\underline{I}_R^0$	$0,30A\angle -15,60°$	$0,30A\angle -17,29°$

Tabelle 7.8.: Vergleich von Messung und Berechnung eines Leitungsende-Fehlers; siehe 7.2

Die obigen Tabellen zeigen aber auch deutlich, dass der Summenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ numerisch *nicht einmal annähernd* dem gesuchten Fehlerstrom $\underline{I}_{L1,F}$ entspricht.

8. Anwendung und kritische Betrachtung

In Abschnitt 6 wurde die Berechnung der Fehlerortentfernung für das typische Mittelspannungsstrahlennetz gezeigt, und zwar

- unter Berücksichtigung der Queradmittanzen,
- für jede beliebige Art der Sternpunkterdung,
- für einen beliebigen Fehlerwiderstand

sowie

- für jeden beliebigen Fehlerort im Leitungsverlauf.

Für die Berechnung des Fehlerortes und zur Verifizierung der Fehlerortformel werden verlässliche Fehlergrößen benötigt, die am Anfang der fehlerbehafteten Leitung während eines Erdschlusses auftreten. Abschnitt 7 befasste sich ausführlich damit, *auf welche Weise* solche Fehlergröße gewonnen werden können und es wurde anhand numerischer Vergleiche gezeigt, dass diese Fehlergrößen verlässlich sind.

Somit ist es nun möglich, für bestimmte, realtypische Netze die Anwendung der Fehlerortformel hinsichtlich ihrer Genauigkeit – und damit hinsichtlich ihrer praktischen Brauchbarkeit – zu überprüfen. Um einen vollständigen Überblick zu geben, wäre es aufgrund der Vielzahl an Parametern, die die Fehlergrößen beeinflussen, erforderlich, jeden einzelnen Parameter, wie z.B. gesamter Erdschlussstrom des Netzes, Nennleistung des versorgenden Transformator, variierende Länge der fehlerbehafteten Leitung, entlang derer der Fehlerort sich verändert, usw. Um die vorliegende Arbeit in ihrer Aussagekraft nicht zu überfrachten, wird zwei praktischen Einflüssen besonderes Augenmerk gewidmet:

1. unterschiedliche Art der Sternpunkterdung sowie
2. entlang der Leitung variierender Fehlerort ($0 < d/l \leq 1$).

Deshalb wird in diesem Abschnitt *eine feste* Netzkonfiguration mit realtypischen Netzelementen bei Veränderung der unter 1. und 2. genannten Einflussgrößen berechnet und die aufgrund von verschiedenen Fehlerortformeln erhaltene Fehlerentfernung der ursprünglich der Rechnung zugrunde gelegten Fehlerentfernung gegenüber gestellt und die Abweichungen diskutiert.

8.1. Das Modellnetz

Für die Berechnung wird das in Abbildung 8.1 dargestellte Netz verwendet:

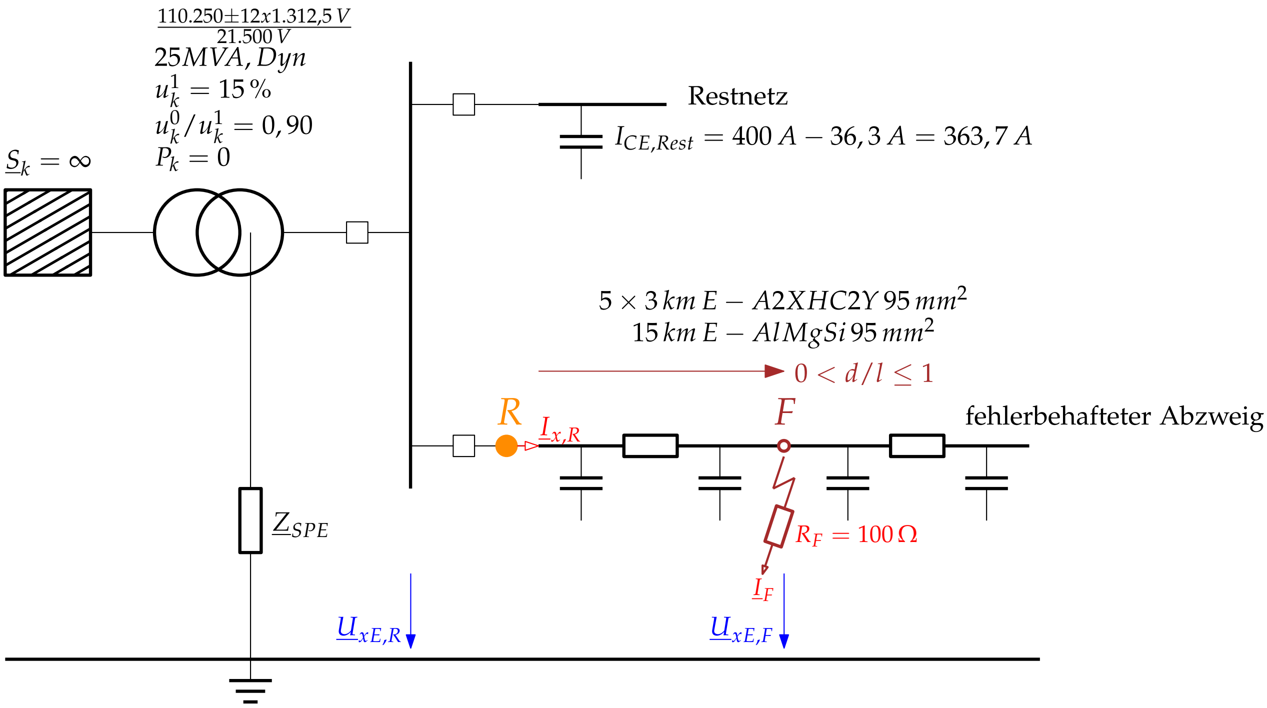


Abbildung 8.1.: Modellnetz für die Berechnung der Fehlerentfernung

Bei der Auswahl der Netzelemente waren folgende Überlegungen maßgeblich:

1. Das Netz besteht sowohl aus Freileitungen als auch aus Kabel.
2. Der gesamte Erdschlussstrom des Netzes möge $I_{CE,gesamt} = 400A$ betragen.
3. Die Impedanz des fehlerbehafteten Abzweiges setzt sich folgenden Anteilen zusammen:
   - $\underline{Z}^1_{Kabel} = 15 \cdot (0{,}320 + j \cdot 0{,}127)\,\Omega$ Kabelanteil zuzüglich
   - $\underline{Z}^1_{Freileitung} = 15 \cdot (0{,}358 + j \cdot 0{,}350)\,\Omega$ Freileitungsanteil,
   - insgesamt $\underline{Z}^1_L = (10{,}17 + j \cdot 7{,}16)\,\Omega = 12{,}43\,\Omega\,\angle 35{,}1°$.
   - Der Erdfaktor wird mit einem hierfür typischen Wert von $\underline{k}_0 = 1{,}12\,\angle 12°$ festgelegt.
4. Der Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abzweiges setzt sich folgenden Anteilen zusammen:
   - rund $15 \times 2{,}3A/km = 34{,}5A$ Kabelanteil zuzüglich
   - rund $15 \times 0{,}12A/km = 1{,}8A$ Freileitungsanteil,
   - insgesamt $36{,}3A$.
5. Der gewählte Fehlerwiderstand von $R_F = 100\,\Omega$ entspricht einem etwa mittelohmigen Fehler.

8.2. Zu betrachtende Fehlerortformeln

In den nachstehenden Berechnungen wird die Verwendung folgender Fehlerortformeln gegenüber gestellt:

1. Die konventionelle Fehlerortformel (3.35):

$$\underline{Z}^1_{Fehl,konv} = \frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}}$$

2. Die Fehlerortformel gemäß [Ach08] (6.22):

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Ach} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - \underline{I}_F \cdot R_F}{\underline{I}_{1,R} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}}$$

3. Die exakte Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler (6.14):

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm1} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}^k_F \cdot R_F}{\left(\underline{I}_{1,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_{1E,R}\right) + \left(\underline{I}_{\Sigma,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot 3\underline{U}_{NE,R}\right) \cdot \underline{k}_0}$$

4. Die exakte Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf (6.34):

$$\alpha^2 \cdot j\frac{\underline{U}_{1E,R} + 3\underline{U}_{NE,R} \cdot \underline{k}_0}{X_{CEAbg2}} - \alpha \cdot \left(\underline{I}_{1,R} + \underline{I}_{\Sigma,R} \cdot \underline{k}_0\right) + \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}^k_F \cdot R_F}{\underline{Z}^1_L} = 0\,,$$

wobei sich die gesuchte Fehlerentfernung zu

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm2} = \alpha \cdot \underline{Z}^1_L$$

berechnet.

8.3. Zur Bestimmung des Korrekturterms „Fehlerstrom $\times$ Fehlerwiderstand“ in den Fehlerortformeln

Abgesehen von der Fehlerortbestimmung nach dem konventionellen Ansatz (3.35) muss die am Leitungsanfang gemessene Leiter-Erde-Spannung der vom Fehler betroffenen Phase um einen Wert „Fehlerstrom $\times$ Fehlerwiderstand“ = $\underline{I}_F \cdot R_F$ korrigiert werden. Da die Fehlergrößen an der Fehlerstelle F am Anfang der fehlerbehafteten Leitung naturgemäß nicht zur Verfügung stehen, bestehen nachstehend beschriebene Möglichkeiten, die beiden Faktoren dieses Korrekturterms aus den am Leitungsanfang gemessenen Fehlergrößen zu bestimmen.

8.3.1. Fehlerstrom I_F

Als Fehlerstrom I_F wird in den nachstehenden Berechnungen ausschließlich der dreifache Gegenstrom am Leitungsanfang verwendet; vergleiche Gleichung (7.1):

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}^k_F \approx 3 \cdot \underline{I}^2_R$$

8.3.2. Ermittlung des Fehlerwiderstandes R_F

Betrachtet man das Komponentenschaltbild (Abbildung 5.3 oder 5.4), so gilt am Fehlerort F:

$$\underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2 + \underline{U}_F^0 = \underline{I}_F^k \cdot 3\underline{Z}_F \tag{8.1}$$

Weiters ist

$$\underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2 + \underline{U}_F^0 = \underline{U}_{1E,F} \tag{8.2}$$

und

$$3 \cdot \underline{I}_F^k = \underline{I}_{L1,F} \tag{8.3}$$

Da an der Fehlerstelle F

$$\underline{I}_{L2,F} = \underline{I}_{L3,F} = 0 \tag{8.4}$$

ist, wird

$$\underline{I}_{L1,F} = \underline{I}_{\Sigma,F} \tag{8.5}$$

und Gleichung (8.1) lautet somit

$$\underline{U}_{1E,F} = \underline{I}_{\Sigma,F} \cdot \underline{Z}_F \tag{8.6}$$

Daraus kann R_F berechnet werden:

$$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,F}}{\underline{I}_{\Sigma,F}}\right) \tag{8.7}$$

Da am Anfang der fehlerbehafteten Leitung die Größen $\underline{U}_{1E,F}$ und $\underline{I}_{\Sigma,F}$ nicht zugänglich sind, kann in einer ersten Näherung nun für

$$\underline{U}_{1E,F} \approx \underline{U}_{1E,R} \tag{8.8}$$

und für

$$\underline{I}_{\Sigma,F} \approx \underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0 \tag{8.9}$$

gesetzt werden, so dass sich der gesuchte Fehlerwiderstand zu

$$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right) = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^0}\right) \tag{8.10}$$

berechnet. In der Arbeit [Ach08] wird gezeigt, dass mit dieser Art der Fehlerwiderstandsbestimmung in seiner Fehlerortformel (6.22) numerisch sehr gute Ergebnisse bei der Ermittlung der Fehlerreaktanz erzielt werden können.

Ein anderer Ansatz ist es, in Gleichung (8.1) für den Fehlerstrom

$$3 \cdot \underline{I}_F^2 = \underline{I}_{L1,F} \approx 3 \cdot \underline{I}_R^2 \tag{8.11}$$

zu verwenden. Folglich würde man hiermit für den gesuchten Fehlerwiderstand

$$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right) \tag{8.12}$$

erhalten.

Da sowohl $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ als auch $3 \cdot \underline{I}_R^2$ am Anfang der fehlerbehafteten Leitung messtechnisch zur Verfügung stehen, werden die Vergleichsrechnungen des nachfolgenden Abschnittes mit beiden Möglichkeit der Fehlerwiderstandsbestimmung durchgeführt.

8.4. Vergleich in Abhängigkeit von der Art der Sternpunkterdung

Die Art der Sternpunkterdung bestimmt das Fehlergeschehen beim einpoligen Fehler, welcher statisch als die häufigste Fehlerart bekannt ist. Je nach Gegebenheiten, dazu zählt vor allem die Netztopologie (bestimmt durch das Verhältnis von Kabelanteil zu Freileitungsanteil) aber auch die unterschiedlichen Betriebserfahrungen und -philosophien der einzelnen Netzbetreiber, sind im Bereich der Mittelspannungs-Verteilernetze die folgenden Arten der Sternpunkterdung verbreitet:

1. NOSPE
   Je nach Betriebsphilosophie sind für das 20-kV-Netz folgende Sternpunktwiderstände typischerweise anzutreffen:
   - $R_{SPE} = 8\,\Omega$ für den Betrieb mit hohem Fehlerstrom („1500 A“) oder
   - $R_{SPE} = 40\,\Omega$ für den Betrieb mit mittlerem Fehlerstrom („300 A“).
2. RESPE
   In diesem Abschnitt wird mit einer Einstellung der Petersenspule von 5 A überkompensiert gerechnet.
3. KNOSPE
   Die kurzzeitige niederohmige Sternpunkterdung wird vor allem für den Betrieb mit dem Verfahren nach [Ach08] benötigt. In diesem Abschnitt soll daher die Frage untersucht werden, wie genau eine Fehlerortung mit diesem Verfahren je nach verwendeter Fehlerortformel vorgenommen werden kann.
   Da bei diesem Verfahren der zur Petersenspule ohmsche Parallelwiderstand nicht ursächlich den zur Anregung eines Nullstrom/Zeit-Schutzes erforderlichen Fehlerstrom erzeugen muss, sondern lediglich den Pilotstrom für die Fehlerortung durch den Distanzschutz liefern muss, braucht der Sternpunktwiderstand nicht zu klein dimensioniert zu werden. Anders als bei reiner NOSPE werden daher in diesem Fall die folgenden Sternpunktwiderstände betrachtet:
   - $R_{SPE} = 40\,\Omega$ für den Betrieb mit einem relativ hohen Pilotstrom („300 A“) oder
   - $R_{SPE} = 60\,\Omega$ für den Betrieb mit einem kleineren Pilotstrom („200 A“).

Nachstehend werden die unter Abschnitt 8.2 angeführten Fehlerortformeln für diese Arten der Sternpunkterdung verglichen. Die folgenden charakteristischen Größen werden in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $0 < d/l \leq 1$ dargestellt, und zwar jeweils für beide Berechnungsmöglichkeiten des Fehlerwiderstandes $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ und $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$:

- Betrag und Phasenwinkel des tatsächlicher Fehlerstromes an der Fehlerstelle $\underline{I}_F = 3\cdot\underline{I}_F^2$ verglichen mit dem dreifachen Gegenstrom $3\cdot\underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3\cdot\underline{I}_R^0$ am Anfang der fehlerbehafteten Leitung,
- tatsächlicher Fehlerwiderstand R_F und gerechneter Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- Korrekturterm mit den tatsächlichen Fehlergrößen $3\cdot\underline{I}_F^2\cdot R_{F,tatsaechlich}$ verglichen mit den gerechneten Fehlergrößen $3\cdot\underline{I}_R^2\cdot R_{F,gerechnet}$,
- tatsächliche Fehlerreaktanz X_{Fehl}^1 versus die gerechneten Fehlerreaktanzen gemäß Abschnitt 8.2, 1. bis 4.: $X_{Fehl,konv}^1$, $X_{Fehl,Ach}^1$, $X_{Fehl,Wm1}^1$ und $X_{Fehl,Wm2}^1$ sowie
- die zugehörigen Fehler.

Da in den Grafiken (8.2) bis (8.11) die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsmöglichkeiten des Fehlerwiderstandes augenscheinlich nicht immer beträchtlich sind, werden die Fehler der Fehlerortformeln explizit am Beispiel $X_{Fehl} = Im(\underline{Z}_{Fehl}^1) = 4.654\,\Omega$, das entspricht einer Fehlerentfernung von $d/l = 65\%$, tabelliert (Tabelle 8.1 bis 8.5).

8.4.1. NOSPE mit $R_{SPE} = 8\,\Omega$

Verlauf des tatsächlichen Fehlerstromes $\underline{I}_F = 3\cdot\underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle F im Vergleich zum dreifachen Gegenstrom $3\cdot\underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3\cdot\underline{I}_R^0$ am Einbauort des Schutzgerätes R in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ (oben: Betrag, unten: Winkel):

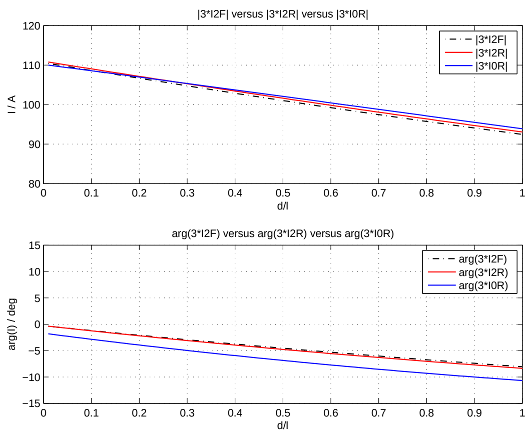
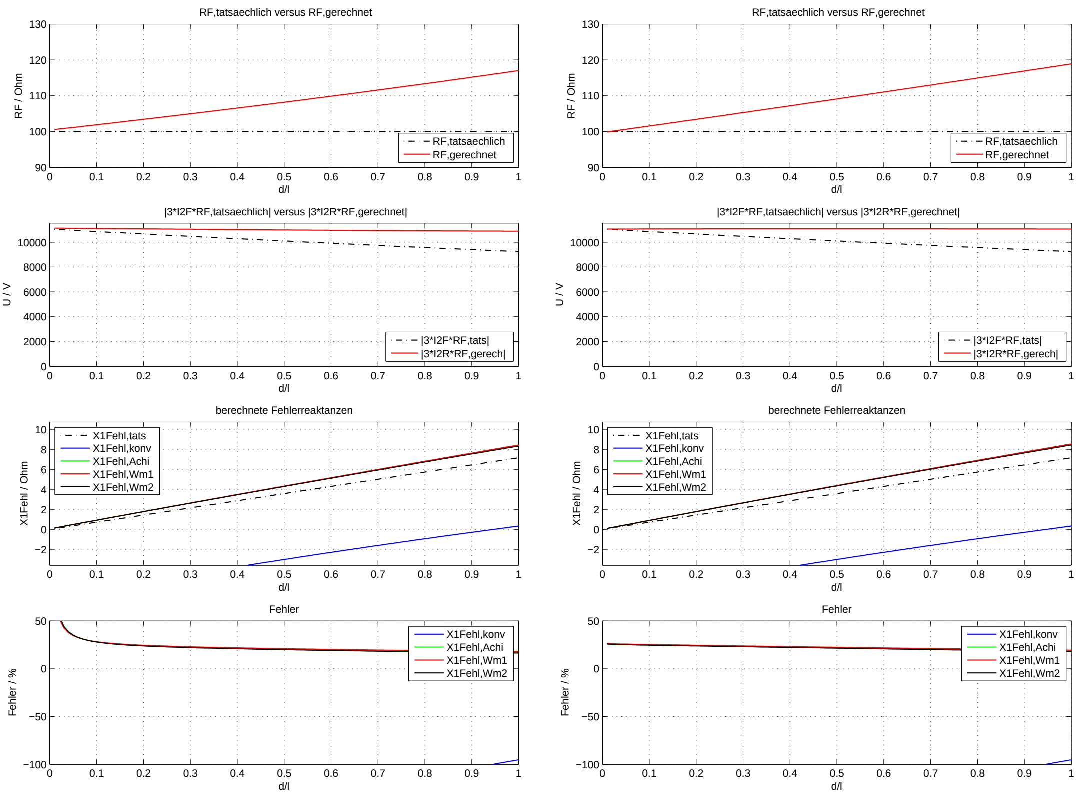


Abbildung 8.2.: Betrag und Winkel der Ströme $3\cdot\underline{I}_F^2$, $3\cdot\underline{I}_R^2$ und $3\cdot\underline{I}_R^0$ für NOSPE mit $R_{SPE} = 8\,\Omega$

Verlauf

- des tatsächlichen Fehlerwiderstandes $R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zum gerechneten Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- des Korrekturterms $3 \cdot \underline{I}_F^2 \cdot R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zu $3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot R_{F,gerechnet}$,
- der tatsächlichen Fehlerreaktanz $X_{Fehl,tatsaechlich}$ im Vergleich zu den gerechneten Fehlerreaktanzen
  - konventionell ($X_{Fehl,konv}$),
  - nach [Acho8] ($X_{Fehl,Ach}$),
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler ($X_{Fehl,Wm1}$) und
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X_{Fehl,Wm2}$)
- sowie der zugehörigen Fehler

in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ und für beide Möglichkeiten der Berechnung des Fehlerwiderstandes (links: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, rechts: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$):



(a) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ (b) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$

Abbildung 8.3.: Fehlerwiderstand, Korrekturterm, Fehlerentfernung und Fehler für NOSPE mit $R_{SPE} = 8\,\Omega$

Tabellarischer Vergleich der Fehler der Fehlerortformeln, beispielhaft für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$110.7\,\Omega$	$112.0\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\mid Fehler$	$-1.949\,\Omega \mid -141.88\%$	$-1.949\,\Omega \mid -141.88\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\mid Fehler$	$5.548\,\Omega \mid 19.21\%$	$5.635\,\Omega \mid 21.08\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\mid Fehler$	$5.577\,\Omega \mid 19.83\%$	$5.651\,\Omega \mid 21.43\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\mid Fehler$	$5.524\,\Omega \mid 18.69\%$	$5.601\,\Omega \mid 20.36\%$

Tabelle 8.1.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für NOSPE mit $R_{SPE} = 8\,\Omega$

8.4.2. NOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Verlauf des tatsächlichen Fehlerstromes $\underline{I}_F = 3\cdot\underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle F im Vergleich zum dreifachen Gegenstrom $3\cdot\underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3\cdot\underline{I}_R^0$ am Einbauort des Schutzgerätes R in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ (oben: Betrag, unten: Winkel):

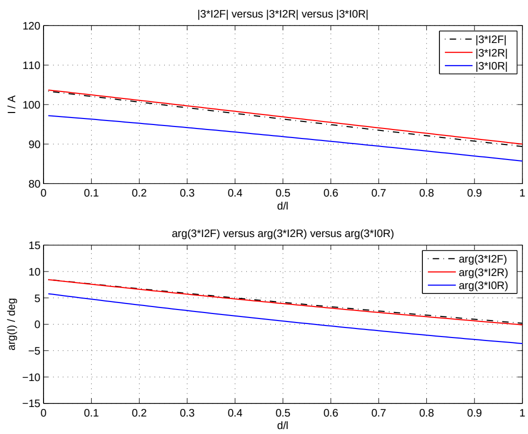
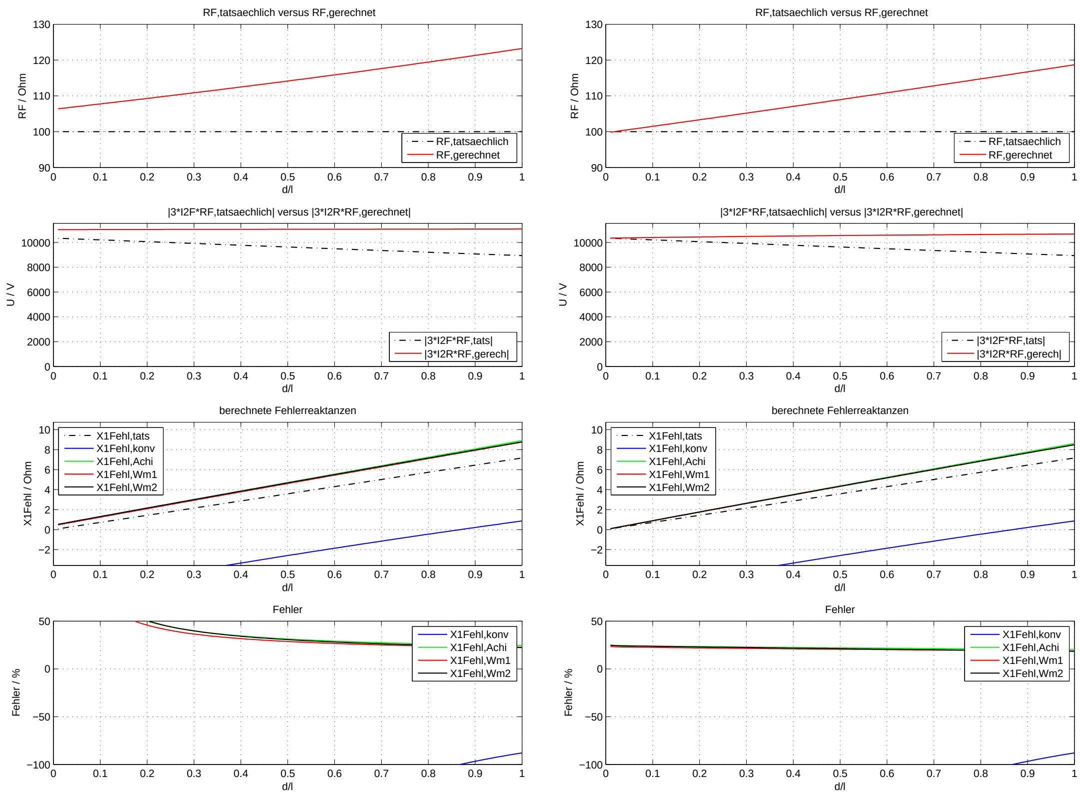


Abbildung 8.4.: Betrag und Winkel der Ströme $3\cdot\underline{I}_F^2$, $3\cdot\underline{I}_R^2$ und $3\cdot\underline{I}_R^0$ für NOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Verlauf

- des tatsächlichen Fehlerwiderstandes $R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zum gerechneten Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- des Korrekturterms $3 \cdot \underline{I}_F^2 \cdot R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zu $3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot R_{F,gerechnet}$,
- der tatsächlichen Fehlerreaktanz $X_{Fehl,tatsaechlich}$ im Vergleich zu den gerechneten Fehlerreaktanzen
  - konventionell ($X_{Fehl,konv}$),
  - nach [Ach08] ($X_{Fehl,Ach}$),
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler ($X_{Fehl,Wm1}$) und
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X_{Fehl,Wm2}$)
- sowie der zugehörigen Fehler

in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ und für beide Möglichkeiten der Berechnung des Fehlerwiderstandes (links: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, rechts: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$):



(a) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$

(b) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$

Abbildung 8.5.: Fehlerwiderstand, Korrekturterm, Fehlerentfernung und Fehler für NOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Tabellarischer Vergleich der Fehler der Fehlerortformeln, beispielhaft für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$116.7\,\Omega$	$111.8\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$-1.506\,\Omega\,\vert\,-132.36\%$	$-1.506\,\Omega\,\vert\,-132.36\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$5.969\,\Omega\,\vert\,28.26\%$	$5.655\,\Omega\,\vert\,21.52\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$5.856\,\Omega\,\vert\,25.83\%$	$5.583\,\Omega\,\vert\,19.95\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$5.918\,\Omega\,\vert\,27.17\%$	$5.601\,\Omega\,\vert\,20.34\%$

Tabelle 8.2.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für NOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

8.4.3. RESPE

Verlauf des tatsächlichen Fehlerstromes $\underline{I}_F = 3\cdot\underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle F im Vergleich zum dreifachen Gegenstrom $3\cdot\underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3\cdot\underline{I}_R^0$ am Einbauort des Schutzgerätes R in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ (oben: Betrag, unten: Winkel):

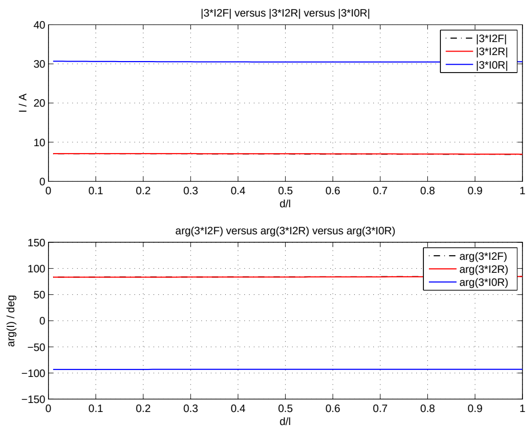
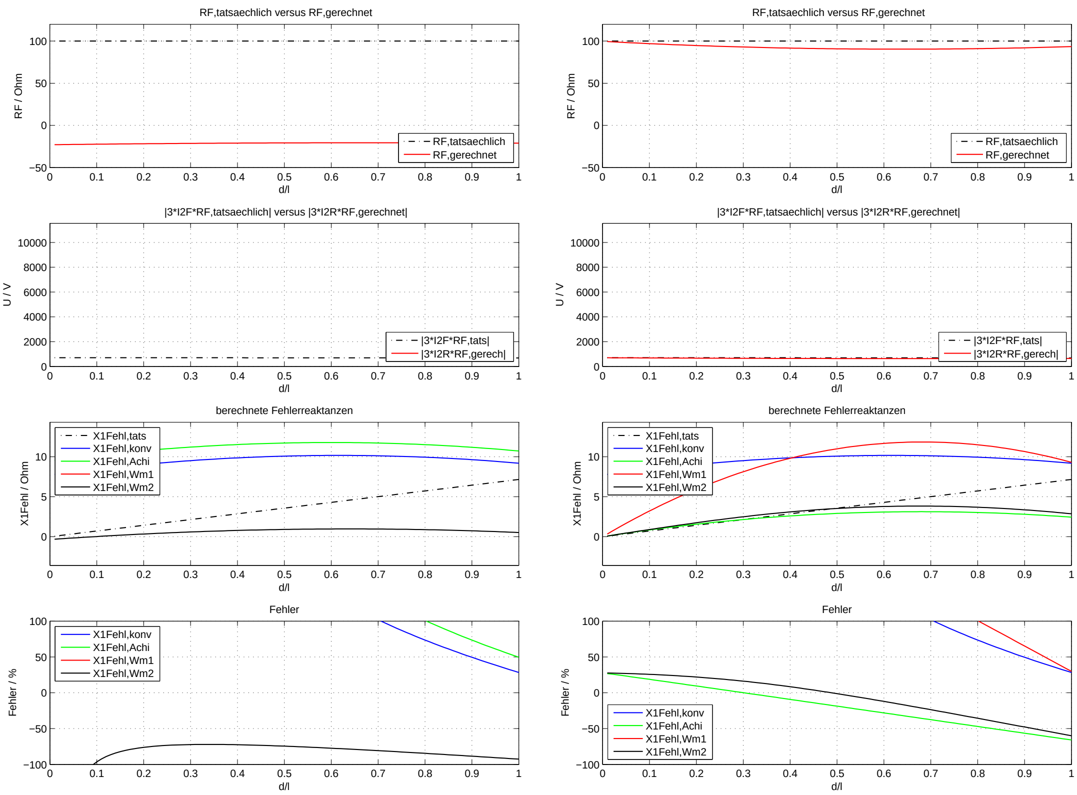


Abbildung 8.6.: Betrag und Winkel der Ströme $3\cdot\underline{I}_F^2$, $3\cdot\underline{I}_R^2$ und $3\cdot\underline{I}_R^0$ für RESPE

Verlauf

- des tatsächlichen Fehlerwiderstandes $R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zum gerechneten Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- des Korrekturterms $3 \cdot \underline{I}_F^2 \cdot R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zu $3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot R_{F,gerechnet}$,
- der tatsächlichen Fehlerreaktanz $X_{Fehl,tatsaechlich}$ im Vergleich zu den gerechneten Fehlerreaktanzen
  - konventionell ($X_{Fehl,konv}$),
  - nach [Acho8] ($X_{Fehl,Ach}$),
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler ($X_{Fehl,Wm1}$) und
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X_{Fehl,Wm2}$)
- sowie der zugehörigen Fehler

in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ und für beide Möglichkeiten der Berechnung des Fehlerwiderstandes (links: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, rechts: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$):



(a) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ (b) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$

Abbildung 8.7.: Fehlerwiderstand, Korrekturterm, Fehlerentfernung und Fehler für RESPE

Tabellarischer Vergleich der Fehler der Fehlerortformeln, beispielhaft für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$-20.6\,\Omega$	$90.4\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$10.158\,\Omega\,\vert\,118.27\%$	$10.158\,\Omega\,\vert\,118.27\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$11.762\,\Omega\,\vert\,152.73\%$	$3.127\,\Omega\,\vert\,-32.82\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$65.634\,\Omega\,\vert\,1310.27\%$	$11.816\,\Omega\,\vert\,153.89\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$9.197\,\Omega\,\vert\,97.61\%$	$3.828\,\Omega\,\vert\,-17.75\%$

Tabelle 8.3.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für RESPE

8.4.4. KNOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Verlauf des tatsächlichen Fehlerstromes $\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle F im Vergleich zum dreifachen Gegenstrom $3 \cdot \underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ am Einbauort des Schutzgerätes R in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ (oben: Betrag, unten: Winkel):

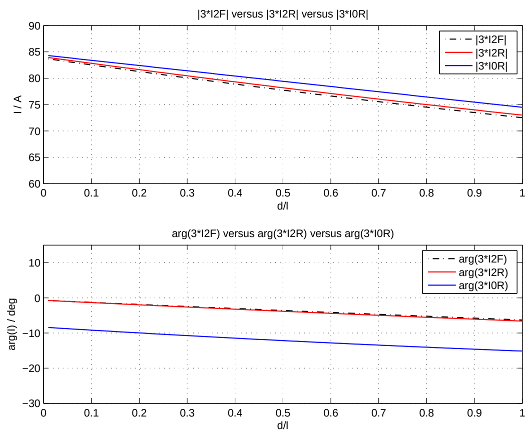
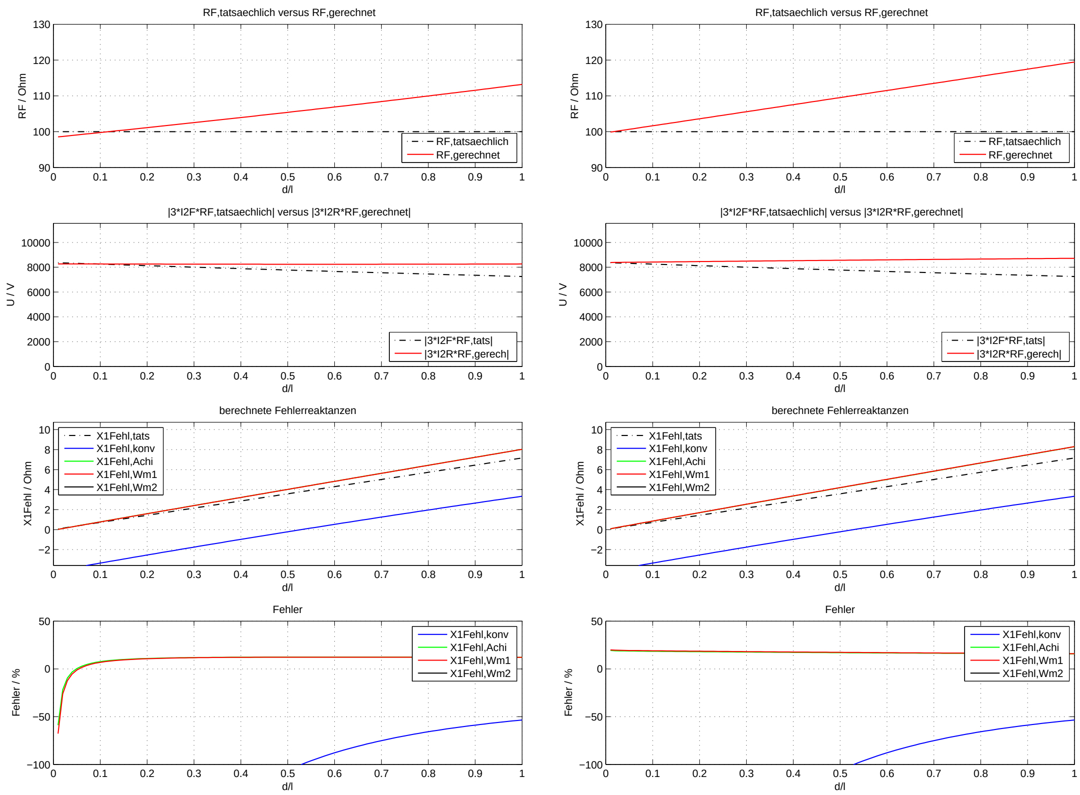


Abbildung 8.8.: Betrag und Winkel der Ströme $3 \cdot \underline{I}_F^2$, $3 \cdot \underline{I}_R^2$ und $3 \cdot \underline{I}_R^0$ für KNOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Verlauf

- des tatsächlichen Fehlerwiderstandes $R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zum gerechneten Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- des Korrekturterms $3 \cdot \underline{I}_F^2 \cdot R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zu $3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot R_{F,gerechnet}$,
- der tatsächlichen Fehlerreaktanz $X_{Fehl,tatsaechlich}$ im Vergleich zu den gerechneten Fehlerreaktanzen
  - konventionell ($X_{Fehl,konv}$),
  - nach [Acho8] ($X_{Fehl,Ach}$),
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler ($X_{Fehl,Wm1}$) und
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X_{Fehl,Wm2}$)
- sowie der zugehörigen Fehler

in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ und für beide Möglichkeiten der Berechnung des Fehlerwiderstandes (links: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, rechts: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$):



(a) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ (b) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$

Abbildung 8.9.: Fehlerwiderstand, Korrekturterm, Fehlerentfernung und Fehler für KNOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Tabellarischer Vergleich der Fehler der Fehlerortformeln, beispielhaft für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$107.6\,\Omega$	$112.5\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$0.887\,\Omega\,\vert -80.94\%$	$0.887\,\Omega\,\vert -80.94\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$5.227\,\Omega\,\vert\,12.32\%$	$5.423\,\Omega\,\vert\,16.52\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$5.224\,\Omega\,\vert\,12.25\%$	$5.437\,\Omega\,\vert\,16.82\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$5.236\,\Omega\,\vert\,12.51\%$	$5.441\,\Omega\,\vert\,16.91\%$

Tabelle 8.4.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für KNOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$

8.4.5. KNOSPE mit $R_{SPE} = 60\,\Omega$

Verlauf des tatsächlichen Fehlerstromes $\underline{I}_F = 3\cdot\underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle F im Vergleich zum dreifachen Gegenstrom $3\cdot\underline{I}_R^2$ und dem Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3\cdot\underline{I}_R^0$ am Einbauort des Schutzgerätes R in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ (oben: Betrag, unten: Winkel):

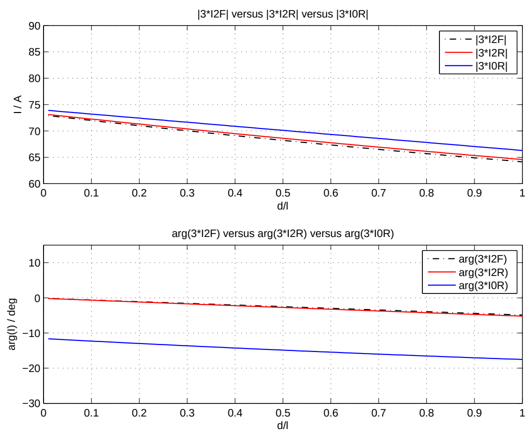
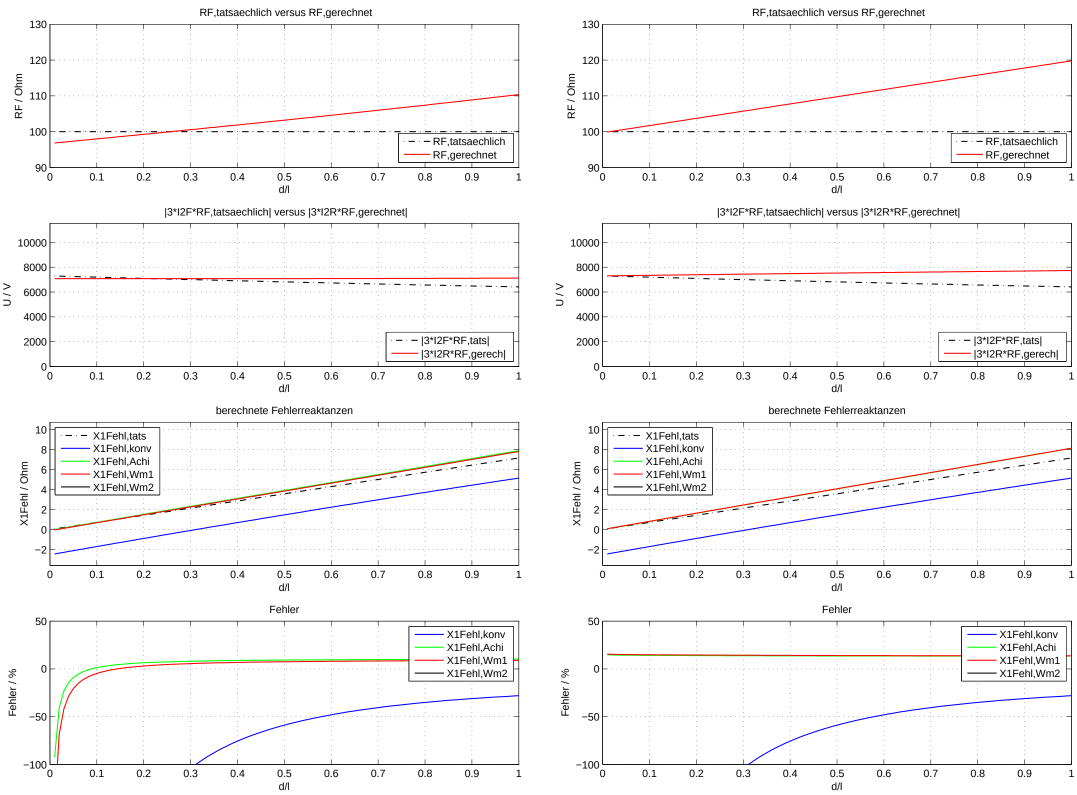


Abbildung 8.10.: Betrag und Winkel der Ströme $3\cdot\underline{I}_F^2$, $3\cdot\underline{I}_R^2$ und $3\cdot\underline{I}_R^0$ für KNOSPE mit $R_{SPE} = 60\,\Omega$

Verlauf

- des tatsächlichen Fehlerwiderstandes $R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zum gerechneten Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$,
- des Korrekturterms $3 \cdot \underline{I}_F^2 \cdot R_{F,tatsaechlich}$ im Vergleich zu $3 \cdot \underline{I}_R^2 \cdot R_{F,gerechnet}$,
- der tatsächlichen Fehlerreaktanz $X_{Fehl,tatsaechlich}$ im Vergleich zu den gerechneten Fehlerreaktanzen
  - konventionell ($X_{Fehl,konv}$),
  - nach [Ach08] ($X_{Fehl,Ach}$),
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler ($X_{Fehl,Wm1}$) und
  - gemäß der exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X_{Fehl,Wm2}$)
- sowie der zugehörigen Fehler

in Abhängigkeit der Fehlerentfernung $\alpha = d/l$ und für beide Möglichkeiten der Berechnung des Fehlerwiderstandes (links: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, rechts: für $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$):



(a) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ (b) $R_{F,gerechnet} = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$

Abbildung 8.11.: Fehlerwiderstand, Korrekturterm, Fehlerentfernung und Fehler für KNOSPE mit $R_{SPE} = 60\,\Omega$

Tabellarischer Vergleich der Fehler der Fehlerortformeln, beispielhaft für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$105.3\,\Omega$	$112.8\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$2.608\,\Omega\,\vert\,-43.96\%$	$2.608\,\Omega\,\vert\,-43.96\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$5.103\,\Omega\,\vert\,9.65\%$	$5.281\,\Omega\,\vert\,13.46\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$5.032\,\Omega\,\vert\,8.12\%$	$5.297\,\Omega\,\vert\,13.82\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$5.092\,\Omega\,\vert\,9.40\%$	$5.330\,\Omega\,\vert\,14.53\%$

Tabelle 8.5.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für KNOSPE mit $R_{SPE} = 60\,\Omega$

Das Listing des MATLAB-Scripts für diesen Fall ist im Anhang B exemplarisch für alle Fehlerortberechnungen angeführt.

8.5. Diskussion der Ergebnisse

8.5.1. Fehlerstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung

Der Vergleich der Grafiken zeigt, dass für jede Art der betrachteten Sternpunkterdung der Verlauf des am Anfang der fehlerbehafteten Leitung gemessenen dreifachen Gegenstromes $3 \cdot \underline{I}_R^2$ sehr gut mit dem tatsächlichen Fehlerstrom an der Fehlerstelle $\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}_F^2$ korreliert. Diese hohe Korrelation zieht eine enorme praktische Bedeutung nach sich: der am Anfang der fehlerbehafteten Leitung nicht messbare Strom an der Fehlerstelle kann durch den dreifachen Gegenstrom mit praktisch hinreichender Genauigkeit angegeben werden – und zwar unabhängig von der Art der Sternpunkterdung!

Ganz allgemein liegt der Unterschied eher im Phasenwinkel als im Betrag. Speziell bei RESPE weichen Betrag und Phasenwinkel des Summenstromes $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ stark vom tatsächlichen Fehlerstrom an der Fehlerstelle $\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_F^2$ und dem dreifachen Gegenstrom $3 \cdot \underline{I}_R^2$ ab (Abbildung 8.6).

8.5.2. Zur Frage des Fehlerstromes für die Berechnung des Fehlerwiderstandes

Bei jenen Arten der Sternpunkterdung, bei denen ein ohmscher Widerstand beteiligt ist (NOSPE oder KNOSPE), bleibt aufgrund des geringfügigen Unterschiedes von $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ und $3 \cdot \underline{I}_R^2$ auch der Unterschied zwischen dem tatsächlichen und dem gerechneten Fehlerwiderstand klein. Somit wird es eine Frage einer allfälligen Implementierung in den Algorithmus eines Schutzgerätes sein, welche der beiden Möglichkeiten das robustere Ergebnis liefert.

8.5.3. Abweichung der tatsächlichen zur gerechneten Fehlerentfernung je nach verwendeter Fehlerortformel

Erwartungsgemäß ist der Fehler bei Verwendung der konventionellen Fehlerentfernung $X^1_{Fehl,konv}$ (3.35) zum Teil so beträchtlich, dass er den Rahmen einer aussagekräftigen Ordinatenskalierung überschreitet.

Allein bei RESPE weisen alle vier Fehlerortformeln gemäß Abschnitt 8.2, 1. bis 4., beträchtliche Abweichungen vom wahren Wert auf (Abbildung 8.7).

Das numerische Ergebnis ist bei jenen Arten der Sternpunkterdung, bei denen ein ohmscher Widerstand beteiligt ist (NOSPE oder KNOSPE), bemerkenswerterweise äußerst uneinheitlich. Grundsätzlich würde erwartet werden, dass sich mit zunehmender Detaillierung

Fehlerortformel gemäß [Ach08] ($X^1_{Fehl,Ach}$, 6.22),
$\downarrow$
Fehlerortformel für den Leitungsende-Fehler unter Berücksichtigung der Kapazitäten des fehlerbehafteten Abzweiges ($X^1_{Fehl,Wm1}$, 6.14) und
$\downarrow$
Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf ($X^1_{Fehl,Wm2}$, 6.34)

die Abweichung vom wahren Wert vermindert.

Tatsächlich liegen die Unterschiede innerhalb eines Prozentpunktes (!), wobei möglicherweise auch die Numerik für die Berechnungen eine Rolle spielt. Ein deutlich einheitliches Verhalten einer bestimmten Fehlerortformel kann aus den Berechnungsergebnissen jedenfalls nicht herausgelesen werden.

Erwähnenswert ist sogar der Unterschied innerhalb der Sternpunkterdung KNOSPE, je nach dem, wie groß der Sternpunktwiderstand gewählt wird, und je nach dem, nach welcher Methode der Fehlerwiderstand berechnet wird:

KNOSPE:	$R_{SPE} = 40\,\Omega$		$R_{SPE} = 60\,\Omega$	
	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot \underline{I}^2_R}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot \underline{I}^2_R}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$107.6\,\Omega$	$112.5\,\Omega$	$105.3\,\Omega$	$112.8\,\Omega$
Fehler bei $X^1_{Fehl,Ach}$	12.32%	16.52%	9.65%	13.46%
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm1}$	12.25%	16.82%	8.12%	13.82%
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm2}$	12.51%	16.91%	9.40%	14.53%

Tabelle 8.6.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für KNOSPE mit $R_{SPE} = 40\,\Omega$ und $R_{SPE} = 60\,\Omega$

Gemäß Tabelle 8.6 wird für eine Fehlerentfernung von $d/l = 65\,\%$ der kleinste Fehler dann erzielt, wenn die KNOSPE mit einem Sternpunktwiderstand von $R_{SPE} = 60\,\Omega$ ausgeführt und der Fehlerwiderstand nach der Methode $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ berechnet wird. Allerdings zeigt der Vergleich der Abbildungen 8.11 (a) und (b), dass der Fehler – betrachtet über die gesamte Leitungslänge $0 < d/l \leq 1$ – bei der Berechnung des Fehlerwiderstandes gemäß $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$ zwar gleichmäßiger, aber dafür mit größerem Wert verläuft.

Ein ganz anderes Verhalten zeigen der Einfluss von Sternpunktwiderstand und die Art der Berechnung des Fehlerwiderstandes bei NOSPE:

NOSPE:	$R_{SPE} = 8\,\Omega$		$R_{SPE} = 40\,\Omega$	
	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$110.7\,\Omega$	$112.0\,\Omega$	$116.7\,\Omega$	$111.8\,\Omega$
Fehler bei $X^1_{Fehl,Ach}$	19.21%	21.08%	28.26%	21.52%
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm1}$	19.83%	21.43%	25.83%	19.95%
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm2}$	18.69%	20.36%	27.17%	20.34%

Tabelle 8.7.: Fehler der Fehlerortformeln am Beispiel $d/l = 65\,\%$ für NOSPE mit $R_{SPE} = 8\,\Omega$ und $R_{SPE} = 40\,\Omega$

Hier liefert der kleinere Wert des Sternpunktwiderstandes ($R_{SPE} = 8\,\Omega$) die kleineren Abweichungen. Berücksichtigt man allerdings, dass der Fehler über die gesamte Leitungslänge $0 < d/l \leq 1$ betrachtet bei der Berechnung des Fehlerwiderstandes gemäß $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$ gleichmäßiger, aber dafür mit größerem Wert verläuft (Abbildungen 8.3 und 8.5), dann liegt der Unterschied zwischen $R_{SPE} = 8\,\Omega$ und $R_{SPE} = 40\,\Omega$ im Bereich eines Prozentpunktes. Dennoch ist es bemerkenswert, dass für dieselbe Art der Sternpunkterdung (NOSPE) der Fehler für einen Sternpunktwiderstand von $R_{SPE} = 8\,\Omega$ und für die Berechnungsmethode des Fehlerwiderstandes gemäß $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$ relativ kleiner ist, als bei einem Sternpunktwiderstand von $R_{SPE} = 40\,\Omega$.

8.6. Exkurs: Abschnittsweise homogene Leitung

Sämtliche Fehlerortberechnungen basieren auf der Annahme, dass die fehlerbehaftete Leitung stets als homogen in der Form

$$\underline{Z}_L^1 = l \cdot \underline{z}_L^1 \,, \tag{8.13}$$

vorausgesetzt wird, worin l die Leitungslänge und $\underline{z}_L^1$ die längenbezogene Längsimpedanz der Leitung ist.

Konsequenterweise weist eine homogene Leitung auch nur *eine* Nullimpedanz $\underline{Z}_L^0$ auf, aus der sich der komplexe Erdfaktor $\underline{k}_0$, welcher in den Fehlerortformeln (3.35), (6.22), (6.14) und (6.34) benötigt wird, gemäß (3.27) zu

$$\underline{Z}_L^0 = (1 + 3 \cdot \underline{k}_0) \cdot \underline{Z}_L^1$$

berechnen lässt.

Bei der abschnittsweise homogenen Leitung, die in den Berechnungen dieses Abschnittes in den Abfolgen

- Kabel – Freileitung und
- Freileitung – Kabel

betrachtet wird, wird ein komplexer „Misch-“Erdfaktor für die Fehlerortformeln aus dem Verhältnis der *gesamten* Nullimpedanz zur *gesamten* Mitimpedanz wie folgt bestimmt:

$$\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Sigma \underline{Z}_L^0}{\Sigma \underline{Z}_L^1} - 1 \right) = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{Z}^0_{L,Kabel} + \underline{Z}^0_{L,Freileitung}}{\underline{Z}^1_{L,Kabel} + \underline{Z}^1_{L,Freileitung}} - 1 \right) \tag{8.14}$$

8.6.1. Kabel – Freileitung

Für die Berechnung wird das in Abbildung 8.12 dargestellte Netz verwendet:

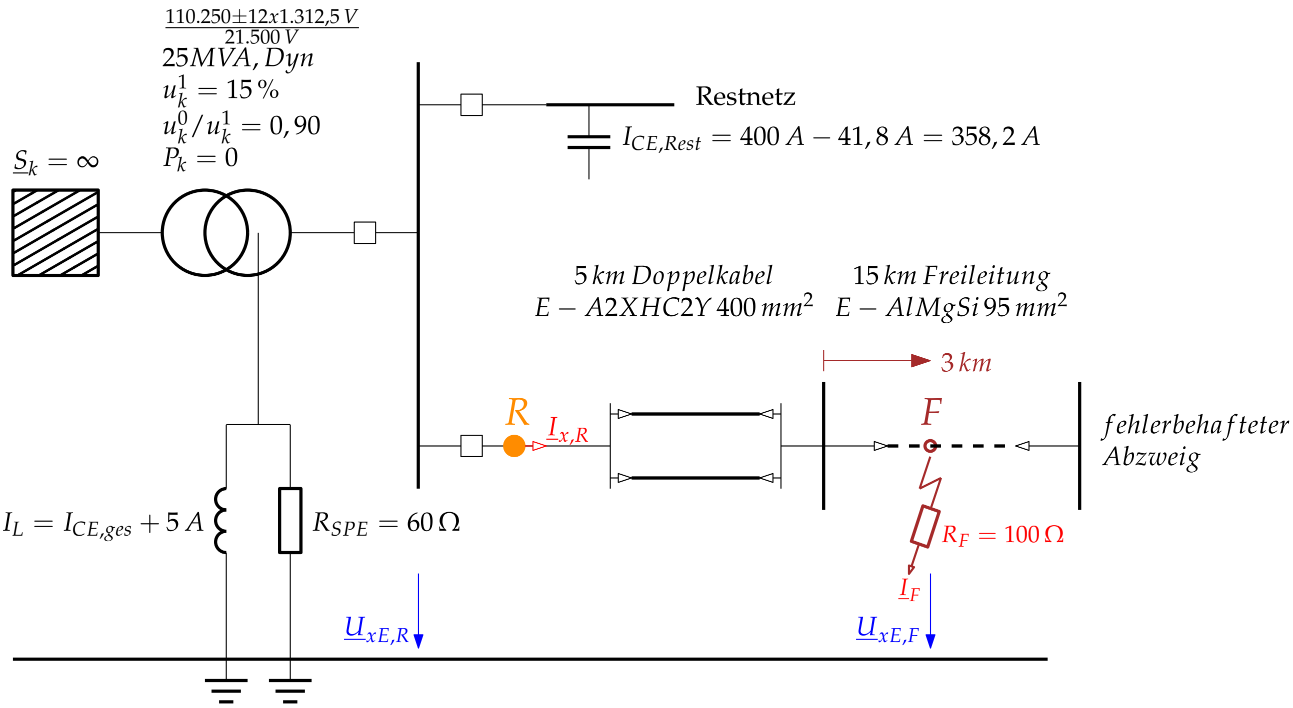


Abbildung 8.12.: Modellnetz für die Fehlerberechnung einer abschnittsweise homogenen Leitung Kabel – Freileitung

Charakteristika des Modellnetzes (8.12):

1. Der fehlerbehaftete Abzweig besteht aus der Abfolge Kabel – Freileitung.
2. Der gesamte Erdschlussstrom des Netzes möge $I_{CE,gesamt} = 400A$ betragen.
3. Die Petersenspule im Sternpunkt ist auf 5 A Überkompensation eingestellt.
4. Die Impedanzen des fehlerbehafteten Abzweiges setzen sich wie folgt zusammen:
   - Kabel: $\underline{Z}^1_{KL} = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot (0,078 + j \cdot 0,102)\,\Omega = (0,195 + j \cdot 0,255)\,\Omega$
   - Freileitung: $\underline{Z}^1_{FL} = 15 \cdot (0,358 + j \cdot 0,350)\,\Omega = (5,37 + j \cdot 5,25)\,\Omega$

5. Für die Erdfaktoren werden folgende Literaturwerte [Fic+04, 67 ff.] verwendet:
   - Kabel: $\underline{k}_{0,KL} = 0,92 \angle -55°$
   - Freileitung: $\underline{k}_{0,FL} = 0,57 \angle 13°$
6. Der Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abzweiges setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:
   - rund $2 \cdot 5 \cdot 4,0 A/km = 40,0 A$ Kabelanteil zuzüglich
   - rund $15 \cdot 0,12 A/km = 1,8 A$ Freileitungsanteil,
   - insgesamt $41,8 A$.
7. Fehlerort: $3\,km$ nach Beginn der Freileitung
   $\underline{Z}_F^1 = \underline{Z}_{KL}^1 + \frac{3}{15} \cdot \underline{Z}_{FL}^1 = (0,195 + j \cdot 0,255)\,\Omega + 3 \cdot (0,358 + j \cdot 0,350)\,\Omega =$
   $= (1,269 + j \cdot 1,305)\,\Omega$
8. Der gewählte Fehlerwiderstand von $R_F = 100\,\Omega$ entspricht einem etwa mittelohmigen Fehler.

Die für die Berechnung des Fehlerortes nach den in Abschnitt 8.2 angeführten Fehlerortformeln benötigten Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung werden durch eine Netzberechnung mittels NEPLAN ermittelt:

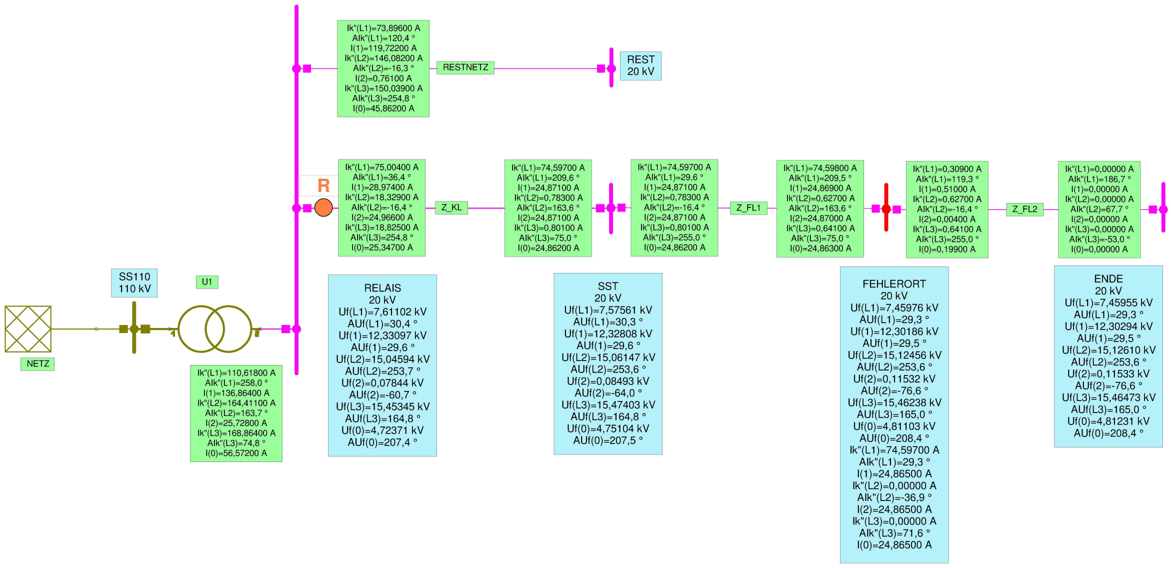


Abbildung 8.13.: Netzberechnung von (8.12) mittels NEPLAN

Legende wie in Abbildung 7.2

Die Winkel der Komponentenströme $\underline{I}^k$ $(k = 0, 1, 2)$ können in der hier verwendeten Version NEPLAN 5.2.1 nicht in die Grafik eingeblendet werden und werden daher der Ergebnistabelle entnommen:

AI(1) = 60, 50°

AI(2) = 29, 29°

AI(0) = 16, 15°

Mit den solcherart erhaltenen Fehlergrößen werden analog zu Abschnitt 8.4 der gerechnete Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$ sowie die Fehlerentfernung für beide Arten der Fehlerwiderstandsermittlung berechnet und gegenübergestellt:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3\cdot\underline{I}_R^2}\right)$
$\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_F^2$	$74.6\,A\,\angle 29.3°$	
$3 \cdot \underline{I}_R^2$	$74.9\,A\,\angle 29.3°$	
$\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$	$76.0\,A\,\angle 16.2°$	
$R_{F,gerechnet}$	$97.0\,\Omega$	$101.6\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$-2.255\,\Omega\,\vert\,-272.77\%$	$-2.255\,\Omega\,\vert\,-272.77\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$1.057\,\Omega\,\vert\,-19.04\%$	$1.212\,\Omega\,\vert\,-7.10\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$1.054\,\Omega\,\vert\,-19.21\%$	$1.218\,\Omega\,\vert\,-6.69\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$1.053\,\Omega\,\vert\,-19.31\%$	$1.213\,\Omega\,\vert\,-7.03\%$

Tabelle 8.8.: tatsächlicher Fehlerstrom an der Fehlerstelle, dreifacher Gegenstrom und Summenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung sowie Fehlerwiderstand und Fehler der Fehlerortformeln für die abschnittsweise homogene Leitung Kabel – Freileitung (8.12) bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 100\,\Omega$

8.6.2. Freileitung – Kabel

Für die Berechnung wird das in Abbildung 8.14 dargestellte Netz verwendet:

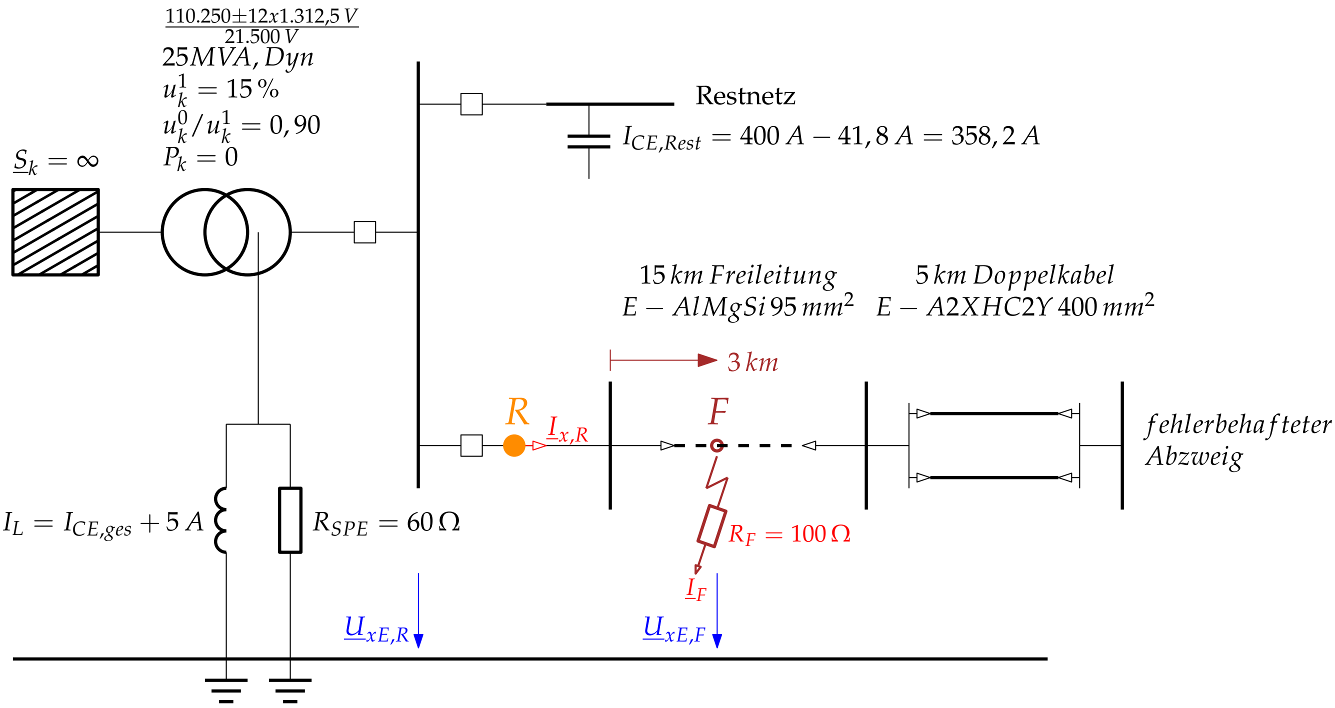


Abbildung 8.14.: Modellnetz für die Fehlerberechnung einer abschnittsweise homogenen Leitung Freileitung – Kabel

Geänderte Charakteristika des Modellnetzes (8.14) gegenüber (8.12):

1. Der fehlerbehaftete Abzweig besteht aus der Abfolge Freileitung – Kabel.

2. Fehlerort: $3\,km$ nach Beginn der Freileitung
   $\underline{Z}_F^1 = \frac{3}{15} \cdot \underline{Z}_{FL}^1 = 3 \cdot (0,358 + j \cdot 0,350)\,\Omega = (1,074 + j \cdot 1,050)\,\Omega$

Die für die Berechnung des Fehlerortes nach den in Abschnitt 8.2 angeführten Fehlerortformeln benötigten Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung werden durch eine Netzberechnung mittels NEPLAN ermittelt:

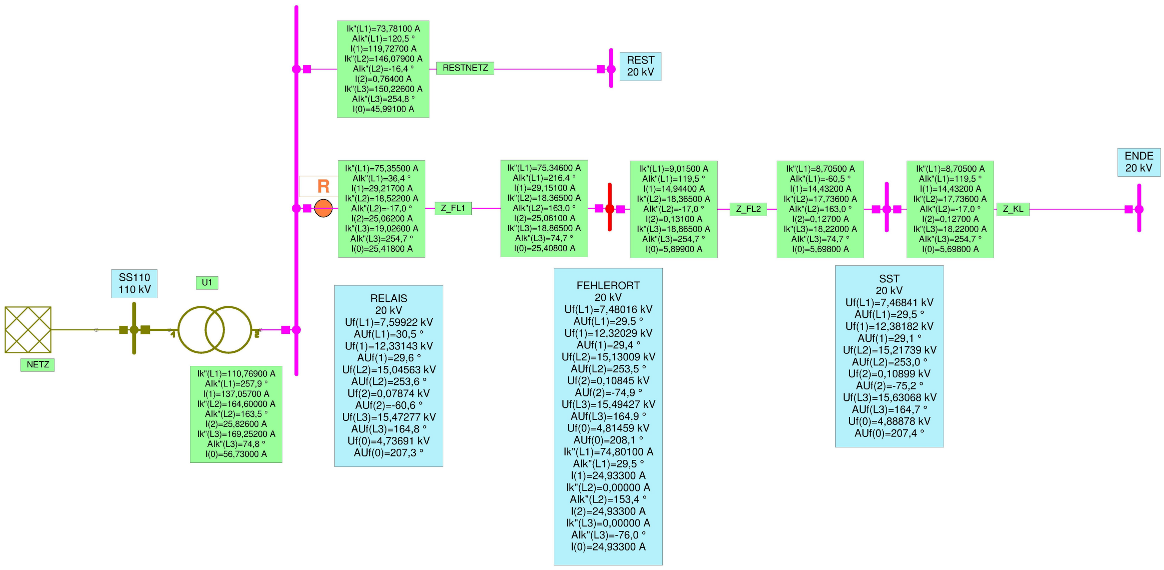


Abbildung 8.15.: Netzberechnung von (8.14) mittels NEPLAN

Legende wie in Abbildung 7.2

Die Winkel der Komponentenströme $\underline{I}^k$ $(k = 0, 1, 2)$ können in der hier verwendeten Version NEPLAN 5.2.1 nicht in die Grafik eingeblendet werden und werden daher der Ergebnistabelle entnommen:

AI(1) = $60,57°$

AI(2) = $29,43°$

AI(0) = $15,99°$

Mit den solcherart erhaltenen Fehlergrößen werden analog zu Abschnitt 8.4 der gerechnete Fehlerwiderstand $R_{F,gerechnet}$ sowie die Fehlerentfernung für beide Arten der Fehlerwiderstandsermittlung berechnet und gegenübergestellt:

	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	für $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$
$\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_F^2$	$74.8\,A\,\angle 29.5°$	
$3 \cdot \underline{I}_R^2$	$75.2\,A\,\angle 29.4°$	
$\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$	$76.3\,A\,\angle 16.0°$	
$R_{F,gerechnet}$	$96.4\,\Omega$	$101.0\,\Omega$
$X^1_{Fehl,konv}\,\vert\,Fehler$	$-2.042\,\Omega\,\vert -294.46\%$	$-2.042\,\Omega\,\vert -294.46\%$
$X^1_{Fehl,Ach}\,\vert\,Fehler$	$1.082\,\Omega\,\vert\,3.02\%$	$1.231\,\Omega\,\vert\,17.27\%$
$X^1_{Fehl,Wm1}\,\vert\,Fehler$	$1.079\,\Omega\,\vert\,2.76\%$	$1.227\,\Omega\,\vert\,17.77\%$
$X^1_{Fehl,Wm2}\,\vert\,Fehler$	$1.078\,\Omega\,\vert\,2.67\%$	$1.232\,\Omega\,\vert\,17.36\%$

Tabelle 8.9.: tatsächlicher Fehlerstrom an der Fehlerstelle, dreifacher Gegenstrom und Summenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung sowie Fehlerwiderstand und Fehler der Fehlerortformeln für die abschnittsweise homogene Leitung Freileitung – Kabel (8.14) bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 100\,\Omega$

8.6.3. Diskussion der Ergebnisse

Bei diesen beiden Beispielen, die durch die unterschiedliche Abfolge von Kabel und Freileitung charakterisiert sind, handelt es sich physikalisch um die Abfolge von „großer" Erdkapazität (Kabel) und „kleiner" Erdkapazität (Freileitung). Da am Anfang der fehlerbehafteten Leitung die Fehlergrößen $\underline{U}_{xE}$ und $\underline{I}_{Lx}$ ungeachtet allfälliger Leitungsinhomogenitäten zur Verfügung stehen und die Fehlerortformeln nur für die homogene Leitung entwickelt wurden, ist es daher von Interesse, inwieweit in diesem Anwendungsfall die rechnerisch ermittelte Fehlerentfernung vom tatsächlichen Fehlerort abweicht. Als Fehlerentfernung wurde jeweils $3\,km$ nach dem Beginn der Freileitung gewählt – mit dem Unterschied, dass bei der Abfolge Kabel – Freileitung die Impedanz des vorgeschalteten Kabels mit dem überwiegenden Teil der Erdkapazität hinzukommt.

In beiden Fällen entspricht der dreifache Gegenstrom $3 \cdot \underline{I}_R^2$ am Anfang der fehlerbehafteten Leitung mit technisch hinreichender Genauigkeit dem tatsächlichen Fehlerstrom $\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}_F^2$ an der Fehlerstelle, vergleiche die Tabellen 8.8 und 8.9. Wiederum tritt der Unterschied mehr im Phasenwinkel als im Betrag auf.

Die Abweichungen der Fehler je nach verwendeter Berechnungsart des Fehlerwiderstand und je nach verwendeter Fehlerortformel zeigen abermals ein uneinheitliches Verhalten, siehe Tabelle 8.10:

	Kabel – Freileitung		Freileitung – Kabel	
	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$	$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$
$R_{F,gerechnet}$	$97.0\,\Omega$	$101.6\,\Omega$	$96.4\,\Omega$	$101.0\,\Omega$
$Fehler\ bei\ X^1_{Fehl,Ach}$	-19.04%	-7.10%	3.02%	17.27%
$Fehler\ bei\ X^1_{Fehl,Wm1}$	-19.21%	-6.69%	2.76%	17.77%
$Fehler\ bei\ X^1_{Fehl,Wm2}$	-19.31%	-7.03%	2.67%	17.36%

Tabelle 8.10.: Fehlerwiderstand und Fehler der Fehlerortformeln für die abschnittsweise homogene Leitung Kabel – Freileitung und Freileitung – Kabel bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 100\,\Omega$

8.7. Resümee

Ziel dieses Abschnittes war es, für bestimmte, realtypische Netze die Anwendung der Fehlerortformel hinsichtlich ihrer Genauigkeit – und damit hinsichtlich ihrer praktischen Brauchbarkeit – zu überprüfen. Aufgrund der Vielzahl an Parametern, die die Fehlergrößen beeinflussen, wäre es erforderlich, jeden einzelnen Parameter, wie z.B. gesamter Erdschlussstrom des Netzes, Nennleistung des versorgenden Transformator, variierende Länge der fehlerbehafteten Leitung, entlang derer der Fehlerort sich verändert, usw. zu verändern, um einen vollständigen Überblick zu erhalten. Tatsächlich wurden die beiden bedeutendsten praktischen Einflüsse genauer untersucht:

- unterschiedliche Art der Sternpunkterdung sowie
- entlang der Leitung variierender Fehlerort ($0 < d/l \leq 1$).

Dazu wurde *eine feste* Netzkonfiguration mit realtypischen Netzelementen bei Veränderung der beiden genannten Einflussgrößen berechnet und die aufgrund von verschiedenen Fehlerortformeln erhaltene Fehlerentfernung der ursprünglich der Rechnung zugrunde gelegten Fehlerentfernung vergleichend gegenüber gestellt und die Abweichungen diskutiert.

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Jene Arten der Sternpunkterdung, bei denen ein ohmscher Widerstand im Sternpunkt des Netzes beteiligt ist, das ist die NOSPE und die KNOSPE, sind geeignet, eine technisch hinreichend genaue Fehlerortbestimmung mit den angegebenen Fehlerortformeln zu geben.
   Die induktive Sternpunkterdung (RESPE) liefert in diesem Zusammenhang unzureichende Ergebnisse.

2. Als Fehlerstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung kann für den an dieser Stelle nicht messbaren Fehlerstrom an der Fehlerstelle $\underline{I}_F = \underline{I}_{L1,F} = 3 \cdot \underline{I}_F^2$ mit technisch hinreichender Genauigkeit der dreifache Gegenstrom $3 \cdot \underline{I}_R^2$ herangezogen werden, was die in den Gleichungen (6.16) bzw. (7.1) formulierte Erkenntnis aus der Netzberechnung untermauert.
   Der am Anfang der fehlerbehafteten Leitung ebenfalls messbare Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma,R} = 3 \cdot \underline{I}_R^0$ ist hierfür nicht geeignet. Der Unterschied äußerst sich sowohl im Betrag als auch im Phasenwinkel, wobei allerdings der Unterschied im Phasenwinkel deutlich ausgeprägter ist.

3. Die Frage, nach welcher Methode der Fehlerwiderstand aus den Messgrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung bestimmt werden soll, das heißt entweder mittels des Summenstromes [$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$] oder mittels des dreifachen Gegenstromes [$R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{3 \cdot \underline{I}_R^2}\right)$], kann nicht eindeutig beantwortet werden. Bei NOSPE und KNOSPE sind die Abweichungen vom wahren Wert zwar zahlenmäßig nicht sehr beträchtlich, da aber diese Rechenwerte für die Fehlerortbestimmung in den Fehlerortformeln verwendet werden, kann eine Befürwortung der einen oder anderen

Methode nur nach Beurteilung der nach der Fehlerortbestimmung auftretenden Fehler ausgesprochen werden. Die induktive Sternpunkterdung (RESPE) liefert auch in diesem Zusammenhang jedenfalls unzureichende Ergebnisse.

4. Einen Aufschluss über die Abweichung der tatsächlichen Fehlerentfernung im Vergleich zu den berechneten Fehlerorten je nach verwendeter Fehlerortformel und in Abhängigkeit der Art der Sternpunkterdung geben die Abbildungen 8.3 und 8.5 sowie Tabelle 8.7 für NOSPE und die Abbildungen 8.9 und 8.11 sowie Tabelle 8.6 für KNOSPE.
   Abhängig von der Größe des ohmschen Sternpunktwiderstandes und von der verwendeten Berechnungsmethode für die Bestimmung des Fehlerwiderstandes liegen die Unterschiede in den Fehlern stets innerhalb eines Prozentpunktes. Dieses Ergebnis überrascht; ist doch die Detaillierung in der Fehlerortformel für den Fehler an einer beliebigen Stelle im Leitungsverlauf ($\underline{X}^1_{Fehl,Wm2}$; Gleichung 6.34) wesentlich höher als bei der Verwendung der relativ einfachen Fehlerortformel gemäß [Ach08] ($\underline{X}^1_{Fehl,Ach}$; Gleichung 6.22)!
   - Bei NOSPE tritt der kleinste Fehler auf, wenn für den Sternpunktwiderstand ein kleiner Wert (hier: $R_{SPE} = 8\,\Omega$) und für die Bestimmung des Fehlerwiderstand der Summenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung, also $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, verwendet wird.
   - Bei KNOSPE wird das bessere Ergebnis bei größerem Sternpunktwiderstand (hier: $R_{SPE} = 60\,\Omega$) und ebenfalls bei der Methode mit dem Summenstrom, also $R_F = Re\left(\frac{\underline{U}_{1E,R}}{\underline{I}_{\Sigma,R}}\right)$, erzielt.

Der Exkurs zur Fehlerortberechnung einer *abschnittsweise homogenen* Leitung untersuchte, inwieweit die deutlich ausgeprägte Abfolge von „großer“ Erdkapazität (Kabel) und „kleiner“ Erdkapazität (Freileitung) die Fehler in der Berechnung beeinflusst. Die Entwicklung einer exakten Fehlerortformel für den Fehler im Leitungsverlauf einer abschnittsweise homogenen Leitung unter Berücksichtigung der Betriebs- und Erdkapazitäten analog zu Abschnitt 6.2 stellt kein prinzipielles Problem dar. Unter der Bedachtnahme, dass die Ergebnisse für den Fehler im Leitungsverlauf auf einer abschnittsweise homogenen Leitung – wie das Beispiel in Abschnitt 8.6 und das Ergebnis in Tabelle 8.10 zeigt – mit den Formeln der homogenen Leitung eine brauchbare Genauigkeit aufweist, wird der Aufwand hierfür keine wesentliche Verbesserung bei der Bestimmung der Fehlerentfernung nach sich ziehen.

Im Falle einer praktischen Realisierung, wenn beispielsweise daran gedacht ist, einen solchen Algorithmus in den Fehlerorter von Distanzschutzeinrichtungen zu implementieren, bedarf es daher einer sorgfältigen Abwägung, wie aufwändig die beabsichtigte Vorgangsweise im Vergleich zu dem erzielbaren Zugewinn an Ortungsgenauigkeit ist.

9. Pilotversuch

In den vorangegangenen Abschnitten wurde Schritt für Schritt ein Verfahren untersucht, das in (Verteiler-)Netzen einen praktikablen Weg ermöglicht, mit technisch hinreichender Genauigkeit bei Erdfehlern eine Fehlerortbestimmung mittels Distanzschutzgeräten durchzuführen.

Dabei hat sich herausgestellt, dass die Art der Sternpunkterdung des Netzes ein bestimmender Parameter für die erzielbare Qualität an Ortungsgenauigkeit ist.

Ganz allgemein werden in den meisten Verteilernetzen überwiegend

- entweder die NOSPE, wenn betrieblich ein Erdschluss abgeschaltet werden soll,
- oder die RESPE, wenn betrieblich der Weiterbetrieb des Netzes mit einem Erdfehler für eine bestimmte Zeit möglich sein soll,

angewendet. Bei NOSPE eignet sich das untersuchte Verfahren ohne weitere primärseitige Maßnahmen. Bei RESPE ist es aufgrund der Untersuchungen in den vorangegangenen Abschnitten dann anwendbar, wenn eine bestimmte Zeit nach Auftreten des Erdschlusses ein ohmscher Widerstand für eine gewisse Zeit parallel zur Petersenspule eingeschaltet wird (= KNOSPE), der einen Pilotstrom hervorruft, mit dessen Hilfe die Fehlerortung erfolgen kann (Verfahren gemäß [AF07], vergleiche auch Abschnitt 1.3 und Abbildung 1.1).

Das angegebene Verfahren wurde sowohl in Form von Simulationsrechnungen als auch durch das Abspielen von Fehlergrößen, die aus Erdschlussversuchen erhalten wurden, erprobt. Die Umsetzung in einem Verteilernetz unter realitätsnahen Verhältnissen sowie eine Implementierung des Verfahrens in handelsübliche Distanzschutzgeräte fand noch nicht statt. Es konnte ein Verteilernetzunternehmen gefunden werden, das bereit war, die praktische Anwendung und die Wirksamkeit des Verfahrens in der Realität in Form eines Pilotprojektes zu erproben, vergleiche auch [Wur11]:

- Das Netz des Pilotversuches wird mit RESPE betrieben. Die konventionelle Erdschlussortung erfolgt nach der „$cos\varphi$“-Methode mit Vergrößerung des natürlichen Wattreststromes, wobei in mehr als rund 70 % aller stehenden Erdfehler der erdschlussbehaftete Abzweig richtig erkannt wird.
- Um nicht auf Simulationsrechnungen oder auf das Abspielen von Fehlergrößen, die bei reellen Versuchen erhalten werden, angewiesen zu sein, wurden Distanzschutzgeräte mit dem modifizierten Algorithmus eingesetzt. Dazu war es notwendig, Hersteller von Distanzschutzgeräten dafür zu gewinnen, diesen Algorithmus in ihre Geräte zu übertragen. In der Tat ist es gelungen, drei Hersteller von Distanzschutzgeräten zu finden, die dankenswerterweise diesen Fehlerortalgorithmus in ein Testgerät implementiert haben.

- Damit der Pilotversuch unter realistischen Bedingungen abläuft, wird mit dem Netz, in dem der Pilotversuch stattfindet, die alltägliche öffentliche Kundenversorgung bewerkstelligt.
- Wie man einerseits von der Angabe der Fehlerentfernung X_{Fehl} bei Phase-Phase-Fehlern weiß und andererseits aus vorangegangenen Erdschlussversuchen erkannt wurde, ist eine vollkommen exakte Angabe der Fehlerentfernung praktisch nicht möglich. Wenngleich auch die Angabe der Fehlerreaktanz bei Phase-Phase-Fehlern oft recht gut zur Fehlerstelle hinführt, wäre es ein Erfolg für das hier eingesetzte Verfahren, wenn sich durch die Angabe der Fehlerentfernung beim Erdfehler die Fehlerstelle auf beispielsweise ein Drittel der Leitungslänge oder genauer genau bestimmen ließe. Für diese aus dem praktischen Betrieb stammende Festlegung wurde der Begriff „Fehlerbereichsortung" geprägt.

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Beschreibung des Pilotversuches samt seiner Auswahlkriterien und der Auswertung der Versuchsergebnisse. Durch die am Anfang der fehlerbehafteten Leitung gemessenen Fehlergrößen wird gemäß den Formeln (3.35), (6.22), (6.14) und (6.34) die Fehlerentfernung bestimmt, mit den von den Versuchsgeräten ermittelten Fehlerentfernungen verglichen und dem tatsächlichen Fehlerort, der aufgrund der Rückmeldung des Betriebspersonals bekannt ist, gegenübergestellt.

9.1. Netzstruktur und Aufbau des Pilotversuches

Das Netz des Pilotversuches ist wie folgt charakterisiert:

- induktive Sternpunkterdung (RESPE) mit Petersenspule, zu der ein ohmscher Sternpunktwiderstand von $R_{SPE} = 60\,\Omega$ temporär parallel geschaltet wird,
- gemischtes Kabel- und Freileitungsnetz,
- strahlenförmiger Betrieb mit vier Abzweigen und
- Aufrechterhaltung der Kundenversorgung, d.h. der Pilotversuch findet mit Laststrom statt.

In einem Umspannwerk werden drei 20-kV-Abzweige, die als stark erdschlussanfällig bekannt sind, mit je einem Testgerät eines jeden Herstellers ausgerüstet. Diese Distanzschutzgeräte werden nur auf Meldung geschaltet und mittels Fernzugriff können die Gerätereaktionen ausgelesen werden. Abbildung 9.1 zeigt den Netzaufbau und die Netzdaten des Pilotversuches. Um von den Störschriebaufzeichnungen der eingesetzten Schutzgeräte unabhängig zu sein, wurde zusätzlich ein Transientenrecorder mit einer sample rate von $9,6$ kHz installiert, siehe Abbildung 9.2.

Beim Aufbau des Pilotversuches wurden weiters folgende praktische Randbedingungen berücksichtigt, so dass eine eventuelle spätere betriebliche Anwendung ohne weitere Anpassungen umsetzbar ist:

- Die in den Abzweigen vorhandenen Strom- und Spannungswandler sollen verwendet werden können.
- Die bestehende Funktionalität des 20-kV-Distanzschutzes soll bestehen bleiben.

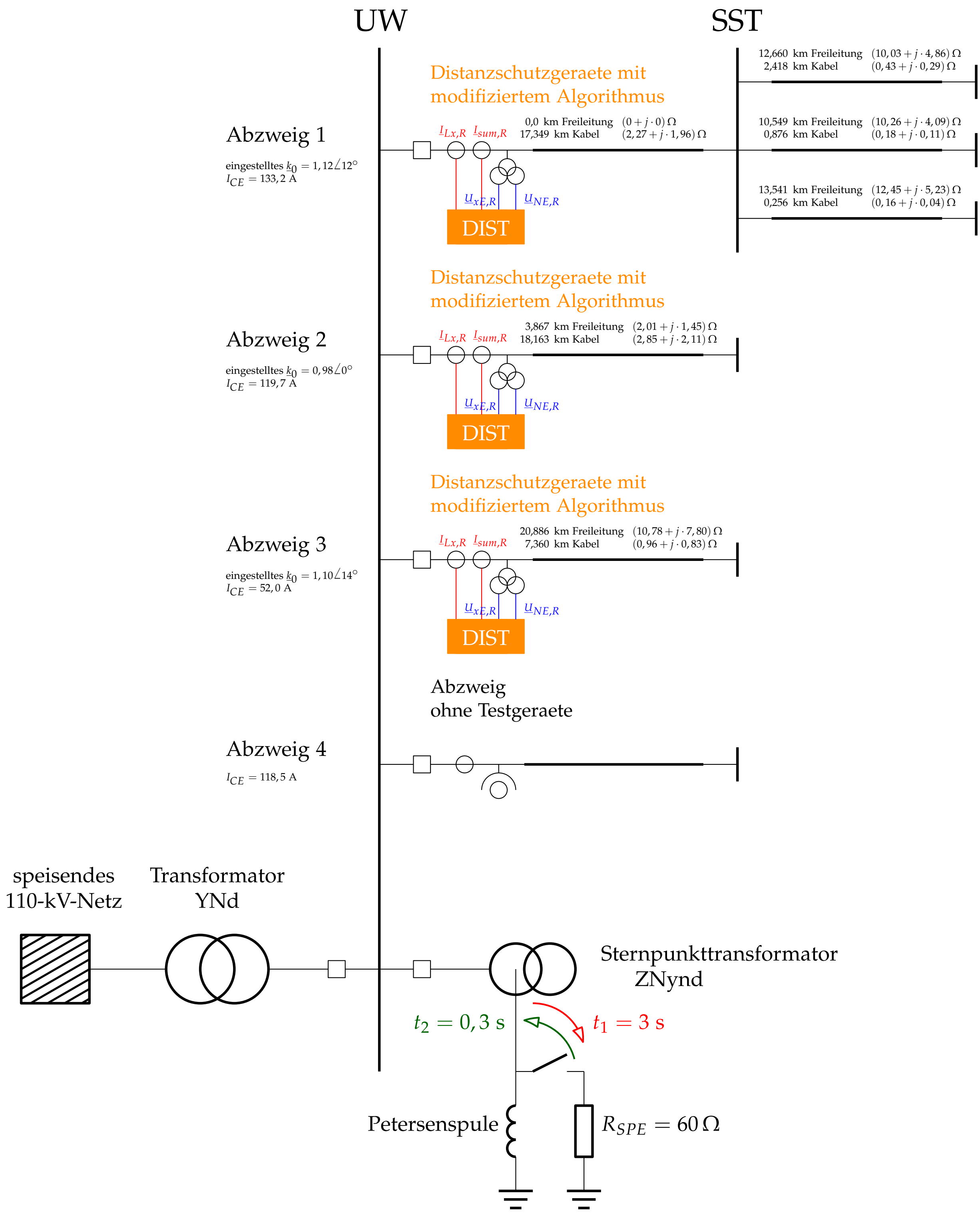


Abbildung 9.1.: Netzaufbau des Pilotversuches (angegebene Impedanzen gelten für die jeweilige Hauptleitung)

UW Umspannwerk
SST Schaltstation
t_1 Zeitdauer nach Eintritt der Erdschlusses, nach der der Sternpunktwiderstand eingeschaltet wird
t_2 Zeitdauer, während der der Sternpunktwiderstand eingeschaltet bleibt

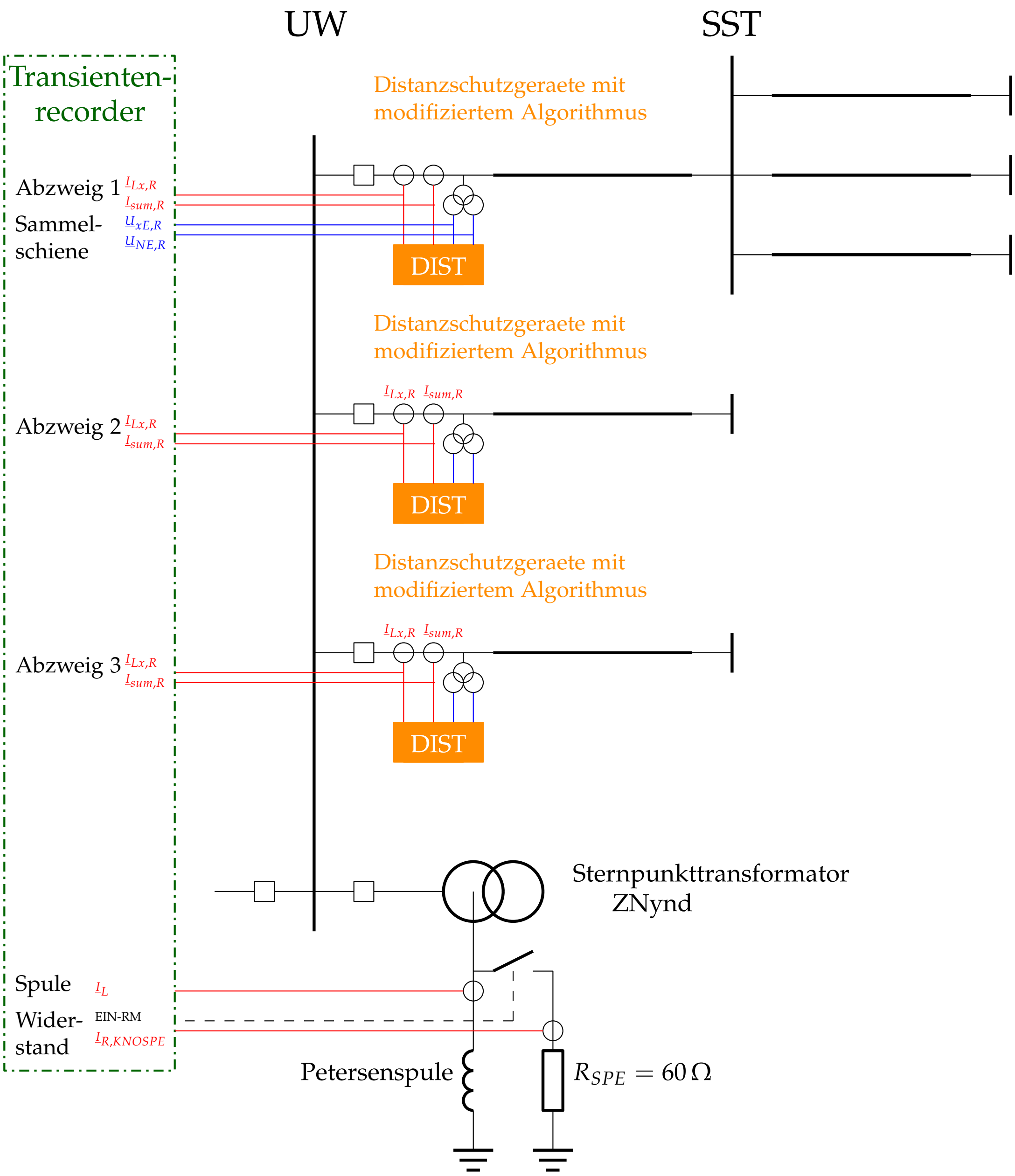


Abbildung 9.2.: Messgrößenaufzeichnung mittels Transientenrecorder

von der Sammelschiene im Umspannwerk:

Leiter-Erde-Spannungen $\underline{U}_{xE}$ $(x = 1, 2, 3)$

Sternpunkt-Erde-Spannung $\underline{U}_{NE}$, gemessen an der offenen Dreieckwicklung des Spannungswandlersatzes

von jedem Abzweig mit einem Testgerät:

Leiterströme $\underline{I}_{Lx}$ $(x = 1, 2, 3)$

Summenstrom $\underline{I}_{\Sigma}$, gemessen mittels Kabelumbauwandler

Strom durch die Petersenspule: $\underline{I}_L$

Strom durch den Sternpunktwiderstand: $\underline{I}_{R,KNOSPE}$

EIN-Stellung des Leistungsschalters, der den Sternpunktwiderstand einschaltet, als Binärsignal.

Die positive Zählrichtung der Ströme und Spannungen entspricht der Zählpfeilannahme in den voran gegangenen Abschnitten.

Abbildung 9.3 zeigt einen Musterstörschrieb stellvertretend für sämtliche Aufzeichnungen im Falle eines (stehenden) Erdschlusses:

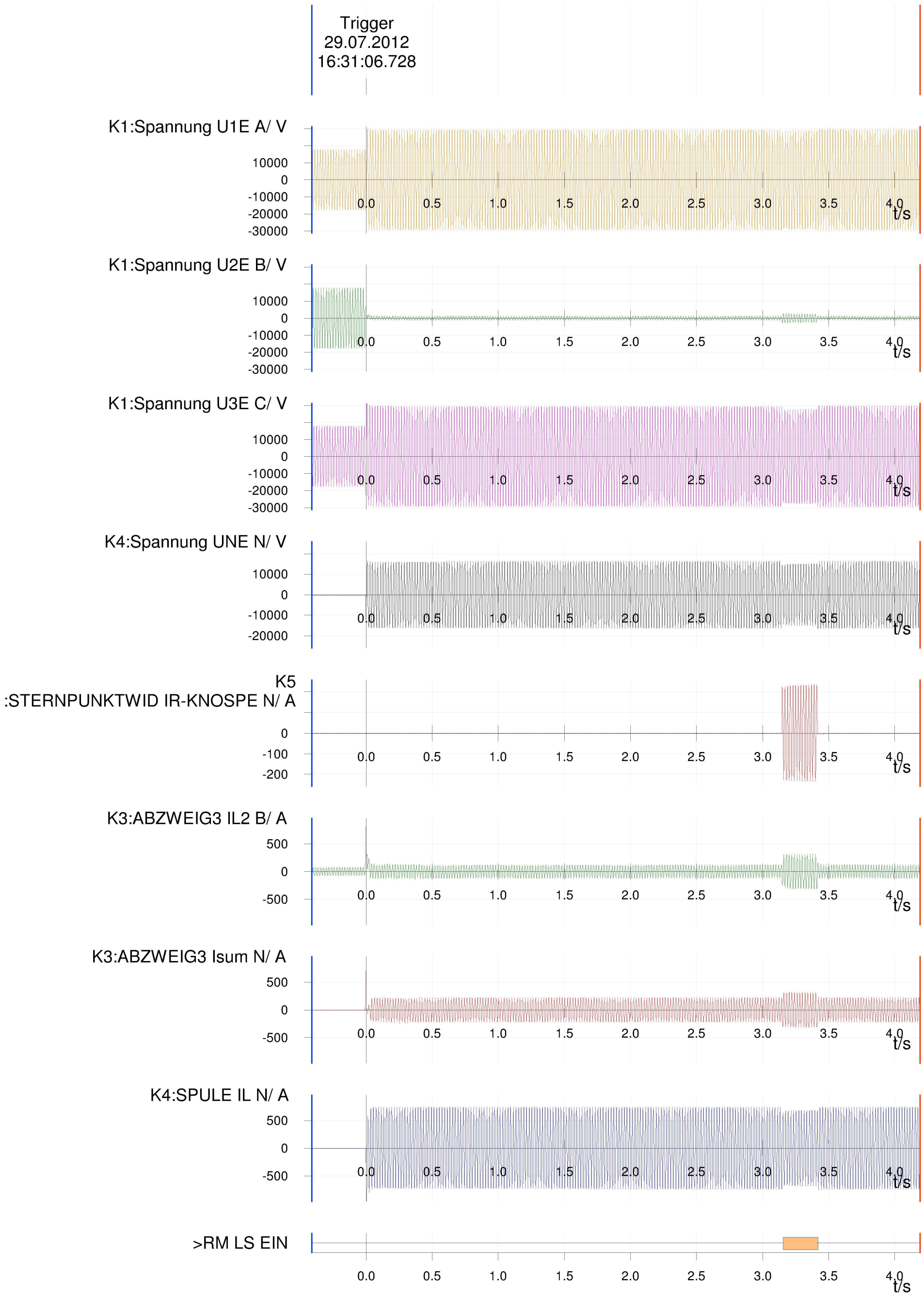


Abbildung 9.3.: Musterstörschrieb des Pilotversuches
Aus Platzgründen wurde die Anzahl der Spuren bei den Abzweigströmen auf den Leiter- und auf den Summenstrom des fehlerbehafteten Abzweiges (hier: $\underline{I}_{L2}$ und $\underline{I}_{sum}$ des Abzweiges 3) eingeschränkt.

Deutlich erkennbar ist der Erdschluss in Phase L2. Im Zeitraum $t2 \approx 0.3\,s$, während der der ohmsche Sternpunktwiderstand eingeschaltet ist, tritt beim fehlerbehafteten Abzweig der Pilotstrom $\underline{I}_{R,KNOSPE}$ nicht nur in dessen Summenstrom, sondern auch im Leiterstrom der fehlerbehafteten Phase in Erscheinung.

Die für die weitere Verarbeitung benötigten Messgrößen werden mit der Messtabellenfunktion des Comtrade-Viewers, mit dem die Störschriebaufzeichnungen ausgewertet werden, angezeigt:

Meßsignal	Effektiv	Wert	Leiter	Wirk	Imag	3.Harmon.	5.Harmon.
K1:ABZWEIG1 IL1 A	69,327 A	69,220 A	27,3°	61,497 A	31,774 A	1,2%	5,3%
K2:ABZWEIG2 IL1 A	46,745 A	46,663 A	15,6°	44,946 A	12,543 A	1,0%	5,5%
K3:ABZWEIG3 IL1 A	40,727 A	40,539 A	-1,6°	40,522 A	-1,1621 A	2,5%	8,2%
K1:ABZWEIG1 IL2 B	38,505 A	38,128 A	164,0°	-36,654 A	10,499 A	0,3%	13,6%
K2:ABZWEIG2 IL2 B	37,312 A	37,112 A	168,0°	-36,303 A	7,7077 A	0,4%	10,1%
K3:ABZWEIG3 IL2 B	214,98 A	214,88 A	168,6°	-210,65 A	42,430 A	1,1%	2,7%
K1:ABZWEIG1 IL3 C	106,93 A	106,83 A	95,4°	-9,9736 A	106,37 A	0,6%	3,9%
K2:ABZWEIG2 IL3 C	82,174 A	82,109 A	92,0°	-2,8643 A	82,059 A	0,9%	3,8%
K3:ABZWEIG3 IL3 C	103,53 A	103,48 A	84,3°	10,287 A	102,97 A	0,7%	2,7%
K5:STERNPUNKTWID	165,37 A	165,35 A	-5,1°	164,70 A	-14,675 A	0,7%	1,2%
K1:ABZWEIG1 Isum N	151,34 A	151,25 A	84,4°	14,764 A	150,53 A	0,9%	3,1%
K2:ABZWEIG2 Isum N	102,54 A	102,47 A	86,8°	5,7786 A	102,31 A	0,9%	3,3%
K3:ABZWEIG3 Isum N	224,93 A	224,64 A	138,3°	-167,81 A	149,34 A	0,6%	4,8%
K4:SPULE IL N	0,4859 kA	0,4859 kA	-94,2°	-0,03564 kA	-0,4846 kA	0,2%	0,1%
K1:Spannung U1E A	20,529 kV	20,526 kV	-33,7°	17,086 kV	-11,376 kV	1,0%	1,0%
K1:Spannung U2E B	1,6458 kV	1,6353 kV	-160,5°	-1,5412 kV	-0,5467 kV	1,7%	10,6%
K1:Spannung U3E C	19,521 kV	19,519 kV	30,9°	16,755 kV	10,013 kV	0,9%	1,3%
K4:Spannung UNE N	10,689 kV	10,688 kV	-3,4°	10,669 kV	-0,6366 kV	0,6%	0,6%

Abbildung 9.4.: Messtabelle des Musterstörschriebes (Abbildung 9.3) zu einem Zeitpunkt, in dem der Sternpunktwiderstand eingeschaltet ist

Die zum Musterstörschrieb (Abbildung 9.3) gehörenden Zeigerbilder können mit dem selben Comtrade-Viewer generiert werden und sind nachfolgend dargestellt:

- Das linke Zeigerbild zeigt die Sternpunkt-Erde-Spannung $\underline{U}_{NE}$, den Strom durch die Petersenspule $\underline{I}_L$ sowie die Summenströme der Abzweige 1 bis 3 *vor* dem Einschalten des Sternpunktwiderstandes: Da die ohmsche Komponente des Summenstromes des Abzweiges 3 bei der gewählten positiven Zählrichtung der Ströme und Spannungen entgegen gesetzt zur Sternpunkt-Erde-Spannung orientiert ist, wird dieser Abzweig als fehlerbehaftet erkannt.
- Das rechte Zeigerbild (passend zur Messtabelle Abbildung 9.4) zeigt die Messgrößen während der Zeit, in der der Sternpunktwiderstand eingeschaltet ist: Wie im Zeitdiagramm in Abbildung 9.3 erkennbar, äußert sich der (zusätzliche) Pilotstrom $\underline{I}_{R,KNOSPE}$ infolge des eingeschalteten Sternpunktwiderstandes unter anderem im Summenstrom des fehlerbehafteten Abzweiges 3; und zwar durch eine deutlich vergrößerte ohmsche Komponente in bezug auf die Sternpunkt-Erde-Spannung $\underline{U}_{NE}$.

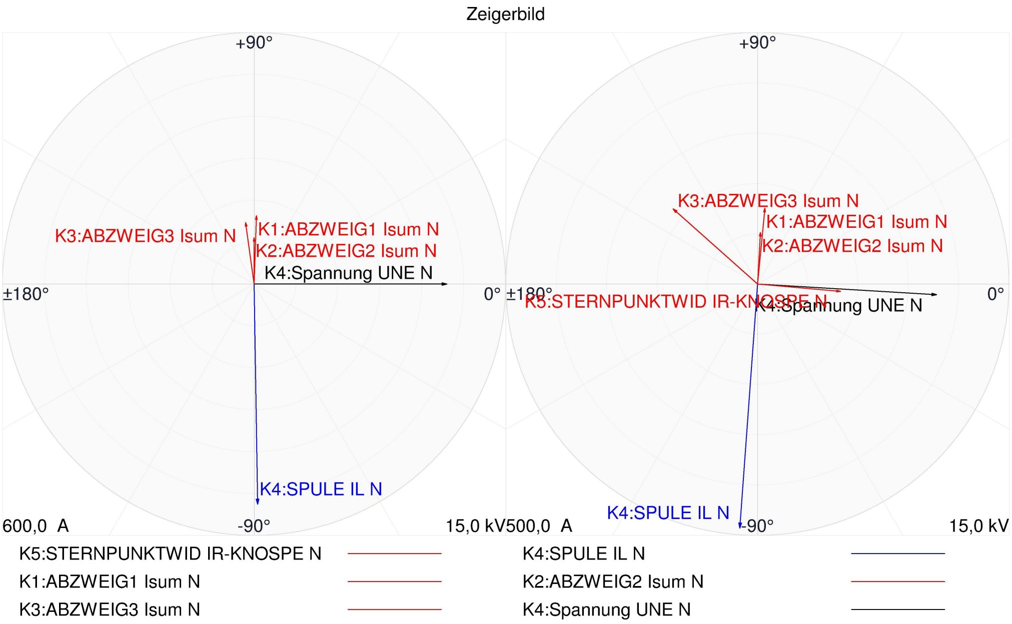


Abbildung 9.5.: Zeigerbilder des Musterstörschriebes

Zeitpunkt links:	vor dem Einschalten des Sternpunktwiderstandes
Zeitpunkt rechts:	während dem eingeschalteten Sternpunktwiderstand

Somit ist verifiziert, dass der Messaufbau des Pilotversuches verlässliche Messgrößen liefert, mit denen die Fehlerortbestimmung durchgeführt werden kann.

Abbildung 9.6 zeigt den Aufbau des Pilotversuches im Umspannwerk:

(a) Sternpunkt-Leistungsschalter und -widerstand

(b) Innenansicht Sternpunktwiderstand

Abbildung 9.6.: Aufbau des Pilotversuches im Umspannwerk

Die Einhausung von Leistungsschalter und Widerstand ist aufgrund der Witterungsverhältnisse insbesondere während des Winters erforderlich.

9.2. Auswertung der Dauererdschlüsse

Seit Inbetriebnahme des Pilotversuches traten an den drei Abzweigen des Testnetzes, die mit Versuchsgeräten ausgerüstet sind, insgesamt fünf dauernde Erdschlüsse auf, deren Auswertung in Tabelle 9.1 angegeben ist.

Die für die Auswertung benötigten Messgrößen wurden über die Messtabellenfunktion des ComtradeViewers erhalten. Für die Berechnung des Fehlerortes sind nur die tatsächlich gemessenen Größen wie Phase-Erde-Spannung des fehlerbehafteten Leiters und die drei Leiterströme erforderlich. In der Auswertung werden – gleich wie in den Testgeräten – Summenstrom und Gegenstrom aus den gemessenen Leiterströmen berechnet.

Der tatsächliche Fehlerort und somit die tatsächliche Fehlerentfernung $\underline{Z}^1_{Fehl,tats}$ sind aufgrund der Angabe des System Operators des Netzes bekannt.

Der Fehlerwiderstand wird gemäß Gleichung (6.17) berechnet. Die Bestimmung des Fehlerortes erfolgt sowohl nach der konventionellen Methode (Gleichung 3.35) als auch gemäß der Formel nach [Ach08] (Gleichung 6.22) sowie den exakten Formeln für den Leitungsende-Fehler (Gleichung 6.14) und für den Fehler im Leitungsverlauf (Gleichung 6.34).

Da auch das Ergebnis der Fehlerortung von einem Hersteller eines Testgerätes vorliegt, ist dieses in der letzten Zeile von Tabelle 9.1 ebenfalls angeführt.

Wie schon in den Abschnitten 8.5.3 und 8.7 mit synthetischen Messgrößen gezeigt, wird das Ortungsergebnis mit wachsender Detaillierung (Formel gemäß [Ach08] $\rightarrow$ exakte Formel für den Leitungsende-Fehler $\rightarrow$ exakte Formel für den Leistungsmitte-Fehler) wohl immer genauer, aber der zahlenmäßige Unterschied ist speziell in Hinblick auf die praktische Anwendung nicht erheblich – noch dazu wenn man bedenkt, dass der Rechenaufwand durch die im Schutzgerät zur Verfügung stehende Rechnerleistung beschränkt wird. Aus diesem Grund wird wohl die Fehlerortbestimmung nach der exakten Formel für den Leistungsmitte-Fehler (6.34) nicht zur Anwendung kommen. Wie schon in den Rechnungen von Abschnitt 8.5.3 zu erkennen war, liegt auch mit tatsächlichen Messgrößen der Unterschied in der Ortungsgenauigkeit zwischen der Formel gemäß [Ach08] (6.22) und der exakten Formel für den Leitungsende-Fehler (6.14) im Bereich weniger Prozentpunkte. Da (6.14) als zusätzlichen Parameter die Kapazität des Abzweiges X_{CEAbg} bzw. X_{CEAbg2} benötigt und dieser Parameter sich mit jeder Änderung des Schaltzustandes ebenfalls ändert, wird der Einsatz dieser Gleichung für die Fehlerortung im praktischen Betrieb wohl nicht zum Einsatz kommen können.

Die Testgeräte haben für die Fehlerortung beim einpoligen Fehler die Methode gemäß [Ach08], Gleichung (6.22), implementiert. Tatsächlich zeigt auch das Messergebnis des Geräteherstellers mit praktisch vernachlässigbarer Abweichung den gleichen Wert wie in der Nachrechnung mit den Messgrößen an!

In Abbildung 9.7 ist das Ortungsergebnis für die fünf Dauererdschlüsse grafisch dargestellt: in roter Farbe ist der tatsächliche Fehlerort, in blauer Farbe ist der gemäß [Ach08] bestimmte Fehlerort eingetragen. (Da sich der gerechnete Wert von dem Wert, der vom Schutzgerät angezeigt wurde, kaum unterscheidet, wird auf eine diesbezügliche Detaillierung verzichtet.)

Datum Aufzeichnung Nr.	23.08.2011 86	12.02.2012 94	27.02.2012 97	28.02.2012 98	29.07.2012 130
Messgrößen:					
Phase Lx	3	1	3	3	2
$\underline{U}_{xE,R}$	$3460\,V \angle -155.6°$	$2330\,V \angle -158.9°$	$3340\,V \angle -136.8°$	$2370\,V \angle -169.2°$	$1640\,V \angle -157.1°$
$\underline{U}_{NE,R}$	$8960\,V \angle 0°$	$10100\,V \angle 0°$	$9410\,V \angle 0°$	$9410\,V \angle 0°$	$10700\,V \angle 0°$
$\underline{I}_{Lx,R}$	$190\,A \angle 171.0°$	$121\,A \angle 172.4°$	$173\,A \angle 172.5°$	$212\,A \angle 171.0°$	$215\,A \angle 172.1°$
$\underline{I}_{\sum,R}$	$198\,A \angle 140.1°$	$58.4\,A \angle -174.4°$	$197\,A \angle 137.1°$	$192\,A \angle 144.4°$	$224\,A \angle 141.8°$
tatsächlicher Fehlerort:					
Abzweig	1	3	1	2	3
$\underline{Z}^1_{Fehl,tats}/\Omega$	$11.60 + j \cdot 6.04$	$2.045 + j \cdot 1.965$	$4.149 + j \cdot 2.949$	$1.952 + j \cdot 1.363$	$1.861 + j \cdot 1.807$
gerechnete Größen:					
$\underline{I}_{\sum,R} = 3 \cdot \underline{I}^0_R$	$196.3\,A \angle 139.8°$	$132.9\,A \angle 162.5°$	$195.3\,A \angle 136.9°$	$191.9\,A \angle 144.4°$	$215.1\,A \angle 141.3°$
$\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}^2_R$	$147.0\,A \angle 171.7°$	$109.4\,A \angle 174.3°$	$141.8\,A \angle 169.5°$	$154.1\,A \angle 168.7°$	$146.6\,A \angle 176.6°$
Fehlerortung:					
$R_F = Re\left(\frac{U_{1E,R}}{I_{\Sigma,R}}\right)$ ... (6.17)	$7.6\,\Omega$	$13.7\,\Omega$	$1.1\,\Omega$	$8.5\,\Omega$	$3.6\,\Omega$
$\underline{Z}^1_{Fehl,konv}/\Omega$ ... (3.35)	$6.19 + j \cdot 5.91$	$7.81 + j \cdot 3.89$	$3.83 + j \cdot 7.82$	$5.15 + j \cdot 3.25$	$2.83 + j \cdot 2.34$
Fehler bei $X^1_{Fehl,konv}$	−2.1%	97.9%	165.2%	138.5%	29.5%
$\underline{Z}^1_{Fehl,Ach}/\Omega$ ... (6.22)	$3.49 + j \cdot 5.39$	$2.20 + j \cdot 3.92$	$3.43 + j \cdot 7.75$	$1.83 + j \cdot 2.66$	$1.67 + j \cdot 2.07$
Fehler bei $X^1_{Fehl,Ach}$	−10.8%	99.6%	162.8%	94.8%	14.3%
$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm1}/\Omega$ ... (6.14)	$4.29 + j \cdot 5.25$	$2.56 + j \cdot 3.83$	$4.65 + j \cdot 7.71$	$2.16 + j \cdot 2.54$	$1.81 + j \cdot 2.04$
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm1}$	−13.0%	94.7%	161.4%	86.0%	12.7%
$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm2}/\Omega$ ... (6.34)	$3.83 + j \cdot 5.52$	$2.31 + j \cdot 3.95$	$3.93 + j \cdot 8.20$	$2.02 + j \cdot 2.65$	$1.70 + j \cdot 2.07$
Fehler bei $X^1_{Fehl,Wm2}$	−8.6%	100.9%	178.2%	94.7%	14.4%
Ergebnis Testgerät:					
X^1_{Fehl}/Ω	5.40	3.99	7.49	2.91	2.06
Fehler bei X^1_{Fehl}	−10.6%	103.1%	154.0%	113.5%	14.4%

Tabelle 9.1.: Auswertung der stehenden Erdschlüsse des Pilotversuches im Zeitraum 11.01.2011 bis 30.04.2013

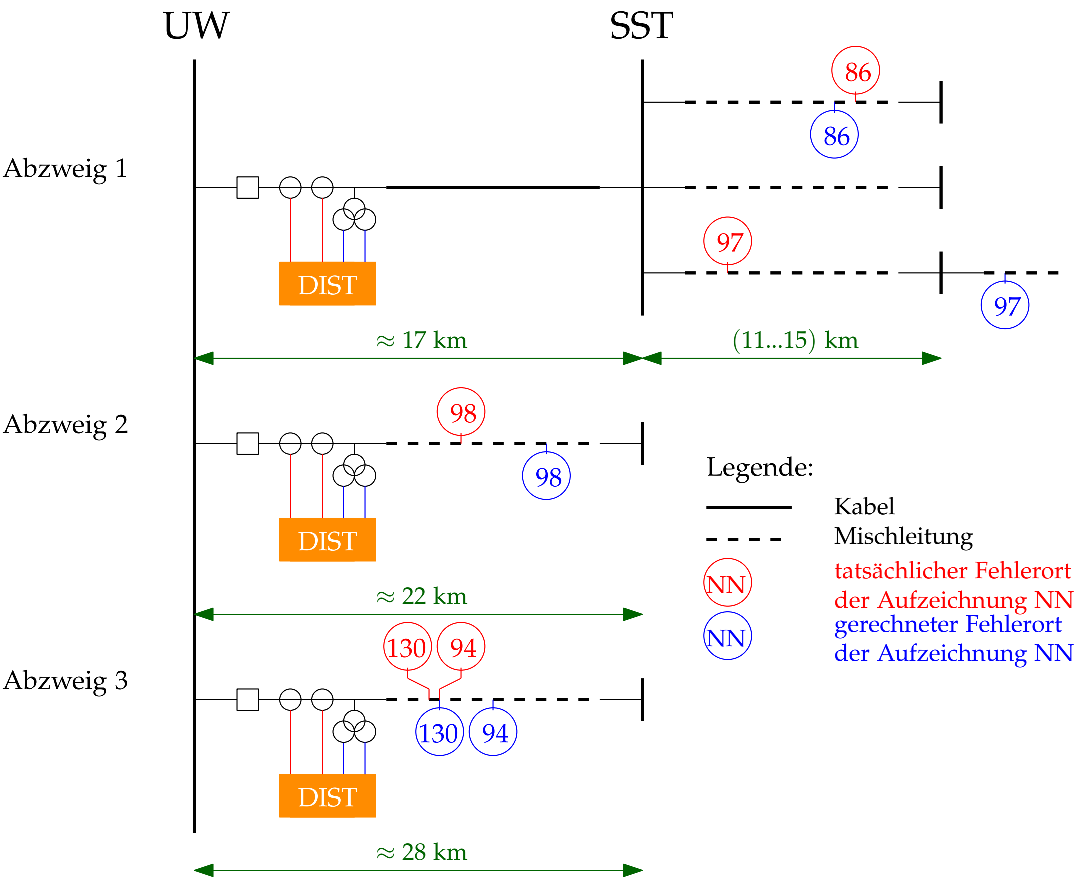


Abbildung 9.7.: grafische Darstellung der Versuchsergebnisse

1. Von den fünf Dauererdschlüssen konnten zwei Erdschlussorte (Aufzeichnung Nr. 86 und 130) mit großer Genauigkeit bestimmt werden.
2. Bei den anderen, weniger exakten Fehlerortungen muss in Betracht gezogen werden, dass in der Bestimmungsgleichung der Erdfaktor $\underline{k}_0$ enthalten ist. Seine Angabe ist exakt nur für die homogene Leitung möglich. Bei einer wechselnden Abfolge von unterschiedlichen Leitungsstücken, wie es im praktischen Netzbetrieb fast ausschließlich der Fall ist, wird für $\underline{k}_0$ prinzipiell nur ein angenäherter Mischwert angebbar sein. Dieser wird realistischerweise nur messtechnisch bestimmbar sein; das Messergebnis wird aber wiederum nur für einen festen Schaltzustand zutreffend sein. Insofern dürfte hierin der Grund für die Abweichung zu suchen sein.
   Es ist aber auch denkbar, aus der Kenntnis der tatsächlichen Fehlerentfernung $\underline{Z}^1_{Fehl,tats}$ einen korrigierten Erdfaktor $\underline{k}_{0,korr}$ zu errechnen und mit diesem die weiteren Fehler zu berechnen. Aufgrund der im Pilotversuch sehr selten auftretenden Dauererdschlüsse liegen damit zurzeit keine Ergebnisse vor.

9.3. Resümee

Mit diesem Pilotversuch konnte gezeigt werden, dass es mit dem in [AF07] und [Ach08] angegebenen Verfahren möglich ist, in einem induktiv geerdeten Netz bei einem Erdfehler eine Fehlerentfernung anzugeben, ohne den Erdfehler abschalten zu müssen. Die eingesetzten Distanzschutzgeräte haben hierfür eine modifizierte Fehlerortformel (Gleichung 6.22) implementiert. Sowohl die mit den aus Transientenrecorderaufzeichnungen erhaltenen Messgrößen errechnete Fehlerentfernung als auch die aus dem Schutzgerät unmittelbar durchgeführte Fehlerortauswertung weist den selben Wert auf. Die Implementierung des Verfahrens in modifizierte Distanzschutzgeräte und die damit verbundenen Aufbauten im Verteilernetz können somit als technisch anwendbar bezeichnet werden.

Im Zuge der (allerdings wenigen) dauernden Erdschlüsse, die während dieses Pilotversuches bislang registriert werden konnten, sind jedoch auch Fehlerortungsergebnisse aufgetreten, die hinsichtlich der Ortungsgenauigkeit noch Optimierungsbedarf nach sich ziehen. Hierbei handelt es sich aber nicht um Verbesserungen betreffend das Verfahren selbst (immerhin sind die aus den Fehlergrößen errechneten und die von den Schutzgeräten erhaltenen Werte mit technischer Genauigkeit identisch), sondern es ist zu überlegen, inwieweit mit den, dem Verfahren zugrunde liegenden Eingabewerten für bestimmte realtypische Netzkonfigurationen praktisch brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle noch jene Fragen angeführt, die im Zuge der Vorbereitungsarbeiten aufgetreten sind und die es (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) unter dem Aspekt gegebener Restriktionen — wie etwa der erhältlichen Gerätetechnik — zu beantworten gilt:

- Welcher Wert des Pilotstromes darf durch entsprechende Dimensionierung des Sternpunktwiderstandes R_{SPE} als untere Grenze gewählt werden, bei dem eine Fehlerortung unter Sicherstellung der Anregesicherheit für den Distanzschutz noch möglich ist?
  Andererseits darf der Pilotstrom nicht zu groß werden, um die zulässige Berührungsspannung durch den Erdschlussstrom an der Fehlerstelle nicht zu überschreiten.
- Welche Art des Anregemodus muss bei den Distanzschutzgeräten eingestellt werden, um einerseits Phase-Phase-Fehler – wie gewohnt – innerhalb der eingestellten Zone abzuschalten und andererseits bei Erdfehlern lediglich eine Fehlerortung ohne Abschaltung anzustoßen? [NN10b] [NN08]
- Wie lässt sich verhindern, dass benachbarte, gesunde Abzweige durch den kapazitiven Erdschlussstrom bei einem Erdfehler nicht abgeschaltet werden und so den Netzbetrieb stören?
- Welche Bedeutung haben steigende Lastströme für das vorliegende Verfahren oder – anders ausgedrückt – welchen Wert darf der größte Abzweig-Nennstrom höchstens annehmen, so dass es unter Bedachtnahme einer minimal einstellbaren Anregeschwelle noch zu einer Fehlerortung kommt?

10. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die Bestimmung der Fehlerentfernung beim einpoligen Fehler mittels Distanzschutzgerät, die in [Acho8] bereits grundsätzlich vorgestellt wurde, mit anderen Bestimmungsmethoden verglichen. Die hierfür benötigten Berechnungsgrundlagen werden theoretisch genau untersucht und hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung mit wissenschaftlichen Methoden überprüft. Abschließend wird ihre Einsatztauglichkeit im praktischen Netzbetrieb anhand eines Feldversuches gezeigt.

Die Untersuchungen gehen aus von der bekannten Modellierung einer einpoligen Verbindung des Leiters L1 mit Erde („Erdschluss L1-E") mittels des Kalküls der Symmetrischen Komponenten nach Fortescue. Darin werden jedoch üblicherweise Querimpedanzen, wie z.B. die Erdkapazitäten, vernachlässigt. Wenn diese jedoch eine nicht mehr vernachlässigbare Größenordnung erreichen, dann werden die berechneten Fehlergrößen fehlerbehaftet gerechnet und in der numerischen Auswertung, die in weiterer Folge für die Bestimmung der Fehlerentfernung benötigt wird, würde sich dieser Fehler in einer Größenordnung auswirken, welcher das gewünschte numerische Ergebnis unbrauchbar macht. Somit beginnen die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit einer exakten Modellierung eines Erdschlusses in einem Strahlennetz unter Berücksichtigung der Erdkapazitäten des fehlerbehafteten Abzweiges und des Restnetzes, mit Annahme eines widerstandsbehafteten Fehlers ($R_F \geq 0$) sowie für beliebige Art der Sternpunkterdung des Netzes (RESPE, NOSPE und KNOSPE). Als Fehlergrößen werden die Ströme und Spannungen im Originalsystem und in den Komponentensystemen sowohl am Anfang der fehlerbehafteten Leitung als auch an der Fehlerstelle analytisch bestimmt. Im Zuge dieser Berechnungen wird gezeigt, dass bei exakter Berücksichtigung des Gegensystems der Gegenstrom am Anfang der fehlerbehaftete Leitung, welcher etwa durch ein an dieser Stelle eingebautes Schutzgerät gemessen werden kann, genau dem Fehlerstrom an der Fehlerstelle entspricht! In den bekannten Modellierungen ist es weiters auch üblich, dass bei der Ermittlung der Fehlergrößen die Fehlerstelle mit dem Ende der fehlerbehafteten Leitung gleichgesetzt wird („Leitungsende-Fehler"). Tatsächlich ist diese Vorgangsweise nur bei der oben erwähnten Vernachlässigung von Querimpedanzen zulässig. Bei exakter Modellierung bildet sich jedoch auch die Erdkapazität der restlichen, fehlerbehafteten Leitung im Fehlerstrom ab und hat somit Einfluss auf die Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung. Somit werden die Fehlergrößen im Zuge der Berechnungen speziell für den Fehler im Leitungsverlauf, das ist definitionsgemäß ein Fehler an einer beliebigen Stelle im Leitungszug mit $0 \leq \alpha \leq 1$ (mit $\alpha =$ Fehlerentfernung/Leitungslänge), bestimmt.

In der Arbeit [Acho8] wird für die Bestimmung der Fehlerentfernung in die konventionelle Fehlerortformel ein Korrekturterm, nämlich das Produkt Fehlerstrom $\times$ Fehlerwiderstand, eingefügt. Nachdem im Rahmen dieser Arbeit die Fehlergrößen speziell am Anfang der fehlerbehafteten Leitung (welcher zugleich auch Einbauort eines Schutzgerätes ist, das aus den gemessenen Fehlergrößen nach einem bestimmten Algorithmus die Fehlerentfernung errechnen kann) genau berechnet werden, können ausgehend von diesen analytisch bestimmten Fehlergrößen zwei weitere Algorithmen zur Fehlerortbestimmung entwickelt werden, und zwar:

1. für den Leitungsende-Fehler, wie es den üblichen Gepflogenheiten bei der Bestimmung der Fehlerentfernung entspricht, siehe Gleichung (6.14):

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm1} = \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}^k_F \cdot R_F}{\left(\underline{I}_{1,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot \underline{U}_{1E,R}\right) + \left(\underline{I}_{\Sigma,R} - j\frac{\omega C_{E,Abg}}{2} \cdot 3\underline{U}_{NE,R}\right) \cdot \underline{k}_0}$$

   sowie
2. für den beliebigen Fehler im Leitungsverlauf, wie dies eher der netztechnischen Realität nahekommt, siehe Gleichung (6.34):

$$\left(\frac{d}{l}\right)^2 \cdot j\frac{\underline{U}_{1E,R} + 3\underline{U}_{NE,R} \cdot \underline{k}_0}{X_{CEAbg2}} - \left(\frac{d}{l}\right) \cdot \left(\underline{I}_{1,R} + \underline{I}_{\Sigma,R} \cdot \underline{k}_0\right) + \frac{\underline{U}_{1E,R} - 3 \cdot \underline{I}^k_F \cdot R_F}{\underline{Z}^1_L} = 0$$

   und daraus

$$\underline{Z}^1_{Fehl,Wm2} = \frac{d}{l} \cdot \underline{Z}^1_L$$

Die Fehlerortbestimmung für den Fehler im Leitungsverlauf gilt exakt nur für die homogene Leitung und ist nur mittels erhöhtem Rechenaufwand möglich, wodurch ihr praktischer Einsatz mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht praktikabel sein wird.

Ungeachtet dessen war es im Rahmen dieser Arbeit von Interesse, in welcher Weise die nun exakt bestimmbaren Fehlerentfernungen sowohl für den Leitungsmitte- als auch für den Fehler im Leitungsverlauf verifiziert werden können. Unter Annahme realistischer Verhältnisse wurde ein Strahlennetz simuliert, das auf den fehlerbehafteten Abzweig sowie das verbleibende Restnetz reduziert wurde. Für verschiedene Arten der Sternpunkterdung (RESPE, NOSPE und KNOSPE) wurden die Fehlergrößen ermittelt und die Ergebnisse folgender Rechenmethoden verglichen:

- Nachrechnung der analytische Darstellung mittels MATLAB,
- Simulation mittels des Netzberechnungsprogrammes NEPLAN,
- Simulation mittels des Netzberechnungsprogrammes INTEGRAL,
- Nachrechnung von Laborversuchen mittels MATLAB.

Insbesondere kann damit gezeigt werden, dass der Gegenstrom am Anfang der fehlerbehafteten Leitung – zugleich Einbauort eines Schutzgerätes zur Ermittlung der Fehlerentfernung – tatsächlich dem Fehlerstrom an der Fehlerstelle entspricht.

Somit ist nun ganz allgemein nachgewiesen, dass mittels des beschriebenen Weges tatsächlich ein verbessertes Verfahren zur Erdfehlerortung mit Distanzschutzgeräten zur Verfügung steht. In weiterer Folge wird dieses verbesserte Verfahren auf seine praktische Anwendbarkeit numerisch überprüft, und zwar anhand der Topologie eines realtypischen Mittelspannungsnetzes mit folgenden praxisnahen Parametern:

- Sternpunkterdung: RESPE (mit kleiner Überkompensation), NOSPE und KNOSPE (mit jeweils zwei unterschiedlichen, in der Netzpraxis typischen Widerständen),
- relativ großer kapazitiver Erdschlussstrom des Netzes und
- mittelohmiger Fehlerwiderstand.

Als Fehlerort wird jeweils ein Erdschluss mit kontinuierlich variierender Entfernung im Bereich $0 < \alpha \leq 1$ angenommen. Aus den auf analytischem Wege exakt ermittelten Fehlergrößen am Anfang der fehlerbehafteten Leitung wird nun sowohl die Fehlerentfernung als auch die Abweichung zum tatsächlichen Wert nach folgenden Bestimmungsmethoden berechnet:

- Verfahren nach [Ach08],
- gemäß der exakten Formel für den Leitungsende-Fehler und
- gemäß der exakten Formel für den Fehler im Leitungsverlauf einer homogenen Leitung.

Diese Gegenüberstellung soll es ermöglichen zu beurteilen und zu entscheiden, welches der gezeigten Verfahren numerisch die besten Werte liefert.

Anhand des Beispiels einer realtypischen, abschnittsweise homogenen Leitung wird im Rahmen eines Exkurses gezeigt, wie sehr die Fehlerentfernung auf dieser abschnittsweise homogenen Leitung, die nach den Formeln für die homogene Leitung berechnet wird, vom realen Wert abweicht.

Zur praktischen Untermauerung der Fehlerortformeln wurde mit den in [AF07] und [Ach08] beschriebenen Verfahren in einem 20-kV-Netz für die öffentliche Stromversorgung eines österreichischen EVUs ein Pilotversuch aufgebaut:

- Primärseitig wurde parallel zur Petersenspule ein schaltbarer 20-kV-Sternpunktwiderstand aufgebaut.
- Sekundärtechnisch wurde in drei von vier Leitungsabzweigen jeweils drei Testgeräte von verschiedenen Herstellern von Distanzschutzgeräten parallel zu den bestehenden Schutzeinrichtungen eingebaut, die für die Ermittlung der Fehlerentfernung beim Erdschluss den modifizierten Algorithmus gemäß [Ach08] implementiert haben.
- Mittels eines separaten Transientenrecorders werden alle Ströme der Versuchsabzweige, die Sammelschienenspannungen sowie die Ströme durch die Petersenspule und den Sternpunktwiderstand bei jedem Erdschluss aufgezeichnet. Damit sind zusätzlich zu den Störschriebaufzeichnungen der Versuchsgeräte Daten verfügbar, aus denen im Nachhinein einerseits die Fehlerentfernung berechnet werden kann und die andererseits den Versuchsgeräten mittels geeigneter Prüfeinrichtung erneut aufgeprägt werden können, um deren Reaktion zu studieren.

Im abschließenden Kapitel wird dieser Pilotversuch beschrieben. Die Fehlerentfernung jedes andauernden Erdschlusses wird gemäß den oben genannten Fehlerortformeln auf Basis der mittels Transientenrecorder aufgezeichneten Fehlergrößen berechnet und jenen Werten, die die Versuchsgeräte ermittelt haben, gegenübergestellt und mit der tatsächlichen Fehlerentfernung, die vom Betriebspersonal dem System Operator übermittelt wurde, verglichen.

Ausblick

Die Bearbeitung des gestellten Themas lieferte einen Beitrag zum besseren Verständnis der Fehlerortbestimmung in realtypischen Strahlennetzen, wie sie überwiegend im Mittelspannungsbereich vorzufinden sind. Es hat sich aber auch gezeigt, dass gewisse Fragen, deren Behandlung den Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen würde, einer weiterführenden Untersuchung bedürften:

- Die Fehlerortformeln wurden für das Strahlennetz, das aus dem fehlerbehafteten Abzweig und dem Restnetz besteht (siehe z.B. Abbildung 3.1), entwickelt. Inwieweit sind gewonnenen Erkenntnisse auch für einen zweiseitig gespeisten Erdschluss in einem vermaschten Netz, wie es etwa im Bereich der Hochspannungsnetze vorzufinden ist, übertragbar?
- In den Fehlerortformeln ist im Leiterstrom der fehlerbehafteten Phase auch der Laststrom enthalten. In welcher Größenordnung beeinflusst dieser Laststrom das Ergebnis in Hinblick auf die erzielbare Ortungsgenauigkeit, speziell vor dem Hintergrund steigender Lastströme sowie der bidirektionalen Nutzung der Verteilernetze infolge dezentraler Einspeiser?
- Bei der Bestimmung der Fehlerentfernung wurde von konstanten Leitungsparametern, wie sie exakt nur für die homogene Leitung gelten, ausgegangen. Die realtypischen Mittelspannungs-Verteilernetze bestehen jedoch aus gemischten Strukturen Kabel – Freileitung. Gibt es Netzkonstellationen, für die die beschriebene Fehlerortungsmethode und die angegebenen Fehlerortformeln besonders günstig oder ungünstig sind, oder lässt sich eine Abschätzung der Abweichung vom tatsächlichen Fehlerort je nach Netzkonstellation angeben?

Appendix

Literatur

[11609] ETG-Fachbericht 116. *STE 2009. Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen - Stand, Herausforderungen, Perspektiven. Vorträge der ETG-Fachtagung vom 27. bis 28. Januar 2009 in Dresden*. Berlin, Offenbach: vde verlag gmbh, 2009 (siehe S. 1, 2).

[13211] ETG-Fachbericht 132. *Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH). Eine Bestandaufnahme mit einer Zusammenfassung der ETG-Umfrage STE 2010, Verfahren der Erdschlusskompensation und selektiven Erdschlusserfassung*. Hrsg. von H. Melzer. Berlin, Offenbach: vde verlag gmbh, 2011 (siehe S. 1, 2).

[Ach08] G. Achleitner. »Earth Fault Distance Protection«. Dissertation. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2008 (siehe S. v, vii, 3, 5, 7, 18, 29, 30, 59–61, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 81, 90, 93, 95, 97).

[AF07] G. Achleitner und L. Fickert. *Verfahren zur Entfernungsortung von Erdschlüssen*. Patent AT503598. 2007 (siehe S. 3, 83, 93, 97).

[CR91] H. Clemens und K. Rothe. *Schutztechnik in Elektroenergiesystemen*. 3. Aufl. Berlin, Offenbach: vde verlag gmbh, 1991 (siehe S. 2).

[Elt84] R. Eltschka. *Berechnung von Erd- und Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen*. Vorlesungsskriptum. Wien: Inst. f. El. Anlagen der Techn. Univ. Wien, 1984 (siehe S. 9).

[Fic+04] L. Fickert u. a. *110-kV-Kabel / -Freileitung: eine technische Gegenüberstellung*. Verlag d. Techn. Univ. Graz, 2004. ISBN: 9783902465115 (siehe S. 13, 76).

[Fic99] L. Fickert. »Verbesserung der Erdschlusserfassung in gelöschten Netzen«. In: *e & i* 116.11 (1999), S. 642–648 (siehe S. 2).

[HO78] H. Happoldt und D. Oeding. *Elektrische Kraftwerke und Netze*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1978.

[Hoc57] A. Hochrainer. *Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer, 1957 (siehe S. 13).

[Hub93] H. Hubensteiner. *Schutztechnik in elektrischen Netzen 1. Grundlagen und Ausführungsbeispiele*. Hrsg. von W. J. Bartz. Berlin, Offenbach: vde verlag gmbh, 1993 (siehe S. 2).

[NN02] N.N. *Network Protection & Automation Guide*. Alstom, 2002. ISBN: 2-9518589-0-6.

[NN08] N.N. *SIPROTEC Distanzschutz 7SA6*. C53000-G1100-C156-6. Bedienungsanleitung. Siemens Aktiengesellschaft, 2008. URL: `www.siprotec.de`. 11.2008 (siehe S. 93).

[NN10a] N.N. *Erdschlussortungsrelais EOR-D*. Bedienungsanleitung. D-90441 Nürnberg: A.Eberle GmbH & Co. KG, 2010. URL: www.a-eberle.de. Januar 2010 (siehe S. 2).

[NN10b] N.N. *MiCOM P433, P435*. Bedienungsanleitung. D-60528 Frankfurt/Main: Areva Energietechnik GmbH, 2010. URL: www.areva-td.com. 2010 (siehe S. 93).

[NN69] N.N. *Power System Protection*. Hrsg. von The Electric Council. 1 - 3 Bde. London: Macdonald, 1969.

[OMI13] OMICRON. *EnerLyzer*. Broschüre. OMICRON electronics GmbH, 2013. URL: http://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/files/pdf/de/EnerLyzer-Brochure-DEU.pdf. 2013 (siehe S. 52).

[Roe84] R Roeper. *Kurzschlußströme in Drehstromnetzen*. 6. Aufl. Berlin, München: Siemens Aktiengesellschaft, 1984. ISBN: 3-8009-1385-2 (siehe S. 9).

[Sti85] H. Stimmer. *Störungen und Schutztechnik in elektrischen Netzen*. Vorlesungsskriptum. Wien: Inst. f. El. Anlagen der Techn. Univ. Wien, 1985 (siehe S. 2, 9).

[Wur+04] M. Wurm u. a. »Erdschlussschutz in Windparknetzen mit isoliertem Sternpunkt«. In: *e & i* 121.10 (2004), S. 343–350 (siehe S. 2).

[Wur10] M. Wurm. »Erdschluss(-tiefen)ortung mittels Distanzschutzgerät, Ergebnisbericht«. In: FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 (9.–10. Juni 2010). Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN). 2010.

[Wur11] M. Wurm. »Earth Fault Distance Localization in Inductive Earthed Networks by means of Distance Protection Relays«. In: 21st CIRED International Conference on Electricity Distribution (6.–9. Juni 2011). Paper 915. CIRED. 2011. URL: http://www.xcdtech.com/cired2011/papers/CIRED2011_0915_final.pdf (besucht am 12. 06. 2013) (siehe S. 83).

Anhang A.

Detailrechnungen zu Abschnitt 5

A.1. Gleichungssystem für den Leitungsende-Fehler

Das Gleichungssystem (5.1) bis (5.13) wird für die numerischen Berechnungen durch folgende Matrizen dargestellt:

$$\underline{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_L^2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_L^0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
\frac{1}{-jX_{CERest}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{-jX_{CEAbg2}} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2}} & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2}} & -1 \\
-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_L^1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \underline{Z}^2 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \underline{Z}^0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{1}{-jX_{CEAbg2}} & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix} \tag{A.1}$$

$$\underline{\boldsymbol{X}} = \begin{pmatrix} \underline{U}_R^1 \\ \underline{U}_R^2 \\ \underline{U}_R^0 \\ \underline{I}_R^1 \\ \underline{I}_R^2 \\ \underline{I}_R^0 \\ \underline{I}_L^1 \\ \underline{I}_L^2 \\ \underline{I}_L^0 \\ \underline{U}_F^1 \\ \underline{U}_F^2 \\ \underline{U}_F^0 \\ \underline{I}_F^k \end{pmatrix} \tag{A.2}$$

$$\underline{\boldsymbol{B}} = \begin{pmatrix} \underline{E} - \underline{I} \cdot \underline{Z}_Q^1 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{I} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A.3}$$

Somit lautet das Gleichungssystem (5.1) bis (5.13) in Matrixform

$$\underline{\boldsymbol{A}} \cdot \underline{\boldsymbol{X}} = \underline{\boldsymbol{B}} \tag{A.4}$$

und daraus

$$\underline{\boldsymbol{X}} = \underline{\boldsymbol{A}}^{-1} \cdot \underline{\boldsymbol{B}} \tag{A.5}$$

A.2. Gleichungssystem für den Fehler im Leitungsverlauf

Das Gleichungssystem (5.20) bis (5.32) wird für die numerischen Berechnungen durch folgende Matrizen dargestellt:

$$\underline{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_L^2 \cdot \alpha & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_L^0 \cdot \alpha & 0 & 0 & -1 & 0 \\
\frac{1}{-jX_{CERest}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2} \cdot \alpha} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{jX_{CEAbg2} \cdot \alpha} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{-jX_{CEAbg2} \cdot \alpha} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{\underline{Z}_{CD}} & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{\underline{Z}_{EF}} & -1 \\
-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_L^1 \cdot \alpha & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \underline{Z}^2 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \underline{Z}^0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{1}{\underline{Z}_{AB}} & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix} \tag{A.6}$$

worin

$$\alpha = \frac{d}{l} \, .$$

Die Matrizen $\underline{\boldsymbol{X}}$ und $\underline{\boldsymbol{B}}$ entsprechen den Gleichungen (A.2) und (A.3), so dass der gesuchte Lösungsvektor $\underline{\boldsymbol{X}}$ analog mittels Gleichung (A.5) erhalten wird.

Anhang B.

MATLAB-Script für die Berechnung der Fehlerentfernung

Stellvertretend für alle Fehlerortberechnungen nach

- der konventionellen Formel ($\underline{Z}^1_{Fehl,konv}$, 3.35),
- der Methode nach Achleitner ($\underline{Z}^1_{Fehl,Achleitner}$, 6.22),
- der exakten Formel für den Leitungsende-Fehle ($\underline{Z}^1_{Fehl,Wm1}$, 6.14) und
- der exakten Formel für den Fehler im Leitungsverlauf ($\underline{Z}^1_{Fehl,Wm2}$, 6.34)

wird nachstehend für den Fall KNOSPE mit $R_{SPE} = 60\,\Omega$ (Abschnitt 8.4.5) das Listing des MATLAB-Scripts angeführt:

```
% FEHLERENTFERNUNG fuer ALLGEMEINES RECHENMODELL
% MIT EXAKTER BERUECKSICHTIGUNG DES GEGENSYSTEMS
% UND FUER BELIEBIGEN FEHLERORT IM LEITUNGSZUG

clc
clear
a=-0.5+j*sqrt(3)/2;

% *** Systemgroessen: ***
% Phasenspannung des Netzes:
    E = 20000/sqrt(3) % in V
% Transformator:
    SN = 25 % Nennscheinleistung in MVA
    U2N = 21.500 % Nennspannung in kV
    uk = 0.15 % Kurzschlussspannung in %
    Z1T = j*uk*U2N*U2N/SN % Mitimpedanz
    Z0T = 0.90 * Z1T % Nullimpedanz
% Erdschlussstrom des gesamten Netzes:
    IE = 400 % in A
    XCE = 3*E/IE % Reaktanz der gesamte Erdkapazitaet
% Sternpunkterdung:
    % u = -1 % Verstimmungsgrad; u>0 = Ueberkompensation; u=-1 = NOSPE
    IPet = IE + 5 % Strom durch die E-Spule (Vorgabe L.)
    BPet = IPet/E % Suszeptanz der Petersenspule
    RY = 60 % NOSPE-Widerstand
    Z0SPE = 3 * 1 / (1/RY-j*BPet) % Nullimpedanz Sternpunkterdung

```

```
% *** Erdschlussbehafteter Abgang: ***
% Erdkapazitaet:
    ICEAbg = 36.3 % Erdschlussstrom des fehlerbehafteten Abganges
    XCERest = 3*E/(IE-ICEAbg) % Reaktanz der restlichen Erdkapazitaet
    XCEAbg = 3*E/ICEAbg % Reaktanz der Erdkapazitaet des Abganges
    XCEAbg2 = 2*XCEAbg % Reaktanz der halben Erdkapazitaet des Abganges (PI-ESB)
% Leitung:
    R1L = 10.17 % Wirkwiderstand der Leitung
    X1L = 7.16 % Mitreaktanz der Leitung
    Z1L = R1L + j*X1L % Mitimpedanz der Leitung
    k0=1.12*(cos(12*pi/180)+j*sin(12*pi/180)) % Erdfehlerfaktor
    Z0L = (3*k0+1)*Z1L % Nullimpedanz der Leitung
    l = 100 % Leitungslaenge
    d = 65 % Fehlerentfernung bis zum Fehlerort
% Fehlerwiderstand:
    ZF = 100 % in Ohm

% *** Impedanzen der S.K.-Ersatzschaltbilder: ***
% Nullsystem:
    ZEF = (Z0L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*l^2)*(-j*XCEAbg2)/(Z0L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*(2*l-d)*l)
    Z0Teil = 1 / (1/(Z0SPE+Z0T)+1/(-j*XCERest)+1/(-j*XCEAbg2*l/d)) + Z0L*d/l;
    Z0 = ZEF*Z0Teil/(ZEF+Z0Teil)
% Gegensystem:
    ZCD = (Z1L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*l^2)*(-j*XCEAbg2)/(Z1L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*(2*l-d)*l)
    Z2Teil = 1 / (1/Z1T+1/(-j*XCERest)+1/(-j*XCEAbg2*l/d)) + Z1L*d/l;
    Z2 = ZCD*Z2Teil/(ZCD+Z2Teil)

ZAB = (Z1L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*l^2)*(-j*XCEAbg2)/(Z1L*(l-d)^2-j*XCEAbg2*(2*l-d)*l)
ZTeil = Z1L*d/l + 1 / (1/ZAB + 1/(Z2+Z0+3*ZF))
Z = Z1T + 1 / (1/(-j*XCERest)+1/(-j*XCEAbg2*l/d)+1/ZTeil)
I = E / Z

% *** Fehlergroessen in S.K. ***

A = eye(13,13);
A(2,8) = -Z1L*d/l;
A(2,11) = -1;
A(3,9) = -Z0L*d/l;
A(3,12) = -1;
A(4,1) = 1/(-j*XCERest);
A(5,2) = -d/(-j*XCEAbg2*l);
A(5,8) = -1;
A(6,3) = -d/(-j*XCEAbg2*l);
A(6,9) = -1;
A(7,1) = d/(-j*XCEAbg2*l);
A(7,4) = -1;
A(8,11) = -1/ZCD;
A(8,13) = -1;
A(9,12) = -1/ZEF;
A(9,13) = -1;
A(10,1) = -1;
A(10,7) = Z1L*d/l;
```

```
A(11,13) = Z2;
A(12,13) = Z0;
A(13,7) = -1;
A(13,10) = 1/ZAB;

B = zeros(13,1);
B(1) = E - I*Z1T;
B(4) = I;

X = A\B;

U1R = X(1);
U2R = X(2);
U0R = X(3);
I1R = X(4);
I2R = X(5);
I0R = X(6);
U1F = X(10);
U2F = X(11);
U0F = X(12);
I1F = X(13);
I2F = I1F;
I0F = I1F;

% *** Kontrollen ***
checkU1EF = U0F + U1F + U2F - I1F*3*ZF % check: muss 0 sein
checkI0R = - U0R/(Z0T+Z0SPE) - U0R/(-j*XCERest) - I0R % check: muss 0 sein
checkI2R = - U2R/(Z1T) - U2R/(-j*XCERest) - I2R % check: muss 0 sein

% *** Fehlergroessen im Originalsystem: ***
    U1EF = U0F + U1F + U2F
    IL1F = I0F + I1F + I2F
    U1ER = U0R + U1R + U2R
    U2ER = U0R + a*a*U1R + a*U2R
    U3ER = U0R + a*U1R + a*a*U2R
    IL1R = I0R + I1R + I2R
    IL2R = I0R + a*a*I1R + a*I2R
    IL3R = I0R + a*I1R + a*a*I2R
    IsumR = IL1R + IL2R + IL3R

% Ausgabe der Fehlergroessen mit Betrag und Winkel
    fprintf('\n')
    fprintf('ERGEBNISSE ALLGEMEINES RECHENMODELL\n')
    fprintf('MIT EXAKTER BERUECKSICHTIGUNG des GEGENSYSTEMS\n')
    fprintf('UND FUER BELIEBIGEN FEHLERORT IM LEITUNGSZUG\n')
    fprintf('\n')
    switch d/l
        case 1 % ... Leitungsende-Fehler
            fprintf('LEITUNGSENDE-FEHLER: %5.1f Prozent der Leitungslaenge\n', d/l
                *100)
            fprintf('\n')
        otherwise
```

```
            fprintf('LEITUNGSMITTE-FEHLER in %5.1f Prozent der Leitungslaenge\n', d/
                l*100)
            fprintf('\n')
    end
    fprintf('Fehlergroessen in S.K. an der Fehlerstelle:\n')
    fprintf('U1,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U1F), angle(U1F)*180/pi)
    fprintf('U2,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U2F), angle(U2F)*180/pi)
    fprintf('U0,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U0F), angle(U0F)*180/pi)
    fprintf('I1,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I1F), angle(I1F)*180/pi)
    fprintf('I2,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I2F), angle(I2F)*180/pi)
    fprintf('I0,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I0F), angle(I0F)*180/pi)
    fprintf('3I0,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(3*I0F), angle(3*I0F)*180/pi)
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlergroessen im Originalsystem an der Fehlerstelle:\n')
    fprintf('U1E,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U1EF), angle(U1EF)*180/pi)
    fprintf('IL1,F = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(IL1F), angle(IL1F)*180/pi)
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlergroessen in S.K. am Relaiseinbauort:\n')
    fprintf('U1,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U1R), angle(U1R)*180/pi)
    fprintf('U2,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U2R), angle(U2R)*180/pi)
    fprintf('U0,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U0R), angle(U0R)*180/pi)
    fprintf('I1,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I1R), angle(I1R)*180/pi)
    fprintf('I2,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I2R), angle(I2R)*180/pi)
    fprintf('I3,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(I0R), angle(I0R)*180/pi)
    fprintf('3I2,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(3*I2R), angle(3*I2R)*180/pi)
    fprintf('3I0,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(3*I0R), angle(3*I0R)*180/pi)
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlergroessen im Originalsystem am Relaiseinbauort:\n')
    fprintf('U1E,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U1ER), angle(U1ER)*180/pi)
    fprintf('U2E,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U2ER), angle(U2ER)*180/pi)
    fprintf('U3E,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U3ER), angle(U3ER)*180/pi)
    fprintf('UNE,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(U0R), angle(U0R)*180/pi)
    fprintf('IL1,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(IL1R), angle(IL1R)*180/pi)
    fprintf('IL2,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(IL2R), angle(IL2R)*180/pi)
    fprintf('IL3,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(IL3R), angle(IL3R)*180/pi)
    fprintf('Isum,R = %5.2f / %4.2f Grad\n', abs(IsumR), angle(IsumR)*180/pi)

% tatsaechliche Fehlerentfernung
    fprintf('\n')
    fprintf('Leitungslaenge:\n')
    fprintf('Z1L = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1L), imag(Z1L))
    fprintf('tatsaechliche Fehlerentfernung:\n')
    fprintf('Z1F = %6.3f + j*%6.3f\n', real(d/l*Z1L), imag(d/l*Z1L))
    fprintf('dist = d/l = %6.3f\n', d/l)

% Berechnung der Fehlerentfernung, ideal:
    P = j*(U1ER+3*U0R*k0)/XCEAbg2;
    Q = -(IL1R+IsumR*k0);
    R = (U1ER-3*I2F*ZF)/Z1L;
    syms x;
    S = P*x^2 + Q*x + R;
    dist = double(solve(S));
```

```
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlerberechnung Wm2 (Leitungsmittefehler), IDEAL mit IF = 3*I2F und RF,tatsaechlich:\n')
    for i = 1:length(dist)
        fprintf('berechnete Fehlerentfernung dist = %6.3f + j*%6.3f\n',real(dist(i)), imag(dist(i)))
        Z1FWm2 = dist(i) * Z1L;
        fprintf('Z1F,Wm2 = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1FWm2), imag(Z1FWm2))
        fprintf('Fehler = %5.2f %% \n', (imag(Z1FWm2)-X1L*d/l)/(X1L*d/l)*100)
     end

% Fehlerwiderstand:
    RF = real(U1ER/IsumR); % gerechneter Fehlerwiderstand RF = Re{U1ER/IsumR}
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlerwiderstand:\n')
    fprintf('tatsaechlicher Fehlerwiderstand RF = %6.1f Ohm\n',ZF)
    fprintf('gerechneter Fehlerwiderstand RF = Re{U1ER/IsumR} = %6.1f Ohm\n',RF)

% vom Schutzgeraet eingemessene Fehlerimpedanz Z1F, konventionell:
    Z1Fkonv = U1ER/(IL1R+k0*IsumR);
    Fehler = (imag(Z1Fkonv)-X1L*d/l)/(X1L*d/l);
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlerberechnung, konventionell:\n')
    fprintf('Z1F,konv = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1Fkonv), imag(Z1Fkonv))
    fprintf('Fehler = %5.2f %% \n', Fehler*100)

% vom Schutzgeraet eingemessene Fehlerimpedanz Z1F, Achleitner mit I2R:
    Z1FAchi = (U1ER-3*I2R*RF)/(IL1R+k0*IsumR);
    Fehler = (imag(Z1FAchi)-X1L*d/l)/(X1L*d/l);
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlerberechnung, Achleitner mit IF = 3*I2R und RF,gerechnet:\n')
    fprintf('Z1F,Achi = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1FAchi), imag(Z1FAchi))
    fprintf('Fehler = %5.2f %% \n', Fehler*100)

% korrigierte Fehlerimpedanz Z1F,Wm1 (Leitungsendefehler):
    Z1FWm1 = (U1ER-3*I2R*RF)/((IL1R-j*U1ER/XCEAbg2)+k0*(IsumR-j*3*U0R/XCEAbg2));
    Fehler = (imag(Z1FWm1)-X1L*d/l)/(X1L*d/l);
    fprintf('\n')
    fprintf('Fehlerberechnung, Wm1 (Leitungsendefehler) mit IF = 3*I2R und RF, gerechnet:\n')
    fprintf('Z1F,Wm1 = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1FWm1), imag(Z1FWm1))
    fprintf('Fehler = %5.2f %% \n', Fehler*100)

% korrigierte Fehlerimpedanz Z1F,Wm2 (Leitungsmittefehler):
    P = j*(U1ER+3*U0R*k0)/XCEAbg2;
    Q = -(IL1R+IsumR*k0);
    R = (U1ER-3*I2R*RF)/Z1L;
    syms x;
    S = P*x^2 + Q*x + R;
    dist = double(solve(S));
    fprintf('\n')
```

```
    fprintf('Fehlerberechnung, Wm2 (Leitungsmittefehler) mit IF = 3*I2R und RF,
        gerechnet:\n')
    for i = 1:length(dist)
        fprintf('berechnete Fehlerentfernung dist = %6.3f + j*%6.3f\n',real(dist(i))
            , imag(dist(i)))
        Z1FWm2 = Z1L * dist(i);
        fprintf('Z1F,Wm2 = %6.3f + j*%6.3f\n', real(Z1FWm2), imag(Z1FWm2))
        fprintf('Fehler = %5.2f %% \n', (imag(Z1FWm2)-X1L*d/l)/(X1L*d/l)*100)
     end
```