



ESEA
Institut für Energiesysteme
und Elektrische Antriebe

EA Elektrische
Anlagen.

Bewertung der Reaktanzmethode und möglicher Verbesserungen in Distanzschutzrelais

DIPLOMARBEIT

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik
und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Benjamin Cox, BSc

E370 - Institut für Energiesysteme und Elektrische Anlagen

Eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Böhm Patrick, BSc
1226440

Wien, Januar 2020

Böhm Patrick

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

12.01.2020

Datum

Böhm Patrick

Unterschrift

Danksagung

Die Diplomarbeit bildet gemeinsam mit der Diplomprüfung den Abschluss des Studiums. Aus diesem Anlass möchte ich hier ein paar dankende Worte niederschreiben.

Ich möchte mich besonders bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik bedanken, der es mir ermöglicht hat unter seiner Leitung diese Abschlussarbeit zu verfassen. Seine Unterstützung und die Beantwortung unzähliger Fragen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Monika und Ewald Böhm. Nicht nur die Tatsache, dass sie mir jederzeit mit einem unterstützenden Rat zur Seite standen, sondern auch der erhaltene soziale Rückhalt sowie ihre finanzielle Unterstützung, haben mir dieses Studium erst ermöglicht. Dies lässt mich sehr stolz auf meine Familie sein.

Ebenso möchte ich mich auch bei meinem Bruder Robin bedanken, der mich immer wieder angespornt und durch mein Studium begleitet hat.

Natürlich möchte ich mich bei meiner Freundin Julia bedanken, die mich nach so manchen Rückschlägen wieder liebevoll aufgebaut hat und auf deren Unterstützung und Verständnis ich immer zählen konnte.

Kurzfassung

Die stetig wachsenden elektrischen Energieübertragungsnetze stellen immer höhere Anforderungen, bezüglich der Zuverlässigkeit und Selektivität, an die darin verwendeten Schutzsysteme. Um diesen Ansprüchen zu genügen müssen diese Systeme ständig weiterentwickelt und verbessert werden. Seit Jahrzehnten befinden sich zur Fehlerortsbestimmung auf Leitungen Distanzschutzrelais im Einsatz. Die darin verwendete Methode zur Bestimmung des Fehlerorts kann den zukünftigen Gegebenheiten jedoch nicht mehr standhalten und soll durch eine neue Methode, die sogenannte Reaktanzmethode, ersetzt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bewertung der Reaktanzmethode und möglicher Verbesserungen in Distanzschutzrelais. Durch den Einsatz der Reaktanzmethode mit Separation des Fehlerwiderstandes soll eine Erhöhung der Fehlerortsselektivität im Vergleich zur konventionellen Methode erreicht werden. Durch die Anwendung auf ein Modell soll die Verbesserung der Genauigkeit bei der Bestimmung des Fehlerorts analysiert und bewertet werden.

Zunächst wird eine kurze Einleitung über die allgemeine Funktionsweise des Distanzschutzes gegeben. Darauf aufbauend wird die konventionelle Methode der Fehlerortsbestimmung erläutert. Durch Anwendung der Methode auf eine beidseitig gespeiste, fehlerbehaftete Leitung werden deren Probleme thematisiert. Danach wird die Reaktanzmethode mit Separation des Fehlerwiderstandes als verbesserte Methode zur Fehlerortsbestimmung vorgestellt und analysiert. Anschließend wird ein Modell entwickelt und dessen Parameter festgelegt. Nach Implementierung des Modells in MATLAB werden darin unterschiedliche Fehlerarten simuliert und die beiden Methoden zur Fehlerortsbestimmung darauf angewandt. Die Ergebnisse der klassischen Methode werden mit jenen der Reaktanzmethode verglichen und interpretiert. Dadurch kann die Reaktanzmethode im Allgemeinen bewertet werden. Abschließend wird eine allgemeine Zusammenfassung der Arbeit angeführt und ein Ausblick auf mögliche Verbesserungen in Distanzschutzrelais gegeben.

Abstract

The constantly growing electrical power transmission networks place ever higher demands on the dependability and selectivity of the protection systems used in them. In order to meet these requirements, these systems have to be continuously further developed and improved. Distance protection relays have been used for decades to determine the location of faults on overhead lines. However, the method used to determine the fault location can no longer withstand future conditions and is to be replaced by a new method, the so-called reactance method.

This thesis deals with the evaluation of the reactance method and possible improvements in distance protection relays. By using the reactance method with separation of the fault resistance an increase of the fault location selectivity in comparison to the conventional method shall be achieved. By applying this method to a model, the improvement of the accuracy in the determination of the fault location is to be analysed and evaluated.

First a short introduction is given about the general function of the distance protection. Building on this, the conventional method of fault location determination is explained. By applying the method to a faulty, double-sided supplied line, its problems are discussed. Then the reactance method with separation of the fault resistance is presented and analysed. Thereafter a model is developed and its parameters defined. After implementation of the model in MATLAB, different types of faults are simulated. The two fault location methods are applied to determine the fault location in faulty model. The results of the classical method are compared with those of the reactance method. Then an interpretation of both results is given. This allows the reactance method to be evaluated in general. Finally, a general summary of this thesis is presented and an outlook on possible improvements in distance protection relays is given.

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

A	Sammelschiene A, entspricht dem Einbauort des Schutzgerätes; Index für Größen im Ort A
B	Sammelschiene B; Index für Größen im Ort B
c_{NA}, c_{NB}	Toleranz der Netzspannung des Netzes A bzw. B
$\underline{\delta}_{A,Cmp}$	komplexer Korrekturwinkel
δ_P	Übertragungswinkel
$\underline{I}_{A,cmp}$	komplexe Kompensationsgröße
\underline{I}_F	Fehlerstrom (an der Fehlerstelle)
\underline{I}_{Lx}	Phasenstrom der Phase x
k	Bezeichnung des Komponentensystems, $k = 0, 1, 2$ (Null-, Mit- und Gegensystem)
\underline{k}_0	komplexer Erdfaktor
l_F	Entfernung zwischen Schutzgerät und Fehlerstelle
l_L	Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung
m	auf die Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung l_L bezogene Entfernung zwischen Schutzgerät und Fehlerstelle
m_{Cmp}	auf die Gesamtlänge der fehlerbehafteten Leitung bezogene Entfernung zwischen Schutzgerät und Kompensationspunkt
$P_{A \rightarrow B}$	vom Netz A zum Netz B übertragene Wirkleistung

φ	Winkel der Leitungsimpedanz \underline{Z}_{Ly}
R_F	Fehlerwiderstand
r'_F	längenbezogener Fehlerwiderstand
R_{Ly}	Widerstand der Leitung y
r'_{Ly}	längenbezogener Widerstand der Leitung y
R_{NA}, R_{NB}	Netzinneiwiderstand des Netzes A bzw. des Netzes B
S''_{kA}, S''_{kB}	Kurzschlussleistung des Netzes A bzw. des Netzes B
$\underline{S}, \underline{T}$	Symmetrierungsmatrix, Entsymmetrierungsmatrix
\underline{U}_F	Spannungsabfall am Fehlerwiderstand R_F
$\underline{U}_{NA}, \underline{U}_{NB}$	Leiter-Erde-Spannung des Netzes A bzw. des Netzes B
x	Index der Phase des Dreiphasensystems ($x = 1, 2, 3$)
X_F	Fehlerreaktanz
x'_F	längenbezogene Fehlerreaktanz
X_{Ly}	Reaktanz der Leitung y
x'_{Ly}	längenbezogene Reaktanz der Leitung y
X_{NA}, X_{NB}	Netzinneiwiderstand des Netzes A bzw. des Netzes B
y	Index der Leitung, $y = 1, 2$
\underline{Z}_F	Fehlerimpedanz
\underline{Z}_{Ly}	Leitungsimpedanz der Leitung y
\underline{z}'_{Ly}	längenbezogene Leitungsimpedanz
$\underline{Z}_{NA}, \underline{Z}_{NB}$	Netzinneiwiderstand des Netzes A bzw. des Netzes B
Kl	Index Klassische Methode
Rm	Index Reaktanzmethode

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iv
Abstract	v
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	vi
1. Einleitung	1
1.1. Funktionsweise des Distanzschutzes	1
1.2. Gliederung der Arbeit	3
2. Grundlagen	4
2.1. Fehlerarten	4
2.2. Fehlerortsformeln der klassischen Methode	4
2.2.1. 1-poliger Fehler	7
2.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung	8
2.2.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung	9
2.2.4. 3-poliger Fehler	10
2.3. Anwendung der klassischen Methode auf eine beidseitig gespeiste Leitung	11
3. Die Reaktanzmethode	14
3.1. Analyse der Methode	14
3.2. Fehlerortsformeln der Reaktanzmethode	17
3.2.1. 1-poliger Fehler	17
3.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung	19
3.2.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung	20
3.2.4. 3-poliger Fehler	22
4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell	25
4.1. Modellbildung	25

Inhaltsverzeichnis

4.2.	Parameter des Modells	26
4.3.	Betrachtung des Modells im stationären Zustand	29
4.3.1.	Berechnung des Übertragungswinkels	29
4.3.2.	Berechnung des stationären Fehler-Zustands	30
4.4.	Simulation und Parametervariation	32
4.4.1.	Definition der simulierten Szenarien	32
4.4.2.	Simulation und Berechnung der Fehlerentfernung	33
4.4.3.	Sensitivitätsanalyse	34
5.	Ergebnisse	38
5.1.	Ergebnisse des 1-poligen Fehlers	38
5.1.1.	Vergleich der beiden Methoden	38
5.1.2.	Sensitivitätsanalyse	50
5.2.	Ergebnisse des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung	58
5.2.1.	Vergleich der beiden Methoden	58
5.2.2.	Sensitivitätsanalyse	67
5.3.	Ergebnisse des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung	74
5.3.1.	Vergleich der beiden Methoden	74
5.3.2.	Sensitivitätsanalyse	84
5.4.	Ergebnisse des 3-poligen Fehlers	91
5.4.1.	Vergleich der beiden Methoden	91
5.4.2.	Sensitivitätsanalyse	98
6.	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	105
7.	Zusammenfassung und Ausblick	109
7.1.	Allgemeine Zusammenfassung	109
7.2.	Ausblick und Erkenntnisse für die Zukunft	110
	Literatur	111
	Abbildungsverzeichnis	112
	Tabellenverzeichnis	118
A.	Parameter des Modells	121
A.1.	Berechnete Parameter des Modells	121
A.2.	Berechnete Werte des Übertragungswinkels	122

Inhaltsverzeichnis

A.3. Berechnung des komplexen Erdfaktors	122
B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen	123
B.1. Berechnung der Spannungs- und Stromwerte im Fehlerzustand .	123
B.1.1. 1-poliger Erdschluss	123
B.1.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung	125
B.1.3. 2-poliger Erdschluss	127
B.1.4. 3-poliger Fehler	129
B.2. Entwicklung der Klassischen Methode	130
B.2.1. 1-poliger Erdschluss	131
B.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung	132
B.2.3. 2-poliger Erdschluss	133
B.2.4. 3-poliger Fehler	134
B.3. Entwicklung der Reaktanzmethode	135
B.3.1. 1-poliger Erdschluss	135
B.3.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung	136
B.3.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung	138
B.3.4. 3-poliger Fehler	140
C. Diagramme	142

1. Einleitung

Die steigende Komplexität der elektrischen Energienetze bewirkt, bei gleichzeitiger Sicherstellung der Versorgungssicherheit, stetig wachsende Anforderungen an die Schutz- und Steuereinrichtungen. Um im Fehlerfall den Schutz des Netzes und der Betriebsmittel gewährleisten zu können, muss der fehlerbehaftete Anlagenteil oder die fehlerbehaftete Leitung von der Schutzeinrichtung erkannt und zeitgerecht abgeschaltet oder vom Netz getrennt werden. Damit eine hohe Selektivität bei der Trennung oder Abschaltung der fehlerhaften Komponente eingehalten werden kann, ist eine genaue Kenntnis der Fehlerart und des Fehlerorts essentiell. Bei der Fehlerortsbestimmung auf Freileitungen werden seit Jahrzehnten Distanzschutzrelais erfolgreich eingesetzt.

1.1. Funktionsweise des Distanzschutzes

Das Distanzschutzrelais basiert auf dem Prinzip des Impedanzvergleichs mit Richtungsentscheidung. Abbildung 1.1 zeigt eine Darstellung des Prinzips einer fehlerbehafteten, einseitig gespeisten Leitung. Das Distanzschutzgerät D befindet sich im Bereich der Sammelschiene A am Übergangspunkt zwischen dem Netz \underline{U}_N und der Leitung mit der Impedanz \underline{Z}_L . Die berechnete oder gemessene Impedanz \underline{Z}_L der zu schützenden Leitung wird im Distanzschutzgerät eingestellt. Während des Betriebs werden dem Gerät kontinuierlich über Strom- und Spannungswandler Messgrößen zugeführt. Tritt nun ein Fehler F auf, über- oder unterschreiten die gemessenen Werte einen Schwellenwert und der Distanzschutz wird anhand voreingestellter Kriterien aktiv. Diese Aktivierung wird auch als Anregung bezeichnet. Es wird die Fehlerart bzw. die Fehlerschleife bestimmt und daraus die Fehler-Impedanz \underline{Z}_F berechnet. Diese wird mit der voreingestellten Leitungsimpedanz des Normalzustandes verglichen und der Auslösebefehl mit einer entsprechenden Zeitverzögerung

1. Einleitung

vorbereitet. Wird ein einstellbares Zeitlimit überschritten, wird ausgelöst und über den Schalter S die fehlerbehaftete Leitung vom Netz getrennt. Werden zwischen Anregung und Auslösung, z.B. durch selektive Abschaltungen zeitlich vorgelagerter Distanzschutzgeräte die Fehlerbedingungen nicht mehr erfüllt, fällt das Gerät in den Ausgangszustand zurück (vgl. [1]).

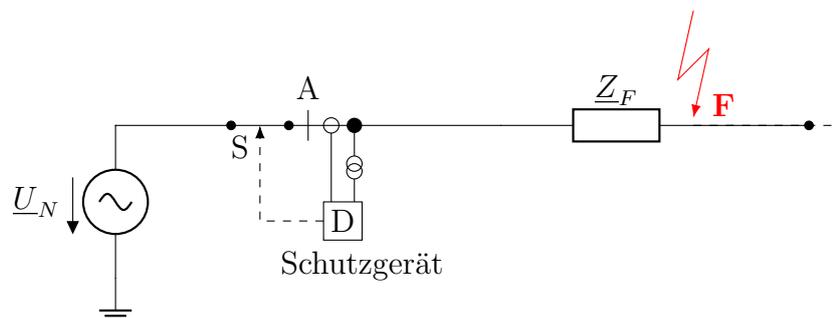


Abbildung 1.1.: Prinzipdarstellung eines Netzes mit einer von einem Distanzschutzgerät zu schützenden Leitung

Um eine hohe Fehlerortsselektivität garantieren zu können, muss die Fehlerimpedanz \underline{Z}_F exakt berechnet werden. Weicht die berechnete Impedanz von der tatsächlich vorhandenen ab, führt dies zu inkorrektem Verhalten des Distanzschutzgeräts, dem sog. Unter- oder Übergreifen. Dies bedeutet, der Fehlerort erscheint dem Schutzgerät weiter entfernt bzw. näher als dieser tatsächlich ist.

Die derzeit in Distanzschutzgeräten eingesetzte Methode zur Berechnung der Fehlerimpedanz ([2], Kap.3.2.2, Konventioneller Distanzschutz), in dieser Arbeit als Klassische Methode bezeichnet, führt bei zweiseitig gespeisten Leitungen und Auftreten eines Fehlerwiderstands $R_F \neq 0$ zu Abweichungen von der tatsächlich vorhandenen Fehlerimpedanz. Durch diese Abweichung kann der Fehlerort nicht mehr exakt bestimmt werden! Die Fehlerortsselektivität ist deshalb nicht mehr gewährleistet. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse und Bewertung der Reaktanzmethode als mögliche alternative Methode in Distanzschutzrelais zur Lösung dieses Problems. Die Reaktanzmethode versucht die Reaktanzabweichung zu kompensieren, um so ein Unter- oder Übergreifen zu verhindern und den Fehlerort exakt zu bestimmen.

1. Einleitung

1.2. Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 verschiedene Fehlerarten auf Übertragungsleitungen charakterisiert. Es werden die Fehlerortsformeln der klassischen Methode für diese Fehlerarten angeführt und die Probleme, die sich bei deren Anwendung auf die beidseitig gespeiste Leitung ergeben, thematisiert.

In Kapitel 3 wird die Reaktanzmethode als verbesserte Methode der Fehlerortsberechnung vorgestellt und analysiert. Die Entwicklung der Fehlerortsformeln für die behandelten Fehlerarten wird kurz dargestellt und diskutiert.

Kapitel 4 befasst sich mit der Entwicklung eines geeigneten Modells und der Anwendung der beiden Methoden zur Fehlerortsbestimmung. Dazu wird das fehlerbehaftete Modell im stationären Fehler-Zustand betrachtet und mit MATLAB die Impedanzberechnung durchgeführt. Es wird sowohl die klassische Methode als auch die Reaktanzmethode zur Fehlerortsbestimmung verwendet. Um Einflüsse verschiedener Parameter auf die Reaktanzmethode analysieren zu können, werden diese variiert und Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Kapitel 5 ausgewertet und interpretiert. Die Berechnungen der Reaktanzmethode werden mit jenen der klassischen Methode verglichen und bewertet. Die Auswirkungen von Parametervariationen auf die Ergebnisse der Reaktanzmethode werden dargestellt und beschrieben.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse des vorherigen Kapitels allgemein zusammengefasst und interpretiert. Darauf aufbauend wird eine Bewertung der Reaktanzmethode durchgeführt.

In Kapitel 7 wird die Arbeit allgemein zusammengefasst und ein Ausblick auf eventuelle weiterführende Arbeiten gegeben.

Im Anhang dieser Arbeit werden alle für die Simulationen verwendeten Herleitungen und Berechnungen detailliert angeführt. Ebenso werden die für das Modell berechneten Parameter angegeben. Diagramme die nicht im Kapitel 5 dargestellt sind, finden sich ebenfalls im Anhang.

2. Grundlagen

Zur Bestimmung des Fehlerorts auf einer fehlerbehafteten Leitung kann die klassische Methode ([2], Kap.3.2.2, Konventioneller Distanzschutz) verwendet werden. Dazu sind zunächst die auf dreiphasigen Übertragungsleitungen auftretenden Fehlerarten dargestellt. Anhand der Ersatzschaltbilder der Fehlerarten können anschließend die Fehlerortsformeln der klassischen Methode angeführt werden. Um deren Grenzen bzw. Probleme aufzeigen zu können, wird die Anwendung der Methode auf ein Modell der beidseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung analysiert.

2.1. Fehlerarten

Abbildung 2.1 zeigt die auf dreiphasigen Freileitungen vorkommenden fünf verschiedenen, widerstandsbehafteten Fehlerarten (vgl. [3], [4]). Der auftretende Fehlerwiderstand wird als R_F bezeichnet. Dieser wird bei Fehlern zwischen zwei Phasen als identisch in jeder Phase angenommen. Bei Fehlern zwischen zwei Phasen mit Verbindung zur Erde wird der Erdschluss-Widerstand als R_g bezeichnet. Die auftretenden Widerstände R_F bzw. R_g werden als rein reell angenommen. Die Fehlerarten a) bis d) werden in weiterer Folge zur Formulierung der Fehlerortsformeln verwendet. Der in e) dargestellte 3-polige Fehler mit Erdberührung wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

2.2. Fehlerortsformeln der klassischen Methode

Die Abbildung 2.2 zeigt eine fehlerbehaftete, vom Netz \underline{U}_{NA} einseitig gespeiste Leitung. Das Distanzschutzgerät befindet sich, wie schon in Abbildung 1.1

2. Grundlagen

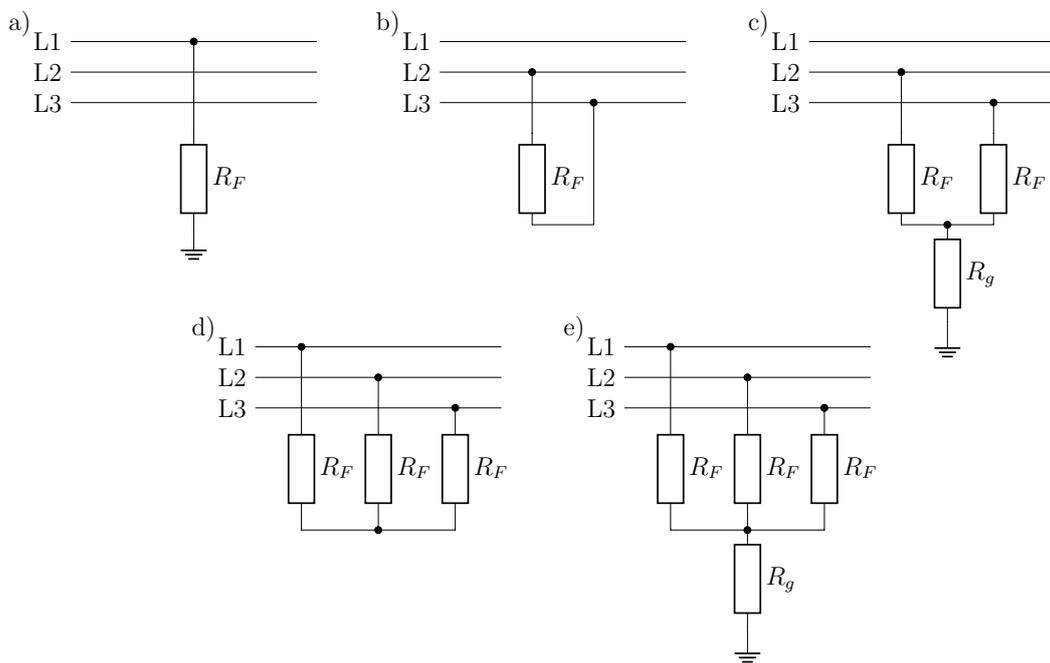


Abbildung 2.1.: Fehlerarten ([3], Fig: 3.1): a) 1-poliger Fehler, b) 2-poliger Kurzschluss, c) 2-poliger Fehler mit Erdberührung, d) 3-poliger Kurzschluss, e) 3-poliger Fehler mit Erdberührung

2. Grundlagen

dargestellt, im Bereich der Sammelschiene A. Nach Auftreten eines Fehlers berechnet das Distanzschutzgerät aus den gemessenen Strom- und Spannungswerten die Fehlerimpedanz \underline{Z}_F der Fehlerschleife. Daraus lässt sich anschließend die Fehlerentfernung wie folgt ermitteln. Die berechnete Impedanz \underline{Z}_F kann als Summe aus dem Fehlerwiderstand R_F und dem Produkt des längenbezogenen Impedanzbelag der Leitung \underline{z}'_L und der Fehlerentfernung l_F dargestellt werden.

$$\underline{Z}_F = R_F + \underline{z}'_L \cdot l_F = R_F + (r'_L + j \cdot x'_L) \cdot l_F \quad (2.1)$$

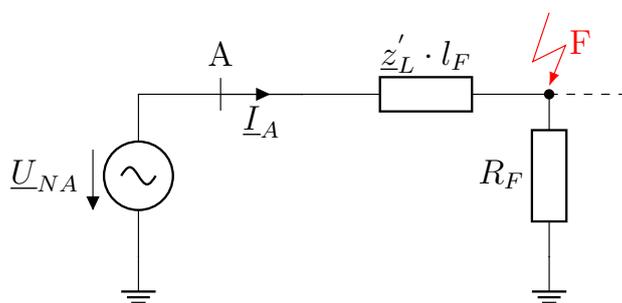


Abbildung 2.2.: Schaltbild einer einseitig gespeisten fehlerbehafteten Leitung

Da der Fehlerwiderstand R_F dem Schutzgerät unbekannt ist, wird nur der Imaginärteil der Fehlerimpedanz $X_F = \Im\{\underline{Z}_F\}$ betrachtet. Daraus kann die gesuchte Fehlerentfernung l_F , bzw. die auf die Gesamtlänge der Leitung l_L bezogene Fehlerentfernung m ermittelt werden.

$$l_F = \frac{X_F}{X_L}, \quad \text{bzw.} \quad m = \frac{l_F}{l_L} \quad (2.2)$$

Die Berechnung der Fehlerimpedanz einer fehlerbehafteten Leitung kann anhand der klassischen Methode durchgeführt werden (vgl. [2], Kap. 3.2.2, Konventioneller Distanzschutz; oder [4], Kap. 2.3.4). Die Fehlerortsformeln für die in Abbildung 2.1 dargestellten Fehlerarten (a-d) werden im folgenden angeführt. Auf die detaillierte und ausführliche Herleitung dieser Methode wird hier verzichtet und auf den Anhang dieser Arbeit verwiesen (B.2).

Für die Entwicklung der Fehlerortsformeln der klassischen Methode wird eine einseitige und symmetrische Speisung des Fehlers angenommen. Für den Fehler

2. Grundlagen

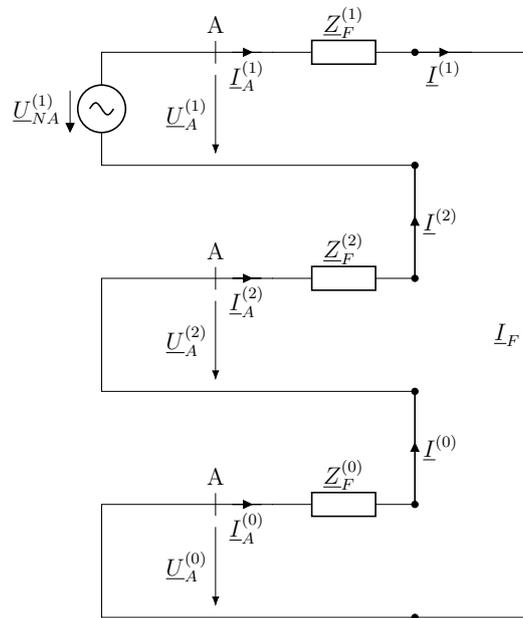


Abbildung 2.3.: Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 1-poligen Fehlers L1-E

setzt man einen satten Kurzschluss mit $R_F = 0 \Omega$ voraus. Die Erstellung der Ersatzschaltbilder bzw. die Herleitung der Fehlerortsformeln kann mithilfe des Kalküls der Symmetrischen Komponenten durchgeführt ([5]) werden.

2.2.1. 1-poliger Fehler

Anhand des Ersatzschaltbildes des 1-poligen Fehlers in Abbildung 2.3 lässt sich die Fehlerortsformel für den Fehler L1-E ableiten (vgl. [2], Glg. 3-31).

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L1-E}}{\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E}} \quad (2.3)$$

$\underline{U}_{A,L1-E}$ kennzeichnet die Leiter-Erde-Spannung. $\underline{I}_{A,L1}$ stellt den Leiter-Strom in der fehlerhaften Phase L1 dar. Der Faktor \underline{k}_0 wird als Erdfaktor bezeichnet und setzt sich aus der Nullsystem- und Mitsystem-Impedanz der Leitung zusammen.

2. Grundlagen

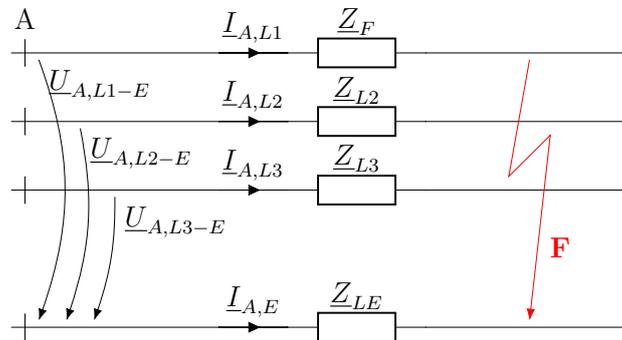


Abbildung 2.4.: Schaltungsausschnitt zur Orientierung des Erdstromes mit Fehler in der Leiter-Erde Schleife L1-E eines 3-phasigen Systems

Der Erdfaktor kann mit folgender Formel berechnet werden (vgl. [4], Glg. 2.19):

$$\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{\underline{Z}_{L1}^{(1)}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Der Strom $\underline{I}_{A,E}$ wird als Summenstrom bezeichnet und mit der Orientierung, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, angenommen. Dieser Strom kann vom Schutzgerät mit der sogenannten Holmgreen-Schaltung der drei Phasenstromwandler oder mittels Kabelumbauwandler erfasst werden ([4], Abb. 4.26). Falls keine Erfassung mittels Messschaltung erfolgt, kann dieser auch aus den drei Phasenströmen, anhand Abbildung 2.4, mit $\underline{I}_{A,E} = -(\underline{I}_{A,L1} + \underline{I}_{A,L2} + \underline{I}_{A,L3}) = -3\underline{I}_A^{(0)}$ berechnet werden.

2.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung

Die Fehlerortsformel des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung ergibt sich, anhand des Ersatzschaltbildes in Abbildung 2.5, zu (vgl. [2], Glg. 3-28):

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L2-L3}}{\underline{I}_{A,L2-L3}} \quad (2.5)$$

2. Grundlagen

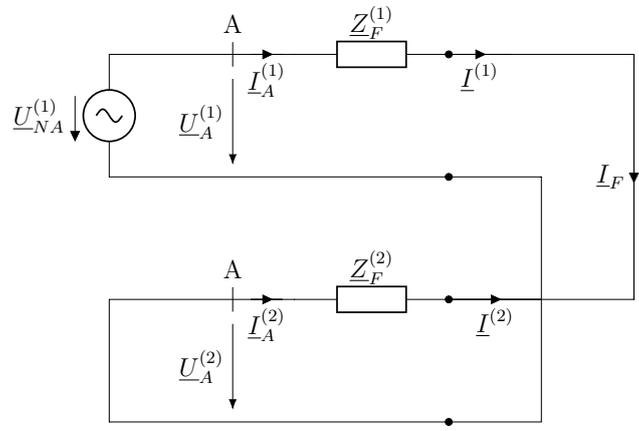


Abbildung 2.5.: Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung L2-L3

$\underline{U}_{A,L2-L3} = \underline{U}_{A,L2-E} - \underline{U}_{A,L3-E}$ bezeichnet die Leiter-Leiter-Spannung der zwei fehlerbehafteten Phasen der Leitung. $\underline{I}_{A,L2-L3} = \underline{I}_{A,L2} - \underline{I}_{A,L3}$ kennzeichnet den Leiter-Leiter-Strom der Leiter L2-L3.

2.2.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung

Für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung kann die Fehlerortsformel durch Verwendung des Ersatzschaltbildes in Abbildung 2.6 abgeleitet werden (vgl. [2], Glg. 3-28).

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L2-L3}}{\underline{I}_{A,L2-L3}} \quad (2.6)$$

Die Formel des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung ist identisch mit der des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung. Darin bezeichnet $\underline{U}_{A,L2-L3}$ wieder die Leiter-Leiter-Spannung und $\underline{I}_{A,L2-L3}$ den Leiter-Leiter-Strom der fehlerhaften Phasen L2-L3.

2. Grundlagen

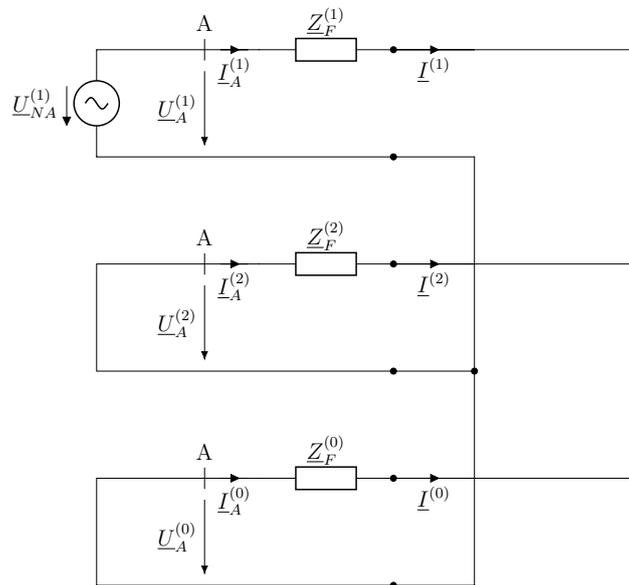


Abbildung 2.6.: Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung L2-L3-E

2.2.4. 3-poliger Fehler

Der 3-polige Fehler stellt einen symmetrischen Fehlerfall dar und besitzt im Ersatzschaltbild deshalb nur ein Mitsystem. Die Fehlerortsformel kann wieder unter Verwendung des Ersatzschaltbildes, dargestellt in Abbildung 2.7, ermittelt werden. Durch die Symmetrie kann jede der drei fehlerhaften Phasen zur Berechnung der Fehlerimpedanz verwendet werden.

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{U_{A,L1-E}}{I_{A,L1}} = \frac{U_{A,Lx-E}}{I_{A,Lx}} \text{ mit } x = 1, 2 \text{ oder } 3 \quad (2.7)$$

2. Grundlagen

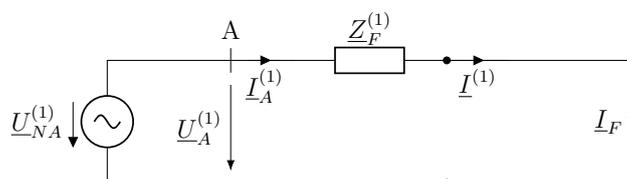


Abbildung 2.7.: Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 3-poligen Fehlers L1-L2-L3

2.3. Anwendung der klassischen Methode auf eine beidseitig gespeiste Leitung

Bei der klassischen Methode wird von einer einseitig gespeisten Leitung ausgegangen. Durch diese Vereinfachungen kann der Fehlerort, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, vom Distanzschutzgerät aus den gemessenen Werten exakt berechnet werden.

Wird nun eine zweiseitig gespeiste, fehlerbehaftete Leitung wie in Abbildung 2.8 und ein Fehlerwiderstand $R_F \neq 0$ betrachtet, kann die Fehlerentfernung nicht mehr exakt bestimmt werden.

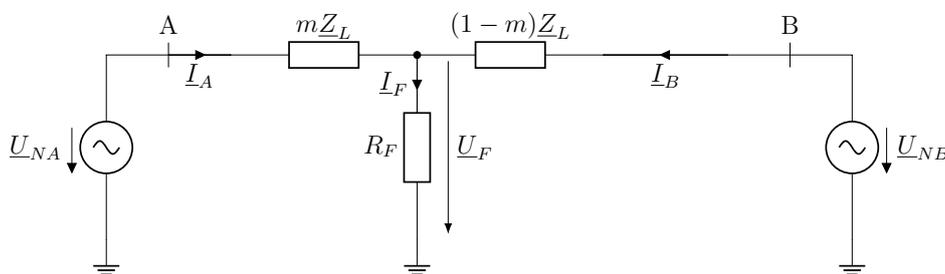


Abbildung 2.8.: Schaltbild einer zweiseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung

Um dies zu zeigen wird die Maschengleichung der Fehlerschleife in Abbildung 2.8 analog zur einseitig gespeisten Leitung aufgestellt. Man erhält folgende Gleichung:

$$\underline{U}_{NA} = \underline{I}_A \cdot m\underline{Z}_L + \underline{U}_F = \underline{I}_A \cdot m\underline{Z}_L + \underline{I}_F \cdot R_F \quad (2.8)$$

2. Grundlagen

Darin kennzeichnet \underline{Z}_L die Leitungsimpedanz und der Faktor m die auf die Gesamtlänge der Leitung bezogene Fehlerentfernung.

Der Strom \underline{I}_F , der über den Fehlerwiderstand R_F fließt, setzt sich aus der Summe der beiden Teilströme \underline{I}_A und \underline{I}_B zusammen.

$$\underline{U}_{NA} = \underline{I}_A \cdot m \underline{Z}_L + (\underline{I}_A + \underline{I}_B) \cdot R_F \quad (2.9)$$

Um die Berechnung analog zur einseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung fortsetzen zu können, müsste der Strom \underline{I}_B dem Distanzschutzrelais bekannt sein. Da dieser vom Schutzgerät im Ort A nicht gemessen werden kann, entsteht bei der Bestimmung der Fehlerimpedanz \underline{Z}_F nach der klassischen Methode eine Abweichung. Die berechnete Fehlerimpedanz entspricht in diesem Fall nicht der tatsächlich vorhandenen. Wird für die bezogene Fehlerentfernung m wieder nur der Imaginärteil von \underline{Z}_F betrachtet, kann diese Abweichung auch an der Fehler-Reaktanz X_F gesehen werden. Diese ist in Abbildung 2.9 b) und c) dargestellt und lässt sich als

$$\Delta X = R_F \cdot \left| \frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A} \right| \cdot \sin \left(\arg \left\{ \frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A} \right\} \right) \quad (2.10)$$

formulieren (vgl. [2]). Der Fehler bei der Berechnung der Reaktanz ist umso größer je größer das Verhältnis der beiden Ströme $\frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A}$ ist. Der Wert des Fehlerwiderstandes R_F wirkt für die Abweichung verstärkend. Bei einem satten Kurzschluss ($R_F = 0 \Omega$) ist die Berechnung des Fehlerorts jedoch exakt.

Ist die berechnete Fehlerimpedanz höher als die tatsächlich vorhandene, erscheint der Fehler dem Schutzgerät weiter entfernt als dieser tatsächlich ist. Es wird deshalb die vorgesehene Auslösezeit der fehlerbehafteten Zone nicht eingehalten bzw. überschritten. Dieses Verhalten ist in Abbildung 2.9 b) dargestellt und wird als Unterreichweite bzw. als Untergreifen des Schutzgeräts (Underreach) bezeichnet. (vgl. [6])

Bei zu klein berechneter Fehlerimpedanz tritt das entgegengesetzte Verhalten auf. Der Fehler erscheint dem Distanzschutzgerät näher als dieser tatsächlich ist. Die für diese Zone vorgesehene Auslösezeit wird deshalb unterschritten und früher ausgelöst als vorgesehen. Dieses Verhalten wird als Überreichweite

2. Grundlagen

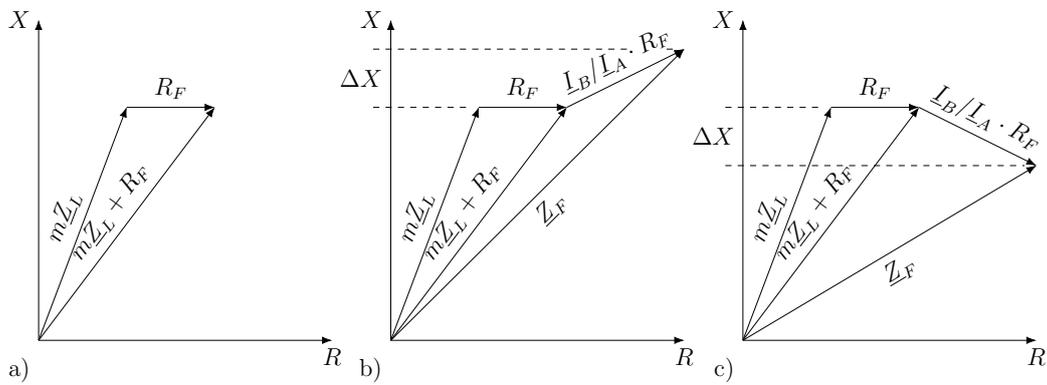


Abbildung 2.9.: Darstellung in der Impedanzebene: a) keine Abweichung der berechneten Reaktanz, die Fehlerentfernung ist exakt bestimmbar; b) untergreifendes Verhalten; c) übergreifendes Verhalten

bzw. als Übergreifen des Schutzgeräts (Overreach) bezeichnet und ist in Abbildung 2.9 c) dargestellt. (vgl. [6])

Durch dieses Unter- bzw. Übergreifen kann Fehlerortsselektivität nicht mehr gewährleistet werden!

3. Die Reaktanzmethode

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, kann mit der klassischen Methode bei einer zweiseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung mit Fehlerwiderstand $R_F \neq 0 \Omega$ die Fehlerentfernung nicht exakt berechnet werden. Die Reaktanzmethode mit Separation des Fehlerwiderstandes, im folgenden nur Reaktanzmethode genannt, kompensiert nun diese Abweichung und ermöglicht eine exakte Berechnung des Fehlerorts. Durch die Separation des Fehlerwiderstandes kann auch dessen Wert exakt bestimmt werden.

3.1. Analyse der Methode

Die Idee hinter der Reaktanzmethode ist, den Einfluss des unbekanntes Stromes \underline{I}_B bzw. \underline{I}_F auf die Reaktanzberechnung durch die Einführung eines Kompensationsfaktors zu kompensieren (vgl. [7], [8], [9] und [10]).

Betrachtet man dazu ein System der beidseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung, wie in Abbildung 3.1, lässt sich der Ansatz der Reaktanzmethode wie folgt erklären.

Die beiden Netze mit den Spannungen \underline{U}_{NA} bzw. \underline{U}_{NB} und den Netzzinnenimpedanzen \underline{Z}_{NA} bzw. \underline{Z}_{NB} speisen den Fehler auf der Leitung. \underline{Z}_F bezeichnet die Fehlerimpedanz, \underline{Z}_L die Leitungsimpedanz und der Faktor m entspricht der auf die Gesamtlänge der Leitung l_L bezogenen Fehlerentfernung. Der Fehlerwiderstand R_F wird als ungleich Null und rein reell angenommen. Die Spannung \underline{U}_A und der Strom \underline{I}_A bezeichnen die vom Schutzgerät im Ort A gemessenen Werte der fehlerhaften Phase.

Um den Spannungsabfall \underline{U}_F über dem Fehlerwiderstand R_F , der durch den unbekanntes Strom $\underline{I}_F = \underline{I}_A + \underline{I}_B$ entsteht, zu kompensieren, wird ein komplexer Kompensationsfaktor eingeführt. Dieser besteht aus dem Produkt der

3. Die Reaktanzmethode

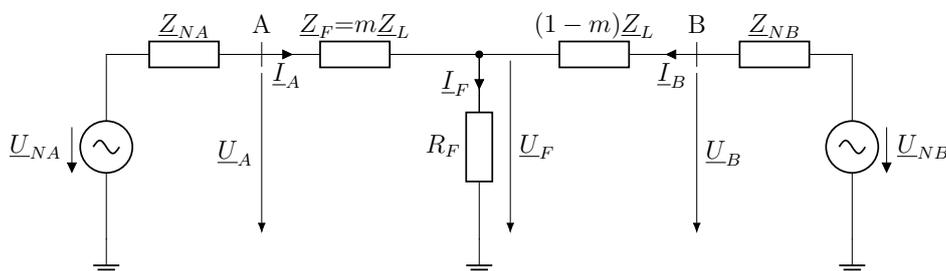


Abbildung 3.1.: Schaltbild einer zweiseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung zur Herleitung der Reaktanzmethode

Kompensationsgröße $\underline{I}_{A,Cmp}$ und des Korrekturwinkels $\underline{\delta}_{A,Cmp}$. Es wird vorausgesetzt, dass der Kompensationsfaktor $\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}$ denselben Winkel und dieselbe Amplitude besitzt wie der Fehlerstrom \underline{I}_F . Somit kann das Produkt als Ersatz für den unbekanntes Fehlerstrom in den Berechnungen verwendet werden.

Stellt man analog zur klassischen Methode die Maschengleichung der Fehler-schleife auf, führt dies zu:

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_A + R_F \cdot \underline{I}_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \quad (3.1)$$

Multipliziert man nun die Gleichung mit dem konjugiert komplexen Produkt $\underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*$ wird der Term $R_F \cdot \underline{I}_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*$ rein reell und fällt bei anschließender Bildung des Imaginärteils weg. Es folgt:

$$\Im \{ \underline{U}_A \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \} = \Im \{ \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \} \quad (3.2)$$

Führt man den Winkel der Leitungsimpedanz $\varphi = \arg\{\underline{Z}_L\}$ ein, so lässt sich die Fehlerreaktanz X_F berechnen.

$$X_F = \Im \{ \underline{Z}_F \} = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im \{ \underline{U}_A \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}}{\Im \{ e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}} \quad (3.3)$$

Die Berechnung des Fehlerwiderstandes R_F gestaltet sich ähnlich. Ausgehend von der Maschengleichung der Fehler-schleife (Glg. 3.1) multipliziert man die Gleichung mit dem konjugiert komplexen Term $\underline{Z}_F^* \cdot \underline{I}_A^*$. Wird nun nur

3. Die Reaktanzmethode

der Imaginärteil berücksichtigt und der Fehlerstrom \underline{I}_F durch das Produkt $\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}$ ersetzt, ergibt sich der Fehlerwiderstand zu:

$$R_F = \Re\{Z_F\} = \frac{\Im\{\underline{U}_A \cdot e^{-j\varphi} \cdot \underline{I}_A^*\}}{\Im\{e^{-j\varphi} \cdot \underline{I}_A^* \cdot \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}\}} \quad (3.4)$$

Die Kompensationsgröße $\underline{I}_{A,Cmp}$ und der Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ können vom Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten der jeweiligen Fehlerart abgeleitet werden. Um jedoch vollständige Kompensation des Fehlerstroms \underline{I}_F zu ermöglichen, muss die Kompensationsgröße und der Korrekturwinkel vom Lastfluss unabhängig sein.

Bei der Annahme von symmetrisch gespeisten Fehlern kann der Strom des Nullsystems $\underline{I}_A^{(0)}$ bzw. der Strom des Gegensystem $\underline{I}_A^{(2)}$ als Kompensationsgröße verwendet werden. Diese sind vom Lastfluss unabhängig und resultieren ausschließlich aus den passiven Netzwerkparametern. Der Strom des Mitsystems $\underline{I}_A^{(1)}$ kann nicht als Kompensationsgröße verwendet werden, da das Mitsystem die beiden Quellen $\underline{U}_{NA}^{(1)}$ bzw. $\underline{U}_{NB}^{(1)}$ beinhaltet. Infolge dessen ist der Strom $\underline{I}_A^{(1)}$ vom Lastfluss abhängig (vgl. [7], [8], [9] und [10]). Der Strom des Null- bzw. Gegensystems kann aber nur im Ort A vom Schutzgerät gemessen werden. Es wird der Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ verwendet, um vollständige Kompensation zu erreichen. Dieser ist ebenso nur von den passiven Netzwerkparametern abhängig und spiegelt somit die Netzwerkinhomogenität wider.

Im folgenden werden die Formeln zur Berechnung der Fehlerreaktanz X_F , des Fehlerwiderstands R_F , der Kompensationsgröße $\underline{I}_{A,Cmp}$ und des Korrekturwinkels $\underline{\delta}_{A,Cmp}$, der in Abbildung 2.1 (a-d) behandelten Fehlerarten, angeführt. Auf die detaillierte Herleitung der Fehlerortsformeln der Reaktanzmethode wird hier verzichtet und auf den Anhang (B.3) verwiesen.

3.2. Fehlerortsformeln der Reaktanzmethode

3.2.1. 1-poliger Fehler

Die Fehlerreaktanz und der Fehlerwiderstand des 1-poligen Fehlers können wie folgt berechnet werden:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (3.5)$$

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (3.6)$$

Darin bezeichnet φ den Winkel der Leitungsimpedanz \underline{Z}_L . Die, vom Schutzgerät im Ort A gemessene Leiter-Erde-Spannung entspricht $\underline{U}_{A,Ph}$ bzw. der gemessene Leiter-Strom der fehlerhaften Phase $\underline{I}_{A,Ph}$.

Die Kompensationsgröße und der Korrekturwinkel können anhand des Ersatzschaltbildes in symmetrischen Komponenten des 1-poligen Fehlers, dargestellt in Abbildung 3.2, abgeleitet werden. Für die Berechnung wurde die Fehlerschleife L1-E angenommen.

$$\underline{I}_{A,Cmp} = 3 \cdot \underline{I}_A^{(0)} \quad (3.7)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \quad (3.8)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m_{Cmp}\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m_{Cmp})\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \quad (3.9)$$

In der Gleichung 3.8, zur Berechnung des Korrekturwinkels, entspricht m der Fehlerentfernung auf der Leitung. Diese ist jedoch unbekannt bzw. soll mit der Reaktanzmethode berechnet werden. Deshalb wird m in der Gleichung des Korrekturwinkels (3.8) durch die Kompensationsentfernung m_{Cmp} ersetzt (3.9)

3. Die Reaktanzmethode

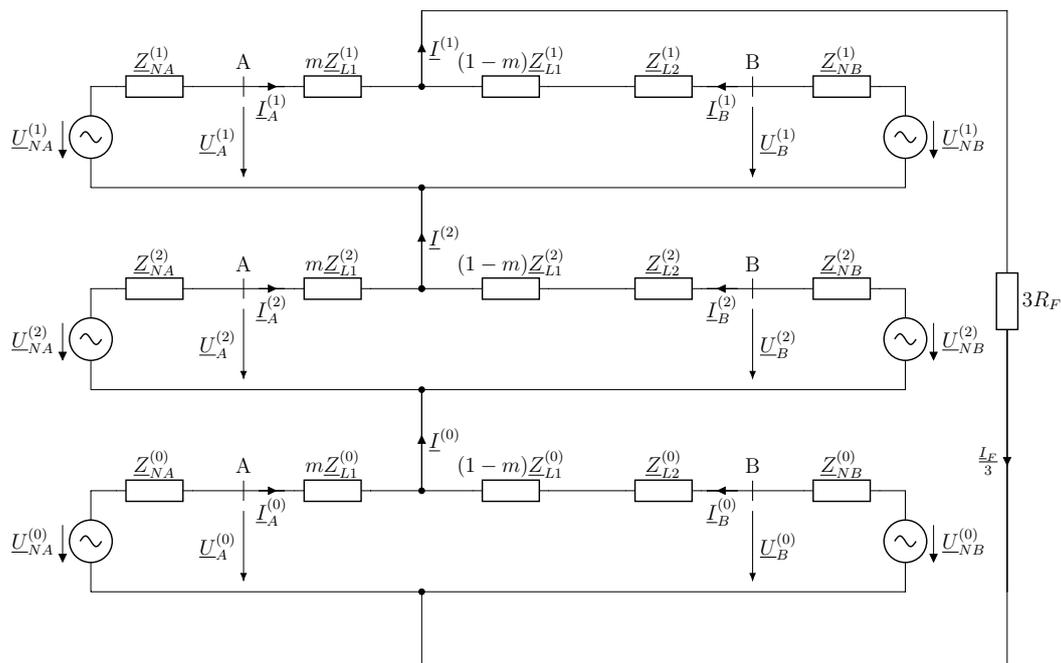


Abbildung 3.2.: Ersatzschaltbild des 1-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten

3. Die Reaktanzmethode

und deren Wert auf das Zonenende der zu schützenden Leitung festgelegt. Dies entspricht einem Wert von $m_{Cmp} = 0.8$ bzw. 80% der Leitungslänge l_L . Für den Fall, dass die Kompensationsentfernung m_{Cmp} jedoch der Fehlerentfernung m entspricht, kann die tatsächliche Fehlerentfernung m mittels Reaktanzmethode exakt berechnet werden!

3.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung

Für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung lassen sich die Fehlerreaktanz und der Fehlerwiderstand anhand folgender Gleichungen berechnen.

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{ \underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}}{\Im\{ e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}} \quad (3.10)$$

$$R_F = \frac{\Im\{ \underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi} \}}{\Im\{ \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi} \}} \quad (3.11)$$

Abbildung 3.3 zeigt das Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung. Da nur Mit- und Gegensystem vorhanden sind, kann nur der Strom des Gegensystems $\underline{I}_A^{(2)}$ als Kompensationsgröße verwendet werden. Dieser ist vom Lastfluss unabhängig. Der Korrekturwinkel ergibt sich ebenfalls aus dem Gegensystem des Ersatzschaltbildes. In der Gleichung 3.13 ist für m bereits m_{Cmp} eingesetzt. Für die Berechnung wurde die Fehlerschleife L2-L3 angenommen.

$$\underline{I}_{A,Cmp} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (3.12)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m_{Cmp} \underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1 - m_{Cmp}) \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \quad (3.13)$$

3. Die Reaktanzmethode

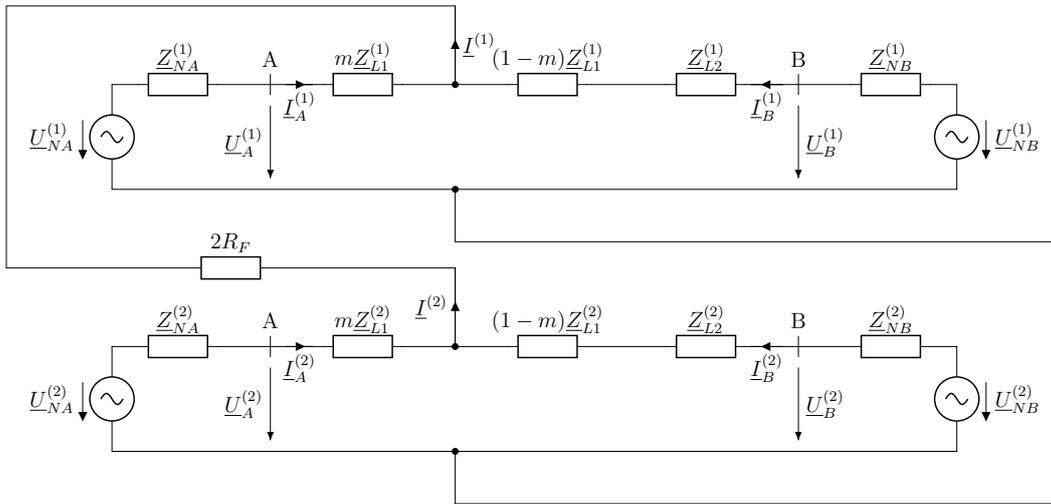


Abbildung 3.3.: Ersatzschaltbild des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung in Symmetrischen Komponenten

3.2.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung

Die Gleichungen zur Berechnung der Fehlerreaktanz bzw. des Fehlerwiderstandes des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung lauten wie folgt:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{U_{A,Ph1-Ph2} \cdot I_{A,Cmp}^* \cdot \delta_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot I_{A,Ph1-Ph2} \cdot I_{A,Cmp}^* \cdot \delta_{A,Cmp}^*\}} \quad (3.14)$$

$$R_F = \frac{\Im\{U_{A,Ph1-Ph2} \cdot I_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{I_{A,Cmp} \cdot \delta_{A,Cmp} \cdot I_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (3.15)$$

Beim 2-poligen Fehler mit Erdberührung, dargestellt in Abbildung 3.4, kann die Kompensationsgröße nur durch die Summe aus Gegen- und Nullsystem ausgedrückt werden und hängt dadurch von diesen beiden Summanden ab. Eine vollständige Kompensation der Netzwerkinhomogenität ist daher nicht mehr möglich (vgl. [7], [8], [9] und [10]). Da das Verhältnis der beiden Ströme eine große Rolle spielt, wird daher angenommen, dass der Strom im Gegensystem viel größer als jener im Nullsystem ist. Mit dieser Annahme ist wieder eine

3. Die Reaktanzmethode

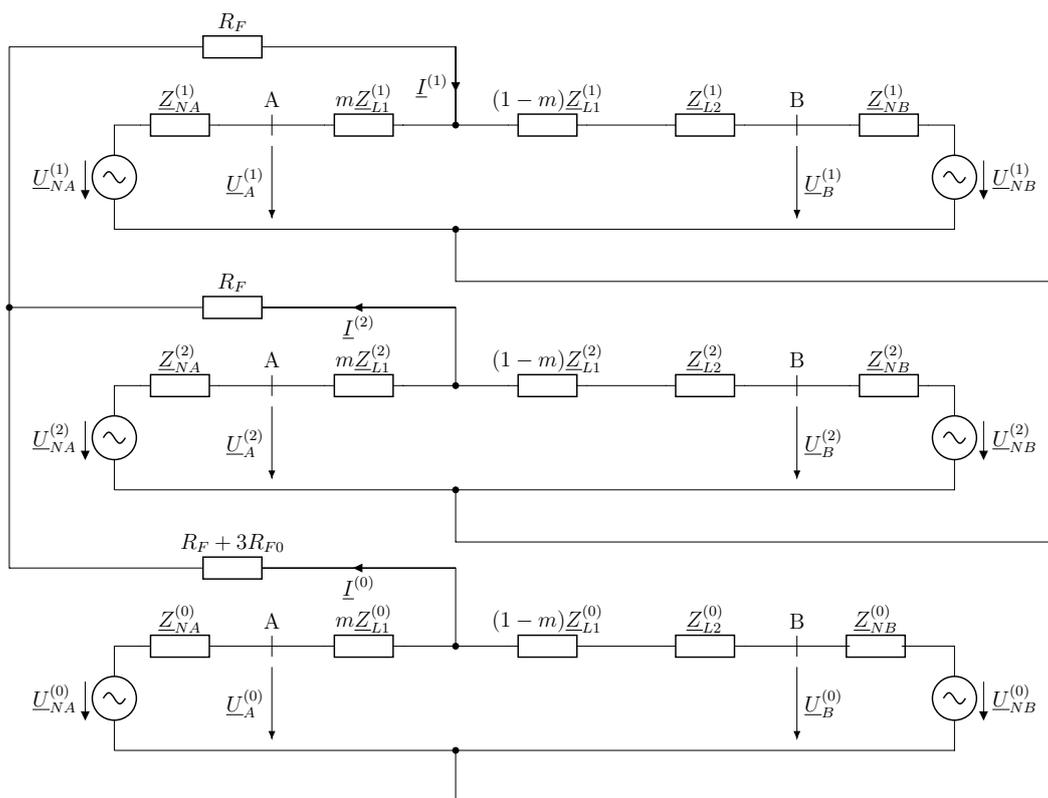


Abbildung 3.4.: Ersatzschaltbild des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung in Symmetrischen Komponenten

3. Die Reaktanzmethode

vollständige Kompensation möglich. Für die Berechnung wird die Fehlerschleife L2-L3-E angenommen.

$$\underline{I}_{A,Cmp,2} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad \text{und} \quad \underline{I}_{A,Cmp,0} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (3.16)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp,2} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m_{Cmp} \underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1 - m_{Cmp}) \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \quad (3.17)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp,0} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m_{Cmp} \underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1 - m_{Cmp}) \underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \quad (3.18)$$

Der Kompensationsfaktor kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} = \underline{I}_{A,Cmp,2} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp,2} + \underline{I}_{A,Cmp,0} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp,0} \quad (3.19)$$

3.2.4. 3-poliger Fehler

Die Gleichung der Fehlerreaktanz und des Fehlerwiderstandes des 3-poligen Fehlers ergibt sich zu:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (3.20)$$

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (3.21)$$

Anhand des Ersatzschaltbildes des 3-poligen Fehlers, dargestellt in Abbildung 3.5, lässt sich erkennen, dass eine Kompensation mittels Null- oder Gegensystem nicht möglich ist, da diese Systeme aufgrund der Symmetrie des Fehlers nicht vorhanden sind. Es wird daher ein Ansatz mit Superpositionsprinzip genutzt (vgl. [5] bzw. [11]). Das System kann in ein fehlerfreies und ein fehlerbehaftetes System geteilt werden. Abbildung 3.6 zeigt das fehlerfreie

3. Die Reaktanzmethode

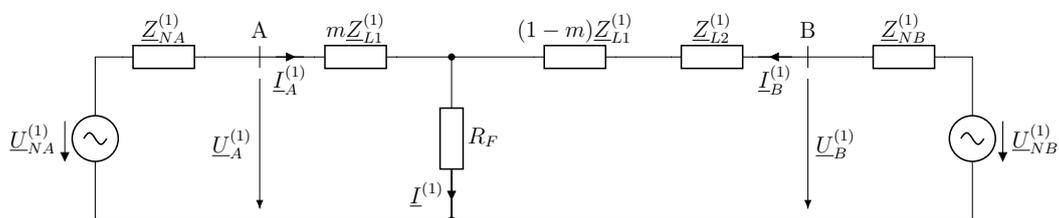


Abbildung 3.5.: Ersatzschaltung des 3-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten

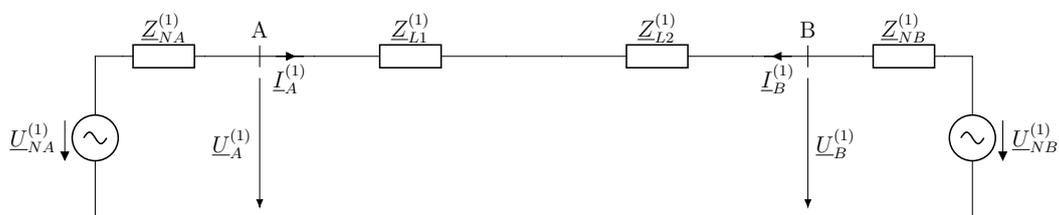


Abbildung 3.6.: Ersatzschaltung des Vorfehler-Zustands des 3-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten

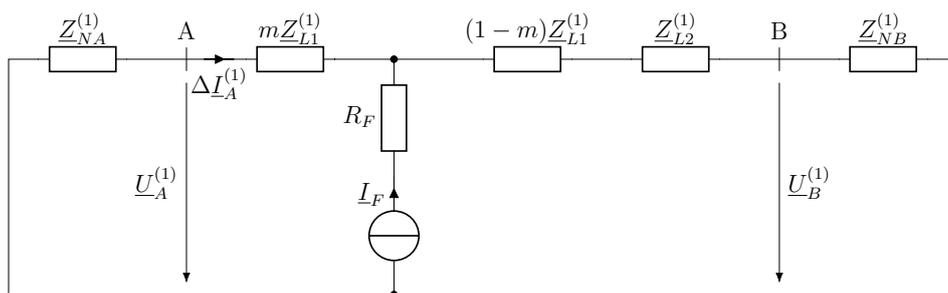


Abbildung 3.7.: Überlagertes Δ -System des 3-poligen Fehlers

3. Die Reaktanzmethode

System, Abbildung 3.5 das fehlerbehaftete. Durch Überlagerung der beiden Systeme ergibt das in Abbildung 3.7 dargestellte Δ -System.

Anhand des Δ -Systems kann die Kompensationsgröße und der Korrekturwinkel abgeleitet werden.

$$\underline{I}_{A,Cmp} = \Delta \underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{A,Fehler}^{(1)} - \underline{I}_{A,Vorfehler}^{(1)} \quad (3.22)$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m_{Cmp} \underline{Z}_{L1}^{(1)}}{(1 - m_{Cmp}) \underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}} + 1 \quad (3.23)$$

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

Die in den Kapiteln 2 und 3 gezeigten Methoden zur Fehlerortsbestimmung werden in diesem Kapitel an einem Modellnetz angewandt. Hierzu wird ein geeignetes Modell entwickelt und dessen Parameter festgelegt. Anschließend betrachtet man den fehlerbehafteten Zustand des Modells.

Für jeden der vier behandelten Fehlerarten (Kapitel 2.1) können die für die Fehlerortsbestimmung benötigten Daten im stationären Fehler-Zustand des Modells abgeleitet werden. Durch Variation des Fehlerwiderstandes und der übertragenen Leistung ergeben sich für jede Fehlerart verschiedene Szenarien. Die Bestimmung des Fehlerorts wird sowohl mit klassischer Methode als auch mit der Reaktanzmethode durchgeführt. Um Einflüsse der Parameter des Modells auf die mit der Reaktanzmethode berechnete Fehlerentfernung analysieren zu können, werden die relevanten Parameter ermittelt und variiert. Die Ergebnisse der in MATLAB durchgeführten Berechnungen und Simulationen sind anschließend im Kapitel 5 graphisch dargestellt und interpretiert.

4.1. Modellbildung

Wie bereits in Kapitel 2.3 gezeigt, kommt es bei der klassischen Methode, beim fehlerbehafteten System der beidseitig gespeisten Leitung, zu Abweichungen bei der Bestimmung des Fehlerorts. Die Reaktanzmethode soll laut den Analysen in Kapitel 3 dieses Problem nicht aufweisen bzw. kompensieren. Um die Unterschiede der beiden Methoden verifizieren und analysieren zu können, wird hier deshalb ein Modell mit einer beidseitig gespeisten Leitung entwickelt.

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

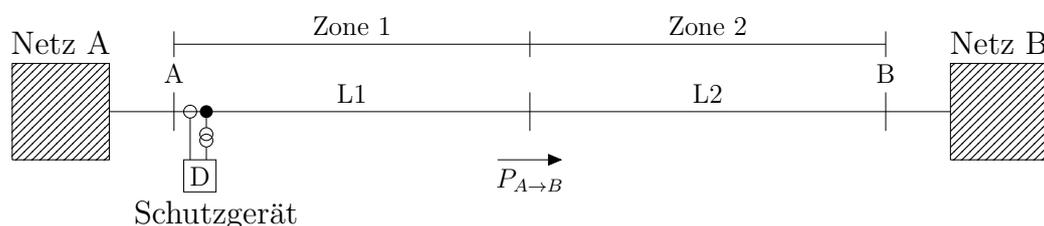


Abbildung 4.1.: Verwendetes Modell, bestehend aus zwei in Serie geschalteten Leitungen und zwei vermaschten, starr geerdeten Netzen.

Abbildung 4.1 zeigt das für die Berechnungen und Simulationen verwendete Modell. Es besteht aus den zwei vermaschten, starr geerdeten, dreiphasigen Mittelspannungsnetzen A und B. Diese sind über eine dreiphasige Leitung miteinander verbunden. Das Schutzgerät D befindet sich im Bereich der Sammelschiene A und nimmt über Strom- und Spannungswandler die benötigten Messgrößen auf.

Die Leitung des Modells wird als Serienschaltung zweier identischer Leitungen L1 und L2 ausgeführt. Jede der beiden Leitungen entspricht einer im Schutzgerät eingestellten Zone. So kann das Verhalten der klassischen Methode bzw. der Reaktanzmethode über zwei Zonen untersucht werden. Zur Bewertung der Methoden unter Lastfluss wird eine vom Netz A zum Netz B übertragene Wirkleistung $P_{A \rightarrow B}$ angenommen.

4.2. Parameter des Modells

Das Modell in Abbildung 4.1 ist im symmetrischen, fehlerfreien Fall durch eine einphasige Schaltung darstellbar. Tritt nun ein Fehler F auf einer der beiden Leitungen L1 oder L2 auf, muss jedoch die dreiphasige Darstellung bzw. das Ersatzschaltbild in Symmetrischen Komponenten betrachtet werden. Die Abbildung 4.2 soll das Modell im Fehlerzustand, zur Beschreibung der Parameter, deshalb nur schematisch wiedergeben.

Die Werte der Netz- und Leitungsparameter der schematischen Ersatzschaltung aus Abbildung 4.2 sind in Tabelle 4.1 angeführt und werden im folgenden beschrieben.

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

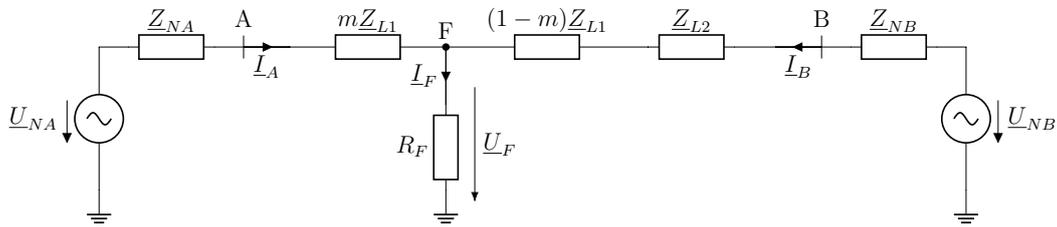


Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung des Modells aus Abbildung 4.1 im Fehlerfall

Tabelle 4.1.: Parameter des verwendeten Modells

Netz A	Leitung L1 bzw. L2 ($y = 1$ bzw. 2)	Netz B
$S''_{kA} = 0,5 \text{ GVA}$	$z'_{Ly} = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}$	$S''_{kB} = 3 \text{ GVA}$
$c_{NA} = 1$	$\underline{Z}_{Ly}^{(2)} = \underline{Z}_{Ly}^{(1)} = \underline{Z}_{Ly}$	$c_{NB} = 1$
$U_{NA,nenn} = 110 \text{ kV}$	$\underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{L1}$	$U_{NB,nenn} = 110 \text{ kV}$
$R_{NA}/X_{NA} = 0,1$	$R_{Ly}^{(0)}/R_{Ly}^{(1)} = 8$	$R_{NB}/X_{NB} = 0,1$
$R_{NA}^{(0)}/R_{NA}^{(1)} = 4$	$X_{Ly}^{(0)}/X_{Ly}^{(1)} = 6$	$R_{NB}^{(0)}/R_{NB}^{(1)} = 4$
$X_{NA}^{(0)}/X_{NA}^{(1)} = 3$	$l_{Ly} = 50 \text{ km}$	$X_{NB}^{(0)}/X_{NB}^{(1)} = 3$

Die beiden dreiphasigen Netze in Abbildung 4.2 besitzen eine konstante Nennspannung $U_{NA,nenn}$ bzw. $U_{NB,nenn}$ von 110 kV. Es sollen zwei unterschiedliche Netze betrachtet werden. Die Kurzschlussleistungen der beiden Netze sind deshalb mit $S''_{kA} = 0,5 \text{ GVA}$ und $S''_{kB} = 3 \text{ GVA}$ angenommen. Das verwendete R/X-Verhältnis $R_{NA}/X_{NA} = 0,1$ bzw. $R_{NB}/X_{NB} = 0,1$ ist ein, für Übertragungsnetze im 110 kV-Bereich, typischer Wert [1]. Die Netzimpedanzen werden als konzentrierte Elemente \underline{Z}_{NA} und \underline{Z}_{NB} berücksichtigt. Deren Betrag ergibt sich aus:

$$Z_N = c \cdot \frac{U_{N,nenn}^2}{S''_k} \quad (4.1)$$

Mit dem R/X-Verhältnis des jeweiligen Netzes kann die Netzimpedanz in Resistanz R_{NA} bzw. R_{NB} und Reaktanz X_{NA} bzw. X_{NB} aufgeteilt werden. Mit den in der Tabelle 4.1 angeführten Verhältnissen der Nullsystemgrößen zu den Mitsystemgrößen können die Reaktanz- und Resistanzparameter des Null-

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

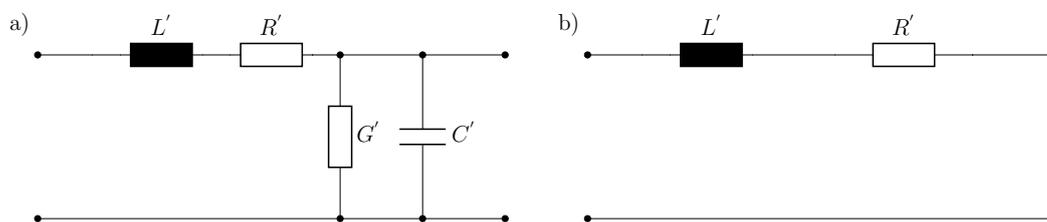


Abbildung 4.3.: Γ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit konzentrierten Leitungsparametern [1]:
a) vollständiges Γ -Ersatzschaltbild; b) Ersatzschaltung mit vernachlässigten Parametern für Leitungen mit ohmsch-induktivem Verhalten

Mit- und Gegensystem berechnet werden. Die detaillierten Berechnungen und Werte dieser Parameter sind im Anhang unter A.1 angeführt.

Die verwendeten dreiphasigen Leitungen L1 und L2 werden als elektrisch kurz angenommen. Abbildung 4.3 a) zeigt das einphasige Γ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit konzentrierten Leitungsparametern [1]. Bei Übertragungsleitungen sind Leitungen mit ohmsch-induktivem Verhalten typisch. Dadurch ist die Vernachlässigung der Parameter C' und G' zulässig. Für das Modell wird deshalb das in Abbildung 4.3 b) dargestellte Leitungsmodell in dreiphasiger Ausführung verwendet. Die Leitung L1 bzw. L2 besitzt eine längenbezogene Resistanz von $R'_{L1} = R'_{L2} = 0,1 \Omega/\text{km}$. Der Reaktanzbelag der Leitung L1 bzw. L2 wird mit $X'_{L1} = X'_{L2} = 0,4 \Omega/\text{km}$ angenommen. Diese Werte sind für Übertragungsleitungen typisch [2]. Die Leitungslänge der Leitung L1 bzw. L2 entspricht mit $l_{L1} = l_{L2} = l_L = 50 \text{ km}$ einer durchschnittlichen Länge von Übertragungsleitungen im Mittelspannungsnetz. Bei Betrachtung der Leitungsparameter in symmetrischen Komponenten werden Mitsystem- und Gegensystem-Impedanz der Leitung als identisch angenommen, $\underline{Z}_{L1}^{(1)} = \underline{Z}_{L1}^{(2)}$. Dies gilt für lineare, symmetrische Impedanzen, die keine rotierenden Energiesystemelemente darstellen [3]. Anhand der Verhältnisse der Nullsystem- zu den Mitsystem-Impedanzen, angegeben in Tabelle 4.1, können die Werte der Leitungsparameter des Null-, Mit- und Gegensystems berechnet werden. Die Berechnungen sind ebenfalls im Anhang A.1 in detaillierter Form zu finden.

Der Fehlerort F befindet sich in der schematischen Darstellung (Abbildung 4.2) in der Zone 1 bzw. auf der Leitung L1. Die auf die Gesamtlänge einer Leitung l_L bezogene Fehlerentfernung m wird im folgenden in Prozent (0%...200%) angegeben. Der auftretende Fehlerwiderstand wird im folgenden als $R_F \neq 0 \Omega$

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

angenommen und je nach simuliertem Szenario variiert. Im Kapitel 4.4.1 wird näher darauf eingegangen.

4.3. Betrachtung des Modells im stationären Zustand

4.3.1. Berechnung des Übertragungswinkels

Um die Berechnung der Fehlerentfernung mittels klassischer Methode bzw. Reaktanzmethode unter Lastfluss analysieren zu können, soll eine, im Modell aus Abbildung 4.1, vom Netz A zum Netz B übertragene Wirkleistung $P_{A \rightarrow B}$ angenommen werden.

Die über eine dreiphasige Leitung übertragene Leistung wird anhand des Ersatzschaltbildes der Leitung, in Abbildung 4.4 dargestellt, wie folgt definiert (vgl. [1]). Es soll vom rein symmetrischen Fall ausgegangen werden, in dem nur Vorgänge im Mitsystem stattfinden.

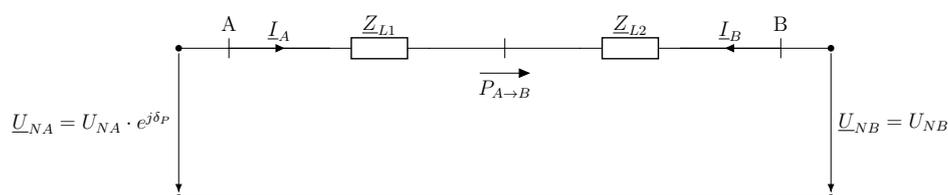


Abbildung 4.4.: Ersatzschaltbild, der im Modell (Abbildung 4.1) verwendeten Leitungen L1 und L2, zur Berechnung des Übertragungswinkels δ_P

Bezieht man alle verwendeten Winkel auf die Spannung U_{NB} , lassen sich die Spannungen der Netze als $\underline{U}_{NA} = U_{NA} \cdot e^{j\delta_P}$ und $\underline{U}_{NB} = U_{NB}$ darstellen. Auf der Leitung fließt der Strom $\underline{I}_A = \underline{I}_B$. Dieser lässt sich durch

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_{NA} - \underline{U}_{NB}}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = \frac{U_{NA} \cdot e^{j\delta_P} - U_{NB}}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} \quad (4.2)$$

berechnen. Die Scheinleistung \underline{S}_{NB} des Netzes B entspricht:

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

$$\underline{S}_{NB} = P_{NB} + jQ_{NB} = 3 \cdot \underline{U}_{NB} \cdot \underline{I}_B^* \quad (4.3)$$

Der Realteil dieser Gleichung stellt die Wirkleistung dar. Setzt man den Strom \underline{I}_B aus Gleichung 4.2 in 4.3 ein und betrachtet nur den Realteil, ergibt sich die Wirkleistung zu:

$$P_{NB} = P_{A \rightarrow B} = \Re \left\{ 3 \cdot \underline{U}_{NB} \cdot \left(\frac{U_{NA} \cdot e^{j\delta_P} - U_{NB}}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} \right)^* \right\} \quad (4.4)$$

Daraus kann der Übertragungswinkel δ_P , unter Verwendung der festgelegten Parameter aus Tabelle 4.1, in Abhängigkeit der angenommenen Leistung $P_{A \rightarrow B}$ berechnet werden.

4.3.2. Berechnung des stationären Fehler-Zustands

Ausgehend vom fehlerfreien, symmetrischen Zustand des Modells, sollen nun vier verschiedene darin auftretende Fehlerfälle, entsprechend der Fehlerarten in Abbildung 2.1 (a-d), betrachtet werden. Das Modell aus Abbildung 4.1 kann für jeden Fehlerfall in das jeweilige Ersatzschaltbild überführt werden. Die Schaltbilder sind in Symmetrischen Komponenten dargestellt und wurden bereits im Kapitel 3.2 zur Analyse der Reaktanzmethode verwendet. Auf deren erneute Darstellung wird hier demnach verzichtet. Abbildungen 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5 zeigen diese Ersatzschaltbilder.

Um die Fehlerortsbestimmung mittels klassischer Methode oder Reaktanzmethode durchführen zu können, müssen die Leiter-Erde-Spannungen der drei Phasen $\underline{U}_{A,L1-E}$, $\underline{U}_{A,L2-E}$ und $\underline{U}_{A,L3-E}$ bzw. die drei Leiterströme $\underline{I}_{A,L1}$, $\underline{I}_{A,L2}$ und $\underline{I}_{A,L3}$ bekannt sein.

Für deren Berechnung werden transiente Vorgänge bzw. Einschwingvorgänge des Fehlers vernachlässigt. Es wird nur der stationäre Zustand des Modells betrachtet. Die Symmetrie der Spannungsquellen soll durch den Fehler unbeeinflusst bleiben. Daher wird angenommen, dass diese nur ein Mitsystem besitzen und die Gegen- bzw. Nullsystemkomponenten null sind:

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{NA}^{(1)} &= U_{NA} \cdot e^{j\delta_P} \\
 \underline{U}_{NB}^{(1)} &= U_{NB} \cdot e^{j0^\circ} \\
 \underline{U}_{NA}^{(0)} &= \underline{U}_{NA}^{(2)} = 0 \\
 \underline{U}_{NB}^{(0)} &= \underline{U}_{NB}^{(2)} = 0
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Der Winkel δ_P bezeichnet in Gleichung 4.5 den Übertragungswinkel aus Gleichung 4.4.

Anhand dieser Annahmen lassen sich für jede Fehlerart die Formeln zur Berechnung der Spannungen $\underline{U}_A^{(0)}$, $\underline{U}_A^{(1)}$ und $\underline{U}_A^{(2)}$ bzw. der Ströme $\underline{I}_A^{(0)}$, $\underline{I}_A^{(1)}$ und $\underline{I}_A^{(2)}$ aus dem jeweiligen Ersatzschaltbild ableiten. Diese Spannungs- und Stromwerte sind jeweils von der bezogenen Fehlerentfernung m , vom Fehlerwiderstand R_F und vom Übertragungswinkel δ_P abhängig. Der Übertragungswinkel kann, wie bereits gezeigt, aus der angenommenen, zu übertragenden Wirkleistung $P_{A \rightarrow B}$ berechnet werden.

Die Formeln der Spannungen und Ströme lassen sich allgemein wie folgt definieren:

$$\left. \begin{array}{l}
 \underline{U}_A^{(0)} \\
 \underline{U}_A^{(1)} \\
 \underline{U}_A^{(2)} \\
 \underline{I}_A^{(0)} \\
 \underline{I}_A^{(1)} \\
 \underline{I}_A^{(2)}
 \end{array} \right\} = f(m, R_F, P_{A \rightarrow B}) \tag{4.6}$$

Die benötigten Leiter-Erde-Spannungen bzw. die drei Leiter-Ströme können mittels Entsymmetrierungsmatrix aus diesen Null-, Mit-, und Gegensystemkomponenten ausgedrückt werden [5]. Die detaillierte Herleitung der Spannungen und Ströme ist im Anhang unter Kapitel B.1 angeführt.

Diese sechs Strom- und Spannungswerte aus Gleichung 4.6 stellen die Ausgangsdaten der Fehlerortsbestimmung in Kapitel 4.4.2 dar.

4.4. Simulation und Parametervariation

4.4.1. Definition der simulierten Szenarien

Um eine möglichst allgemeine Bewertung der Reaktanzmethode zu ermöglichen, werden verschiedene Szenarien jeder Fehlerart untersucht.

Für jede Fehlerart aus Abbildung 2.1 (a-d) werden mehrere Szenarien betrachtet. Diese unterscheiden sich jeweils durch den Wert des Fehlerwiderstandes R_F . Wie bereits erwähnt, wird dieser als rein reelle Größe betrachtet. Bei Lichtbogenfehlern liegt der Wert des auftretenden Fehlerwiderstandes im niedrigen einstelligen Ohm-Bereich. Bei Fehlern mit Verbindung zu einem Mast der Leitung kann dieser jedoch auch höher sein.

Es werden daher folgende Szenarien betrachtet:

1. $R_F = 0 \Omega$
2. $R_F = 2 \Omega$
3. $R_F = 5 \Omega$
4. $R_F = 10 \Omega$
5. $R_F = 50 \Omega$ (nur für 1-poligen Fehler)

Das Szenario 1 entspricht, mit einem Widerstandswert von $R_F = 0 \Omega$, einem satten Kurzschluss. Die Szenarien 2 und 3 stellen mit $R_F = 2 \Omega$ bzw. $R_F = 5 \Omega$ einen widerstandsbehafteten Lichtbogenfehler dar. Das Szenario 4, mit einem Widerstandswert von $R_F = 10 \Omega$, soll als Worst-Case-Abschätzung des Lichtbogenfehlers dienen. Szenario 5 entspricht mit $R_F = 50 \Omega$ dem Worst-Case-Szenario eines Fehlers mit Verbindung zu einem Mast und wird nur für den 1-poligen Fehler betrachtet.

Für jedes der fünf Szenarien werden verschiedene, vom Netz A zum Netz B, übertragene Wirkleistungen $P_{A \rightarrow B}$ betrachtet. Diese lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Leistungsimport
- lastflussfreier Zustand
- Leistungsexport

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

Für den Leistungsimport wird eine vom Netz A zu B übertragene Wirkleistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW angenommen. Der lastflussfreie Zustand entspricht einem Wirkleistungstransport von $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW. Für den Leistungsexport werden die Leistungswerte $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW, $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW und $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW verwendet.

4.4.2. Simulation und Berechnung der Fehlerentfernung

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Fehlerentfernung mittels klassischer Methode bzw. Reaktanzmethode lässt sich anhand des Flussdiagramms in Abbildung 4.5 erklären. Alle Berechnungen werden mit MATLAB durchgeführt.

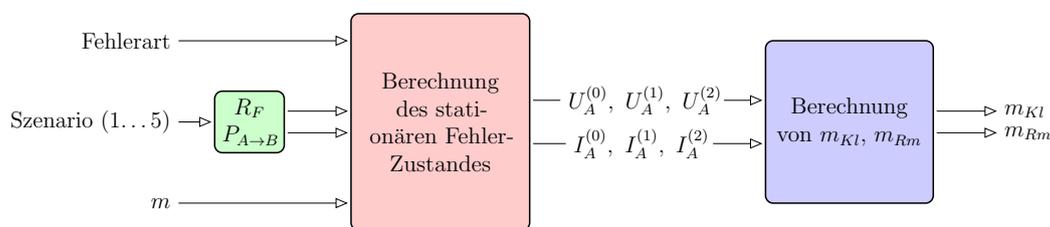


Abbildung 4.5.: Diagramm zur Darstellung des Simulationsvorganges in MATLAB

Es wird die zu simulierende Fehlerart (Abbildung 2.1, a-d) und ein Szenario (R_F und $P_{A \rightarrow B}$) ausgewählt. Die Fehlerentfernung m des simulierten Fehlers wird ebenfalls vorgegeben.

Anschließend werden anhand der in 4.3.2 beschriebenen Berechnungen des stationären Fehler-Zustandes, sowie den Werten des Übertragungswinkels (Anhang: Tabelle A.1), die Werte der Spannungen $\underline{U}_A^{(0)}$, $\underline{U}_A^{(1)}$ und $\underline{U}_A^{(2)}$ und der Ströme $\underline{I}_A^{(0)}$, $\underline{I}_A^{(1)}$ und $\underline{I}_A^{(2)}$ berechnet.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden dazu verwendet, um mittels klassischer Methode (Kapitel 2.2) bzw. Reaktanzmethode (Kapitel 3.2) die simulierte, vorgegebene Fehlerentfernung m zu ermitteln. Als Ergebnis dieser Berechnungen erhält man eine, mit der klassischen Methode bzw. der Reaktanzmethode berechnete Fehlerentfernung m_{Kl} bzw. m_{Rm} .

Wird nun die vorgegebene bezogene Fehlerentfernung m von 0 bis 2 (entspricht 0 bis 200% der Leitungslänge l_L) variiert, ergeben sich die berechneten

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

Fehlerentfernungen m_{Kl} bzw. m_{Rm} als Funktion der vorgegeben Entfernung m .

$$\begin{aligned} m_{Kl} &= f(m) \\ &\text{bzw.} \\ m_{Rm} &= f(m) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Die daraus erzeugten Diagramme sind im Kapitel 5 dargestellt und beschrieben.

4.4.3. Sensitivitätsanalyse

Durch Analyse der im Kapitel 3.2 für jede Fehlerart berechneten Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ lässt sich folgendes erkennen. Der Korrekturwinkel im allgemeinen betrachtet, ist von der Kompensationsentfernung m_{Cmp} , den Netzimpedanzen $\underline{Z}_{NA}^{(k)}$ bzw. $\underline{Z}_{NB}^{(k)}$ und den Leitungsimpedanzen $\underline{Z}_{L1}^{(k)}$ bzw. $\underline{Z}_{L2}^{(k)}$ abhängig. Die Hochzahl k bezeichnet dabei das jeweilige betrachtete System der symmetrischen Komponenten (Null-, Mit- bzw. Gegensystem).

Die Leitungsimpedanzen werden im folgenden als fest vorgegebene, konstante Größen betrachtet. Die Netzimpedanzen können jedoch aus der Kurzschlussleistung S_{kA} bzw. S_{kB} und der konstanten Nennspannung U_{NA} bzw. U_{NB} , mit der Gleichung 4.1, berechnet werden. Somit lassen sich für den Korrekturwinkel folgende Abhängigkeiten definieren:

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = f(m_{Cmp}, S''_{kA}, S''_{kB}) \quad (4.8)$$

Die Fehlerreaktanz X_F kann unter Verwendung des Korrekturwinkels anhand der in Kapitel 3.2 angeführten Formeln (der Fehlerart entsprechend) berechnet werden. Somit kann die Fehlerreaktanz X_F als eine Funktion des Korrekturwinkels gesehen werden.

$$X_F = f(\underline{\delta}_{A,Cmp}) \quad (4.9)$$

Da sich die mit der Reaktanzmethode zu berechnende bezogene Fehlerentfernung m_{Rm} aus der Fehlerreaktanz ergibt, wird m_{Rm} als Funktion von X_F definiert.

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

Durch Betrachtung der Gleichungen 4.8 und 4.9 lässt sich für die zu berechnende bezogene Fehlerentfernung folgendes ableiten:

$$m_{Rm} = f(X_F) = f(\underline{\delta}_{A,Cmp}) = f(m_{Cmp}, S''_{kA}, S''_{kB}) \quad (4.10)$$

Die mit der Reaktanzmethode berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} ist somit von der Kompensationsentfernung m_{Cmp} und von den Kurzschlussleistungen S''_{kA} bzw. S''_{kB} der beiden Netze abhängig.

Um Einflüsse dieser Parameter auf die bezogene Fehlerentfernung m_{Rm} analysieren zu können, werden im folgenden Abschnitt Szenarien zur Sensitivitätsprüfung definiert.

Variation der Kompensationsentfernung

Wie in Gleichung 4.10 gezeigt, ist die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} vom Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ und somit in weiterer Folge von der Kompensationsentfernung m_{Cmp} abhängig. Diese wurde bisher, wie im Kapitel 3 beschrieben, auf das Zonenende der zu schützenden Leitung festgelegt. Dies entspricht $m_{Cmp} = 0,8$. Um die Sensitivität der Fehlerentfernung m_{Rm} auf die Variation der Kompensationsentfernung untersuchen zu können, wird m_{Cmp} im folgenden jedoch als variabel betrachtet. Abbildung 4.6 zeigt den, mit den Null- bzw. Gegensystemparametern aus Tabelle 4.1, berechneten Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ in Abhängigkeit der Kompensationsentfernung m_{Cmp} .

Die mit der Reaktanzmethode berechnete Fehlerentfernung soll auf die Variation der Kompensationsentfernung anhand folgendem Szenario untersucht werden:

Die Kompensationsentfernung m_{Cmp} wird von 0% . . . 200% der Leitungslänge l_L variiert. Dazu wird m_{Cmp} im Diagramm 4.5 als zusätzlicher Eingangsparameter definiert. Die Vorgangsweise, der im Kapitel 4.4.2 beschriebenen Berechnung der Fehlerentfernung, bleibt davon unbeeinflusst. Als Resultat ergibt sich die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} als Funktion der simulierten, tatsächlichen Fehlerentfernung m und der Kompensationsentfernung m_{Cmp} .

$$m_{Rm} = f(m, m_{Cmp}) \quad (4.11)$$

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

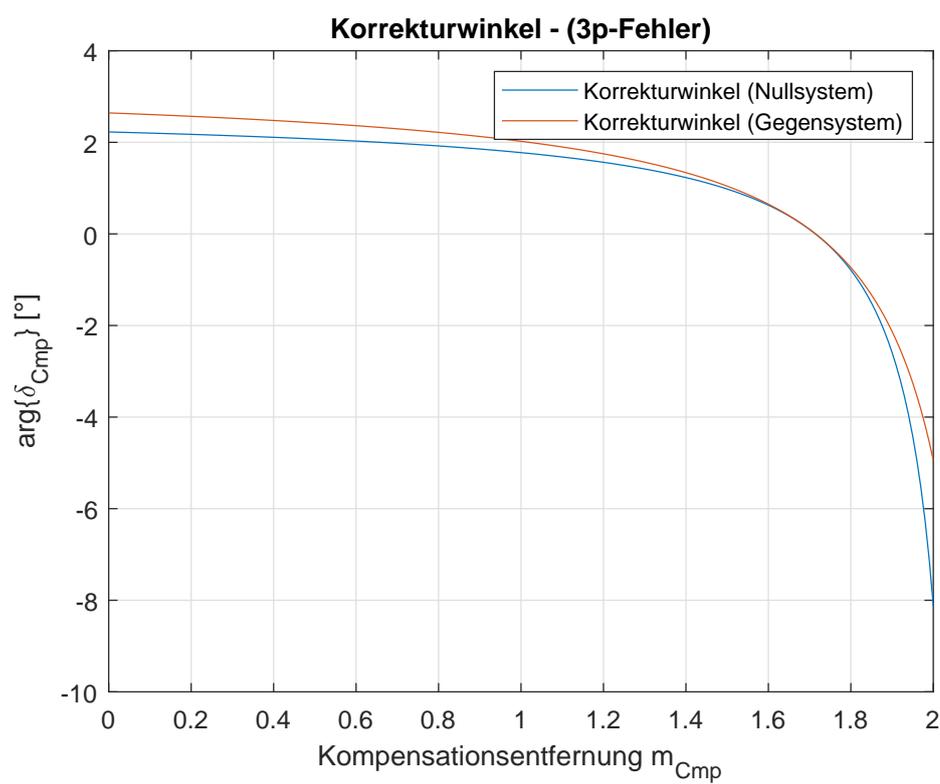


Abbildung 4.6.: $\arg\{\delta_{A,Cmp}\}$ (berechnet aus den Nullsystem- bzw. Gegensystem-Parametern) in Abhängigkeit der Kompensationsentfernung m_{Cmp}

4. Analytische Betrachtung und Simulation am Modell

Die Ergebnisse dieser Simulationen finden sich ebenfalls im Kapitel 5.

Variation der Kurzschlussleistung

Die Kurzschlussleistung S''_k eines realen Netzes schwankt in der Regel über den Tagesverlauf. Wie in Gleichung 4.8 gezeigt, ist der Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ von den Kurzschlussleistungen der beiden im Modell betrachteten Netze abhängig. Im Normal-Betrieb wird der Korrekturwinkel jedoch fest im Schutzgerät eingestellt und der täglich variierenden Kurzschlussleistung nicht laufend angepasst. Die geänderte Kurzschlussleistung S''_{kA} bzw. S''_{kB} hat bei gleichbleibender Nennspannung der Netze, entsprechend Gleichung 4.1, eine geänderte Netzimpedanz \underline{Z}_{NA} bzw. \underline{Z}_{NB} zufolge. Diese werden zur Berechnung der Ausgangsdaten der Fehlerortsbestimmung ($\underline{U}_A^{(0)}, \underline{U}_A^{(1)}, \underline{U}_A^{(2)}, \underline{I}_A^{(0)}, \underline{I}_A^{(1)}, \underline{I}_A^{(2)}$) verwendet. Dadurch folgen aus einer variierten Kurzschlussleistung veränderte Ausgangsdaten.

Die daraus entstehenden Auswirkungen auf die zu berechnende Fehlerentfernung m_{RM} sollen in den folgenden zwei Szenarien untersucht werden.

Im Szenario A wird für die Berechnung des stationären Fehlerzustandes (gezeigt in Kapitel 4.3.2) ein geänderter Wert der Kurzschlussleistung S''_{kA} verwendet. Es werden die Werte $S''_{kA}/4$, $S''_{kA}/2$, $2 \cdot S''_{kA}$ und $4 \cdot S''_{kA}$ eingesetzt.

Für das Szenario B wird die Kurzschlussleistung S''_{kB} variiert. Es werden $S''_{kB}/4$, $S''_{kB}/2$, $2 \cdot S''_{kB}$ und $4 \cdot S''_{kB}$ verwendet.

Für beide Szenarien wird jedoch der Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ mit den ursprünglichen Werten (Tabelle 4.1) der Kurzschlussleistungen berechnet! Als Kompensationsentfernung wird wieder $m_{Cmp} = 0.8$ eingesetzt!

Anschließend kann die Berechnung der Fehlerentfernung m_{RM} analog zu der im Kapitel 4.4.2 definierten Vorgangsweise durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind im Kapitel 5 angeführt und beschrieben.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Simulationen präsentiert und interpretiert. Diese bilden die Grundlage für die Bewertung der Reaktanzmethode.

Beginnend mit dem 1-poligen Fehler werden im folgenden nacheinander die Ergebnisse aller vier Fehlerarten (Abbildung 2.1) dargestellt und kurz beschrieben. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, wird im nächsten Kapitel eine allgemeine Interpretation der Ergebnisse angeführt und die Reaktanzmethode allgemein bewertet.

5.1. Ergebnisse des 1-poligen Fehlers

5.1.1. Vergleich der beiden Methoden

Szenario 1

Die Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis des simulierten Szenarios 1 mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$. Sowohl die klassische Methode als auch die Reaktanzmethode liefern hier, wie durch die Analysen in Kapitel 2 und 3 erwartet, den exakten Fehlerort.

Szenario 2

Abbildung 5.2 zeigt das Ergebnis der Simulation für einen Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$. Die Differenz der berechneten zur tatsächlichen Fehlerentfernung

5. Ergebnisse

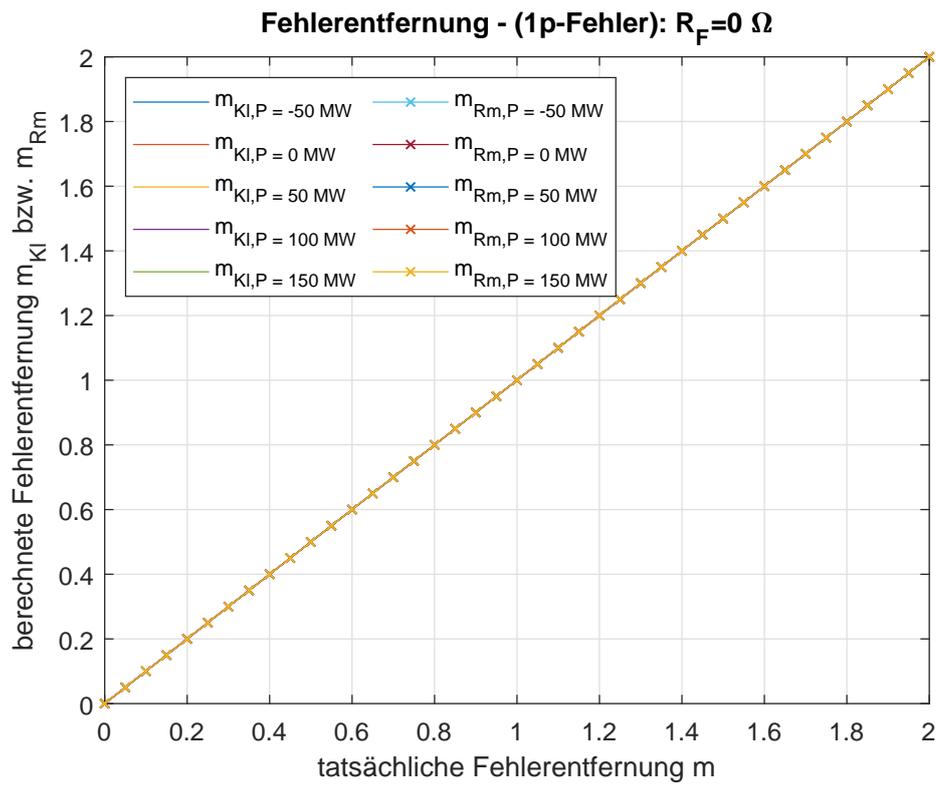


Abbildung 5.1.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$

5. Ergebnisse

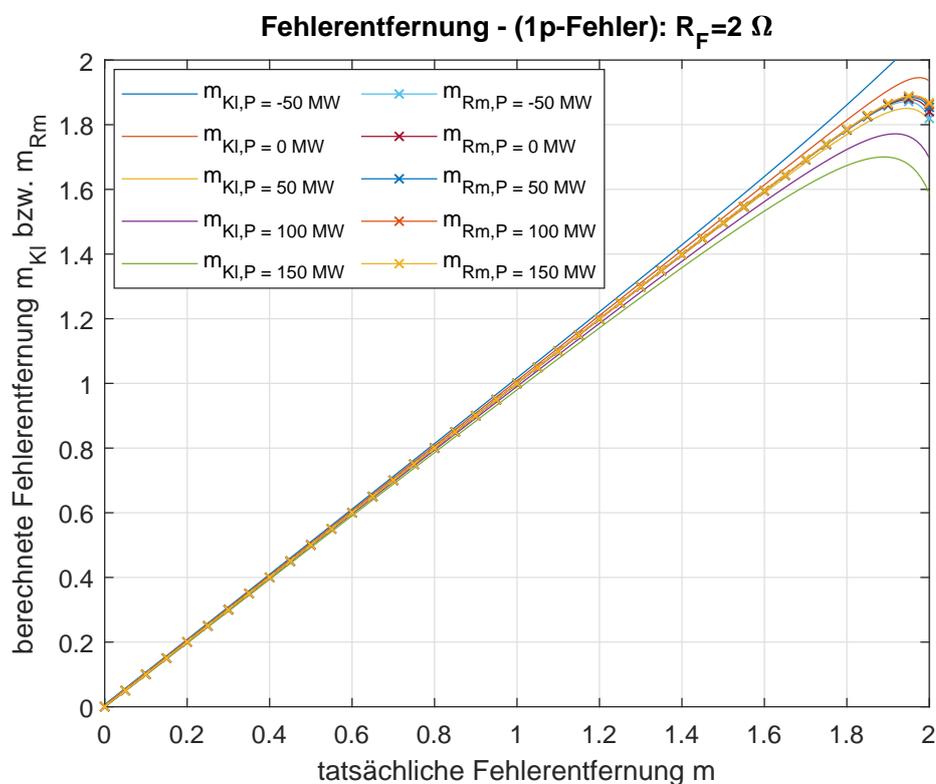


Abbildung 5.2.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

(bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) der klassischen Methode sowie der Reaktanzmethode ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Wie aus den beiden Abbildungen ersichtlich, ist die Berechnung des Fehlerorts mit der Reaktanzmethode für $R_F = 2 \Omega$ bis weit in die zweite Zone hinein, für alle betrachteten Lastflusszenarien, exakt. Erst ab einer tatsächlichen Fehlerentfernung von ca. $m = 1,8$ zeigen sich erste Anzeichen von übergreifendem Verhalten bzw. Abweichungen im Prozentbereich. Die maximale Differenz zwischen berechneter und tatsächlicher Entfernung entsteht am Ende der zweiten Zone ($m = 2$) mit ca. 7%. Wie aus den Ergebnissen für $R_F = 2 \Omega$ ersichtlich, ist die Reaktanzmethode nahezu unabhängig vom Lastfluss.

5. Ergebnisse

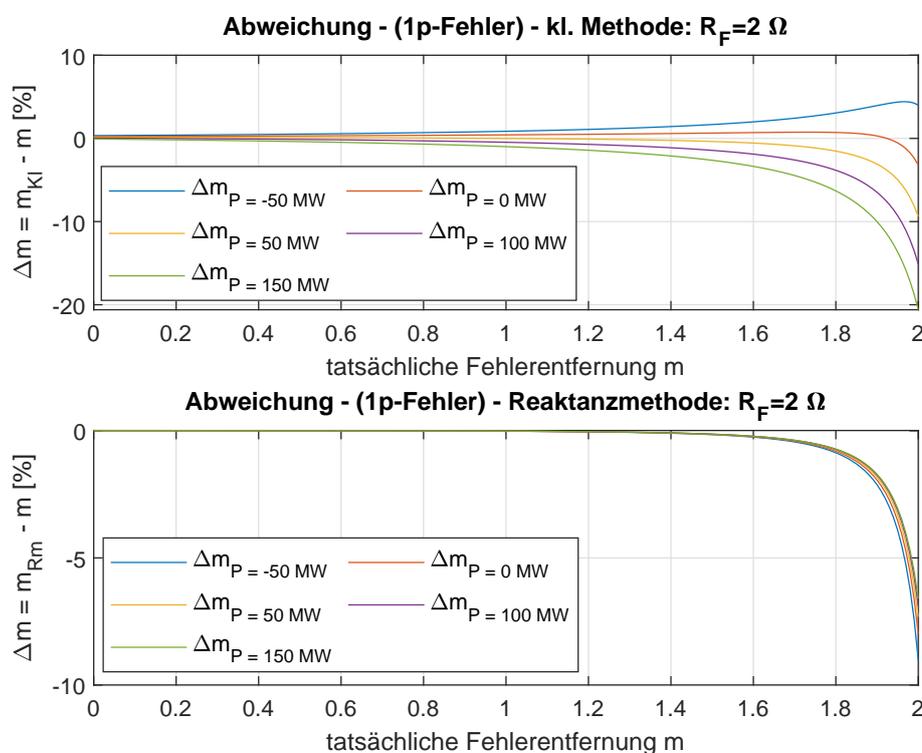


Abbildung 5.3.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

Bei der klassischen Methode weicht für das Szenario 2, $R_F = 2 \Omega$, bereits in der ersten Zone, die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung ab. Für den Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW tritt untergreifendes Verhalten auf. Für die Fälle $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW tritt Übergreifen auf. Das Unter- bzw. Übergreifen wird gegen Ende der Zone 2 größer. Die Abweichung beträgt bei $m = 2$, für $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW, 10%. Für $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW ergibt sich mit 20% die maximale Abweichung. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich für einen Wirkleistungstransport $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW sagen, dass die klassische Methode mit steigender Leistung ungenauere Ergebnisse des Fehlerorts liefert bzw. die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung immer stärker abweicht.

5. Ergebnisse

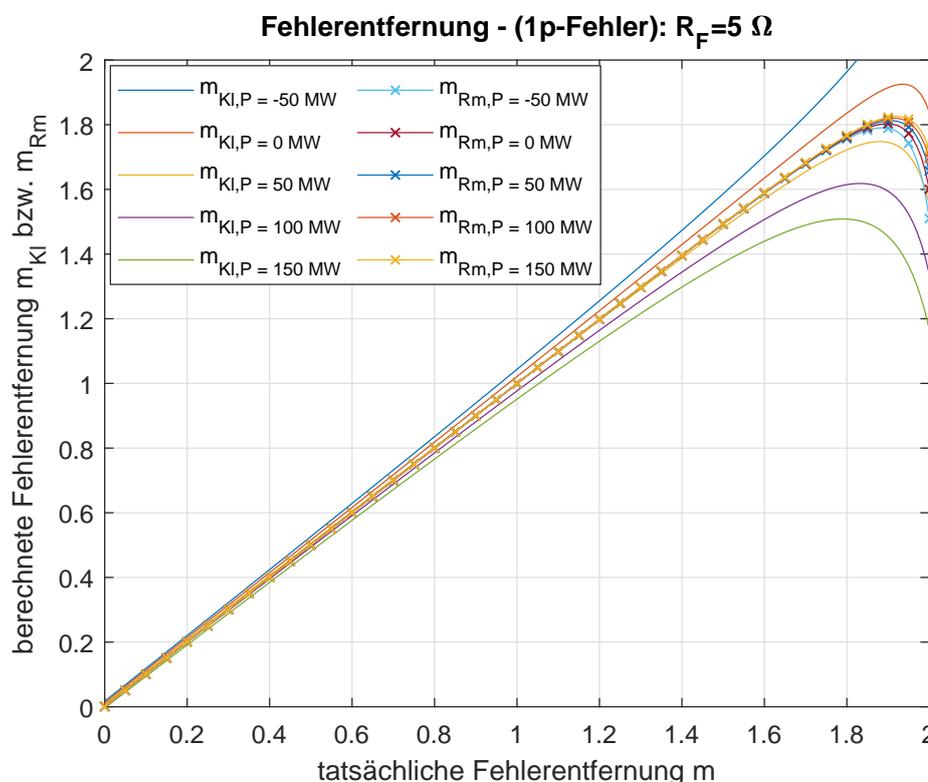


Abbildung 5.4.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

Szenario 3

Für Szenario 3, $R_F = 5 \Omega$, zeigt sich ein ähnliches Verhalten der beiden Methoden. Wie in Abbildung 5.4 und 5.5 ersichtlich, ist die Berechnung mit der Reaktanzmethode wieder bis weit in die Zone 2 exakt. Erst am Ende der zweiten Zone (ab $m = 1,9$) zeigt sich ein übergreifendes Verhalten. Die maximale Abweichung liegt hier, je nach Lastfluss, zwischen 15% und 25%. Die große Abweichung stellt hier allerdings noch kein zu großes Problem dar, da ein Fehler am Ende der Zone 2 vom Distanzschutzgerät noch immer in Zone 2 gesehen wird.

Die klassische Methode zeigt hingegen bereits am Ende der ersten Zone Abwei-

5. Ergebnisse

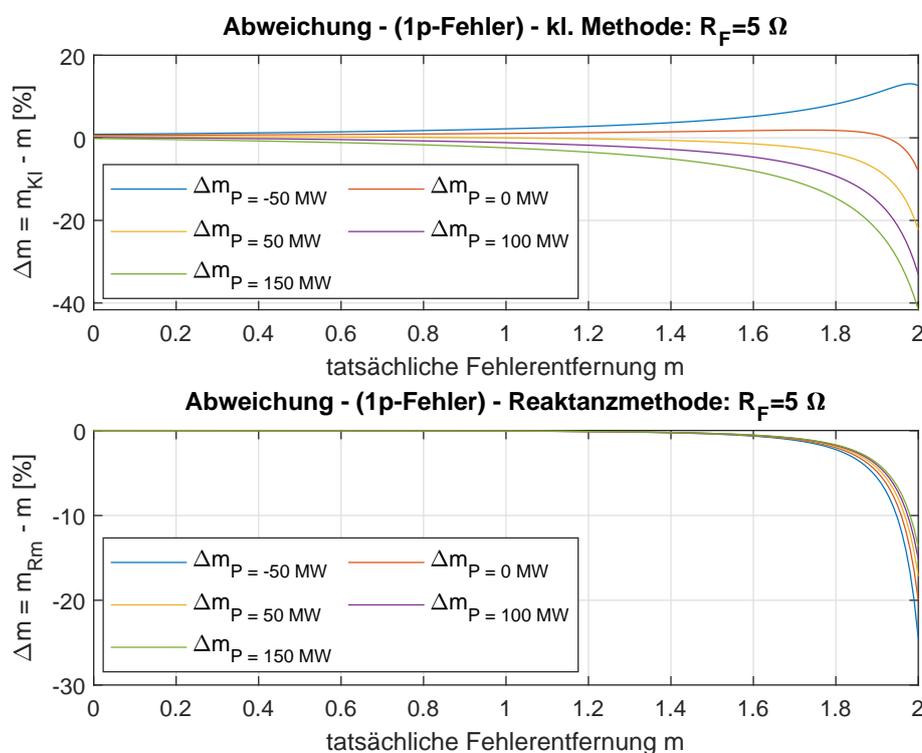


Abbildung 5.5.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

chungen im Prozentbereich, welche am Ende der Zone 2, für $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW, zwischen 20% und 40% erreichen. Für den Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt Untergreifen auf. Für den lastflussfreien Fall zeigt die Berechnung mit der klassischen Methode am Ende der zweiten Zone zwar nur geringe Abweichungen zwischen 5% und 10%, jedoch weist diese über weite Teile der beiden Zonen leicht untergreifendes Verhalten auf. Dies könnte bei Fehlern im Bereich der Grenze zwischen den beiden Zonen dazu führen, dass ein Fehler der gerade noch in Zone 2 liegt, als ein in Zone 1 liegender Fehler erkannt wird.

5. Ergebnisse

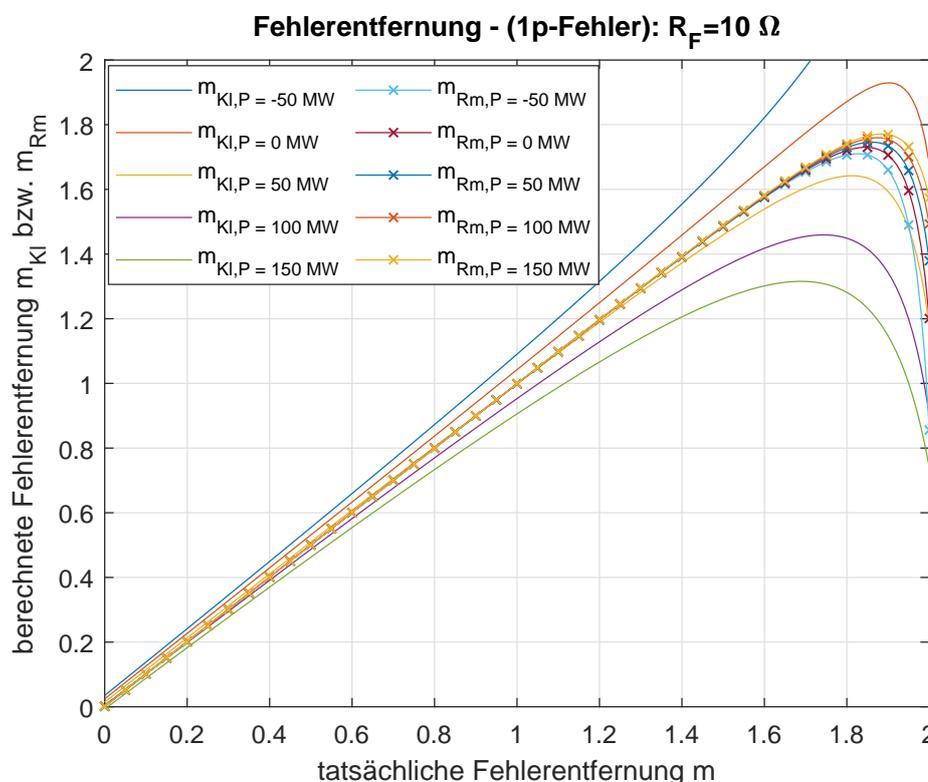


Abbildung 5.6.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

Szenario 4

In Abbildung 5.6 und 5.7 ist das Ergebnis des Szenarios 4 mit $R_F = 10 \Omega$ dargestellt.

Hier lassen sich bereits starke Unterschiede zwischen den beiden Methoden erkennen. Während die Reaktanzmethode wieder bis ca. $m = 1,6$ sehr exakte Werte der Fehlerentfernung liefert, weicht die mit der klassische Methode berechnete Entfernung bereits ab $m = 0,6$ um ca. 5% von der tatsächlichen Fehlerentfernung ab. Mit steigenden Werten von m wird diese Abweichung größer und nimmt gegen Ende der Zone 2 beträchtliche Werte an.

5. Ergebnisse

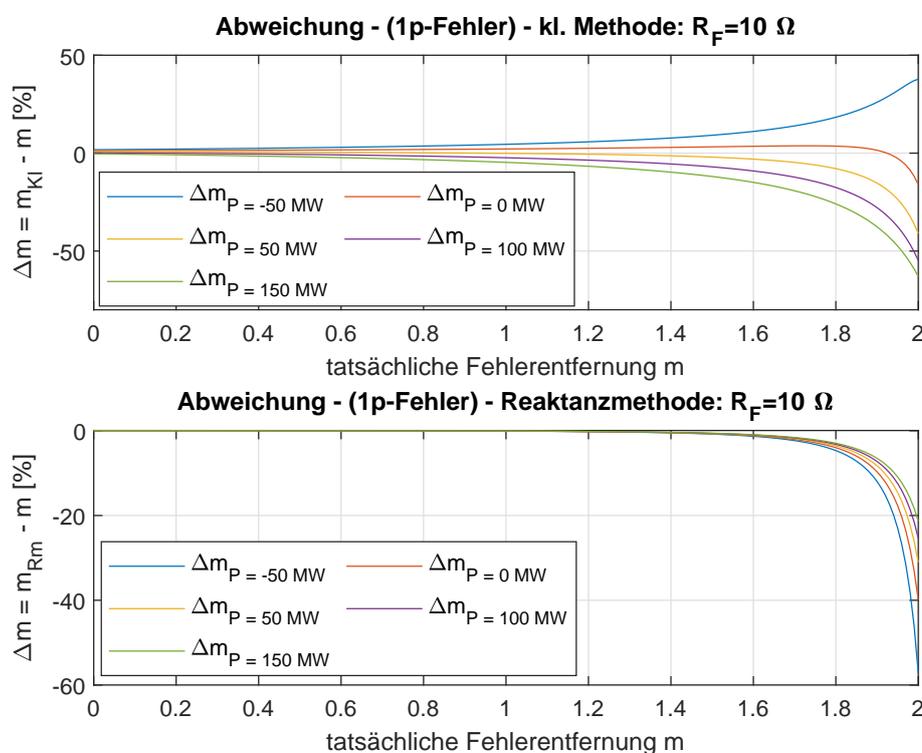


Abbildung 5.7.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

Die Reaktanzmethode liefert wieder, für alle fünf Lastflussvarianten, bis ca. $m = 1,6$ nahezu exakte Werte der Fehlerentfernung. Erst ab $m = 1,8$ beträgt die Abweichung des berechneten vom tatsächlichen Fehlerort mehr als 5%. Bei Entfernungen nahe dem Ende der Zone 2 ($m > 1,8$) zeigt die Reaktanzmethode, bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$, stark übergreifendes Verhalten. Die maximale Differenz zur tatsächlichen Fehlerentfernung beträgt, bei $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$, ca. 57%. Dies stellt jedoch ein großes Problem dar, da ein Fehler in Zone 2 somit in Zone 1 gesehen werden würde.

Aus den Darstellungen in Abbildung 5.6 und 5.7 ist ersichtlich, dass die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung bei der Reaktanzmethode mit steigendem Lastfluss kleiner werden.

5. Ergebnisse

Die klassische Methode weist am Ende der Zone 2, wie in den Abbildungen 5.6 und 5.7 ersichtlich, beachtliche Abweichungen von der tatsächlichen Fehlerentfernung auf. Für den Fall $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW tritt starkes Übergreifen auf. Die Abweichung beträgt ca. 60%. Dies würde ebenfalls bedeuten, dass ein Fehler in Zone 2 als ein Fehler in Zone 1 erkannt werden würde. Für den Leistungsimport-Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt stark untergreifendes Verhalten auf. Die Abweichung beträgt jedoch ca. 37%.

Szenario 5

Die Abbildungen 5.8 und 5.9 stellen die Ergebnisse des Szenarios 5 mit $R_F = 50 \Omega$ dar.

Die Reaktanzmethode liefert auch hier, unabhängig der betrachteten übertragenen Wirkleistung, bis ca. $m = 1,4$ exakte Werte der Fehlerentfernung. Erst ab $m = 1,6$ übersteigen die Abweichungen der berechneten zur tatsächlichen Fehlerentfernung 5%. Für die Fälle $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW, $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW und $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW liegt die Abweichung zur tatsächlichen Entfernung für Fehler am Ende der Zone 2 bei 40%, 60% bzw. 90%.

Bei einer tatsächlichen Fehlerentfernung von $m = 2$ und einer übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW weicht die Reaktanzmethode um 200% von der tatsächlichen Entfernung ab und ist somit ungenauer als das Ergebnis der klassischen Methode.

Der Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW stellt einen besonderen Fall dar, da es hier zu einer Polstelle (bei $m = 1.97$) bei der Berechnung mittels Reaktanzmethode kommt. Die Polstelle tritt aufgrund der gewählten Werte der Modell-Parameter auf und stellt ein großes Problem dar. Die Fehlerortsselektivität ist hier nicht mehr gewährleistet! Wird dieses Szenario nun mit einem anderen Wert der Kompensationsentfernung m_{Cmp} betrachtet, ergibt sich das Ergebnis in Abbildung 5.10. Für die Kompensationsentfernung wurde $m_{Cmp} = 1.973$ verwendet. Dieser Wert entspricht der tatsächlichen Fehlerentfernung kurz nach der Polstelle. Hier zeigt die Reaktanzmethode für alle betrachteten Lastflüsse, über beide Zonen hinweg, ein deutliches untergreifendes Verhalten. Die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung betragen, je nach Lastfluss, zwischen ca. 15% und 35%. Die Polstelle tritt bei dieser Kompensationsentfernung

5. Ergebnisse

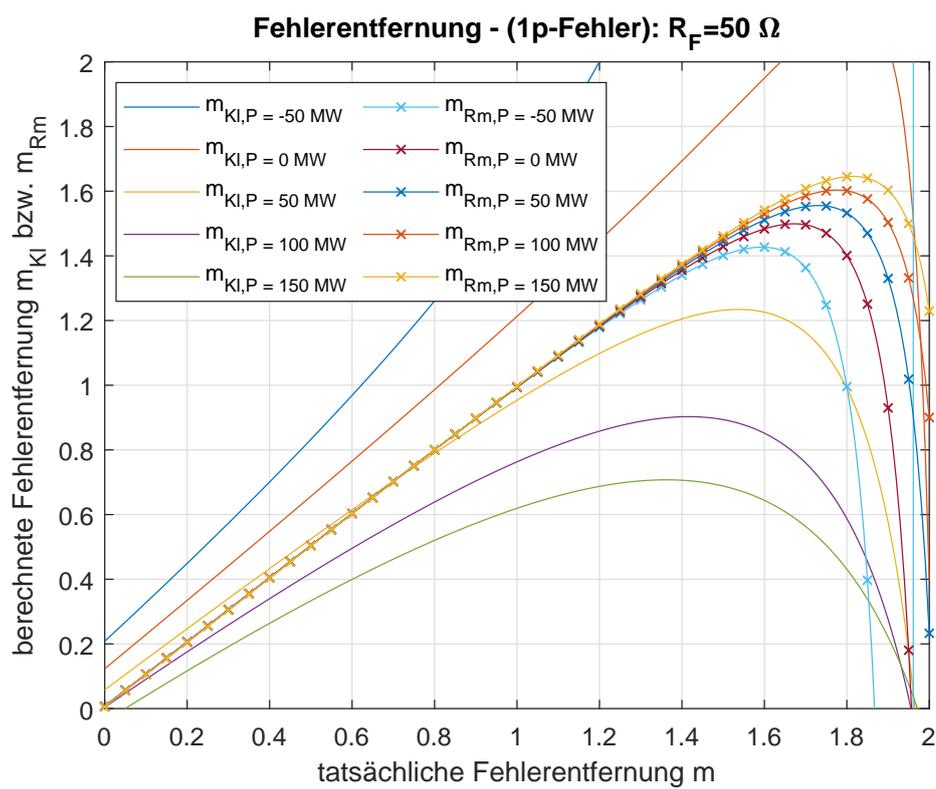


Abbildung 5.8.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$

5. Ergebnisse

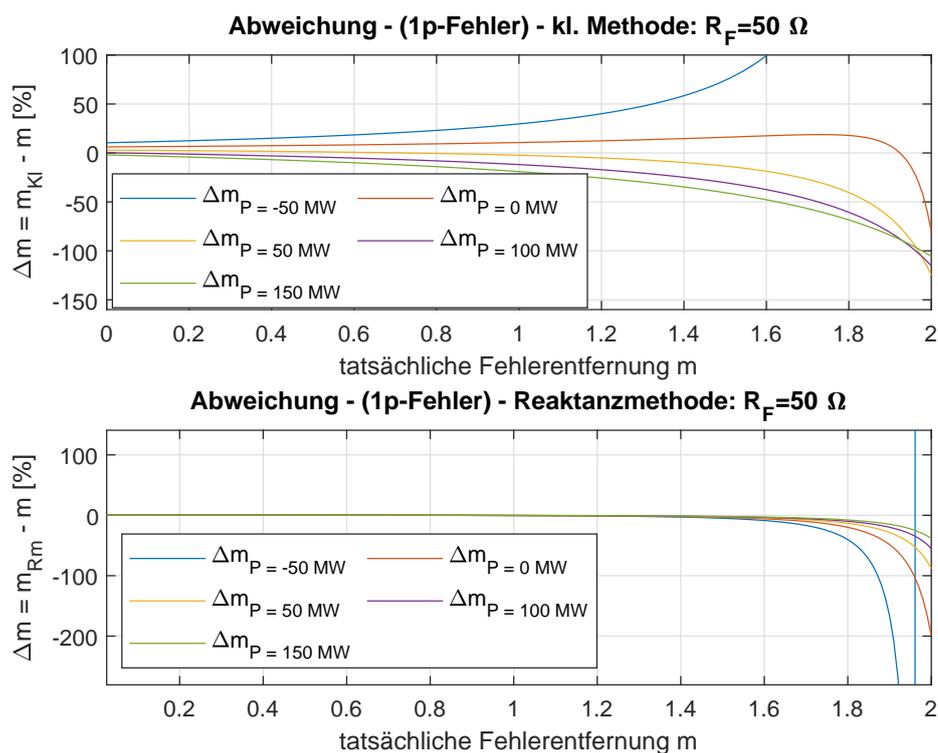


Abbildung 5.9.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$

5. Ergebnisse

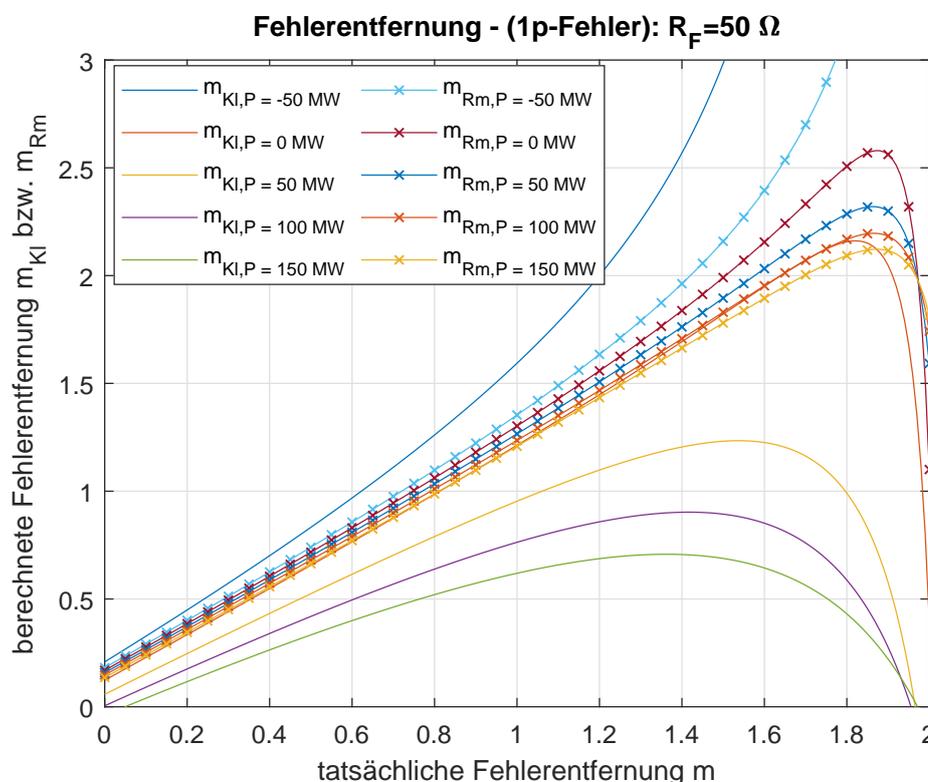


Abbildung 5.10.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 1.9735$) bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$

($m_{Cmp} = 1.973$) jedoch nicht auf! Bei allen anderen Werten von $m_{Cmp} = 0 \dots 2$, tritt diese Polstelle auf. Daraus lässt sich schließen, dass beim Auftreten einer Polstelle deren Fehlerentfernung m bekannt sein muss, um diese durch eine veränderte Kompensationsentfernung vermeiden zu können!

Die klassische Methode zeigt für $R_F = 50 \Omega$ für die Fälle $P_{A \rightarrow B} \geq 0 \text{ MW}$ ab $m = 0,5$ Abweichungen größer 10%. Zum Ende der Zone 2 hin steigen diese stark an und betragen bei $m = 2$ zwischen 100% und 120%. Für den Fall $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$, steigt die Abweichung jedoch für $m > 1,4$ stark an. Für Fehler am Ende der Zone 2 ($m > 1,8$) beträgt die Differenz der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung mehr als 200%. Für Fehler in diesem Bereich ist somit keine ernst zunehmende Impedanzberechnung mittels klassischer

5. Ergebnisse

Methode mehr möglich. Für die übertragenen Leistungen $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW, wird jeder Fehler (unabhängig von der tatsächlichen Fehlerentfernung) in Zone 2 als ein Fehler in Zone 1 erkannt. Dies stellt ebenfalls ein großes Problem dar, da Fehlerortsselektivität nicht mehr gewährleistet ist!

5.1.2. Sensitivitätsanalyse

Variation der Kompensationsentfernung

Die Abbildungen 5.11, 5.12 und 5.13 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse durch die Variation der Kompensationsentfernung m_{Cmp} für den 1-poligen Fehler.

Bei kleinen Werten des Fehlerwiderstandes, wie in Abbildung 5.11 ($R_F = 2 \Omega$), lässt sich erkennen, dass die Reaktanzmethode von der Kompensationsentfernung m_{Cmp} nahezu unabhängig ist. Jedoch lässt sich auch feststellen, dass die Fehlerentfernung m exakt ermittelt werden kann, wenn $m_{Cmp} = m$ ist. Am Ende der Zone 2, an der Stelle $m = 2$ und $m_{Cmp} = 2$, ist die Fehlerentfernung m_{Rm} exakt berechnet.

Abbildung 5.12 zeigt die berechnete Fehlerentfernung bei Variation der Kompensationsentfernung mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW. Für $m < 1,5$ ist die Reaktanzmethode wieder nahezu unabhängig von der Kompensationsentfernung. Bei größeren Fehlerentfernungen $m > 1,5$ tritt für Kompensationsentfernungen von $m_{Cmp} < 1$ das bereits in den Szenarien 1-4 behandelte Übergreifen auf. Für $m > 1,5$ und $m_{Cmp} > 1,5$ tritt untergreifendes Verhalten auf. Für den Punkt $m_{Cmp} = m$ ist die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} jedoch wieder exakt berechnet!

Bei hohen Werten des Fehlerwiderstandes ($R_F = 50 \Omega$), dargestellt in Abbildung 5.13, weist die Reaktanzmethode für Fehler am Beginn der Zone 1, $m = 0$, und hohen Werten der Kompensationsentfernung $m_{Cmp} > 1,5$, ein leicht untergreifendes Verhalten auf. Dieses Untergreifen wächst mit steigender Fehlerentfernung an und erreicht bei ca. $m = 1,8$ ein Maximum und sinkt anschließend wieder auf $m_{Rm} = 2$ ab. Die Fehlerentfernung $m_{Rm} = 2$ ist auch hier wieder exakt.

5. Ergebnisse

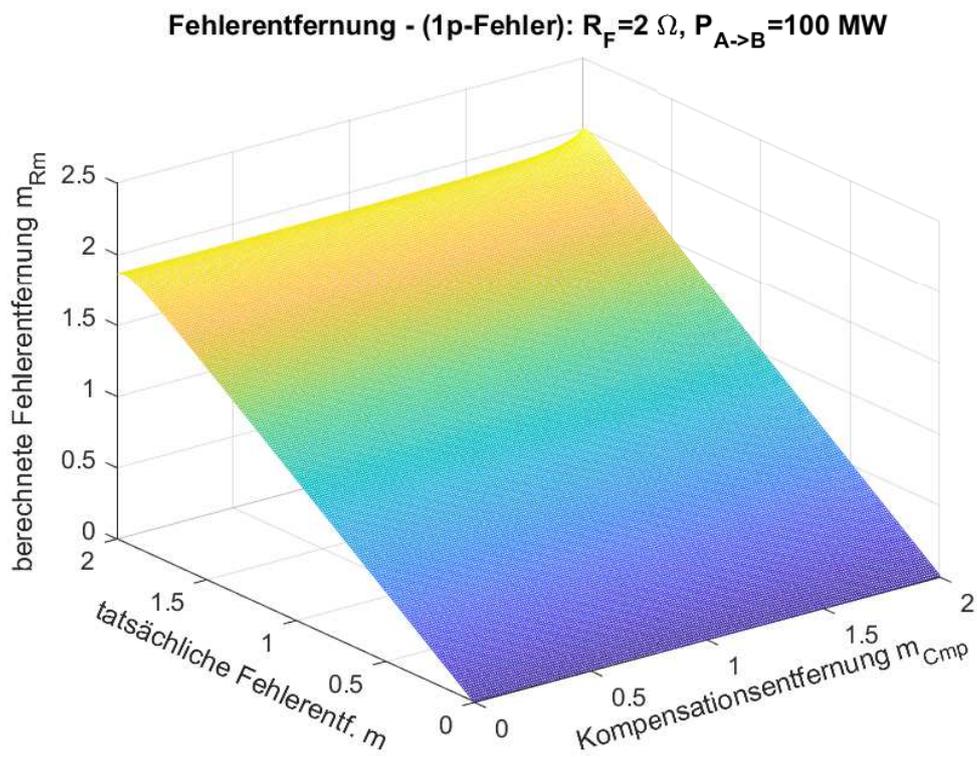


Abbildung 5.11.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

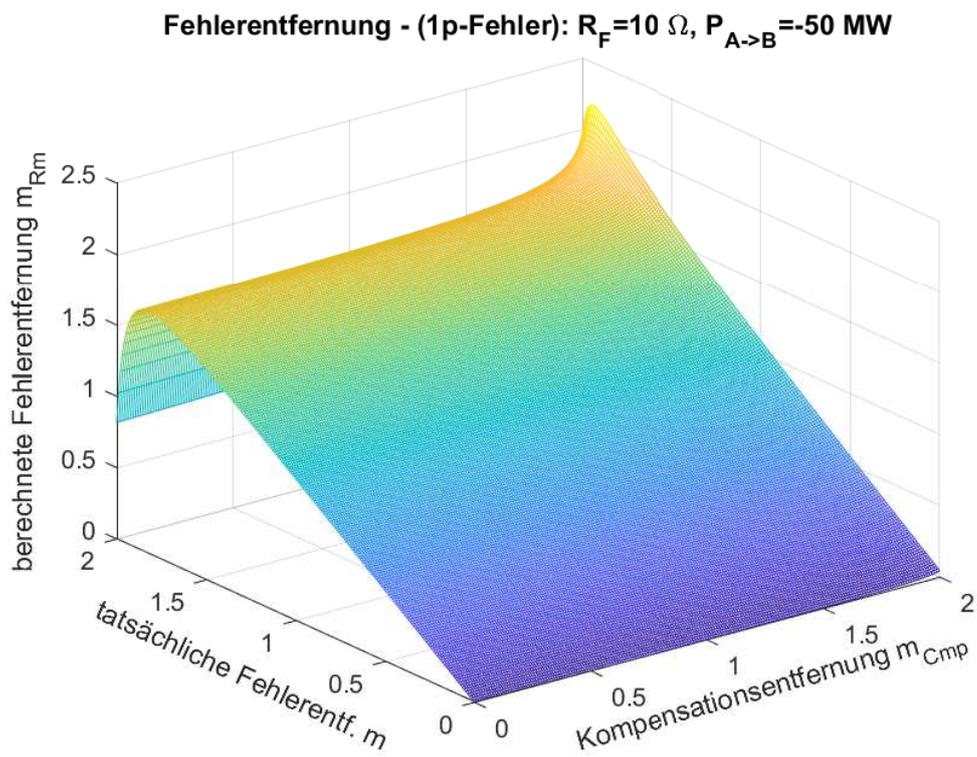


Abbildung 5.12.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

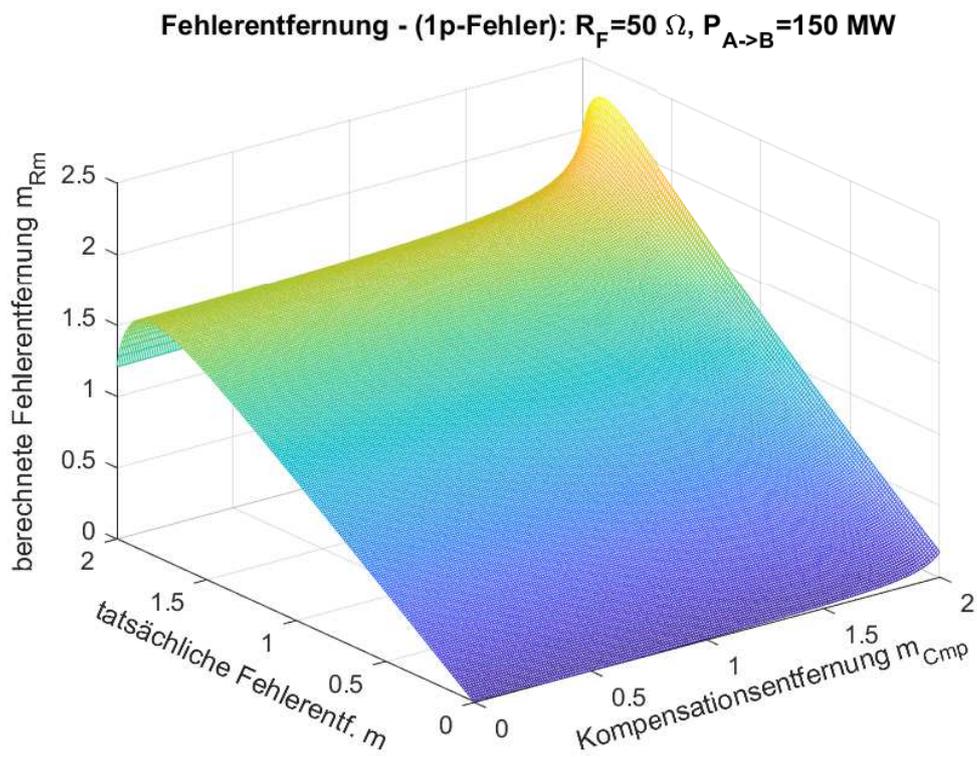


Abbildung 5.13.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

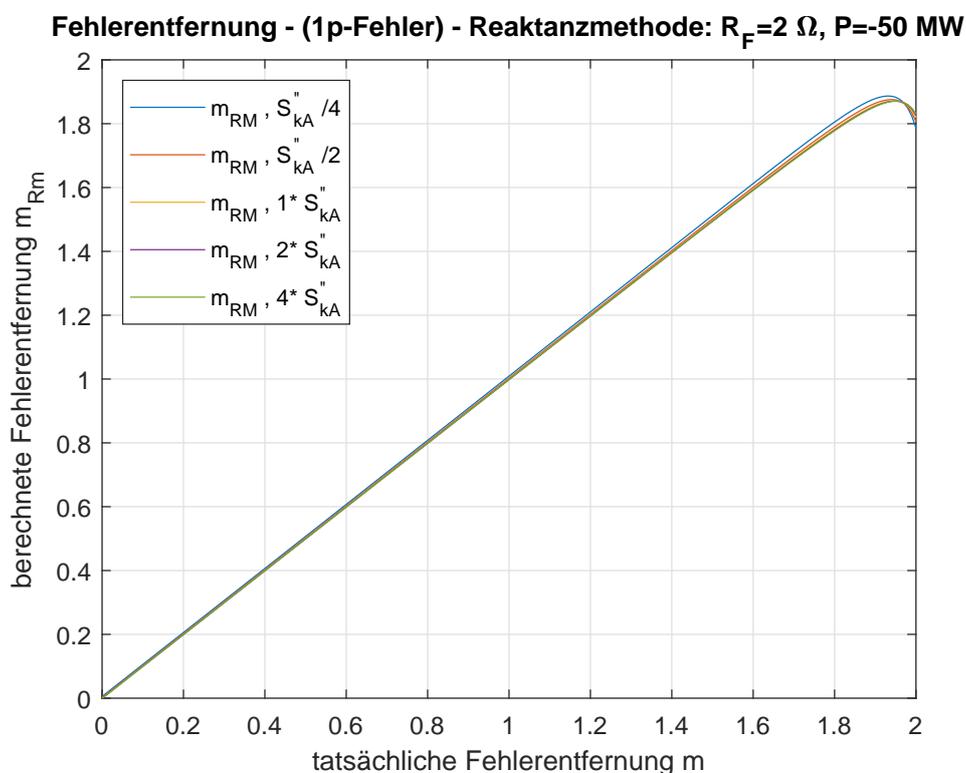


Abbildung 5.14.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Variation der Kurzschlussleistungen

Die Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kA} .

Wie in Abbildung 5.14 zu ersichtlich, hat die Veränderung der Kurzschlussleistung S''_{kA} bei niedrigen Werten des Fehlerwiderstandes (hier $R_F = 2 \Omega$) und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$ keinen nennenswerten Einfluss auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Lediglich für Fehler am Ende der Zone 2 weist die Reaktanzmethode hier ein leichtes Übergreifen, ähnlich zu Szenario 2, auf.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} =$

5. Ergebnisse

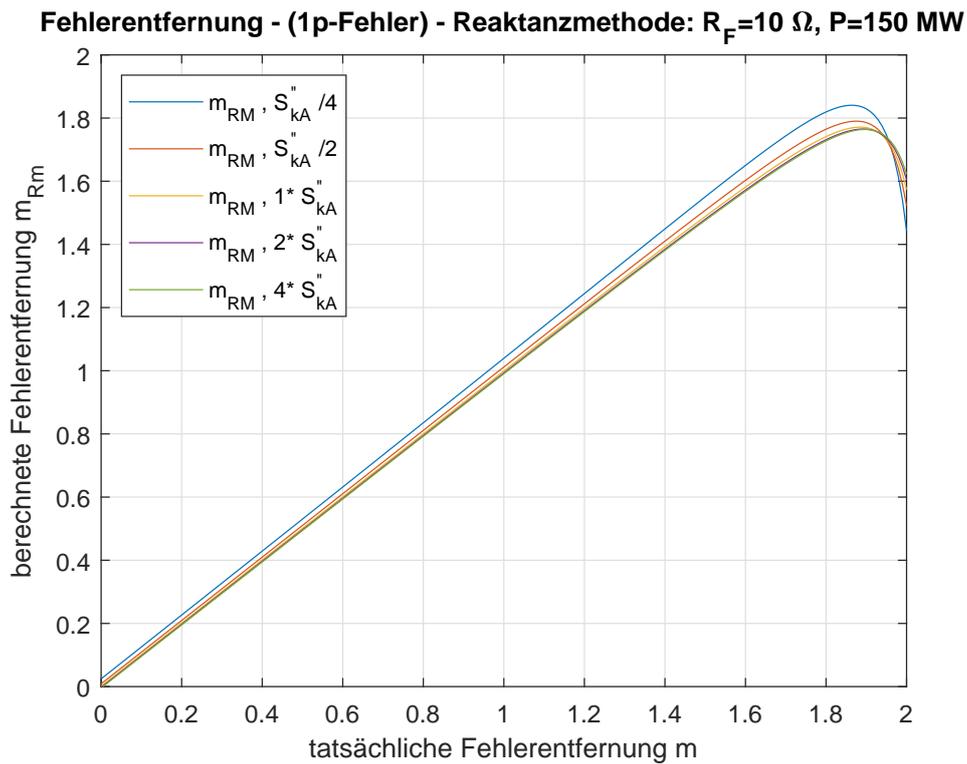


Abbildung 5.15.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

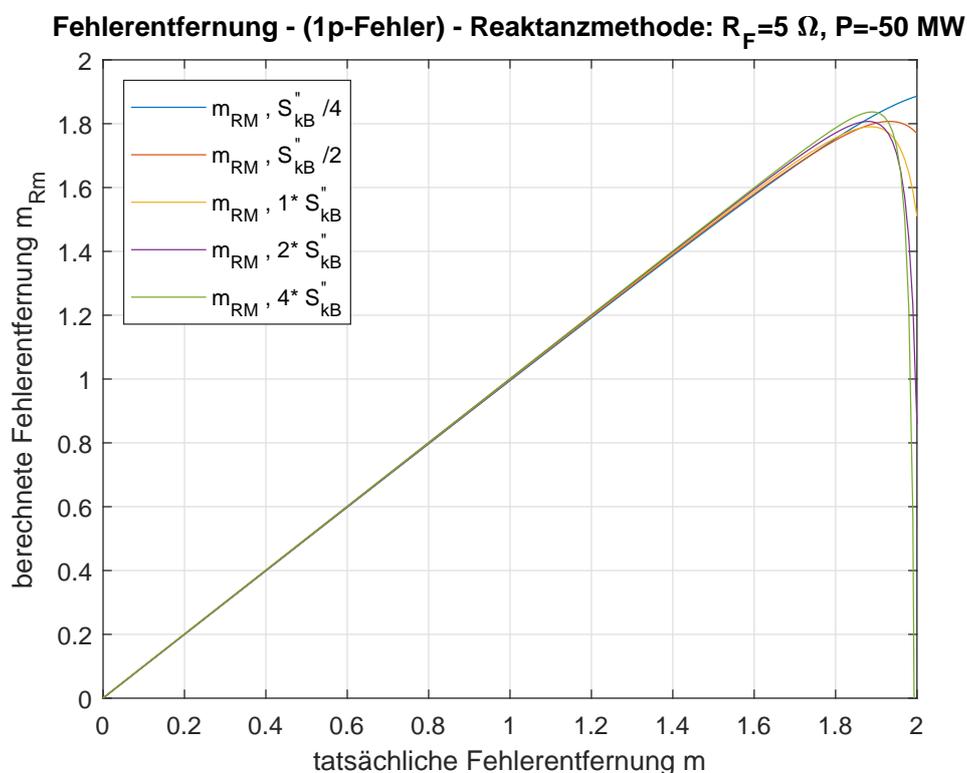


Abbildung 5.16.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

150 MW bewirkt die Reduktion der Kurzschlussleistung auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes ein leichtes Untergreifen über beide Zonen ($m = 0 \dots 2$). Für die Fälle $1/2 \cdot S''_{kA}$, $1 \cdot S''_{kA}$, $2 \cdot S''_{kA}$ bzw. $4 \cdot S''_{kA}$ sind die berechneten Fehlerentfernungen annähernd identisch.

In den Abbildungen 5.16 und 5.17 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} dargestellt.

Anhand der Abbildung 5.16 lässt sich erkennen, dass beim 1-poligen Fehler, mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$, die Vergrößerung der Kurzschlussleistung S''_{kB} , auf den zwei- bzw. vierfachen Wert, das Übergreifen am Ende der Zone 2 ($m > 1,8$) erhöht. Eine Verkleinerung der Kurzschlussleistung auf die Hälfte bzw. ein Viertel des

5. Ergebnisse

ursprünglichen Werts, vermindert das Übergreifen. Für Fehlerentfernungen $m < 1,8$ hat die Variation von S''_{kB} keinen nennenswerten Einfluss auf die Bestimmung des Fehlerorts durch die Reaktanzmethode.

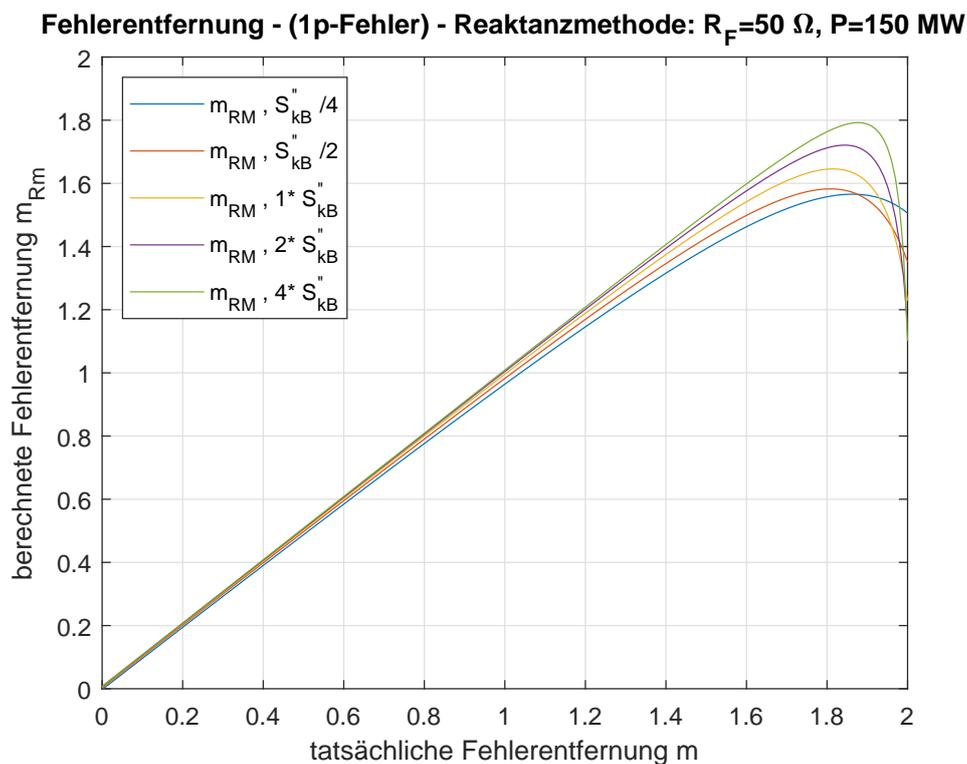


Abbildung 5.17.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Bei hohen Werten des Fehlerwiderstandes, wie in Abbildung 5.17, und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$ weist die Reaktanzmethode bereits ab einer Entfernung von $m = 1,2$ leichte Abhängigkeiten von der Kurzschlussleistung S''_{kB} auf. Für Fehler am Ende der Zone 2 ($m > 1,6$) bewirkt eine Erhöhung der Kurzschlussleistung eine höhere Genauigkeit bei der Fehlerortsbestimmung. Durch eine Verminderung von S''_{kB} entsteht bereits ab $m > 1,2$ eine Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung.

5. Ergebnisse

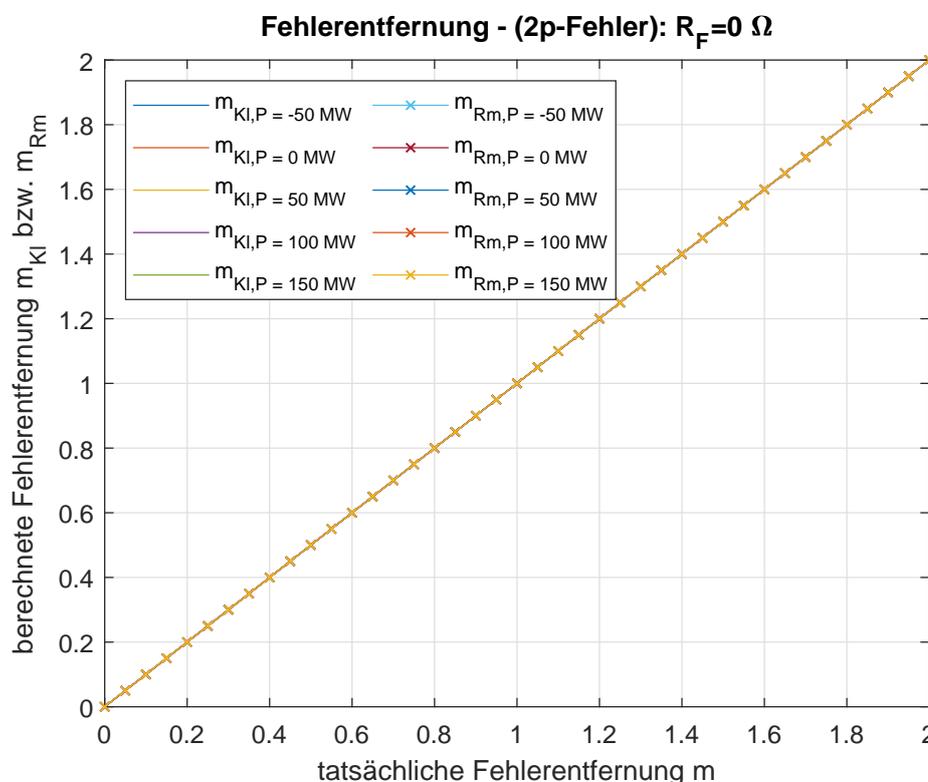


Abbildung 5.18.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$

5.2. Ergebnisse des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung

5.2.1. Vergleich der beiden Methoden

Szenario 1

Die Abbildung 5.18 zeigt das Ergebnis des ersten Szenarios bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$. Auch beim 2-poligen Fehler

5. Ergebnisse

ohne Erdberührung kann der Fehlerort sowohl mit der klassischen Methode als auch mit der Reaktanzmethode exakt berechnet werden.

Szenario 2

In Abbildung 5.19 und 5.20 zeigen die Ergebnisse des Szenarios 2 für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung.

Die Ergebnisse der Reaktanzmethode sind, wie aus den Abbildungen ersichtlich, für alle betrachteten Lastflüsse bis weit in die Zone 2 exakt. Erst ab einer Entfernung von $m = 1,9$ weicht die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung mehr als 5% ab. Am Ende der Zone 2 ($m = 2$) betragen die Abweichungen je Lastfluss zwischen 8% und 12%. Wie auch beim 1-poligen Fehler ist die Reaktanzmethode auch beim 2-poligen Fehler, bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$, nahezu unabhängig vom Lastfluss.

Die klassische Methode zeigt beim 2-poligen Fehler bereits für kleine Werte des Fehlerwiderstandes ($R_F = 2 \Omega$) bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$, am Beginn der Zone 2, $m = 1,2$, untergreifendes Verhalten auf. Die Abweichungen betragen hier ca. 5% und steigen bis zum Ende der Zone 2 auf 10% an. Für die übertragenen Leistungen $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$, $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$ und $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$ ist die mittels klassischer Methode berechnete Fehlerentfernung ebenfalls für $m > 1$ ungenauer als die mit Reaktanzmethode berechnete Entfernung. Gegen Ende der Zone 2 weist die klassische Methode bei diesen Lastflüssen starke Abweichungen im Bereich zwischen 20% und 40% auf.

Nur für den lastflussfreien Fall bei $R_F = 2 \Omega$ ist am Ende der Zone 2 $m > 1,7$ die Abweichung der klassischen Methode geringer als die der Reaktanzmethode.

Szenario 3

Die Ergebnisse für das Szenario 3 sind in den Abbildungen 5.21 und 5.22 dargestellt.

Für einen Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ zeigen sich beim 2-poligen Fehler ohne Erdberührung, für die betrachteten Lastflüsse $P_{A \rightarrow B} \neq 0 \text{ MW}$, deutliche

5. Ergebnisse

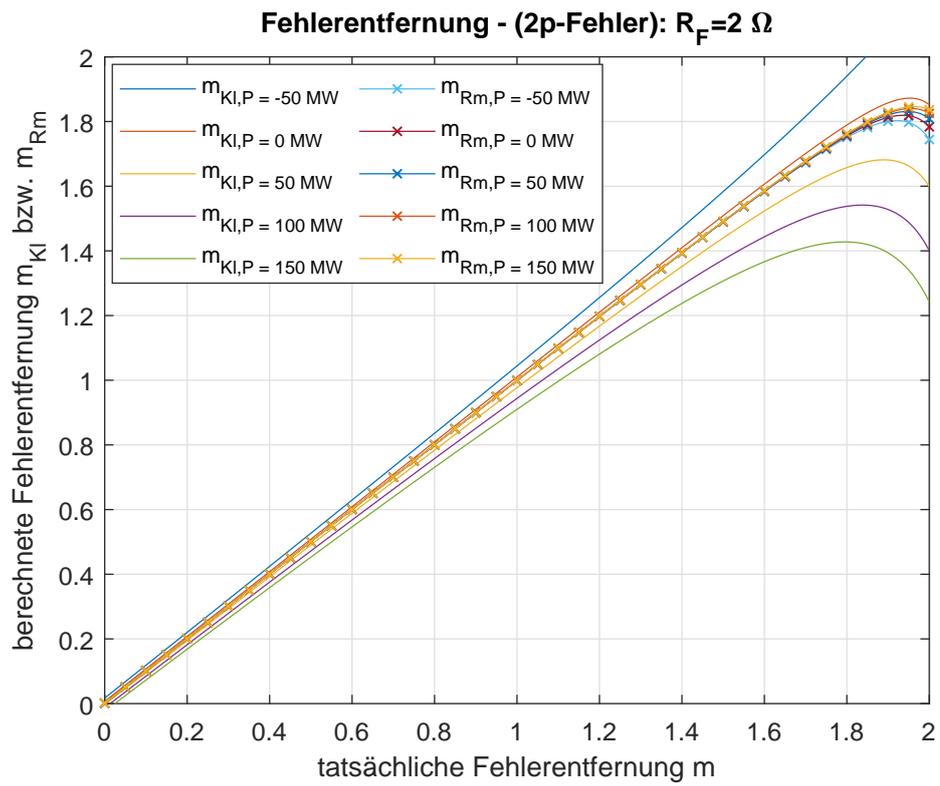


Abbildung 5.19.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

5. Ergebnisse

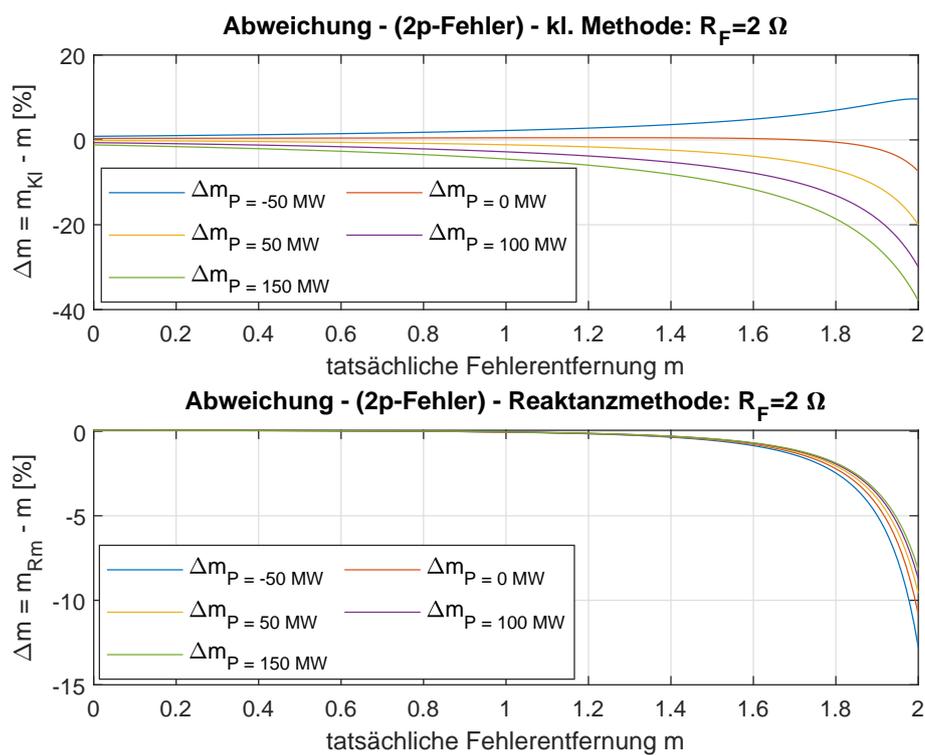


Abbildung 5.20.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

5. Ergebnisse

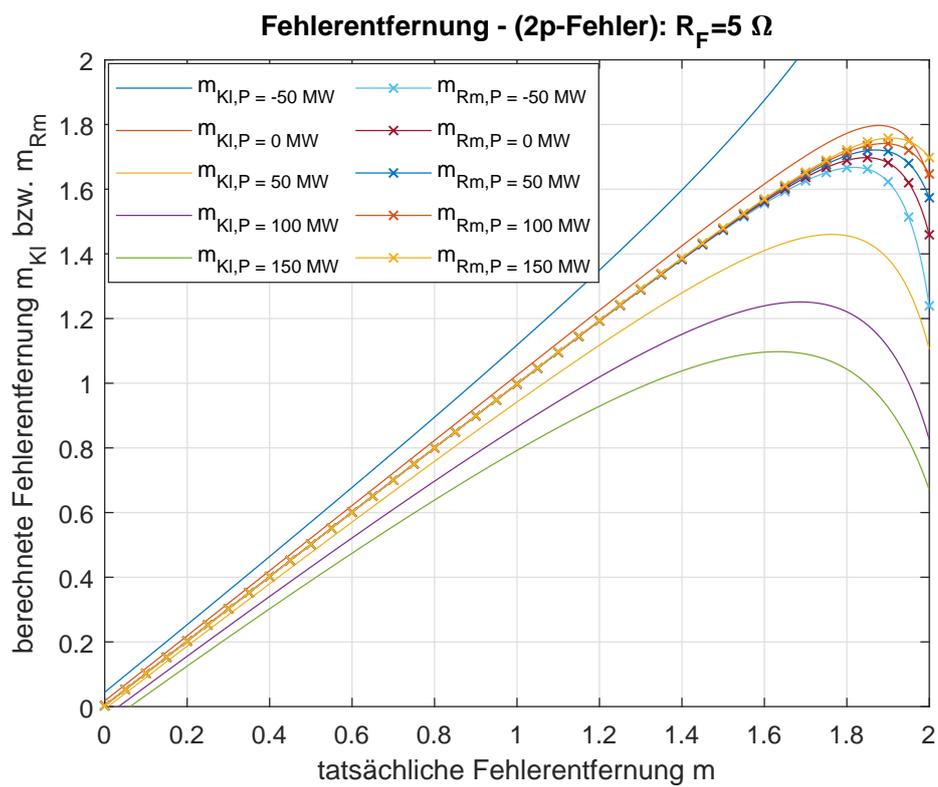


Abbildung 5.21.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

5. Ergebnisse

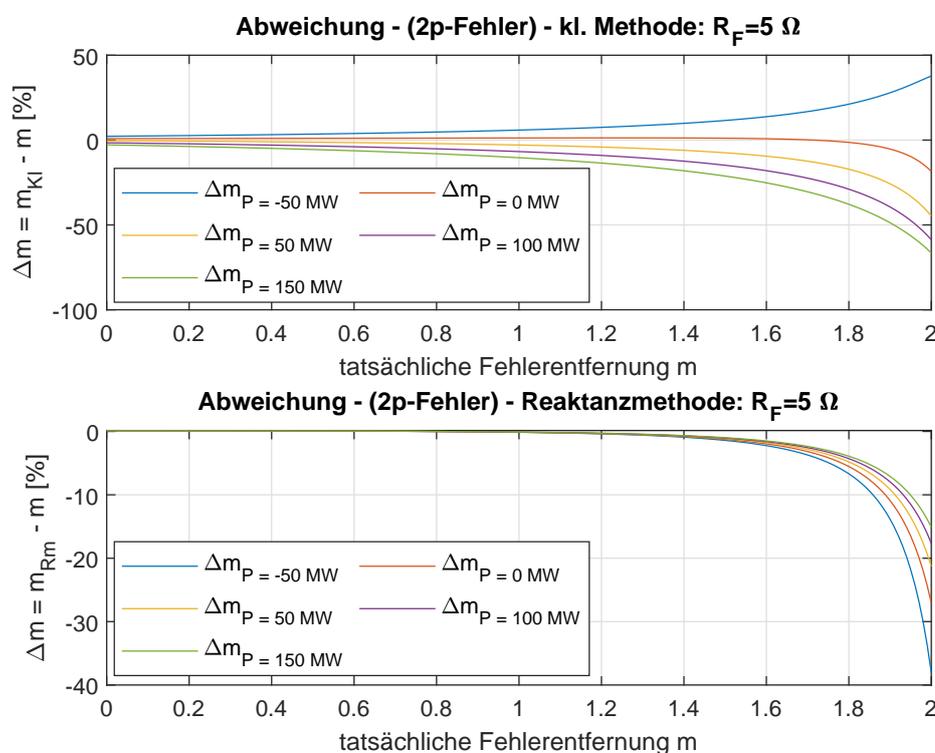


Abbildung 5.22.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

Unterschiede zwischen der Reaktanzmethode und der klassischen Methode. Die mittels Reaktanzmethode berechneten Fehlerentfernungen sind hier wieder, unabhängig vom Lastfluss, bis weit in die Zone 2 ($m < 1,5$) exakt. Lediglich am Zonenende der Zone 2, bei $m = 2$, betragen die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung, je nach Lastfluss, zwischen 15% und 37%. Es findet ein Übergreifen statt. Auch hier weist die Reaktanzmethode für eine übertragene Wirkleistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$ die größte Abweichung mit 37% auf (ebenfalls übergreifendes Verhalten).

Die mittels klassischer Methode berechnete Fehlerentfernung weist, für betrachtete Lastflüsse $P_{A \rightarrow B} \neq 0 \text{ MW}$, bereits in der Zone 1 ($m > 0,8$) Abweichungen größer 5% auf. Bis zum Ende der Zone 2 steigen diese, für den Fall

5. Ergebnisse

$P_{A \rightarrow B} = 100$ MW, auf 58% an. Die maximale Abweichung der klassischen Methode entsteht bei einer übertragenen Wirkleistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW am Zonenende der Zone 2 ($m = 2$) mit 66%. Für beide Fälle findet ein Übergreifen statt. Bei allen betrachteten Lastflussszenarien $P_{A \rightarrow B} \neq 0$ MW sind die Ergebnisse der klassischen Methode weit ungenauer als die der Reaktanzmethode.

Die Berechnungen mittels klassischer Methode sind für den Fall $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW, relativ genau. Über weite Teile der beiden Zonen findet jedoch ein Untergreifen bzw. ab $m < 1,7$, ein Übergreifen statt. Die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung betragen am Ende der Zone 2 jedoch nur ca. 20%.

Szenario 4

Die Abbildungen 5.23 und 5.24 zeigen das Ergebnis der Simulation eines 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$.

Hier zeigt sich für die Reaktanzmethode ebenfalls wieder, dass diese auch mit höheren Werten des Fehlerwiderstandes sehr gut funktioniert. Der Fehlerort wird bis $m = 1,3$ exakt berechnet. Hier lässt sich ebenfalls die Unabhängigkeit der Reaktanzmethode von der übertragenen Leistung erkennen. Erst für Fehlerentfernungen $m > 1,8$ beträgt die Abweichung der berechneten Entfernung, für einen Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW, mehr als 15%. Bei einem Fehler am Ende der Zone 2 ($m = 2$) weicht die Reaktanzmethode für diese Leistung jedoch um mehr als 100% ab. Für diesen Fall ist somit keine ernstzunehmende Fehlerortsbestimmung mehr möglich. Für eine übertragene Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW beträgt die Abweichung der Reaktanzmethode, für $m = 2$, nur ca. 22%. Die Reaktanzmethode weist für alle betrachteten Lastflüsse übergreifendes Verhalten am Ende der Zone 2 auf, liefert jedoch genauere Werte des Fehlerorts, als die klassische Methode.

Die Ergebnisse der klassischen Methode sind für das Szenario 4 ($R_F = 10 \Omega$) gegenüber dem Szenario 3 ($R_F = 5 \Omega$) entsprechend ungenauer. Wie in den beiden Abbildungen 5.23 und 5.24 erkennbar ist, zeigt sich auch hier wieder eine Abhängigkeit der klassischen Methode vom betrachteten Lastfluss. Bereits ab Beginn der Zone 1 ($m = 0$), weist die klassische Methode, für alle

5. Ergebnisse

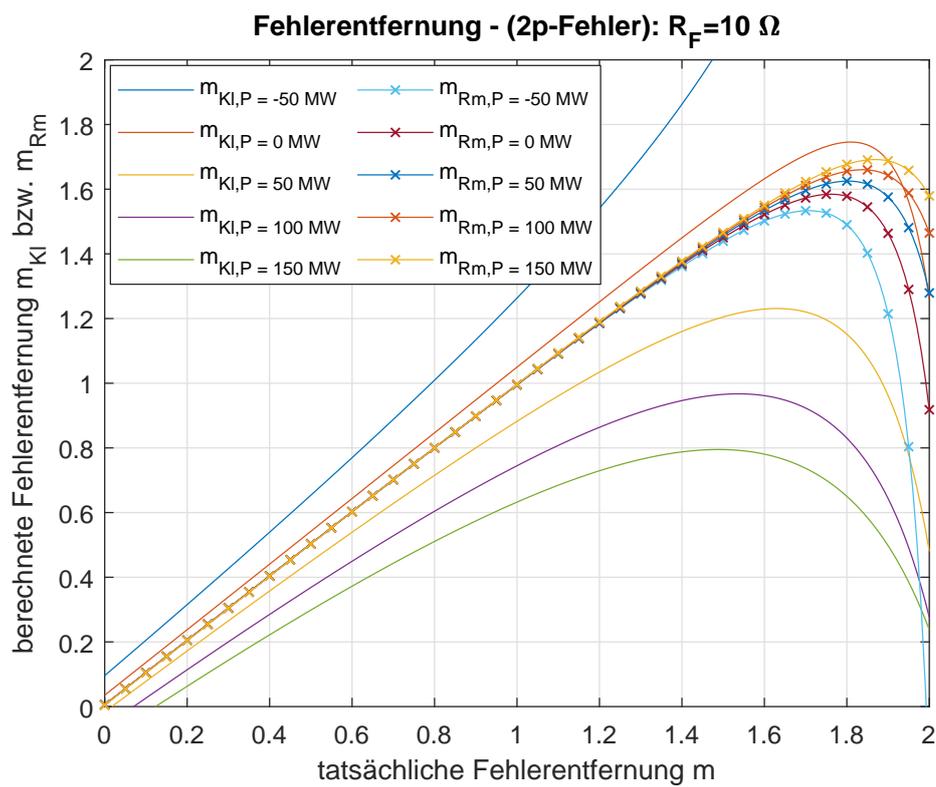


Abbildung 5.23.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

5. Ergebnisse

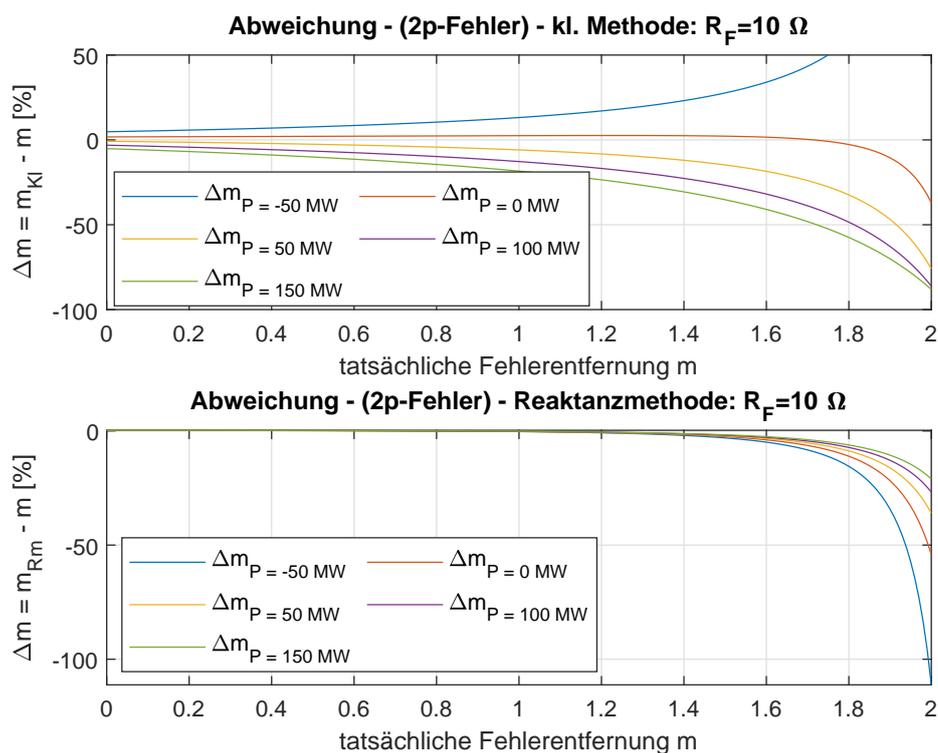


Abbildung 5.24.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

5. Ergebnisse

betrachteten Lastflüsse, Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung größer 5% auf. Diese steigen mit steigender Entfernung m stark an und betragen am Ende der Zone 2, für $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW, zwischen 75% und 85%.

Es tritt übergreifendes Verhalten auf. Für die Fälle $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW wird, wie in Abbildung 5.23 ersichtlich, jeder Fehler in Zone 2 als in der Zone 1 liegend erkannt. Dies stellt ein erhebliches Problem dar, da ein Fehler in Zone 2 zur Abschaltung der Zone 1 führen würde, obwohl dies nicht nötig wäre. Bei einer übertragenen Wirkleistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt bereits ab Beginn der Zone 1 untergreifendes Verhalten auf. Die Abweichungen steigen von 5% am Beginn der Zone 1 auf ca. 180% am Ende der Zone 2. Somit ist für diesen Fall, für Fehler am Ende der Zone 2, keine ernstzunehmende Fehlerortsbestimmung mehr möglich. Die klassische Methode weist, wie bereits erwähnt, für alle betrachteten Lastflüsse größere Abweichungen als die Reaktanzmethode auf.

5.2.2. Sensitivitätsanalyse

Variation der Kompensationsentfernung

Die Abbildungen 5.25 und 5.26 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse durch die Variation der Kompensationsentfernung m_{Cmp} für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung.

Anhand der Abbildung 5.25 lässt sich erkennen, dass die Reaktanzmethode bei niedrigem Wert des Fehlerwiderstandes ($R_F = 2 \Omega$) und hohem Lastfluss ($P_{A \rightarrow B} = 150$ MW) für Fehlerentfernungen innerhalb der Zone 1 ($m < 1$), von der Kompensationsentfernung m_{Cmp} unabhängig ist. Bei Fehlern am Ende der Zone 2, $m = 2$, kann die Fehlerentfernung bei $m_{Cmp} = 2$ exakt bestimmt werden.

Bei höheren Werten des Fehlerwiderstands, wie in Abbildung 5.26 ($R_F = 5 \Omega$), und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW, tritt bei einer Kompensationsentfernung von $m_{Cmp} < 1,5$, ähnlich zu Szenario 3, bei Fehlern am Ende der Zone 2 ($m > 1,5$) übergreifendes Verhalten auf. Für Kompensationsentfernungen und Fehler nahe dem Zonenende der Zone 2, tritt leicht untergreifendes Verhalten

5. Ergebnisse

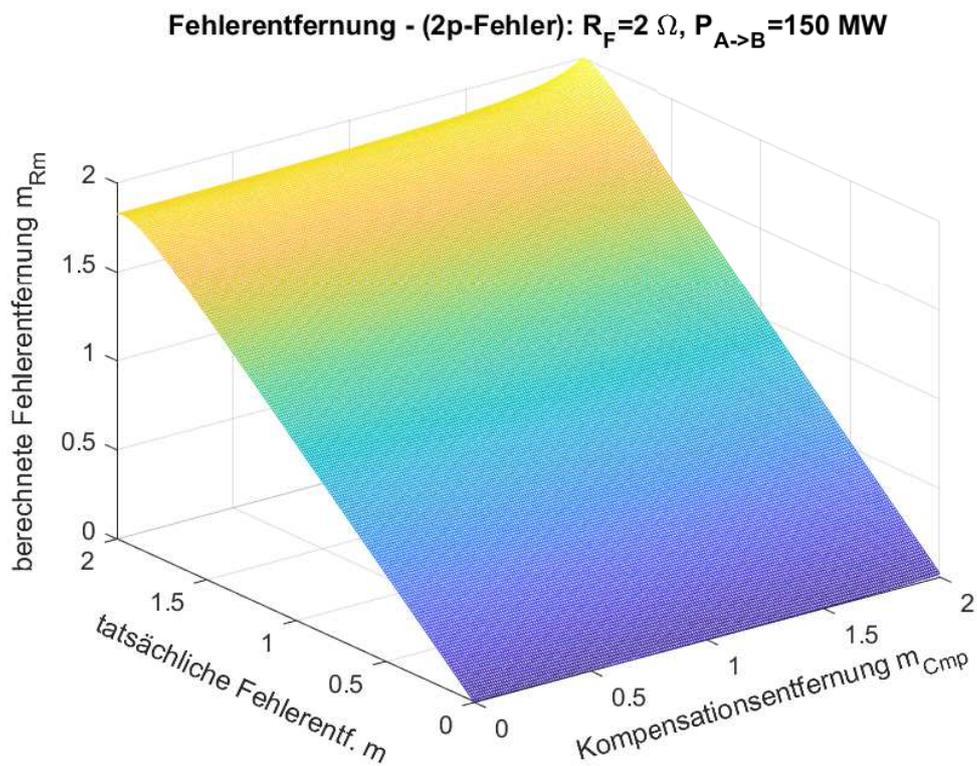


Abbildung 5.25.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

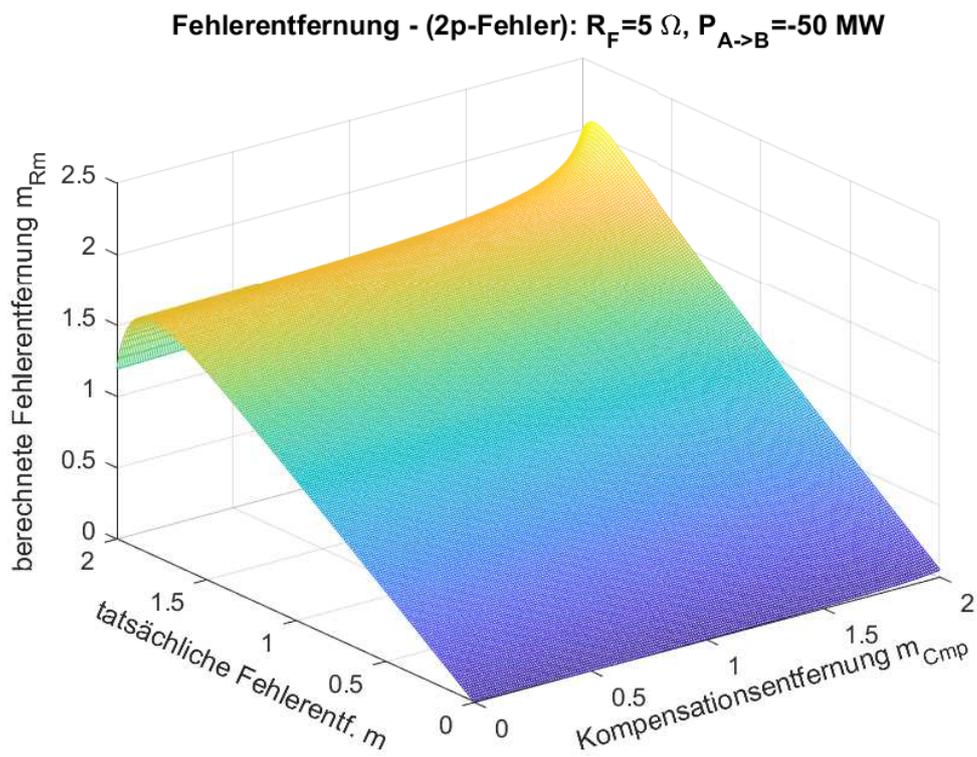


Abbildung 5.26.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

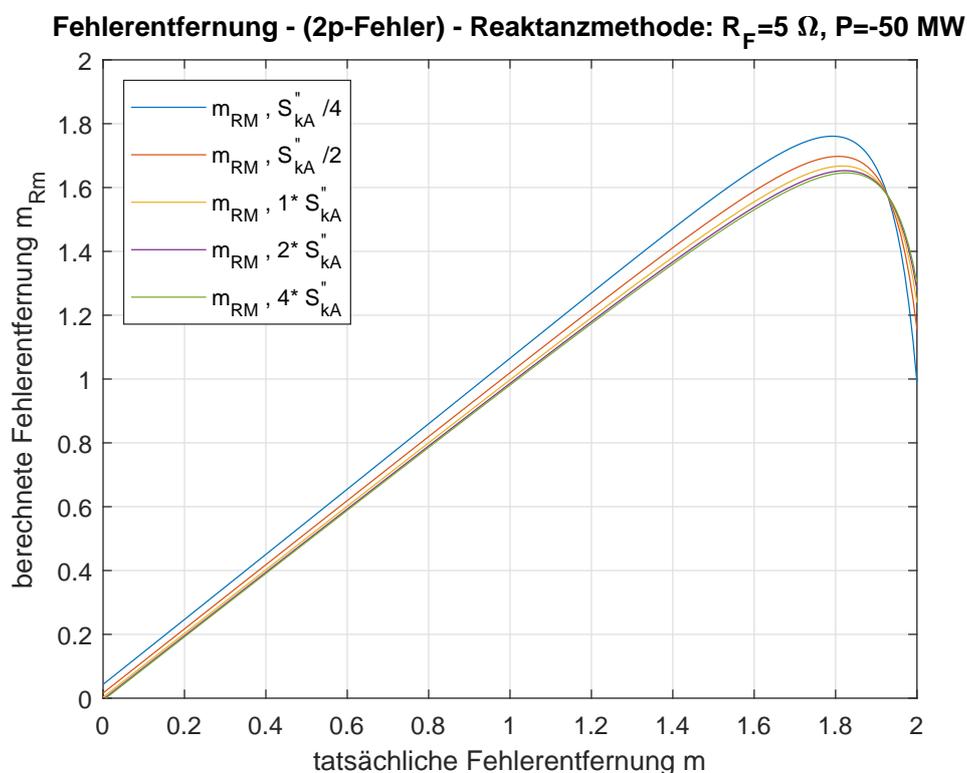


Abbildung 5.27.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

auf. Jedoch lässt sich auch hier wieder feststellen, dass die Fehlerentfernung bei $m_{Cmp} = m$ exakt berechnet wird.

Variation der Kurzschlussleistungen

In den Abbildungen 5.27 und 5.28 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, des 2-poligen Fehlers, bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kA} dargestellt.

Wie in Abbildung 5.27 ersichtlich, zeigt sich für Fehlerentfernungen $m < 1,9$, bei Reduktion der Kurzschlussleistung S''_{kA} auf ein Viertel bzw. auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes (bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ bzw. einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$) ein untergreifendes Verhalten. Für Fehler

5. Ergebnisse

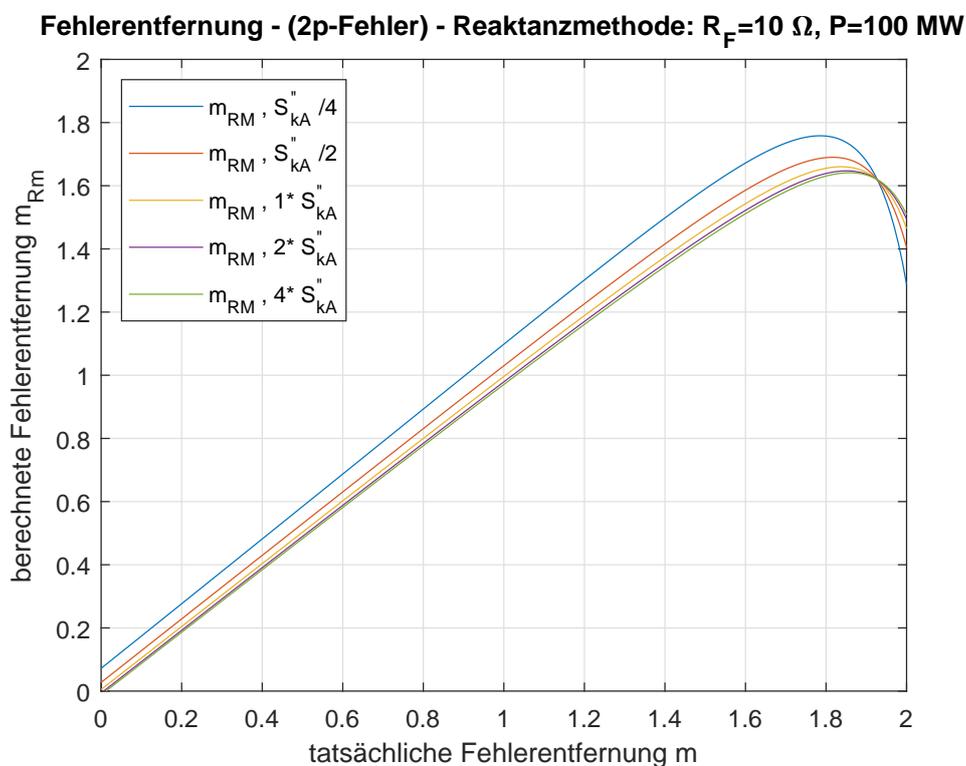


Abbildung 5.28.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

am Ende der Zone 2 ($m = 2$) zeigen die betrachteten Fälle ein übergreifendes Verhalten. Wird die Kurzschlussleistung auf $S''_{kA}/4$ reduziert, kann das zu einem Problem führen. Bei einer tatsächlichen Fehlerentfernung von $m = 2$, beträgt die berechnete Entfernung $m_{Rm} = 1$. Der Fehler in Zone 2 könnte somit als ein Fehler in Zone 1 gesehen werden.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$, dargestellt in Abbildung 5.28, entsteht ebenfalls für die Fälle $S''_{kA}/4$ und $S''_{kA}/2$ bei Fehlerentfernungen $m < 1,8$ ein untergreifendes Verhalten. Die Erhöhung der Kurzschlussleistung auf $2 \cdot S''_{kA}$ bzw. $4 \cdot S''_{kA}$ zeigt beinahe keine Auswirkung auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Jedoch entsteht bei allen Fällen, für Fehler am Ende der Zone 2, bei hohen Werten des Fehlerwiderstandes eine Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung.

5. Ergebnisse

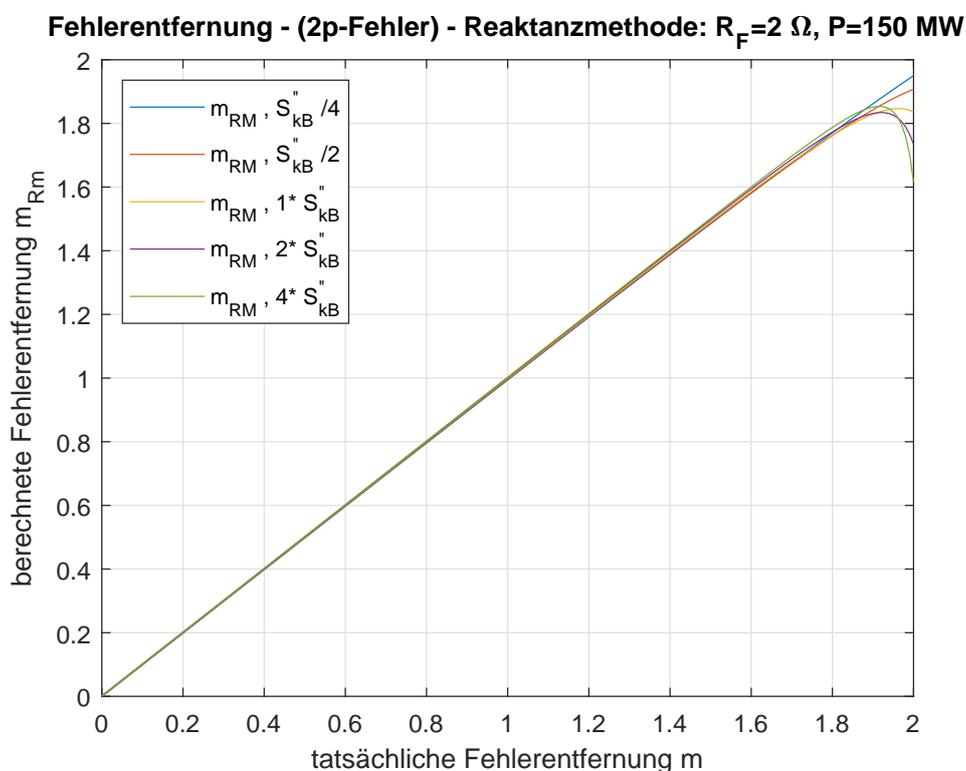


Abbildung 5.29.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Die Abbildungen 5.29 und 5.30 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung, bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} .

Die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} zeigt bei kleinen Werten des Fehlerwiderstandes ($R_F = 2 \Omega$) und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$, für Fehlerentfernungen $m < 1,9$, keine Auswirkungen auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Für $m > 1,9$ entsteht übergreifendes Verhalten. Beträgt die Kurzschlussleistung S''_{kB} ein Viertel des ursprünglichen Wertes, kann die Fehlerentfernung, wie in Abbildung 5.29 ersichtlich, beinahe exakt ermittelt werden.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} =$

5. Ergebnisse

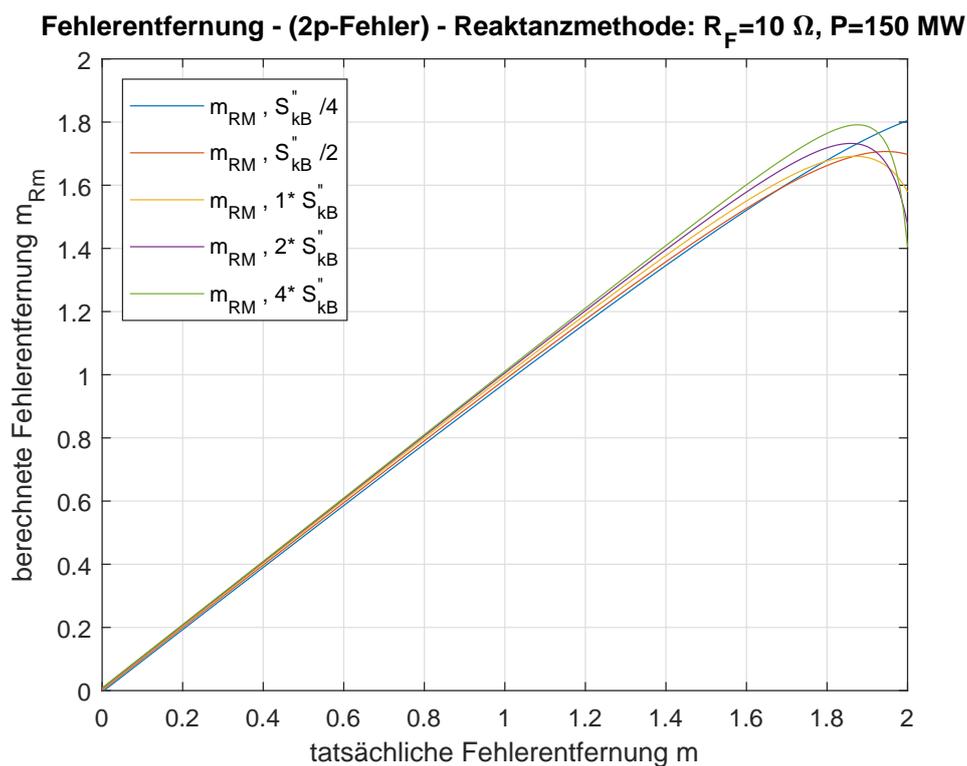


Abbildung 5.30.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kB}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

150 MW hat die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} , bei einer Fehlerentfernung von $m < 1$, keinen nennenswerten Einfluss auf die Reaktanzmethode. Bei größeren Fehlerentfernungen, $m > 1,6$, tritt leicht übergreifendes Verhalten für alle betrachteten Fälle auf. Für Fehlerentfernungen am Ende der Zone 2 ($m = 2$) weicht das Szenario mit $S''_{kB}/4$ am wenigsten von der tatsächlichen Fehlerentfernung ab.

5.3. Ergebnisse des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung

5.3.1. Vergleich der beiden Methoden

Szenario 1

Wie in Abbildung 5.31 ersichtlich, kann auch beim 2-poligen Fehler mit Erdberührung, bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$, der Fehlerort mittels klassischer Methode als auch mittels Reaktanzmethode exakt berechnet werden.

Szenario 2

In Abbildung 5.32 und 5.33 ist das Ergebnis des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung für das Szenario 2 mit $R_F = 2 \Omega$ dargestellt.

Für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung zeigt die Reaktanzmethode, wie in den beiden Abbildungen ersichtlich, für alle betrachteten Lastflüsse, ein sehr gutes Ergebnis. Die berechnete Fehlerentfernung ist über die gesamte Zone 1 und bis weit in die Zone 2 exakt. Erst ab einer Entfernung von $m = 1,9$ weicht die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung um 5% ab. Die maximale Abweichung beträgt für das Zonenende $m = 2$, je nach übertragener Leistung, zwischen 10% und 15%. Wie bereits beim 1-poligen Fehler und beim 2-poligen Fehler ohne Erdberührung, ist die Reaktanzmethode auch beim 2-poligen Fehler mit Erdberührung von der übertragenen Leistung nahezu unabhängig.

5. Ergebnisse

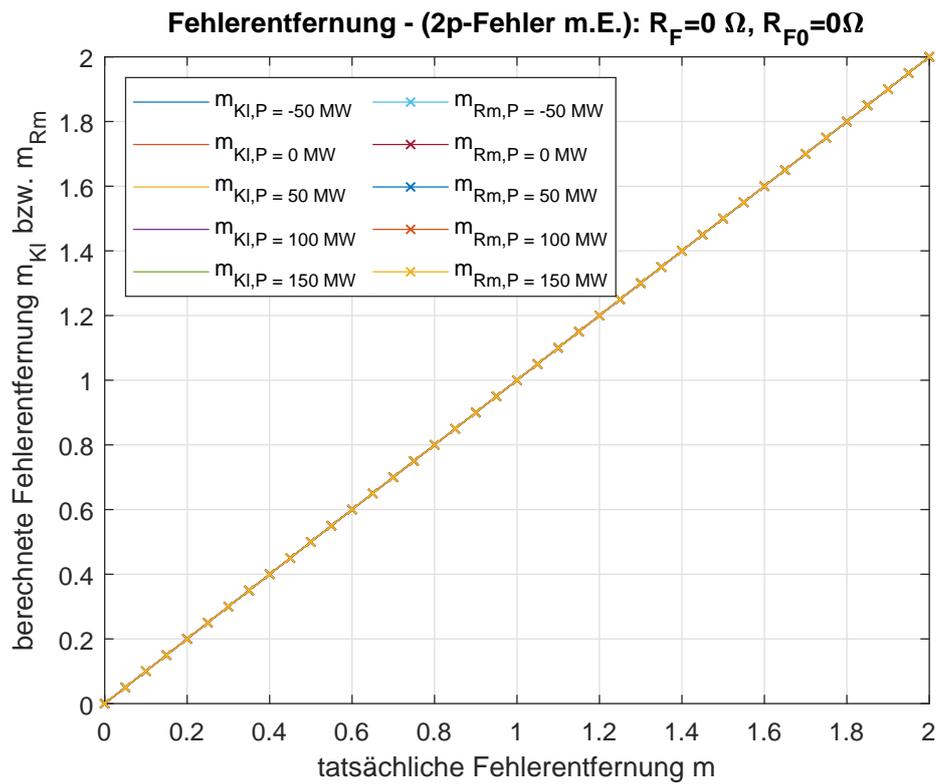


Abbildung 5.31.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$

5. Ergebnisse

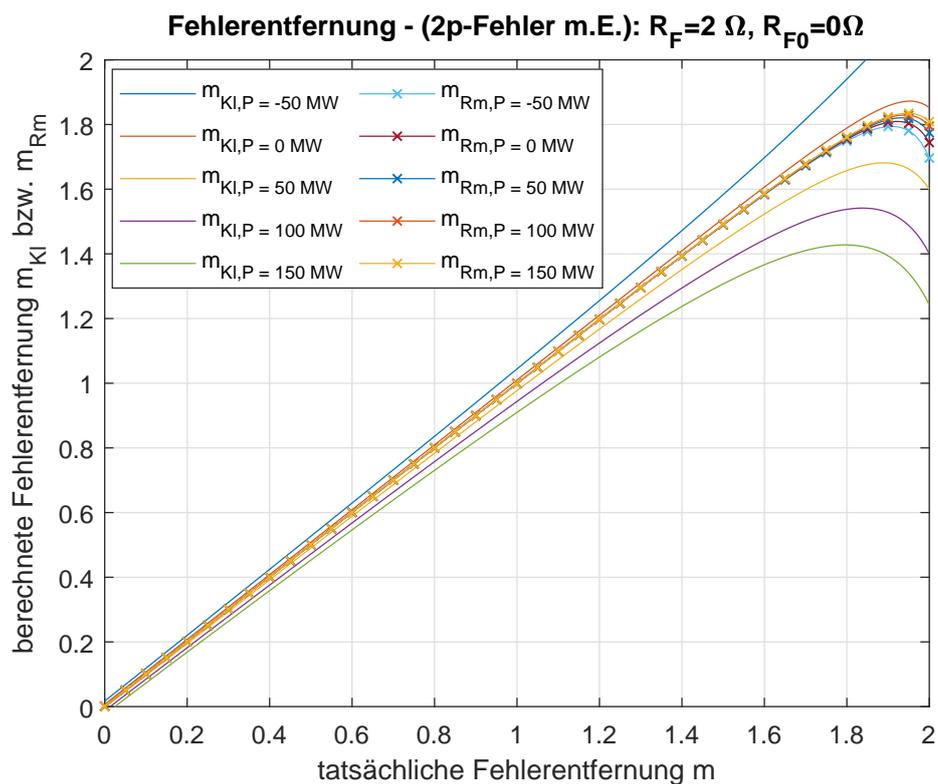


Abbildung 5.32.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

5. Ergebnisse

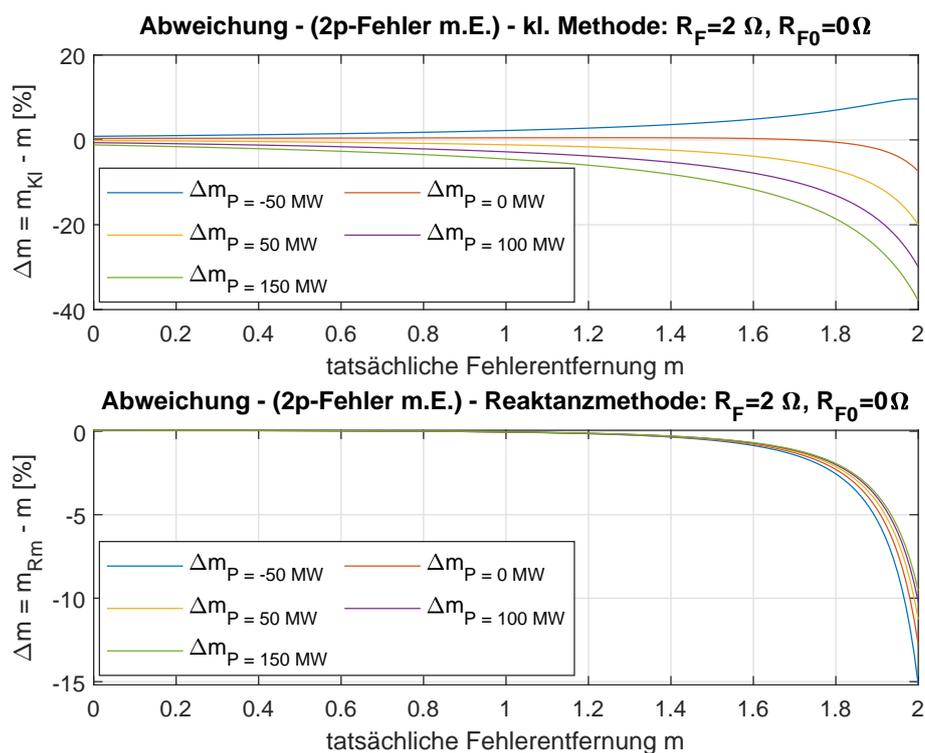


Abbildung 5.33.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

5. Ergebnisse

Bei der klassischen Methode weicht, für das Szenario 2 mit $R_F = 2 \Omega$, bereits in der ersten Zone, für die Lastflüsse $P_{A \rightarrow B} \neq 0$ MW, die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung ab. Für den Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt untergreifendes Verhalten auf. Die maximale Abweichung tritt am Ende der Zone 2 auf und beträgt ca. 10%. Für $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW liefert die klassische Methode am Zonenende ($m = 2$) genauere Werte des Fehlerortes als die Reaktanzmethode, jedoch weist diese über weite Teile der Zone 1 und 2 leicht untergreifendes Verhalten auf. Für die Fälle $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW, $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW und $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW zeigt die klassische Methode bereits in der Zone 1 übergreifendes Verhalten und Abweichungen im Prozentbereich. Diese wachsen mit steigender Fehlerentfernung m auf 20%, 28% bzw. 38% an. Die Reaktanzmethode liefert für diese übertragenen Leistungen jeweils exaktere Werte des Fehlerortes als die klassische Methode. Für den lastflussfreien Fall $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW weicht die klassische Methode, für Fehlerentfernungen $m > 1.4$, jedoch weniger stark vom tatsächlichen Fehlerort ab, als die Reaktanzmethode. Bei Entfernungen $m < 1.4$ zeigt sich allerdings leicht untergreifendes Verhalten.

Szenario 3

Die Ergebnisse des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung für das Szenario 3 sind in den Abbildungen 5.34 und 5.35 dargestellt.

Für das Szenario 3, $R_F = 5 \Omega$, ist die mittels Reaktanzmethode berechnete Fehlerentfernung für die gesamte Zone 1 bzw. bis in die Zone 2 ($m < 1.2$) exakt und unabhängig vom Lastfluss. Bei Fehlerentfernungen am Ende der Zone 2 ($m = 2$) beträgt die Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Entfernung, für den Fall $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW, ca. 53%. Dies stellt bei auftretenden Fehlern mit einer Fehlerentfernung $m = 2$ ein Problem dar, da dieser Fehler in Zone 2, als ein Fehler in Zone 1 erkannt wird. Die Unabhängigkeit der berechneten Fehlerentfernungen vom Lastfluss für Fehler mit $m < 1.6$ fällt in diesem Szenario jedoch wieder positiv auf. Für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW liefert die Reaktanzmethode ebenfalls wieder exaktere Werte der Fehlerentfernung als die klassische Methode.

Die klassische Methode weist bereits am Beginn der Zone 1 ($m = 0$), wie in den Abbildungen 5.34 und 5.35 ersichtlich, Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung auf. Für die beiden Fälle $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw.

5. Ergebnisse

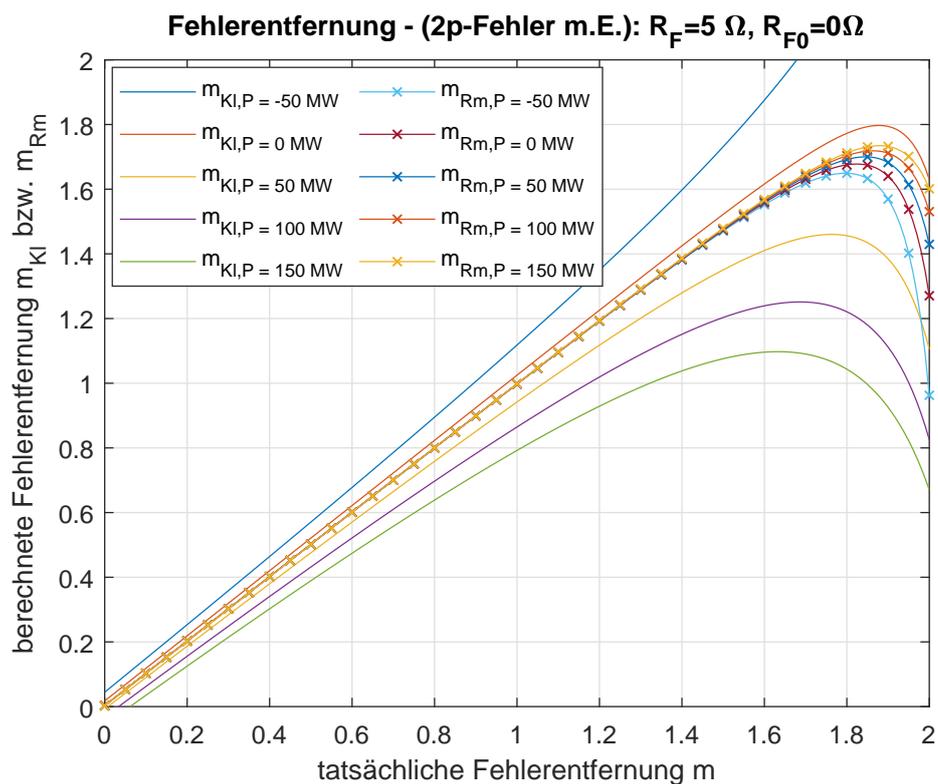


Abbildung 5.34.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

5. Ergebnisse

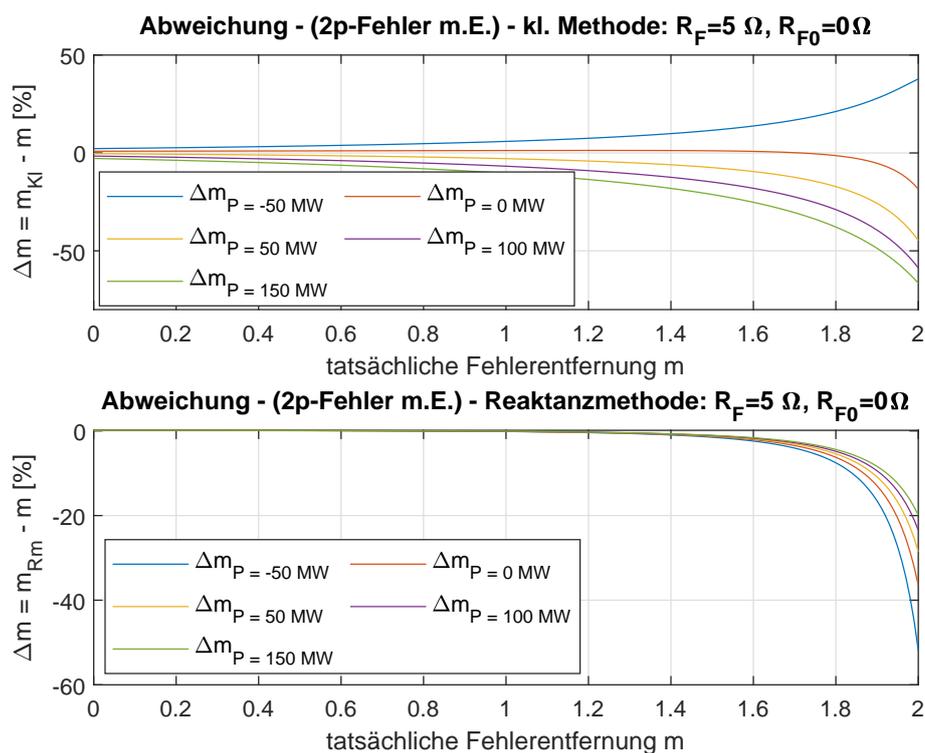


Abbildung 5.35.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

5. Ergebnisse

$P_{A \rightarrow B} = 150$ MW tritt gegen Ende der Zone 2, für $m > 1.8$, starkes Übergreifen auf. Die maximale Abweichung beträgt hier ca. 58% bzw. 65%. Dies stellt ein Problem dar, da es ebenfalls bedeuten würde, dass ein auftretender Fehler in Zone 2, als ein Fehler in Zone 1 erkannt wird.

Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt untergreifendes Verhalten auf. Die Abweichung steigt von ca. 4% am Beginn der Zone 1 ($m = 0$) auf 38% am Ende der Zone 2 ($m = 2$) an. Nur für den lastflussfreien Fall $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW ist das Ergebnis der klassischen Methode am Zonenende der Zone 2 genauer als jenes der Reaktanzmethode.

Szenario 4

Die Abbildungen 5.36 und 5.37 zeigen die Ergebnisse des vierten Szenarios. Für dieses Szenario mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden.

Die Reaktanzmethode liefert auch hier wieder bis zu $m = 1.4$ exakte Werte der Fehlerentfernung. Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW weicht die berechnete von der tatsächlichen Fehlerentfernung am Zonenende der Zone 2 ($m = 2$) um 27% bzw. 34% ab. Der Fall $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW stellt mit einer Abweichung von ca. 51% bei einer Fehlerentfernung von $m = 2$ ein Problem dar, da hier der Fehler wieder als in Zone 1 liegend erkannt wird. Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt für Entfernungen $m > 1.8$ starkes Übergreifen auf. Die Abweichungen betragen für $m > 1.95$ über 100%. Der Fehlerort kann hier somit nicht mehr annähernd genau bestimmt werden. Für alle betrachteten Lastflüsse tritt bei der Reaktanzmethode übergreifendes Verhalten auf, jedoch sind die Ergebnisse des Fehlerorts exakter als jene der klassischen Methode.

Die mittels klassischer Methode berechnete Fehlerentfernung weicht, wie in den Szenarien 2 und 3, auch hier beim Szenario 4 ($R_F = 10 \Omega$) bereits am Beginn der Zone 1 von der tatsächlichen Entfernung ab. Für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW tritt für Fehlerentfernungen $m > 1.5$ stark übergreifendes Verhalten auf. Bei Lastflüssen von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW wird, wie in Abbildung 5.36 ersichtlich, jeder in Zone 2 auftretende Fehler als ein Fehler in Zone 1 erkannt. Dies stellt wie bereits erwähnt ein großes Problem

5. Ergebnisse

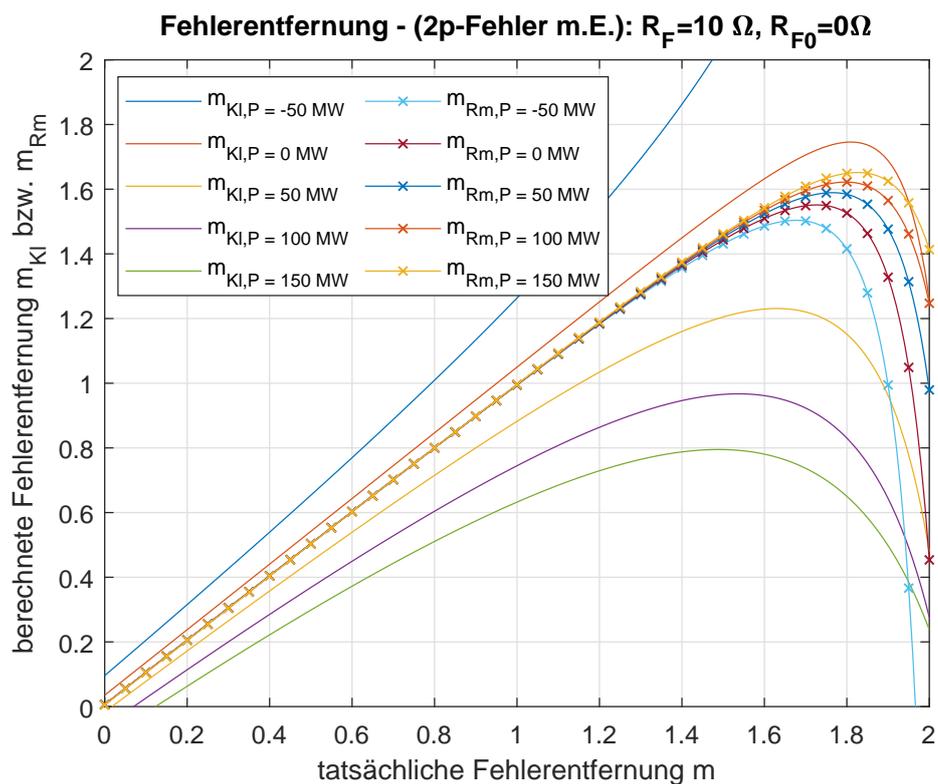


Abbildung 5.36.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

5. Ergebnisse

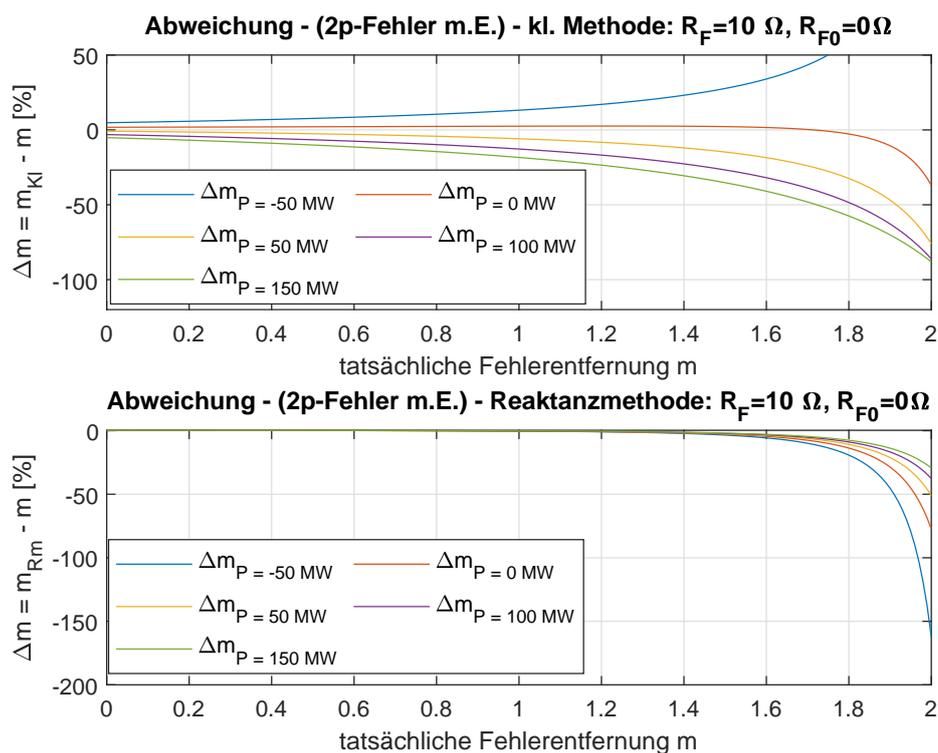


Abbildung 5.37.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

5. Ergebnisse

dar! Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW weist die klassische Methode stark untergreifendes Verhalten und Abweichungen größer 100%, für Fehler am Ende der Zone 2, auf.

5.3.2. Sensitivitätsanalyse

Variation der Kompensationsentfernung

Die Abbildungen 5.38 und 5.39 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Variation der Kompensationsentfernung m_{Cmp} für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung.

Für einen Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW weist die Reaktanzmethode, wie in Abbildung 5.38 dargestellt, bei hohen Kompensationsentfernungen $m_{Cmp} > 1,5$ und geringen Fehlerentfernungen untergreifendes Verhalten auf. Dieses Untergreifen steigt mit wachsender Fehlerentfernung an und sinkt anschließend wieder ab. Für einen Fehler am Ende der Zone 2, an der Stelle $m = 2$ und $m_{Cmp} = 2$, lässt sich die Fehlerentfernung exakt berechnen.

Bei niedrigen Werten der Kompensationsentfernung m_{Cmp} und Fehlerentfernungen am Ende der Zone 2 ($m = 2$) weist die Reaktanzmethode übergreifendes Verhalten auf. Für $m = 2$ und $m_{Cmp} < 0,5$, ergibt sich die berechnete Fehlerentfernung zu $m_{Rm} < 1$. Dies führt zu Problemen, da der Fehler in Zone 2 als Fehler in Zone 1 gesehen wird!

Abbildung 5.39 zeigt die berechnete Fehlerentfernung bei Variation der Kompensationsentfernung mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW. Für $m_{Cmp} < 1,5$ ist die Reaktanzmethode wieder nahezu unabhängig von der Kompensationsentfernung. Bei Fehlerentfernungen nahe dem Ende der Zone 2 ($m > 1,7$) tritt das bereits in Szenario 3 behandelte übergreifende Verhalten auf.

Für größere Fehlerentfernungen ($m > 1,5$) tritt für Kompensationsentfernungen von $m_{Cmp} > 1,5$ untergreifendes Verhalten auf. Die Reaktanzmethode weist in diesem Bereich eine geringe Abhängigkeit von der Kompensationsentfernung auf. Jedoch kann auch hier wieder festgestellt werden, dass die Fehlerentfernung m_{Rm} für $m_{Cmp} = m$ exakt berechnet werden kann.

5. Ergebnisse

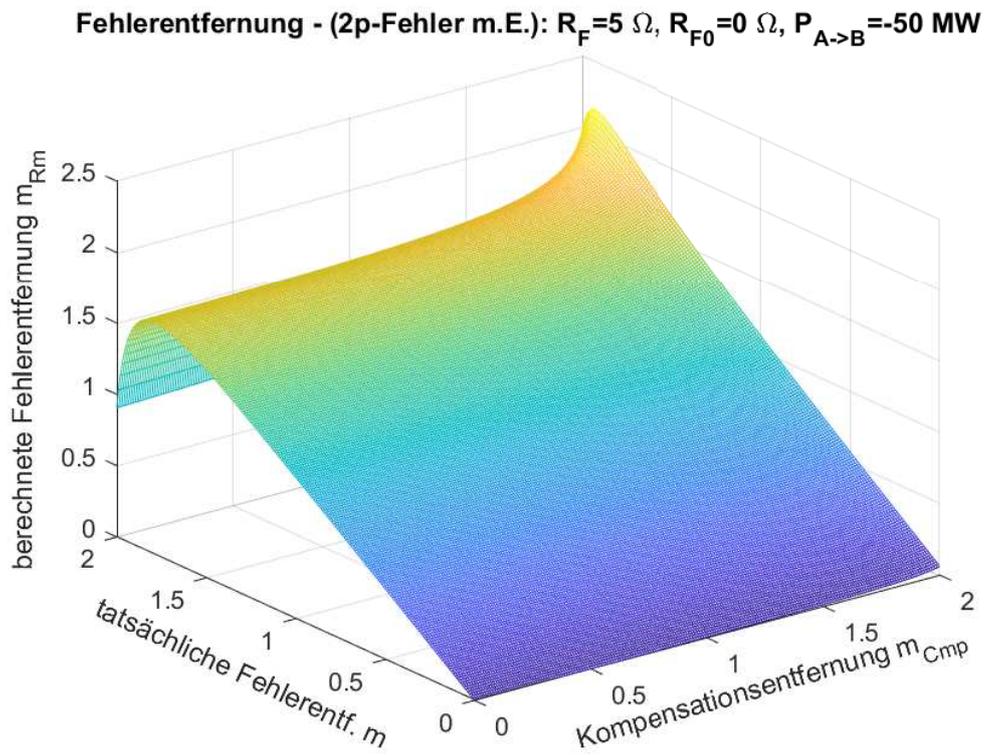


Abbildung 5.38.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

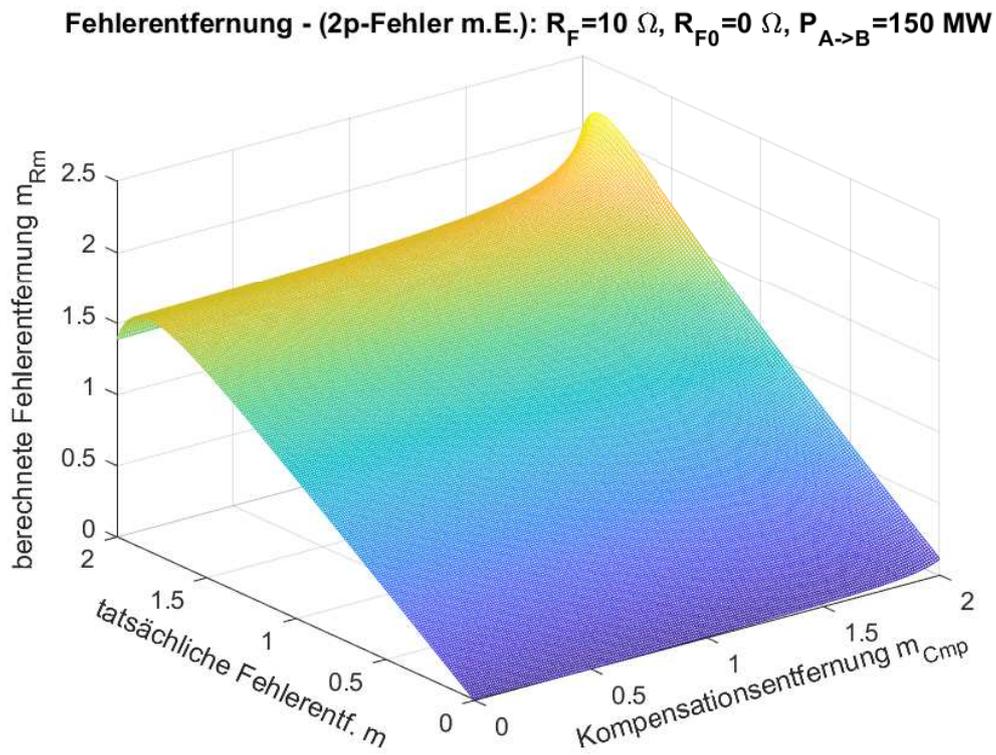


Abbildung 5.39.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=-50$ MW

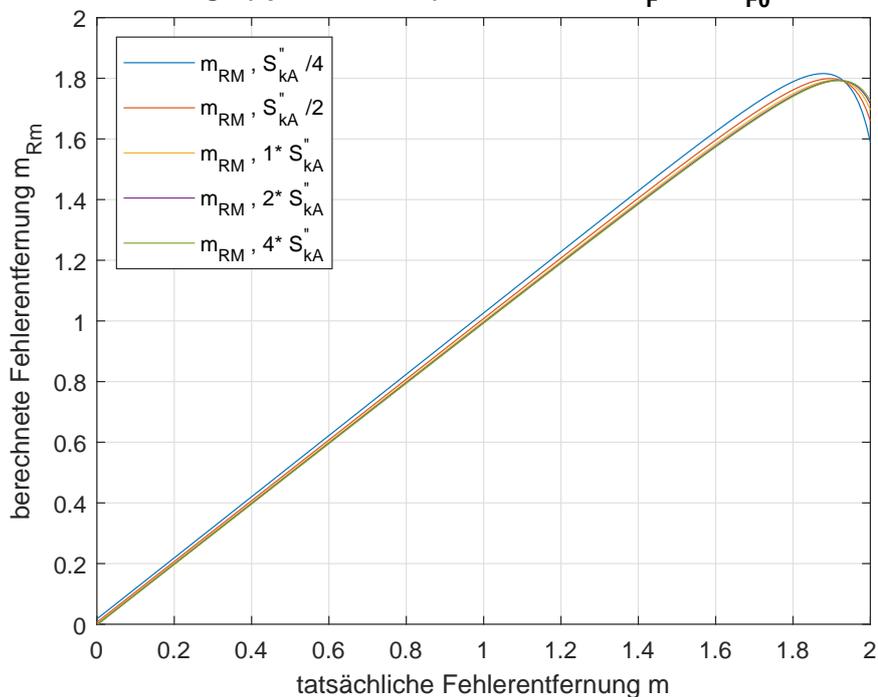


Abbildung 5.40.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW

Variation der Kurzschlussleistungen

Die Abbildungen 5.40 und 5.41 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Variation der Kurzschlussleistung S''_{kA}) für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung.

Wie in Abbildung 5.40 zu erkennen ist, hat die Veränderung der Kurzschlussleistung ($S''_{kA}/2$, $2 \cdot S''_{kA}$ und $4 \cdot S''_{kA}$), bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW, keinen nennenswerten Einfluss auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Die Reduktion der Kurzschlussleistung auf $S''_{kA}/4$ führt zu leicht untergreifendem Verhalten bei Fehlerentfernungen $m < 1,8$. Für Fehler am Ende der Zone 2 ($m > 1,9$)

5. Ergebnisse

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=50$ MW

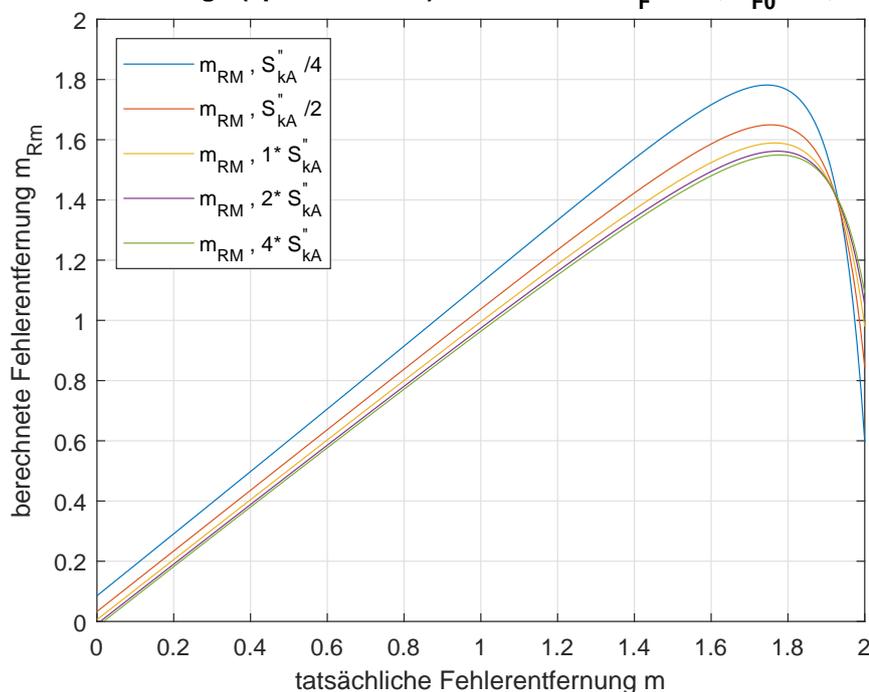


Abbildung 5.41.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW

weist die Reaktanzmethode für alle betrachteten Fälle ein leichtes Übergreifen, ähnlich zu Szenario 2 (Abbildung 5.32) auf.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW bewirkt die Reduktion der Kurzschlussleistung, auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes ($S''_{kA}/4$), ein untergreifendes Verhalten bei einer Fehlerentfernung von $m < 1,7$ bzw. starkes Übergreifen bei Fehlerentfernungen $m > 1,8$. Bei einer Vergrößerung der Kurzschlussleistung ($2 \cdot S''_{kA}$, $4 \cdot S''_{kA}$) entsteht für eine Fehlerentfernung $m > 1,2$ leicht übergreifendes Verhalten. Für Fehlerentfernungen am Ende der Zone 2 ($m = 2$) entsteht starkes Übergreifen. Für den Fall $S''_{kA}/4$ kann dies zu Problemen führen, da die berechnete Fehlerentfernung $m_{Rm} < 1$ wird. Somit würde ein Fehler am Ende der Zone 2 (bei $m = 2$) als ein Fehler in Zone 1 erkannt werden.

5. Ergebnisse

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=-50 \text{ MW}$

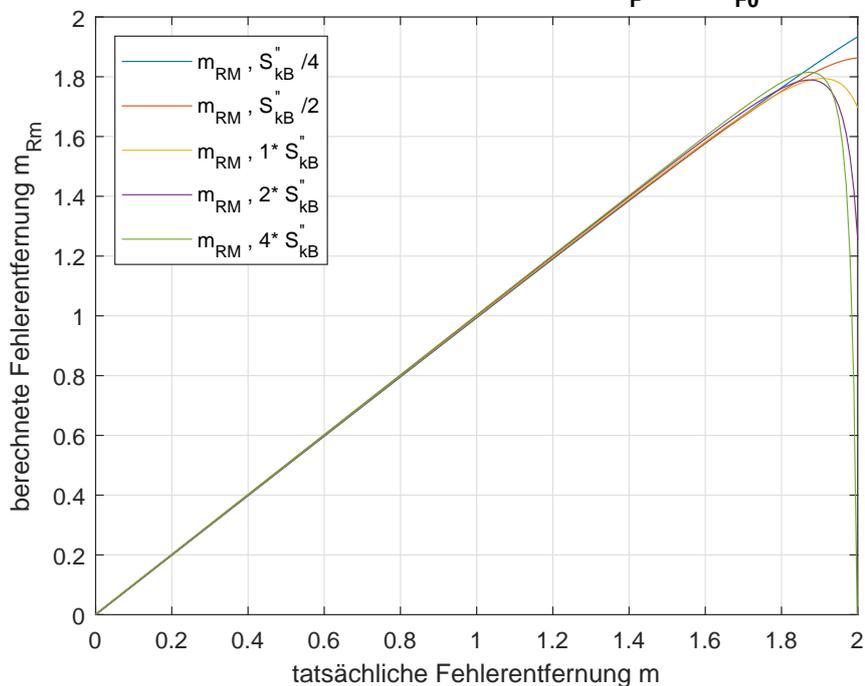


Abbildung 5.42.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

In den beiden Abbildungen 5.42 und 5.43 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB}) des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung dargestellt.

Wie in Abbildung 5.42 zu erkennen ist, hat die Veränderung der Kurzschlussleistung S''_{kB} bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$, einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$ und einer tatsächlichen Fehlerentfernung $m < 1,9$ keinen Einfluss auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Lediglich für Fehler am Ende der Zone 2 ($m > 1,9$) weist die Reaktanzmethode für die Fälle $S''_{kB}/2$ bzw. $S''_{kB}/4$ Übergreifen auf. Für den Fall $S''_{kB}/2$ ist das übergreifende Verhalten stärker ausgeprägt. Die Vergrößerung der Kurzschlussleistung auf den vierfachen ursprünglichen Wert ($4 \cdot S''_{kB}$) bewirkt starkes Übergreifen am Ende der Zone 2. Bei einer tatsächlichen Fehlerentfernung von $m = 2$ beträgt

5. Ergebnisse

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=150 \text{ MW}$

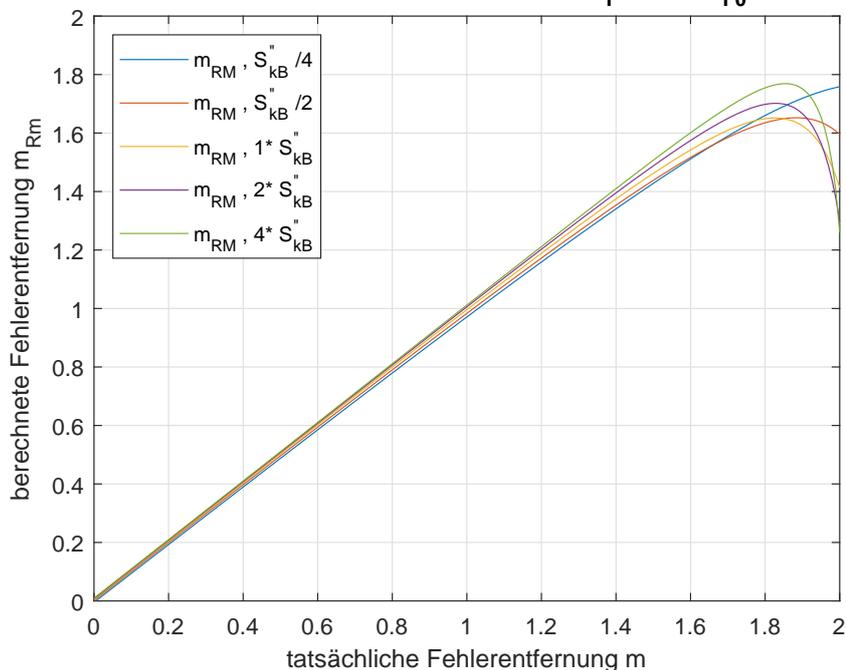


Abbildung 5.43.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

die berechnete Fehlerentfernung $m_{Rm} = 0$.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$ hat die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} bei einer Fehlerentfernung von $m < 1$ nahezu keine Auswirkung auf die Reaktanzmethode. Für die Fälle $2 \cdot S''_{kB}$ bzw. $4 \cdot S''_{kB}$ kann die Fehlerentfernung m_{Rm} bis zu einer tatsächlichen Entfernung $m < 1,4$ bzw. $m < 1,6$ exakt berechnet werden. Bei Kurzschlussleistungen von $S''_{kB}/2$ bzw. $S''_{kB}/4$ tritt für $m > 1$ schwach untergreifendes Verhalten auf.

5. Ergebnisse

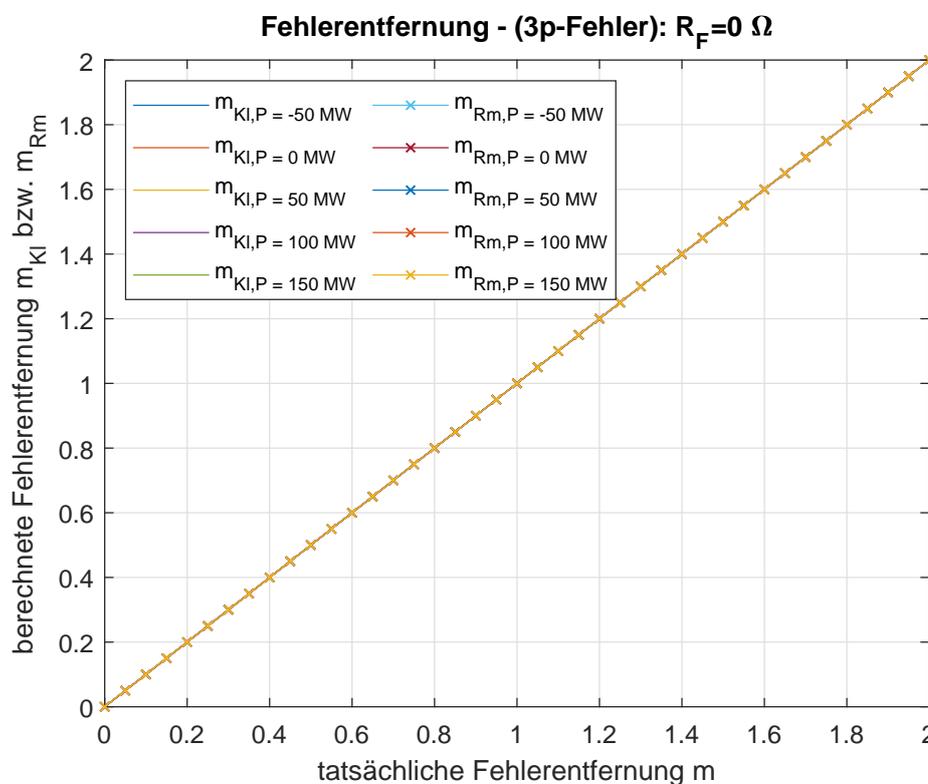


Abbildung 5.44.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$

5.4. Ergebnisse des 3-poligen Fehlers

5.4.1. Vergleich der beiden Methoden

Szenario 1

Die Abbildung 5.44 zeigt das Ergebnis des Szenarios 1 bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$. Wie schon bei den Fehlerarten in den vorherigen Abschnitten, ist auch beim 3-poligen Fehler die Berechnung des Fehlerorts mittels klassischer Methode bzw. Reaktanzmethode, bei $R_F = 0 \Omega$, exakt.

5. Ergebnisse

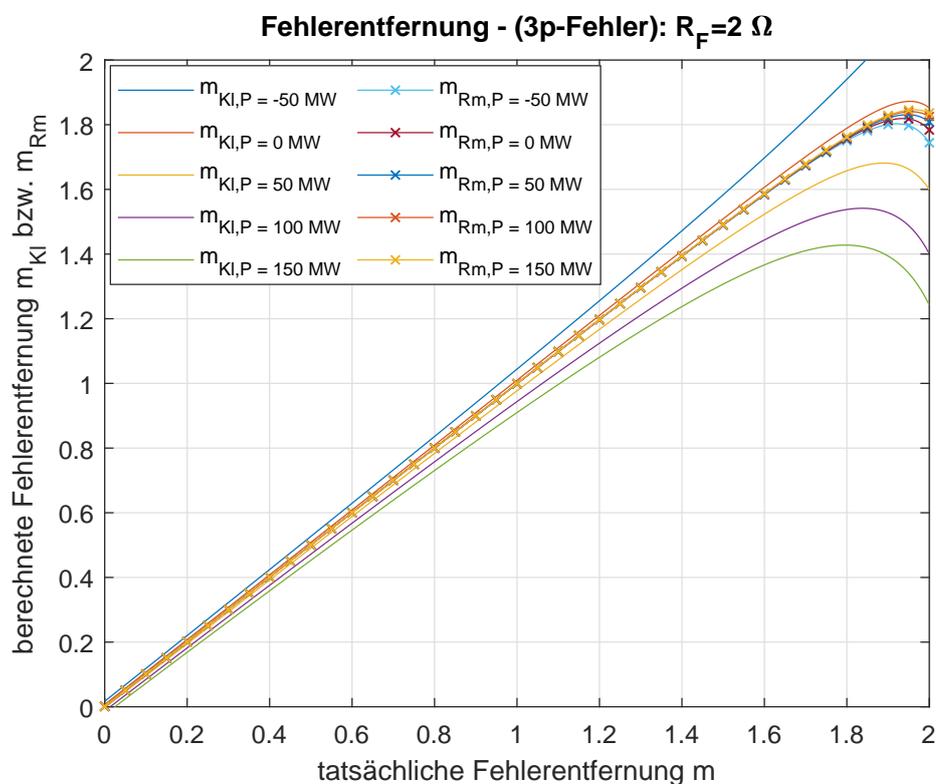


Abbildung 5.45.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

Szenario 2

In Abbildung 5.45 und 5.46 sind die Ergebnisse des zweiten Szenarios für den 3-poligen Fehler dargestellt.

Wie aus den beiden Abbildungen 5.45 und 5.46 ersichtlich, ist die Berechnung des Fehlerorts mit der Reaktanzmethode für $R_F = 2 \Omega$ beim 3-poligen Fehler, bis ca. $m = 1,2$, für alle betrachteten Lastflusszenarien exakt. Erst ab einer tatsächlichen Fehlerentfernung von $m = 1,9$ zeigen sich Abweichungen größer 5%. Diese betragen bei $m = 2$, je nach übertragener Leistung, zwischen 8% und 12%. Es tritt für alle betrachteten Lastflüsse übergreifendes Verhalten auf. Die Ergebnisse der Reaktanzmethode sind beim 3-poligen Fehler mit einem

5. Ergebnisse

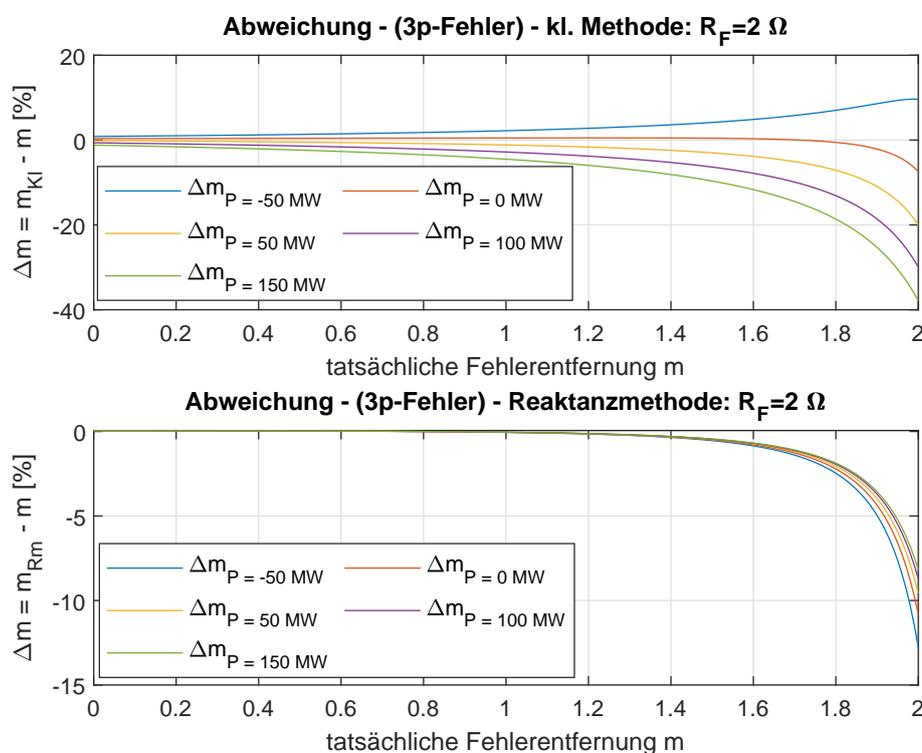


Abbildung 5.46.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$

Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$, wie in den Abbildungen erkennbar, bei einer Fehlerentfernung von $m < 1,5$ unabhängig vom Lastfluss.

Die Ergebnisse der klassischen Methode weisen hingegen schon ab Beginn der Zone 1 ($m = 0$) eine Abweichung von der tatsächlichen Fehlerentfernung, sowie eine Abhängigkeit vom betrachteten Lastfluss auf. Für übertragene Leistungen von $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW treten Abweichungen zwischen 20% und 38% auf. Die hier berechneten Fehlerentfernungen sind demnach ungenauer als jene mittels Reaktanzmethode berechneten Entfernungen.

5. Ergebnisse

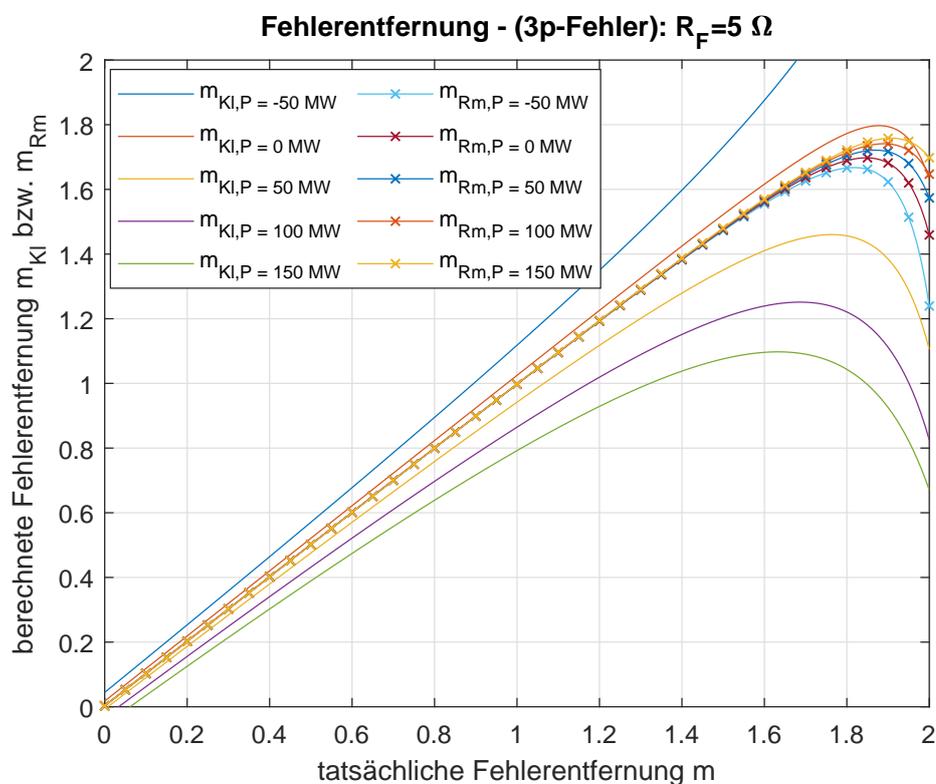


Abbildung 5.47.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

Szenario 3

Abbildung 5.47 und 5.48 zeigen die Ergebnisse des Szenarios 3. Wie auch bei den Fehlerarten davor, zeigen sich für das Szenario 3, mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$, deutliche Unterschiede zwischen Reaktanzmethode und klassischer Methode.

Die Reaktanzmethode zeigt bei Fehlerentfernungen innerhalb der Zone 1 ($m < 1$), für alle betrachteten Lastflüsse, keine Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung. Auch bei Entfernungen bis $m = 1,7$ liegen die Abweichungen unter 5%. Die größte Abweichung tritt am Ende der Zone 2 ($m = 2$), bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW, mit

5. Ergebnisse

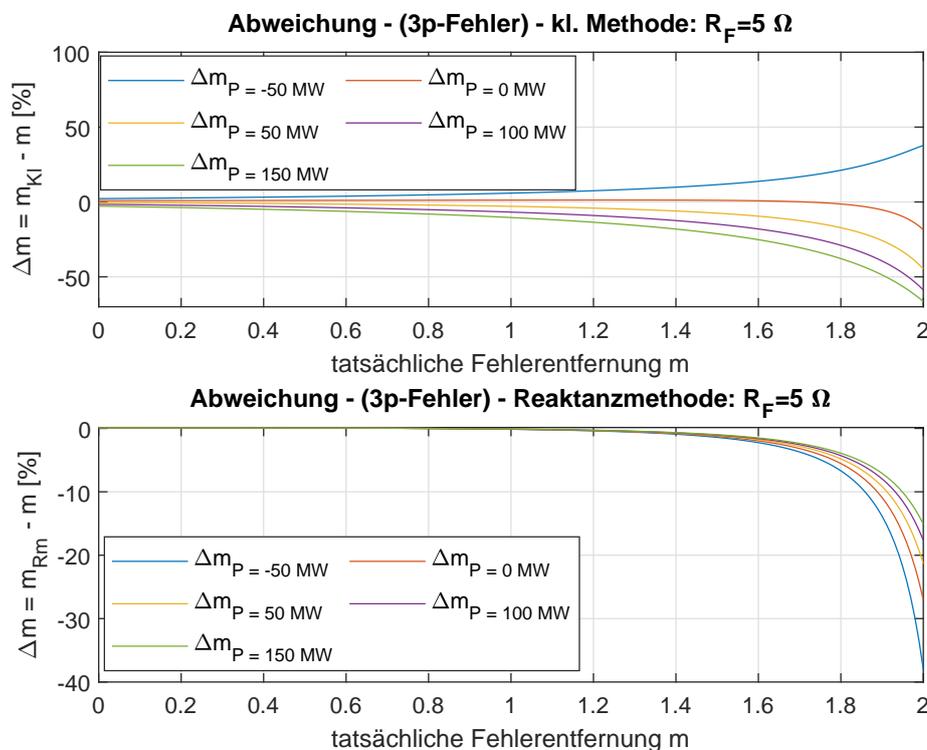


Abbildung 5.48.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$

ca. 37% auf. Für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} \neq 0$ MW liefert die Reaktanzmethode über die gesamten zwei Zonen exaktere Ergebnisse als die klassische Methode.

Die klassische Methode weist, wie im Szenario 2, bereits am Beginn der Zone 1 ($m = 0$) eine Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung auf. Bei einer Entfernung von $m > 1$ lässt sich die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Lastfluss deutlich erkennen. Für die beiden Fälle $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW tritt gegen Ende der Zone 2, für $m > 1,95$ bzw. $m > 1,9$, untergreifendes Verhalten auf. Die maximale Abweichung beträgt hier 58% bzw. 67%. Dies stellt ein Problem dar, da ein auftretender Fehler in Zone 2, als ein Fehler in Zone 1 erkannt wird! Für die Lastflüsse $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW,

5. Ergebnisse

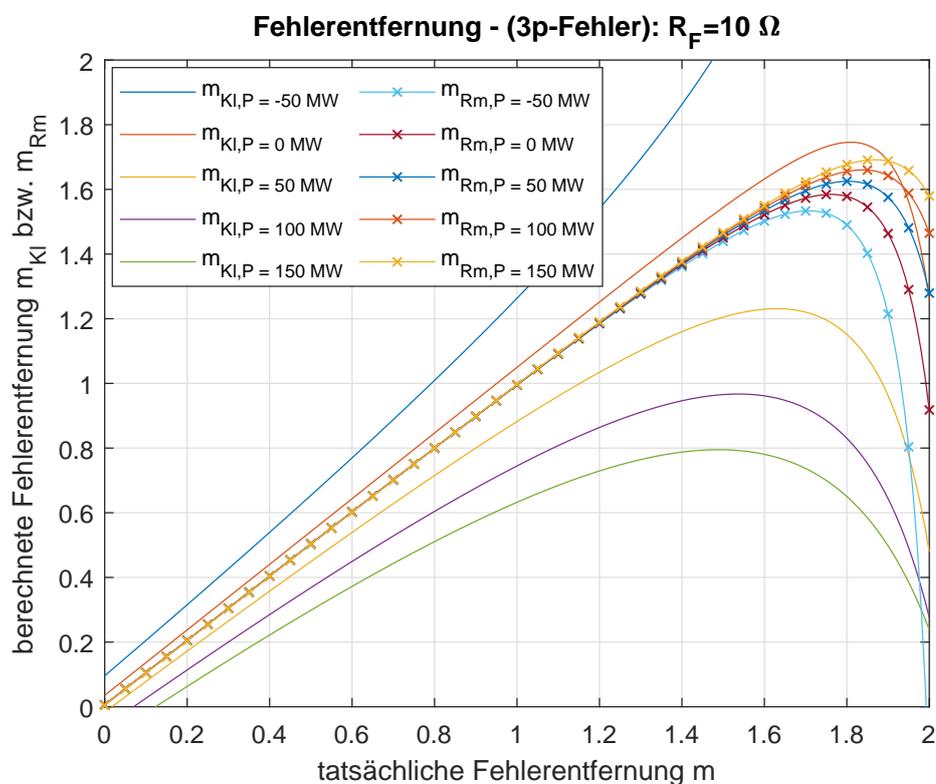


Abbildung 5.49.: Berechnete Fehlerentfernung der klassischen Methode und der Reaktanzmethode (mit $m_{Cmp} = 0,8$) bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

$P_{A \rightarrow B} = 0$ MW und $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW liegen die maximalen Abweichungen unter 50%.

Szenario 4

Die Ergebnisse für das Szenario 4 des 3-poligen Fehlers finden sich in den Abbildungen 5.49 und 5.50.

In den beiden Abbildungen 5.49 und 5.50 ist die Überlegenheit der Reaktanzmethode für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} \neq 0$ MW deutlich zu erkennen. Die

5. Ergebnisse

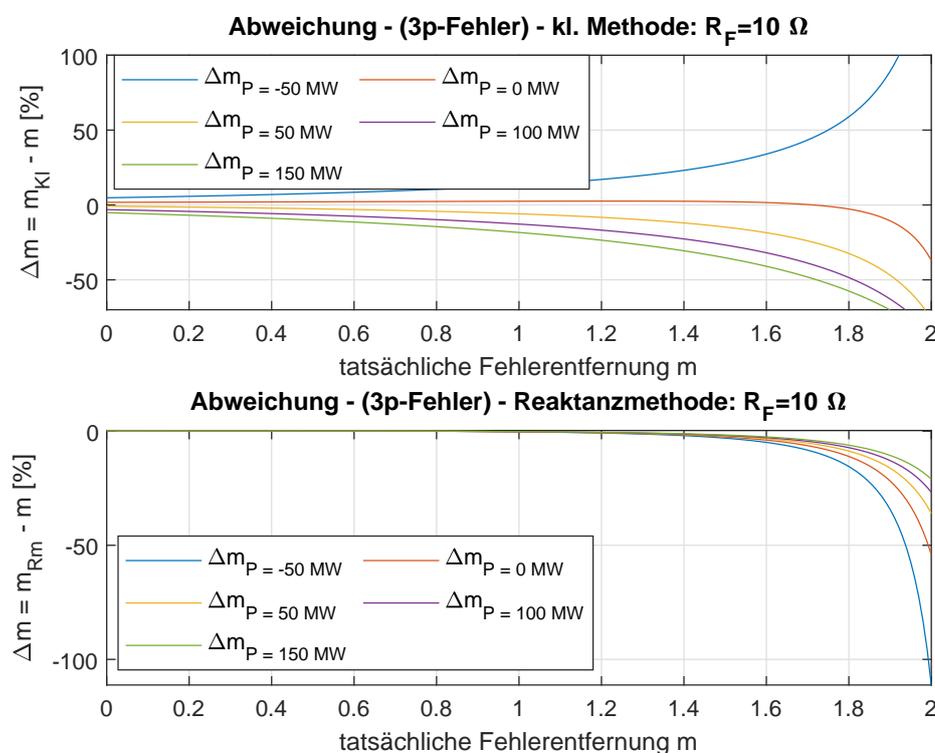


Abbildung 5.50.: Abweichung der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung (bezogen auf die Gesamtentfernung $m = 2$) bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$

mittels Reaktanzmethode berechneten Fehlerentfernungen sind, für alle betrachteten Lastflüsse, bei Entfernungen $m < 1, 2$ exakt. Für den lastflussfreien Fall $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW tritt am Ende der Zone 2 eine Abweichung von 54% auf. Dies führt wieder zu Problemen bei am Ende der Zone 2 auftretenden Fehlern. Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW beträgt die maximale Abweichung bei $m = 2$, ca. 110%. Hier ist somit keine ernstzunehmende Bestimmung des Fehlerorts mehr möglich. Die Reaktanzmethode weist für Lastflüsse $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW über die Zone 1 und Zone 2 geringere Abweichungen auf als die klassische Methode. Der Fehlerort kann für diese Fälle entsprechend exakter bestimmt werden.

Die klassische Methode zeigt auch hier beim Szenario 4 ($R_F = 10 \Omega$) bereits

5. Ergebnisse

am Beginn der Zone 1 Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Entfernung. Für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} \neq 0$ MW tritt für Fehlerentfernungen $m > 1,2$ bereits eine Abweichung größer 10% auf. Bei Lastflüssen von $P_{A \rightarrow B} \geq 0$ MW tritt am Ende der Zone 2 stark übergreifendes Verhalten auf. Die Abweichungen von der tatsächlichen Fehlerentfernung liegen hier weit über 50%. Wie in Abbildung 5.49 ersichtlich, wird für übertragene Leistungen von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW bzw. $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW jeder in Zone 2 auftretende Fehler als ein Fehler in Zone 1 erkannt! Bei einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW weist die klassische Methode, für Fehler am Ende der Zone 2 ($m = 2$), stark untergreifendes Verhalten mit einer maximalen Abweichung von ca. 175% auf. Der Fehlerort kann bei diesem Lastfluss, für Fehlerentfernungen $m > 1,9$, nicht mehr annähernd genau bestimmt werden. Die mittels klassischer Methode berechnete Fehlerentfernung des lastflussfreien Falls ist für Entfernungen $m > 1,7$ exakter als die der Reaktanzmethode. Jedoch ist aus den Abbildungen ersichtlich, dass die klassische Methode für diesen Fall, vom Beginn der Zone 1 bis in die Zone 2 ($m = 1,7$), leicht untergreifendes Verhalten aufweist.

5.4.2. Sensitivitätsanalyse

Variation der Kompensationsentfernung

In den Abbildungen 5.51 und 5.52 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des 3-poligen Fehlers bei Variation der Kompensationsentfernung m_{Cmp} dargestellt.

Die Abbildung 5.51 zeigt die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} bei Variation der Kompensationsentfernung mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW. Für $m < 1,5$ und $m_{Cmp} < 1,5$ ist die Reaktanzmethode wieder nahezu unabhängig von der Kompensationsentfernung. Bei größeren Fehlerentfernungen $m > 1,5$ tritt für Kompensationsentfernungen von $m_{Cmp} < 1,5$ stark übergreifendes Verhalten, ähnlich zu Szenario 4 (Abbildung 5.49) auf. Die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung sind so groß, dass der Fehlerort hier nicht mehr annähernd genau ermittelt werden kann. Das übergreifende Verhalten resultiert

5. Ergebnisse

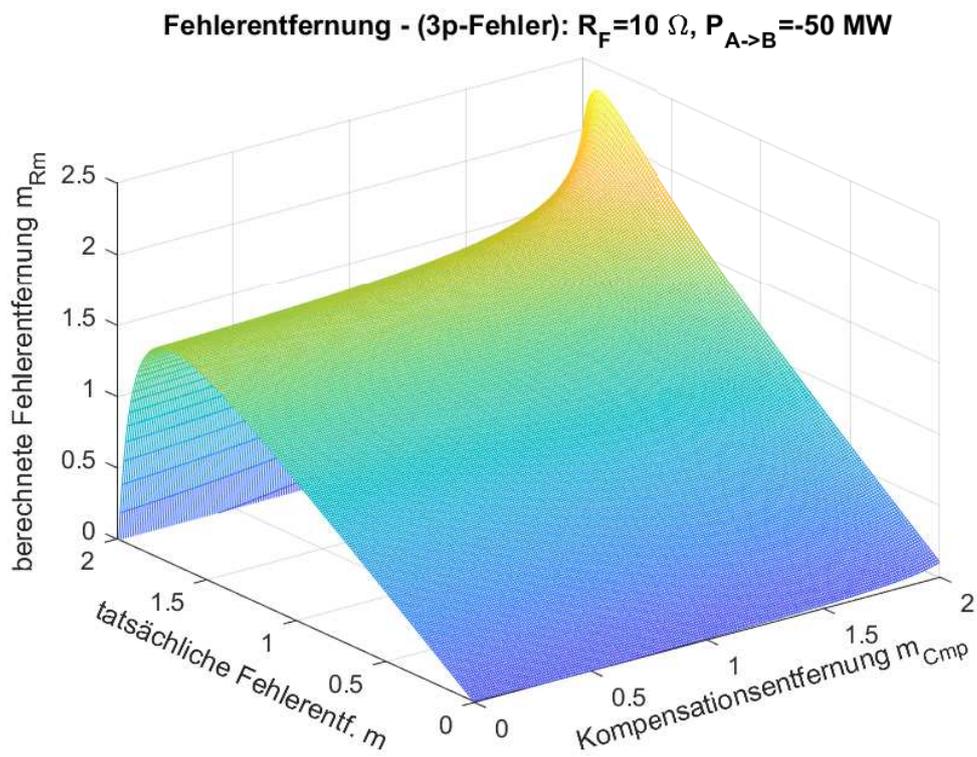


Abbildung 5.51.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

5. Ergebnisse

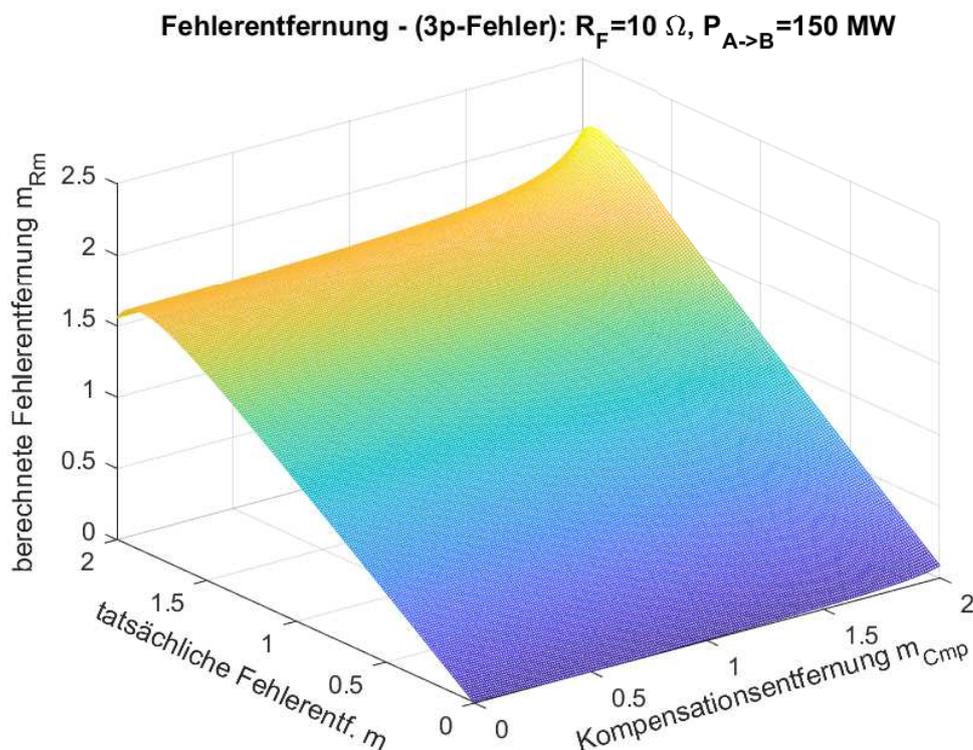


Abbildung 5.52.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

jedoch aus dem hohen Wert des Fehlerwiderstandes und der übertragenen Leistung $P_{A \rightarrow B} < 0 \text{ MW}$.

Für $m > 1,5$ und $m_{Cmp} > 1,5$ tritt untergreifendes Verhalten auf. Dieses Untergreifen nimmt nach Erreichen des Maximalwerts bei ca. $m = 1,8$ und $m_{Cmp} = 2$, jedoch zum Ende der Zone 2 hin wieder ab. Für den Punkt $m_{Cmp} = m = 2$ ist die berechnete Fehlerentfernung $m_{Rm} = 2$ jedoch auch hier wieder exakt ermittelbar!

Anhand der Abbildung 5.25 lässt sich erkennen, dass die Reaktanzmethode bei hohem Fehlerwiderstand ($R_F = 10 \Omega$) und hohem Lastfluss ($P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$), für $m_{Cmp} < 1,5$ von der Kompensationsentfernung unabhängig ist. Bei ei-

5. Ergebnisse

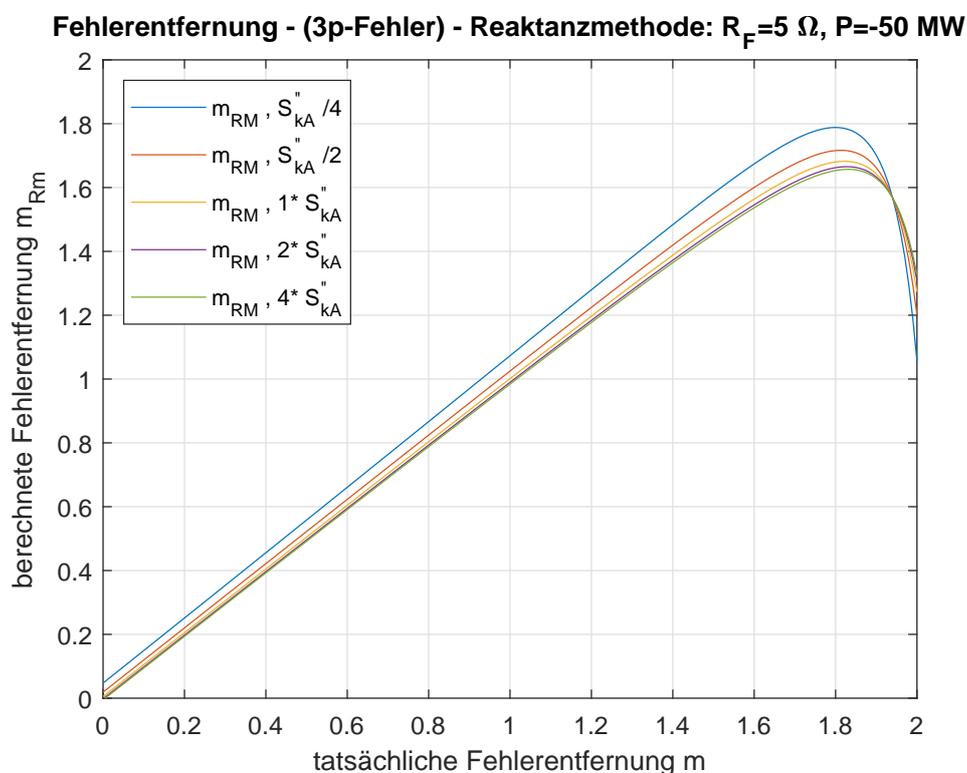


Abbildung 5.53.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

ner Kompensationsentfernung $m_{Cmp} > 1,5$ entsteht leicht untergreifendes Verhalten. Bei Fehlern am Ende der Zone 2 ($m = 2$) und einer Kompensationsentfernung $m_{Cmp} = 2$, kann die Fehlerentfernung $m_{Rm} = 2$ exakt bestimmt werden.

Variation der Kurzschlussleistungen

Die Abbildungen 5.53 und 5.54 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kA} , des 3-poligen Fehlers.

Wie in Abbildung 5.53 dargestellt, hat die Vergrößerung der Kurzschlussleistung ($2 \cdot S''_{kA}$ bzw. $4 \cdot S''_{kA}$) bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ bzw. einem

5. Ergebnisse

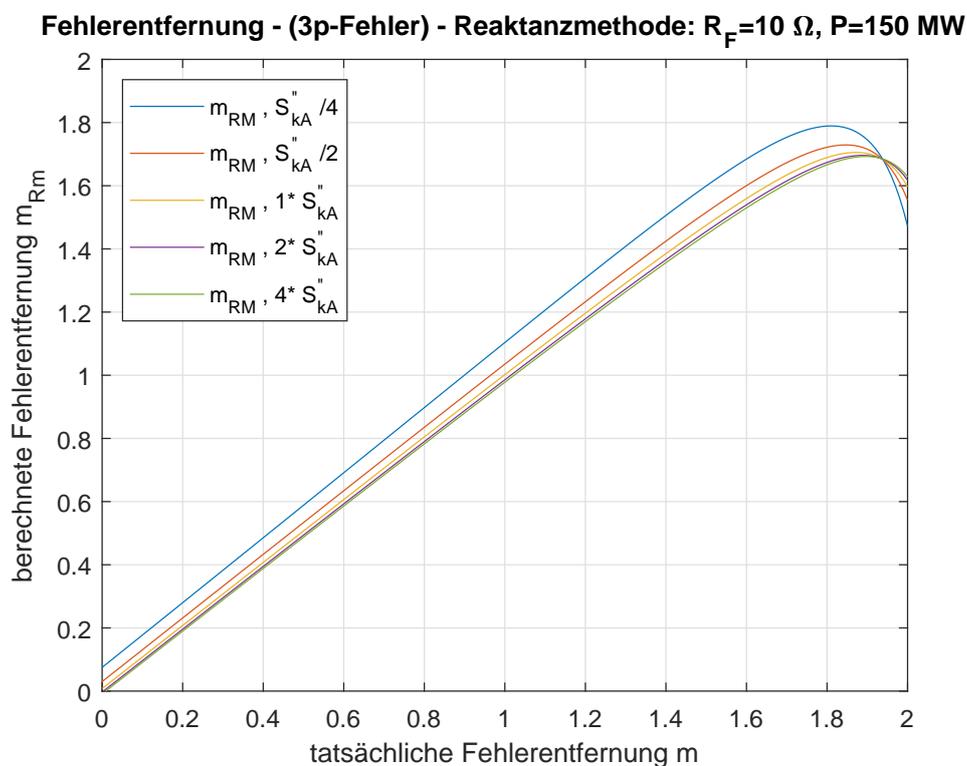


Abbildung 5.54.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$, für Fehlerentfernungen $m < 1,8$, nahezu keine Auswirkungen auf die Reaktanzmethode. Für Fehlerentfernungen $m < 1$ kann m_{Rm} exakt berechnet werden. Bei höheren Entfernungen ($m > 1,2$) zeigt sich ein schwach übergreifendes Verhalten. Für Fehler am Ende der Zone 2 ($m = 2$) ist dieses Übergreifen stärker ausgeprägt. Die Reduktion der Kurzschlussleistung auf $S''_{kA}/4$ bewirkt für Fehlerentfernungen $m < 1,8$ untergreifendes bzw. für $m > 1,8$ übergreifendes Verhalten.

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$, dargestellt in Abbildung 5.54, entsteht ebenfalls für die Fälle $S''_{kA}/4$ und $S''_{kA}/2$ bei Fehlerentfernungen $m < 1,8$ untergreifendes Verhalten. Bei Fehlerentfernungen $m > 1,8$ tritt übergreifendes Verhalten auf. Die Erhöhung der Kurzschlussleistung auf $2 \cdot S''_{kA}$ bzw. $4 \cdot S''_{kA}$ zeigt beinahe keine Auswirkung

5. Ergebnisse

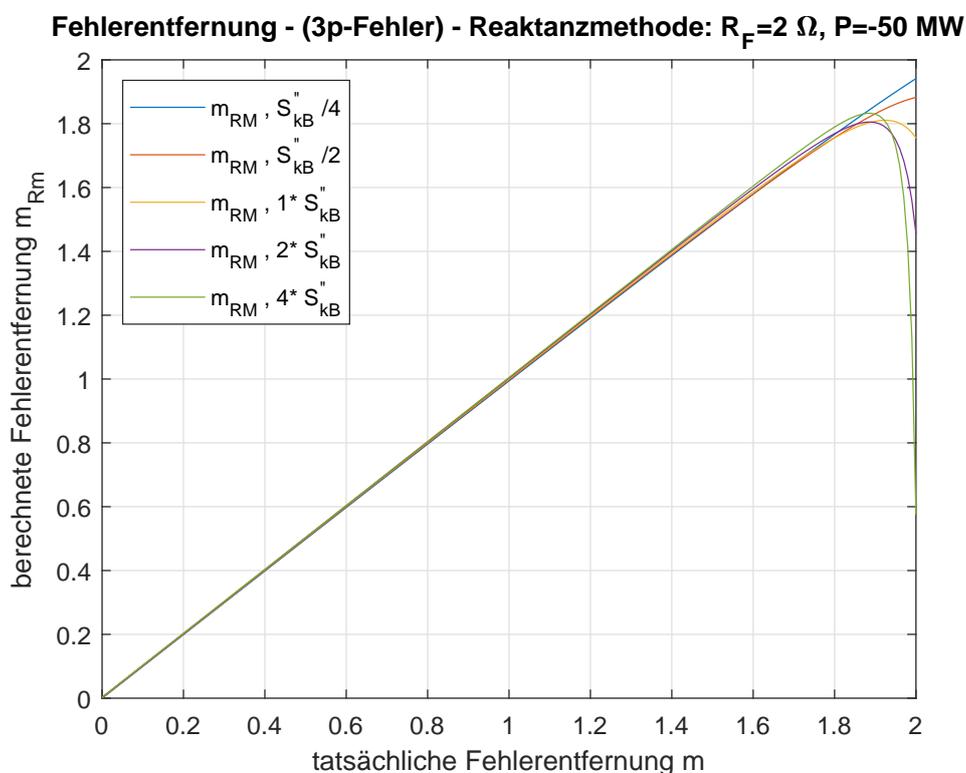


Abbildung 5.55.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} . Hier tritt ab einer Entfernung $m > 1$ übergreifendes Verhalten, ähnlich zu Szenario 4 (Abbildung 5.49), auf.

In den Abbildungen 5.55 und 5.56 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (bei Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB}) des 3-poligen Fehlers dargestellt.

Anhand der Abbildung 5.55 lässt sich erkennen, dass die Veränderung der Kurzschlussleistung S''_{kB} bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$, einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$ und einer tatsächlichen Fehlerentfernung $m < 1,9$, keinen Einfluss auf die berechnete Fehlerentfernung m_{Rm} hat. Bei Fehlern am Ende der Zone 2 ($m > 1,9$) tritt für die Fälle $S''_{kB}/2$ bzw. $S''_{kB}/4$ schwach übergreifendes Verhalten auf. Die Berechnung mit $S''_{kB}/4$ liefert hier ein hervorragendes Ergebnis. Die Vergrößerung der Kurzschlussleistung

5. Ergebnisse

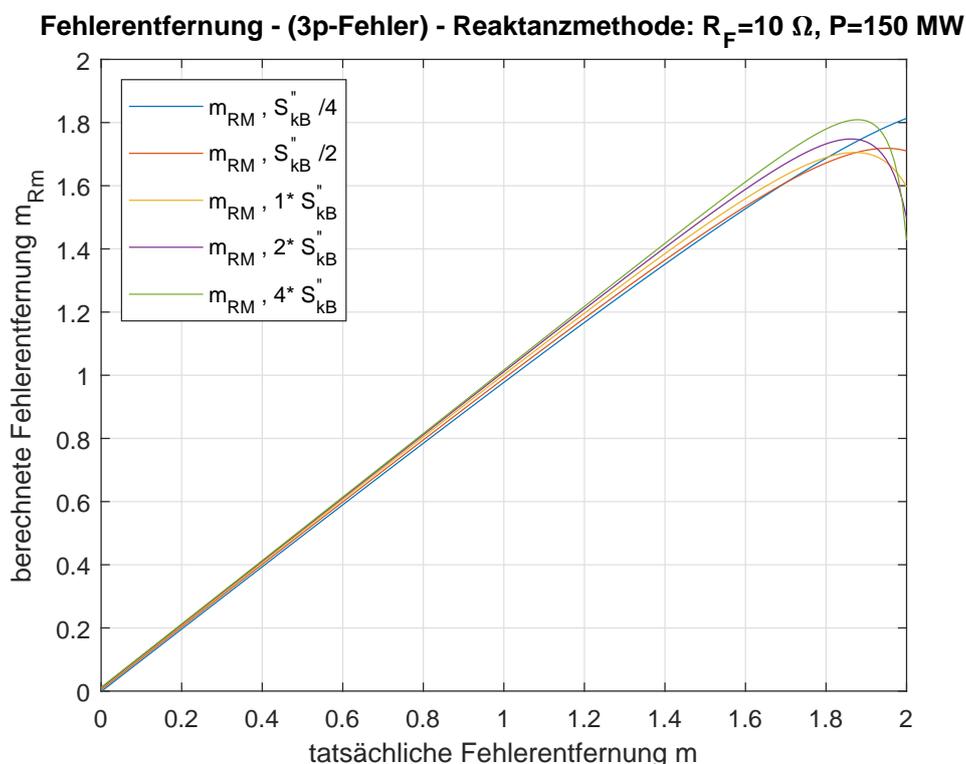


Abbildung 5.56.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

auf $4 \cdot S''_{kB}$ bewirkt starkes Übergreifen am Ende der Zone 2 ($m = 2$). Die berechnete Fehlerentfernung liegt hier wieder in Zone 1. Der Fehler bei $m = 2$ wird somit als Fehler in Zone 1 erkannt und stellt, wie bereits erwähnt, ein Problem dar!

Bei einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einem Lastfluss von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$ hat die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} bei einer Fehlerentfernung von $m < 1$ keine nennenswerte Auswirkung auf die Reaktanzmethode. Für die Fälle $2 \cdot S''_{kB}$ bzw. $4 \cdot S''_{kB}$ kann die Fehlerentfernung m_{Rm} bis zu einer tatsächlichen Entfernung von $m < 1,4$ annähernd exakt berechnet werden. Fehlerentfernungen nahe dem Ende der Zone 2 ($m > 1,8$) führen aber auch hier zu übergreifendem Verhalten. Bei Kurzschlussleistungen von $S''_{kB}/2$ bzw. $S''_{kB}/4$ tritt für $m > 1,2$ schwach untergreifendes Verhalten auf.

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Anhand der in Kapitel 5 präsentierten Ergebnisse sollen jene der Reaktanzmethode hier nochmals allgemein zusammengefasst und diskutiert werden. Darauf aufbauend wird eine Bewertung der Reaktanzmethode durchgeführt.

Für das betrachtete Szenario 1 mit $R_F = 0 \Omega$ kann der Fehlerort, unabhängig von der auftretenden Fehlerart, sowohl mittels Reaktanzmethode als auch mit klassischer Methode exakt berechnet werden. Für diesen Fall hat weder die übertragene Leistung $P_{A \rightarrow B}$ noch die Variation der Kompensationsentfernung bzw. der Kurzschlussleistungen Einfluss auf das exakte Ergebnis.

Werden nun die Ergebnisse der Szenarien 2 bis 5 unabhängig der Fehlerart betrachtet, lassen sich folgende Schlüsse daraus ziehen. Die Reaktanzmethode berechnet den Fehlerort, unabhängig von der Größe des Fehlerwiderstandes ($R_F = 2 \dots 50 \Omega$), innerhalb der Zone 1 immer exakt. Es wird hier die benötigte hohe Genauigkeit am Zonenende der Zone 1 (zwischen 80% und 100% der Leitungslänge l_L) erfüllt! Die klassische Methode zeigt bereits ab einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ geringe Abweichungen von der tatsächlichen Fehlerentfernung. Diese werden mit steigender übertragener Leistung bzw. mit steigendem Fehlerwiderstand größer. Das kann bei Fehlern, die an der Grenze zwischen den beiden Zonen liegen zu Problemen führen. Bei am Ende der Zone 2 auftretenden Fehlern, zeigen sowohl die Reaktanzmethode als auch die klassische Methode, bei höheren Fehlerwiderstandswerten, erhebliche Abweichungen. Aber auch hier erweist sich die Reaktanzmethode als bessere Wahl, da deren Abweichungen für übertragene Leistungen $P_{A \rightarrow B} > 0$ MW geringer sind als jene der klassischen Methode. Lediglich bei einer Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW entstehen bei der Reaktanzmethode (für $m_{Cmp} = 0,8$) höhere Abweichungen von der tatsächlichen Fehlerentfernung. Wird die Kompensationsentfernung

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

jedoch auf den Endbereich der Zone 2 festgelegt, z.B. $m_{Cmp} = 1,8$, ist die Berechnung mittels Reaktanzmethode genauer als jene mittels klassischer Methode. Man nimmt jedoch mit einer höheren Kompensationsentfernung ein schwach untergreifendes Verhalten über beide Zonen hinweg (bis $m_{Cmp} = 1,8$) in Kauf. Dieses Untergreifen stellt hingegen ein kleineres Problem dar als starkes Übergreifen. Bei stark übergreifendem Verhalten wird ein in Zone 2 auftretender Fehler als ein Fehler in Zone 1 erkannt. Es wird somit Zone 1 abgeschaltet, obwohl dies nicht nötig wäre. Fehlerortsselektivität ist hiermit bei stark übergreifendem Verhalten nicht mehr gewährleistet! Bei Verwendung der Reaktanzmethode kann für die Einstellung des Kompensationspunktes im Distanzschutzgerät deshalb ein höherer Wert der Kompensationsentfernung empfohlen werden.

Bei einem hohen Wert des Fehlerwiderstandes ($R_F = 50 \Omega$) und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW tritt beim 1-poligen Fehler eine Polstelle bei der Berechnung der Fehlerentfernung auf. Diese Polstelle stellt jedoch nur ein Problem dar, wenn der auftretende Fehler exakt auf der Polstelle liegt. In allen anderen Fällen ist diese unproblematisch! Diese Polstelle lässt sich aber durch eine geänderte Kompensationsentfernung m_{Cmp} eliminieren. Als Nachteil entsteht jedoch über beide Zonen hinweg untergreifendes Verhalten.

Durch die Sensitivitätsanalyse bei Variation der Kompensationsentfernung m_{Cmp} konnte festgestellt werden, dass die Berechnung des Fehlerorts im Punkt $m_{Cmp} = m$ immer exakt ist. Die in Kapitel 3, bei der Analyse der Reaktanzmethode, gezeigte Theorie konnte somit bei der Simulation am Modell bestätigt werden. Aus dieser Erkenntnis lässt sich eine, im Kapitel 7 vorgestellte mögliche Verbesserung in Distanzschutzrelais ableiten.

Allgemein hat die Wahl der Kompensationsentfernung m_{Cmp} bei Fehlerentfernungen innerhalb der Zone 1, unabhängig der Fehlerart, keine bzw. kaum Auswirkungen auf die berechnete Fehlerentfernung. Bei Fehlern am Ende der Zone 2 (z.B. $m = 1,5 \dots 2$) vermindert eine ebenso in diesem Bereich gewählte Kompensationsentfernung das stark übergreifende Verhalten. Hier kann dadurch die Fehlerentfernung exakter berechnet werden! Als Nachteil entsteht jedoch ein leicht untergreifendes Verhalten in der Zone 1 bzw. bis zum Fehlerort. Ist dieses Untergreifen bei der Anwendung der Reaktanzmethode im Distanzschutzgerät akzeptabel, kann hier eine Kompensationsentfernung innerhalb der Zone 2 (z.B. $m_{Cmp} = 1,8$) empfohlen werden.

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Der im Schutzgerät eingestellte Korrekturwinkel $\underline{\delta}_{A,Cmp}$ wird der, sich über den Tagesverlauf ändernden Kurzschlussleistung (S''_{kA} bzw. S''_{kB}) nicht laufend angepasst. Die Ergebnisse dieser durchgeführten Sensitivitätsanalyse werden im folgenden interpretiert.

Die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kA} hat, unabhängig von der Fehlerart, bei niedrigen Werten des Fehlerwiderstandes ($R_F = 2 \Omega$ bzw. $R_F = 5 \Omega$) keine bzw. nur geringe Auswirkungen auf die Fehlerortsbestimmung mittels Reaktanzmethode. Bei höheren Fehlerwiderständen ($R_F = 10 \Omega$ bzw. $R_F = 50 \Omega$) entstehen, über beide Zonen hinweg, größere Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Fehlerentfernung. Ist die tatsächlich vorhandene Kurzschlussleistung kleiner, als die für den Korrekturwinkel ursprünglich angenommene, so zeigt sich untergreifendes Verhalten bzw. am Ende der Zone 2 übergreifendes Verhalten. Für eine als höher angenommene als tatsächlich vorhandene Kurzschlussleistung weichen die Berechnungen kaum vom Basisszenario (angenommene entspricht tatsächlich vorhandener Kurzschlussleistung) ab. Bei der Abschätzung der Kurzschlussleistung S''_{kA} hat hier eine Überschätzung kaum Auswirkungen auf die zu berechnende Fehlerentfernung, eine Unterschätzung beeinträchtigt jedoch die Fehlerortsbestimmung maßgeblich!

Aus der Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} lässt sich, unabhängig von der Fehlerart und der Größe des Fehlerwiderstandes, schließen, dass eine als höher angenommene als tatsächlich vorhandene Kurzschlussleistung positive Auswirkungen auf die Fehlerortsbestimmung hat. Für Fehler im Bereich des Zonenendes der Zone 2, wird die Berechnung der Fehlerentfernung dadurch exakter bzw. findet das stark untergreifende Verhalten nicht statt. Ist die tatsächliche Kurzschlussleistung höher als die für die Berechnung des Korrekturwinkels angenommene, so entsteht am Ende der Zone 2 stark übergreifendes Verhalten. Bei der Abschätzung der Kurzschlussleistung S''_{kB} ist ebenfalls eine Überschätzung besser als eine Unterschätzung. Für Fehler innerhalb der Zone 1 hat die Variation der Kurzschlussleistung S''_{kB} keine Auswirkungen.

Allgemein lässt sich aus diesem Verhalten folgende Empfehlung bezüglich der Einstellung des Korrekturwinkels im Schutzgerät abgeben. Bei der Abschätzung der Kurzschlussleistungen der beiden Netze hat eine Überschätzung des Verhältnisses $\frac{S''_{kA}}{S''_{kB}}$ kaum Auswirkungen auf die Fehlerortsbestimmung mittels Reaktanzmethode. Eine Unterschätzung des Verhältnisses wirkt sich jedoch negativ, in

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Form von untergreifendem Verhalten in der Zone 1 bzw. stark übergreifendem Verhalten am Ende der Zone 2 aus.

Aus den Ergebnissen kann ebenso abgeleitet werden, dass für in etwa gleich große Netze (S''_{kA} entspricht ungefähr S''_{kB}) die Berechnung des Fehlerorts mittels Reaktanzmethode genauer ist als die Berechnung bei gänzlich verschieden großen Netzen. Allgemein formuliert liefert die Reaktanzmethode bei ähnlich großen Netzen exaktere Ergebnisse!

Mit den Simulationen aus Kapitel 4 konnte anhand der im vorherigen Abschnitt präsentierten Ergebnisse gezeigt werden, dass die Reaktanzmethode die klassische Methode für die Fehlerortsbestimmung in Distanzschutzgeräten durchaus ersetzen kann. Vor allem die erhöhte Genauigkeit der Reaktanzmethode am Ende der Zone 1 stellt einen großen Vorteil dar! Ebenso ist die Berechnung des Fehlerorts, bei Auftreten eines hohen Fehlerwiderstandes, exakter als die Berechnung mittels klassischer Methode. Durch Verwendung der Reaktanzmethode anstatt der klassischen Methode kann der Fehlerort genauer bestimmt und damit eine hohe Fehlerortsselektivität gewährleistet werden!

7. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend soll in diesem Kapitel die Arbeit nochmals allgemein zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten gegeben werden.

7.1. Allgemeine Zusammenfassung

Durch Analyse der klassischen Methode zur Fehlerortsbestimmung und deren Anwendung auf eine beidseitig gespeiste Leitung wurden deren Probleme und Schwächen identifiziert. Anschließend wurden die Fehlerortsformeln verschiedener Fehlerarten angeführt. Als verbesserte Methode zur Bestimmung des Fehlerorts wurde die Reaktanzmethode mit Separation des Fehlerwiderstandes vorgestellt. Durch Analyse dieser Methode und Herleitung der Fehlerortsformeln für verschiedene Fehlerarten konnten die Vorteile der Methode in der Theorie gezeigt werden. Um diese Verbesserung der Reaktanzmethode im Vergleich der klassischen Methode an einem Modell zeigen zu können, wurde ein geeignetes Modell entwickelt und dessen Parameter festgelegt. Das Modell wurde in MATLAB implementiert und der stationäre Fehlerzustand berechnet. Durch die Wahl verschiedener Szenarien wurde das Verhalten der Reaktanzmethode im Vergleich zur klassischen Methode untersucht und analysiert. Zur Prüfung der Reaktanzmethode auf Parametervariation wurden die Parameter m_{Cmp} , S''_{kA} und S''_{kB} variiert. Durch Analyse und Interpretation der Ergebnisse der simulierten Szenarien bzw. der Sensitivitätsanalysen konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Verwendung der Reaktanzmethode anstatt der klassischen Methode einige Vorteile bringt. Mit der Reaktanzmethode konnte der Fehlerort, bei Auftreten eines Fehlerwiderstandes von $R_F \neq 0 \Omega$, exakter ermittelt werden als mittels klassischer Methode. Bei Fehlern innerhalb der Zone 1 konnte gezeigt werden, dass die Reaktanzmethode unabhängig vom Lastfluss den Fehlerort

7. Zusammenfassung und Ausblick

immer exakt ermittelt! Vor allem konnte die benötigte hohe Genauigkeit am Zonenende der Zone 1 eingehalten werden. Bei Verwendung der Reaktanzmethode erweisen sich auch hohe Fehlerwiderstandswerte als weniger problematisch als bei Verwendung der klassischen Methode!

7.2. Ausblick und Erkenntnisse für die Zukunft

Wie aus den Ergebnissen der Simulation bzw. deren Interpretation und Diskussion ersichtlich ist, kann durch die Wahl der Kompensationsentfernung m_{Cmp} das Ergebnis der Fehlerentfernungsberechnung positiv beeinflusst werden. Bei der Analyse der Reaktanzmethode wurde bereits gezeigt, dass die Fehlerentfernung und der Fehlerwiderstand exakt berechnet werden kann, wenn die Kompensationsentfernung der Fehlerentfernung entspricht ($m_{Cmp} = m$). Dies konnte durch die Ergebnisse der simulierten Szenarien bestätigt werden.

Ein Ansatzpunkt zur zukünftigen möglichen Verbesserung der Reaktanzmethode stellt die Wahl der Kompensationsentfernung m_{Cmp} dar. Hier wäre folgendes Szenario denkbar. Tritt ein Fehler auf der zu schützenden Leitung auf, kann ausgehend von einem eingestellten Anfangswert $m_{Cmp,0}$ durch ein iteratives Verfahren eine Kompensationsentfernung ermittelt werden, welche der Fehlerentfernung entspricht ($m_{Cmp,n} = m$). Als mögliche weiterführende Arbeit könnte ein iteratives Verfahren entwickelt und an einem Modell untersucht werden. Hier sollte speziell die Konvergenz des entwickelten Verfahrens näher betrachtet werden. Mit Hilfe dieses iterativen Verfahrens könnte die Reaktanzmethode in Zukunft weiter verbessert werden.

Literatur

- [1] W. Gawlik, *Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Skriptum zur Vorlesung 370.028*. TU-Wien, 3. Okt. 2016.
- [2] G. Ziegler, *Digitaler Distanzschutz: Grundlagen und Anwendung*. 2. Auflage, Publicis Corporate Publishing, 2008, S. 392, ISBN: 978-3-89578-320-3.
- [3] M. Saha, J. Izykowski und E. Rosolowski, *Fault Location on Power Networks*. Springer-Verlag London, 2010, 425 S., ISBN: 978-1-84882-885-8.
- [4] M. Wurm, *Schutztechnik in elektrischen Netzen, Skriptum zur Vorlesung 370.045*. TU-Wien, 2. März 2019.
- [5] A. Hochrainer, *Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen*. Springer Berlin Heidelberg, 3. Okt. 2013, 380 S., ISBN: 3642502024.
- [6] C. Gererstorfer, S. Stukelj, G. Stix und W. Gawlik, »Schutz in Netzen mit leistungselektronischer Einspeisung – Betrachtungen zu Einflussgrößen auf die Distanzmessung von Distanzschutzgeräten«, Springer Vienna, 2016. DOI: 10.1007/s00502-016-0444-4.
- [7] C. Dzienis, Y. Yelgin, G. Steynberg und M. Claus, »Novel impedance determination method for phase-to-phase loops«, in *2014 Power Systems Computation Conference*, 2014, S. 1–7. DOI: 10.1109/PSCC.2014.7038393.
- [8] M. Washer, J. Maun, C. Dzienis, M. Kereit, Y. Yelgin und J. Blumschein, »Precise impedance based fault location algorithm with fault resistance separation«, in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, S. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232595.
- [9] C. Dzienis, Y. Yelgin, M. Washer und J. Maun, »Accurate impedance based fault location algorithm using communication between protective relays«, in *2015 Modern Electric Power Systems (MEPS)*, 2015, S. 1–6. DOI: 10.1109/MEPS.2015.7477178.

Literatur

- [10] J. Blumschein, C. Dzienis und Y. Yelgin, »New design of distance protection for smart grid applications«, in *13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, 2016, S. 1–8. DOI: 10.1049/cp.2016.0015.
- [11] P. Horton und S. Swain, »Using superimposed principles (Delta) in protection techniques in an increasingly challenging power network«, in *2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2017, S. 1–12. DOI: 10.1109/CPRE.2017.8090059.
- [12] A. Amberg und A. Rangel, »Tutorial on symmetrical Components, Part 2«, 2014.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Prinzipdarstellung eines Netzes mit einer von einem Distanzschutzgerät zu schützenden Leitung	2
2.1. Fehlerarten ([3], Fig: 3.1): a) 1-poliger Fehler, b) 2-poliger Kurzschluss, c) 2-poliger Fehler mit Erdberührung, d) 3-poliger Kurzschluss, e) 3-poliger Fehler mit Erdberührung	5
2.2. Schaltbild einer einseitig gespeisten fehlerbehafteten Leitung . .	6
2.3. Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 1-poligen Fehlers L1-E	7
2.4. Schaltungsausschnitt zur Orientierung des Erdstromes mit Fehler in der Leiter-Erde Schleife L1-E eines 3-phasigen Systems	8
2.5. Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung L2-L3	9
2.6. Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung L2-L3-E	10
2.7. Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten des 3-poligen Fehlers L1-L2-L3	11
2.8. Schaltbild einer zweiseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung .	11
2.9. Darstellung in der Impedanzebene: a) keine Abweichung der berechneten Reaktanz, die Fehlerentfernung ist exakt bestimmbar; b) untergreifendes Verhalten; c) übergreifendes Verhalten	13
3.1. Schaltbild einer zweiseitig gespeisten, fehlerbehafteten Leitung zur Herleitung der Reaktanzmethode	15
3.2. Ersatzschaltbild des 1-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten	18
3.3. Ersatzschaltbild des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung in Symmetrischen Komponenten	20

Abbildungsverzeichnis

3.4. Ersatzschaltbild des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung in Symmetrischen Komponenten	21
3.5. Ersatzschaltung des 3-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten	23
3.6. Ersatzschaltung des Vorf Fehler-Zustands des 3-poligen Fehlers in Symmetrischen Komponenten	23
3.7. Überlagertes Δ -System des 3-poligen Fehlers	23
4.1. Verwendetes Modell, bestehend aus zwei in Serie geschalteten Leitungen und zwei vermaschten, starr geerdeten Netzen.	26
4.2. Schematische Darstellung des Modells aus Abbildung 4.1 im Fehlerfall	27
4.3. Γ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit konzentrierten Leitungsparametern [1]: a) vollständiges Γ -Ersatzschaltbild; b) Ersatzschaltung mit vernachlässigten Parametern für Leitungen mit ohmsch-induktivem Verhalten	28
4.4. Ersatzschaltbild, der im Modell (Abbildung 4.1) verwendeten Leitungen L1 und L2, zur Berechnung des Übertragungswinkels δ_P	29
4.5. Diagramm zur Darstellung des Simulationsvorganges in MATLAB	33
4.6. Korrekturwinkel in Abhängigkeit der Kompensationsentfernung	36
5.1. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$	39
5.2. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	40
5.3. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	41
5.4. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	42
5.5. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	43
5.6. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	44
5.7. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	45
5.8. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$	47

Abbildungsverzeichnis

5.9. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$	48
5.10. Berechnete Fehlerentfernung des 1-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ ($m_{Cmp} = 1.9735$)	49
5.11. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW	51
5.12. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	52
5.13. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW	53
5.14. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	54
5.15. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW	55
5.16. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	56
5.17. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW	57
5.18. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$	58
5.19. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	60
5.20. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	61
5.21. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	62

Abbildungsverzeichnis

5.22. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	63
5.23. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	65
5.24. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	66
5.25. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	68
5.26. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$	69
5.27. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$	70
5.28. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$	71
5.29. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	72
5.30. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	73
5.31. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$	75
5.32. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	76
5.33. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	77
5.34. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	79

Abbildungsverzeichnis

5.35. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	80
5.36. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	82
5.37. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung und einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	83
5.38. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	85
5.39. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW	86
5.40. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	87
5.41. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW	88
5.42. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW	89
5.43. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW	90
5.44. Berechnete Fehlerentfernung des 3-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$	91
5.45. Berechnete Fehlerentfernung des 3-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	92
5.46. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$	93

Abbildungsverzeichnis

5.47. Berechnete Fehlerentfernung des 3-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	94
5.48. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$	95
5.49. Berechnete Fehlerentfernung des 2-poligen Fehlers mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	96
5.50. Abweichung der Fehlerentfernung bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$	97
5.51. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$	99
5.52. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	100
5.53. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$	101
5.54. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	102
5.55. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$	103
5.56. Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0, 8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$	104

Tabellenverzeichnis

4.1. Parameter des verwendeten Modells	27
A.1. Übertragungswinkel δ_P für verschiedene Leistungen $P_{A \rightarrow B}$	122

Anhang

Anhang A.

Parameter des Modells

A.1. Berechnete Parameter des Modells

Leitung L1 bzw. L2:

$$\underline{Z}_{L1} = 50\text{km} \cdot (0,1\Omega/\text{km} + j0,4\Omega/\text{km}) = 5 + j20 \Omega$$

$$R_{L1}^{(0)} = R_{L2}^{(0)} = 8 \cdot R_{L1}^{(1)} = 40 \Omega$$

$$X_{L1}^{(0)} = X_{L2}^{(0)} = 6 \cdot X_{L1}^{(1)} = 120 \Omega$$

Netz A:

$$|\underline{Z}_{NA}| = \sqrt{R_{NA}^2 + X_{NA}^2} = c_{NA} \cdot \frac{U_{NA}^2}{S_{KA}^{(1)}} = 24,2 \Omega$$

$$R_{NA} = R_{NA}^{(1)} = R_{NA}^{(2)} = \frac{|\underline{Z}_{NA}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_{NA}}{R_{NA}}\right)^2}} = 2,408 \Omega$$

$$X_{NA} = X_{NA}^{(1)} = X_{NA}^{(2)} = \frac{R_{NA}}{0,1} = 24,08 \Omega$$

$$R_{NA}^{(0)} = 4 \cdot R_{NA}^{(1)} = 9,63 \Omega$$

$$X_{NA}^{(0)} = 3 \cdot X_{NA}^{(1)} = 72,24 \Omega$$

Netz B:

$$|\underline{Z}_{NB}| = \sqrt{R_{NB}^2 + X_{NB}^2} = c_{NB} \cdot \frac{U_{NB}^2}{S_{KB}^{(1)}} = 4,033 \Omega$$

$$R_{NB} = R_{NB}^{(1)} = R_{NB}^{(2)} = \frac{|\underline{Z}_{NB}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_{NB}}{R_{NB}}\right)^2}} = 0,4013 \Omega$$

$$X_{NB} = X_{NB}^{(1)} = X_{NB}^{(2)} = \frac{R_{NB}}{0,1} = 4,013 \Omega$$

$$R_{NB}^{(0)} = 4 \cdot R_{NB}^{(1)} = 1,605 \Omega$$

$$X_{NB}^{(0)} = 3 \cdot X_{NB}^{(1)} = 12,04 \Omega$$

A.2. Berechnete Werte des Übertragungswinkels

Anhand der Gleichung 4.4 berechnete Werte des Übertragungswinkels δ_P :

Tabelle A.1.: Übertragungswinkel δ_P für verschiedene Leistungen $P_{A \rightarrow B}$

$P_{A \rightarrow B}$ in MW	δ_P
-50	-10,35°
0	0°
50	10,35°
100	21,65°
150	34,88°

A.3. Berechnung des komplexen Erdfaktors

Komplexer Erdfaktor der Leitung L1 bzw. L2 (vgl. [4], Glg. 2.19):

$$\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{\underline{Z}_{L1}^{(1)}} - 1 \right) = 1,7059 - j0,1569 \quad (\text{A.1})$$

Anhang B.

Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

B.1. Berechnung der Spannungs- und Stromwerte im Fehlerzustand

Berechnungen der Spannungen $\underline{U}_{A,L1-E}$, $\underline{U}_{A,L2-E}$ und $\underline{U}_{A,L3-E}$ und Ströme $\underline{I}_{A,L1}$, $\underline{I}_{A,L2}$ und $\underline{I}_{A,L3}$ (entspricht der dem Distanzschutzgerät zugeführten Daten).

B.1.1. 1-poliger Erdschluss

Es wird ein einpoliger Erdschluss mit der Fehlerschleife L1-E angenommen. Für die Fehlerschleifen L2-E bzw. L3-E muss der jeweilige Drehoperator berücksichtigt werden! Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

$$\underline{I}^{(0)} = \underline{I}^{(1)} = \underline{I}^{(2)} = \frac{\underline{I}_F}{3} \quad (\text{B.1})$$

$$\underline{Z}_G^{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}) \cdot ((1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)})}{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + \underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} \quad (\text{B.2})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{Z}_G^{(2)} = \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)})}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} \quad (\text{B.3})$$

Superposition: $\underline{U}_{NB}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_{A|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \frac{((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}) \cdot (3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)})}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + 3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)}}} \quad (\text{B.4})$$

Superposition: $\underline{U}_{NA}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_{B|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}) \cdot (3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)})}{m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{NA}^{(1)} + 3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)}}} \quad (\text{B.5})$$

$$\underline{I}_{A|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} = -\frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_{BB}^{(1)} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}} \quad (\text{B.6})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{A|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} + \underline{I}_{A|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \quad (\text{B.7})$$

$$\underline{I}_{|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(0)} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_{A|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} \cdot (m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{NA}^{(1)})}{3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)}} \quad (\text{B.8})$$

$$\underline{I}_{|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(0)} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_{B|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{3R_F + \underline{Z}_G^{(0)} + \underline{Z}_G^{(2)}} \quad (\text{B.9})$$

$$\underline{I}^{(0)} = \underline{I}^{(1)} = \underline{I}^{(2)} = \underline{I}_{|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(0)} + \underline{I}_{|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(0)} \quad (\text{B.10})$$

$$\underline{I}_A^{(0)} = \underline{I}^{(0)} \frac{\underline{Z}_G^{(0)}}{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}} \quad (\text{B.11})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_A^{(2)} = \underline{I}^{(2)} \frac{\underline{Z}_G^{(2)}}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}} \quad (\text{B.12})$$

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(1)} \quad (\text{B.13})$$

$$\underline{U}_A^{(2)} = -\underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(2)} \quad (\text{B.14})$$

$$\underline{U}_A^{(0)} = -\underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(0)} \quad (\text{B.15})$$

$$\underline{U}_{A,Lx-E} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{U}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.16})$$

$$\underline{I}_{A,Lx} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{I}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.17})$$

B.1.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung

Es wird ein zweipoliger Kurzschluss mit der Fehlerschleife L2-L3 angenommen. Für die Fehlerschleifen L1-L2 bzw. L3-L1 muss der jeweilige Drehoperator berücksichtigt werden! Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

$$\underline{Z}_G^{(2)} = \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)})}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} \quad (\text{B.18})$$

Superposition: $\underline{U}_{NB}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \frac{((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}) \cdot (\underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F)}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + \underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F}} \quad (\text{B.19})$$

Superposition: $\underline{U}_{NA}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_B^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}) \cdot (\underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F)}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F}} \quad (\text{B.20})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} = - \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_{B|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}} \quad (\text{B.21})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} + \underline{I}_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \quad (\text{B.22})$$

$$\underline{I}_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_{A|\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} \cdot (\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)})}{\underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F} \quad (\text{B.23})$$

$$\underline{I}_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_{B|\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{\underline{Z}_G^{(2)} + 2 \cdot R_F} \quad (\text{B.24})$$

$$\underline{I}^{(1)} = \underline{I}_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}^{(1)} + \underline{I}_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}^{(1)} \quad (\text{B.25})$$

$$\underline{I}_A^{(2)} = -\underline{I}^{(1)} \cdot \frac{\underline{Z}_G^{(2)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}} \quad (\text{B.26})$$

$$\underline{I}_A^{(0)} = 0 \text{ und } \underline{U}_A^{(0)} = 0 \quad (\text{B.27})$$

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(1)} \quad (\text{B.28})$$

$$\underline{U}_A^{(2)} = -\underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(2)} \quad (\text{B.29})$$

$$\underline{U}_{A,Lx-E} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{U}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.30})$$

$$\underline{I}_{A,Lx} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{I}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.31})$$

B.1.3. 2-poliger Erdschluss

Da R_{F0} nur signifikant wird, wenn R_F pro Phase unterschiedlich ist, bzw. die pro Phase gemessene Impedanz $m\underline{Z}_{L1}$ unterschiedlich ist, wird dieser hier vernachlässigt. Daraus folgt $R_{F0} = 0\Omega$ (vgl. [12]).

Es wird ein zweipoliger Erdschluss mit der Fehlerschleife L2-L3-E angenommen. Für die Fehlerschleifen L1-L2-E bzw. L3-L1-E muss der jeweilige Drehoperator berücksichtigt werden! Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

$$\underline{Z}_G^{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)})}{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + \underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} \quad (\text{B.32})$$

$$\underline{Z}_G^{(2)} = \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)})}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} \quad (\text{B.33})$$

Superposition: $\underline{U}_{NB}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \frac{\left(R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} \right) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} + (1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}}} \quad (\text{B.34})$$

Superposition: $\underline{U}_{NA}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_B^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + \frac{\left(R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} \right) \cdot (\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)})}{R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} + \underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}}} \quad (\text{B.35})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} = - \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_B^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}} \quad (\text{B.36})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} + \underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} \quad (\text{B.37})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} \cdot (\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)})}{R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}}} \quad (\text{B.38})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_B^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} \cdot (\underline{Z}_{NB}^{(1)} + (1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)})}{R_F + \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}}} \quad (\text{B.39})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} + \underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} \quad (\text{B.40})$$

$$\underline{I}_A^{(2)} = -\underline{I}_A^{(1)} \cdot \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} \cdot \frac{1}{R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} \quad (\text{B.41})$$

$$\underline{I}_A^{(0)} = -\underline{I}_A^{(1)} \cdot \frac{(R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)}) \cdot (R_F + \underline{Z}_G^{(2)})}{R_F + 3R_{F0} + \underline{Z}_G^{(0)} + R_F + \underline{Z}_G^{(2)}} \cdot \frac{1}{R_F + \underline{Z}_G^{(0)}} \quad (\text{B.42})$$

$$\underline{I}_A^{(2)} = \underline{I}_A^{(2)} \cdot \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)})}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}} \quad (\text{B.43})$$

$$\underline{I}_A^{(0)} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}) \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)})}{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + \underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}} \quad (\text{B.44})$$

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(1)} \quad (\text{B.45})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{U}_A^{(2)} = -\underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(2)} \quad (\text{B.46})$$

$$\underline{U}_A^{(0)} = -\underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(0)} \quad (\text{B.47})$$

$$\underline{U}_{A,Lx-E} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{U}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.48})$$

$$\underline{I}_{A,Lx} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{I}_A^{(k)}, \text{ mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.49})$$

B.1.4. 3-poliger Fehler

Die Ersatzschaltbilder sind in Abbildung 3.5, 3.6 und 3.7 dargestellt.

Vorfehlergrößen:

$$-\underline{U}_{NA}^{(1)} + \underline{I}_{A,\text{Vor-Fehler}}^{(1)} \cdot (\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + (1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}) + \underline{U}_{NB}^{(1)} = 0 \quad (\text{B.50})$$

$$\underline{I}_{A,\text{Vor-Fehler}}^{(1)} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{U}_{NB}^{(1)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + \underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}} \quad (\text{B.51})$$

$$\underline{I}^{(0)} = \underline{I}^{(2)} = \underline{I}_A^{(0)} = \underline{I}_A^{(2)} = 0 \quad (\text{B.52})$$

$$\underline{U}_A^{(0)} = \underline{U}_A^{(2)} = 0 \quad (\text{B.53})$$

Superposition: $\underline{U}_{NB}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_A^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NA}^{(1)}}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \frac{((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}) \cdot R_F}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + R_F}} \quad (\text{B.54})$$

Superposition: $\underline{U}_{NA}^{(1)} = 0$

$$\underline{I}_B^{(1)} \Big|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0} = \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)} + \frac{(\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}) \cdot R_F}{m\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{NA}^{(1)} + R_F}} \quad (\text{B.55})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_{A|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}}^{(1)} = - \frac{\underline{U}_{NB}^{(1)} - \underline{I}_{B|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}}^{(1)} \cdot ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)})}{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}} \quad (\text{B.56})$$

$$\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{A|_{\underline{U}_{NB}^{(1)}=0}}^{(1)} + \underline{I}_{A|_{\underline{U}_{NA}^{(1)}=0}}^{(1)} \quad (\text{B.57})$$

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{U}_{NA}^{(1)} - \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_{NA}^{(1)} \quad (\text{B.58})$$

da das Nullsystem und Gegensystem Null sind, gilt:

$$\underline{I}_A^{(0)} = \underline{I}_A^{(2)} = 0 \quad \text{und} \quad \underline{U}_A^{(0)} = \underline{U}_A^{(2)} = 0 \quad (\text{B.59})$$

$$\underline{U}_{A,Lx-E} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{U}_A^{(k)}, \quad \text{mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.60})$$

$$\underline{I}_{A,Lx} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{I}_A^{(k)}, \quad \text{mit } x = 1, 2, 3 \text{ und } k = 0, 1, 2 \quad (\text{B.61})$$

B.2. Entwicklung der Klassischen Methode

Zur Konstruktion der Ersatzschaltbilder bzw. der Herleitung der Fehlerortsformeln wird das System der Symmetrischen Komponenten verwendet (siehe [5]).

Symmetrierungsmatrix \underline{S} bzw. Entsymmetrierungsmatrix \underline{T} :

$$\underline{S} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix}, \quad \underline{T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.62})$$

Am Einbauort A des Schutzgeräts für jede Fehlerart gültige Gleichungen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A^{(0)} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{U}_F^{(0)} \\ \underline{U}_A^{(1)} &= \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(1)} \\ \underline{U}_A^{(2)} &= \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(2)} \end{aligned} \quad (\text{B.63})$$

B.2.1. 1-poliger Erdschluss

Annahme: Fehler L1-E

Addiert man alle 3 Gleichungen aus (B.63) folgt:

$$\underline{U}_A^{(0)} + \underline{U}_A^{(1)} + \underline{U}_A^{(2)} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{U}_F^{(0)} + \underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} \quad (\text{B.64})$$

wobei $\underline{U}_A^{(0)} + \underline{U}_A^{(1)} + \underline{U}_A^{(2)} = \underline{U}_{A,L1-E}$ und $\underline{U}_F^{(0)} + \underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} = 0$ (bei der Annahme dass $R_F = 0$).

Mit $\underline{Z}_F^{(1)} = \underline{Z}_F^{(2)}$ ergibt sich

$$\underline{U}_{A,L1-E} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{Z}_F^{(1)} \cdot (\underline{I}_A^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)}) \quad (\text{B.65})$$

durch Einführung des komplexen Erdfaktors A.3 folgt:

$$\underline{U}_{A,L1-E} = (\underline{I}_A^{(0)} \cdot (1 + 3\underline{k}_0) + \underline{I}_A^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)}) \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \quad (\text{B.66})$$

mit $\underline{I}_A^{(0)} + \underline{I}_A^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)} = \underline{I}_{A,L1}$

$$\underline{U}_{A,L1-E} = \underline{I}_{A,L1} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + 3\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \quad (\text{B.67})$$

Der Faktor $3\underline{I}_A^{(0)}$ kann durch den sog. Summenstrom $-\underline{I}_{A,E}$ ersetzt werden (Orientierung: siehe 2.4).

$$\underline{U}_{A,L1-E} = (\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E}) \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \quad (\text{B.68})$$

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L1-E}}{\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E}} \quad (\text{B.69})$$

$$m = \frac{\Im\{ \underline{Z}_F^{(1)} \}}{\Im\{ \underline{Z}_{L1}^{(1)} \}} \quad (\text{B.70})$$

B.2.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung

Annahme: Fehler L2-L3

Für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung gilt:

$$\underline{I}_A^{(0)} = 0 \text{ und } \underline{I}_A^{(2)} = -\underline{I}_A^{(1)} \quad (\text{B.71})$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A,L1} &= 0 \\ \underline{I}_{A,L2} &= \underline{I}_A^{(1)} \cdot (a^2 - a) \\ \underline{I}_{A,L3} &= -\underline{I}_{A,L2} \end{aligned} \quad (\text{B.72})$$

daraus, und mit $\underline{Z}_F^{(1)} = \underline{Z}_F^{(2)}$ folgt aus Gleichung (B.63):

$$\begin{aligned} \underline{U}_A^{(0)} &= 0 \\ \underline{U}_A^{(1)} &= 2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \\ \underline{U}_A^{(2)} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{B.73})$$

durch Transformation der Komponentengrößen zu Leitungsgrößen folgt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A,L1-E} &= 2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \\ \underline{U}_{A,L2-E} &= a^2 \cdot 2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \\ \underline{U}_{A,L3-E} &= a \cdot 2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \end{aligned} \quad (\text{B.74})$$

$$\underline{U}_{A,L2-L3} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \cdot (a^2 - a) = 2 \cdot \underline{I}_{A,L2} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \quad (\text{B.75})$$

mit $\underline{I}_{A,L2-L3} = 2 \cdot \underline{I}_{A,L2}$ folgt:

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L2-L3}}{\underline{I}_{A,L2-L3}} \quad (\text{B.76})$$

$$m = \frac{\Im\{\underline{Z}_F^{(1)}\}}{\Im\{\underline{Z}_{L1}^{(1)}\}} \quad (\text{B.77})$$

B.2.3. 2-poliger Erdschluss

Annahme: Fehler L2-L3-E

Für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung gilt:

$$\underline{I}_A^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)} + \underline{I}_A^{(0)} = 0 \quad (\text{B.78})$$

weilers gilt:

$$\underline{U}_F^{(0)} = \underline{U}_F^{(1)} = \underline{U}_F^{(2)} = \underline{U}_F \quad (\text{B.79})$$

somit lassen sich die Gleichungen (B.63) schreiben als

$$\begin{aligned} \underline{U}_A^{(0)} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{U}_F \\ \underline{U}_A^{(1)} &= \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{U}_F \\ \underline{U}_A^{(2)} &= \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{U}_F \end{aligned} \quad (\text{B.80})$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A,L1-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{U}_F + \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{U}_F + \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{U}_F \\ \underline{U}_{A,L2-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{U}_F + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_F + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_F \\ \underline{U}_{A,L3-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{U}_F + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_F + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_F \end{aligned} \quad (\text{B.81})$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A,L1-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + 3 \cdot \underline{U}_F \\ \underline{U}_{A,L2-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_F \\ \underline{U}_{A,L3-E} &= \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot \underline{Z}_F^{(2)} + (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_F \end{aligned} \quad (\text{B.82})$$

Durch Subtraktion der letzten beiden Gleichungen und einsetzen von $\underline{Z}_{L1}^{(2)} = \underline{Z}_{L1}^{(1)}$ folgt:

$$\underline{U}_{A,L2-L3} = \underline{Z}_F^{(1)} \cdot (\underline{I}_A^{(1)} - \underline{I}_A^{(2)}) \cdot (\underline{a}^2 - \underline{a}) \quad (\text{B.83})$$

für die drei Phasenströme $\underline{I}_{A,L1}$, $\underline{I}_{A,L2}$ und $\underline{I}_{A,L3}$ ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A,L1} &= 0 \\ \underline{I}_{A,L2} &= \underline{I}_A^{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(2)} \\ \underline{I}_{A,L3} &= \underline{I}_A^{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_A^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \end{aligned} \quad (\text{B.84})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_{A,L2-L3} = (\underline{I}_A^{(1)} - \underline{I}_A^{(2)}) \cdot (\underline{a}^2 - \underline{a}) \quad (\text{B.85})$$

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L2-L3}}{\underline{I}_{A,L2-L3}} \quad (\text{B.86})$$

$$m = \frac{\Im\{\underline{Z}_F^{(1)}\}}{\Im\{\underline{Z}_{L1}^{(1)}\}} \quad (\text{B.87})$$

B.2.4. 3-poliger Fehler

Fehler L1-L2-L3

Am Fehlerort gilt für die drei Phasenströme \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} , \underline{I}_{L3} :

$$\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 0 \rightarrow \underline{I}^{(0)} = 0 \quad (\text{B.88})$$

Da das Gegensystem Null ist, gilt ebenso $\underline{I}^{(2)} = 0$.

Addiert man die drei Gleichungen aus (B.63) und berücksichtigt $\underline{Z}_{L1}^{(2)} = \underline{Z}_{L1}^{(1)}$ folgt:

$$\underline{U}_A^{(0)} + \underline{U}_A^{(1)} + \underline{U}_A^{(2)} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot \underline{Z}_F^{(0)} + (\underline{I}_A^{(1)} + \underline{I}_A^{(2)}) \cdot \underline{Z}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(0)} + \underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} \quad (\text{B.89})$$

Unter der Annahme dass $R_F = 0$ gilt: $\underline{U}_F^{(0)} + \underline{U}_F^{(1)} + \underline{U}_F^{(2)} = 0$.

$$\underline{U}_{A,L1-E} = \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} = \underline{I}_{A,L1} \cdot \underline{Z}_F^{(1)} \quad (\text{B.90})$$

$$\underline{Z}_F^{(1)} = \frac{\underline{U}_{A,L1-E}}{\underline{I}_{A,L1}} = \frac{\underline{U}_{A,Lx-E}}{\underline{I}_{A,Lx}} \text{ mit } x = 1, 2 \text{ oder } 3 \quad (\text{B.91})$$

$$m = \frac{\Im\{\underline{Z}_F^{(1)}\}}{\Im\{\underline{Z}_{L1}^{(1)}\}} \quad (\text{B.92})$$

B.3. Entwicklung der Reaktanzmethode

B.3.1. 1-poliger Erdschluss

Berechnung von R_F und X_F :

$$\underline{U}_{A,Ph} = \underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \quad (B.93)$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*$ rein reell.

$$\Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} = \Im\{\underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} \quad (B.94)$$

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ bzw. $X_F = |\underline{Z}_F| \cdot \sin(\varphi)$ folgt

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (B.95)$$

für den 1-poligen Fehler L1-E folgt:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_{A,L1-E} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot (\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E}) \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (B.96)$$

Für die Berechnung von R_F geht man wieder von folgender Gleichung aus:

$$\underline{U}_{A,Ph} = \underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot \underline{Z}_F^* \quad (B.97)$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_{A,Ph} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot \underline{Z}_F^*$ rein reell.

$$\Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot \underline{Z}_F^*\} = \Im\{\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot \underline{Z}_F^*\} \quad (B.98)$$

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ folgt

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_{A,Ph} \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_F \cdot \underline{I}_{A,Ph}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (B.99)$$

für den 1-poligen Fehler L1-E folgt:

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_{A,L1-E} \cdot (\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E})^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot (\underline{I}_{A,L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{A,E})^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (B.100)$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

Berechnung von $\underline{I}_{A,Cmp}$ und $\underline{\delta}_{A,Cmp}$:

$$(\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}) \cdot \underline{I}_A^{(0)} = ((1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}) \cdot \underline{I}_B^{(0)} \quad (\text{B.101})$$

umformen zu:

$$\underline{I}_B^{(0)} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} \quad (\text{B.102})$$

weilers gilt:

$$\frac{\underline{I}_F}{3} = \underline{I}_A^{(0)} + \underline{I}_B^{(0)} \quad (\text{B.103})$$

und

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} = 3 \cdot \underline{I}_A^{(0)} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \right) \quad (\text{B.104})$$

$$\underline{I}_{A,Cmp} = 3 \cdot \underline{I}_A^{(0)} \quad (\text{B.105})$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m\underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m)\underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \quad (\text{B.106})$$

wobei $m = m_{Cmp}$.

B.3.2. 2-poliger Fehler ohne Erdberührung

Berechnung von R_F und X_F :

$$\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} = \underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \quad (\text{B.107})$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*$ rein reell.

$$\Im\{\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} = \Im\{\underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} \quad (\text{B.108})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ bzw. $X_F = |\underline{Z}_F| \cdot \sin(\varphi)$ folgt

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (\text{B.109})$$

für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung L2-L3 folgt:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_{A,L2-L3} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,L2-L3} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (\text{B.110})$$

Für die Berechnung von R_F geht man wieder von folgender Gleichung aus:

$$\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} = \underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot \underline{Z}_F^* \quad (\text{B.111})$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot \underline{Z}_F^*$ rein reell.

$$\Im\{\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot \underline{Z}_F^*\} = \Im\{\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot \underline{Z}_F^*\} \quad (\text{B.112})$$

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ folgt

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_{A,Ph1-Ph2} \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_F \cdot \underline{I}_{A,Ph1-Ph2}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (\text{B.113})$$

für den 2-poligen Fehler ohne Erdberührung L2-L3 folgt:

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_{A,L2-L3} \cdot \underline{I}_{A,L2-L3}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot \underline{I}_{A,L2-L3}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (\text{B.114})$$

Berechnung von $\underline{I}_{A,Cmp}$ und $\underline{\delta}_{A,Cmp}$:

Da das Nullsystem Null ist, kann nur das Gegensystem für die Berechnung herangezogen werden.

Der Fehlerstrom \underline{I}_F über den Fehlerwiderstand R_F entspricht $\underline{I}_F = \underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L3}$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L2} &= \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}^{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{a} \cdot \underline{I}^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^{(2)} \end{aligned} \quad (\text{B.115})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$(\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}) \cdot \underline{I}_A^{(2)} = ((1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}) \cdot \underline{I}_B^{(2)} \quad (\text{B.116})$$

$$\underline{I}^{(1)} = -\underline{I}^{(2)} = -(\underline{I}_A^{(2)} + \underline{I}_B^{(2)}) = -\underline{I}_A^{(2)} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \right) \quad (\text{B.117})$$

weilers gilt:

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L3} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}^{(2)} - (\underline{a} \cdot \underline{I}^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}^{(2)}) \quad (\text{B.118})$$

$$\underline{I}_F = 2 \cdot \underline{I}^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) = 2 \cdot (\underline{I}_A^{(2)} + \underline{I}_B^{(2)}) \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (\text{B.119})$$

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \right) \quad (\text{B.120})$$

$$\underline{I}_{A,Cmp} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (\text{B.121})$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m\underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \quad (\text{B.122})$$

wobei $m = m_{Cmp}$.

B.3.3. 2-poliger Fehler mit Erdberührung

Die Berechnung/Herleitung von R_F und X_F ist identisch mit der des 2-poligen Fehlers ohne Erdberührung (Kapitel B.3.2).

Für den 2-poligen Fehler mit Erdberührung L2-L3-E folgt:

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im m \{ \underline{U}_{A,L2-L3} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}}{\Im m \{ e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{A,L2-L3} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \}} \quad (\text{B.123})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

und

$$R_F = \frac{\Im\{U_{A,L2-L3} \cdot I_{A,L2-L3}^* \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{I_{A,Cmp} \cdot \delta_{A,Cmp} \cdot I_{A,L2-L3}^* \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (\text{B.124})$$

Berechnung von $I_{A,Cmp}$ und $\delta_{A,Cmp}$:

$$I^{(1)} = -I^{(2)} - I^{(0)} \quad (\text{B.125})$$

weilers gilt:

$$I^{(2)} = I_A^{(2)} + I_B^{(2)} \quad \text{und} \quad I^{(0)} = I_A^{(0)} + I_B^{(0)} \quad (\text{B.126})$$

$$(Z_{NA}^{(2)} + mZ_{L1}^{(2)}) \cdot I_A^{(2)} = ((1-m)Z_{L1}^{(2)} + Z_{L2}^{(2)} + Z_{NB}^{(2)}) \cdot I_B^{(2)} \quad (\text{B.127})$$

daraus folgt:

$$I^{(2)} = I_A^{(2)} \cdot \left(\frac{Z_{NA}^{(2)} + mZ_{L1}^{(2)}}{(1-m)Z_{L1}^{(2)} + Z_{L2}^{(2)} + Z_{NB}^{(2)}} + 1 \right) \quad (\text{B.128})$$

bzw. für das Nullsystem:

$$(Z_{NA}^{(0)} + mZ_{L1}^{(0)}) \cdot I_A^{(0)} = ((1-m)Z_{L1}^{(0)} + Z_{L2}^{(0)} + Z_{NB}^{(0)}) \cdot I_B^{(0)} \quad (\text{B.129})$$

und

$$I^{(0)} = I_A^{(0)} \cdot \left(\frac{Z_{NA}^{(0)} + mZ_{L1}^{(0)}}{(1-m)Z_{L1}^{(0)} + Z_{L2}^{(0)} + Z_{NB}^{(0)}} + 1 \right) \quad (\text{B.130})$$

$$\begin{aligned} I_{F,L2} &= I^{(0)} + \underline{a}^2 \cdot I^{(1)} + \underline{a} \cdot I^{(2)} \\ I_{F,L3} &= I^{(0)} + \underline{a} \cdot I^{(1)} + \underline{a}^2 \cdot I^{(2)} \end{aligned} \quad (\text{B.131})$$

Der Fehlerstrom I_F an der Fehlerstelle, der über den Fehlerwiderstand R_F fließt, entspricht:

$$I_F = I_{F,L2} - I_{F,L3} = 2 \cdot I^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) + I^{(0)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (\text{B.132})$$

$$\begin{aligned} I_F &= 2 \cdot I_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \left(\frac{Z_{NA}^{(2)} + mZ_{L1}^{(2)}}{(1-m)Z_{L1}^{(2)} + Z_{L2}^{(2)} + Z_{NB}^{(2)}} + 1 \right) \\ &+ I_A^{(0)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \left(\frac{Z_{NA}^{(0)} + mZ_{L1}^{(0)}}{(1-m)Z_{L1}^{(0)} + Z_{L2}^{(0)} + Z_{NB}^{(0)}} + 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{B.133})$$

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} = \underline{I}_{A,Cmp,2} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp,2} + \underline{I}_{A,Cmp,0} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp,0} \quad (\text{B.134})$$

$$\underline{I}_{A,Cmp,2} = 2 \cdot \underline{I}_A^{(2)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad \text{und} \quad \underline{I}_{A,Cmp,0} = \underline{I}_A^{(0)} \cdot (\underline{a} - \underline{a}^2) \quad (\text{B.135})$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp,2} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(2)} + m \underline{Z}_{L1}^{(2)}}{(1-m) \underline{Z}_{L1}^{(2)} + \underline{Z}_{L2}^{(2)} + \underline{Z}_{NB}^{(2)}} + 1 \quad (\text{B.136})$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp,0} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(0)} + m \underline{Z}_{L1}^{(0)}}{(1-m) \underline{Z}_{L1}^{(0)} + \underline{Z}_{L2}^{(0)} + \underline{Z}_{NB}^{(0)}} + 1 \quad (\text{B.137})$$

wobei $m = m_{Cmp}$.

B.3.4. 3-poliger Fehler

Ausgehend vom Ersatzschaltbild in Symmetrischen Komponenten kann folgende Maschengleichung aufgestellt werden:

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^* \quad (\text{B.138})$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*$ rein reell.

$$\Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} = \Im\{\underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\} \quad (\text{B.139})$$

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ bzw. $X_F = |\underline{Z}_F| \cdot \sin(\varphi)$ folgt

$$X_F = \frac{\sin(\varphi) \cdot \Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}}{\Im\{e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_{A,Cmp}^* \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}^*\}} \quad (\text{B.140})$$

Für die Berechnung von R_F geht man wieder von folgender Gleichung aus:

$$\underline{U}_A^{(1)} = \underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F + \underline{I}_F \cdot R_F \quad | \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot \underline{Z}_F^* \quad (\text{B.141})$$

Dadurch wird der Term $\underline{I}_A^{(1)} \cdot \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot \underline{Z}_F^*$ rein reell.

Anhang B. Detaillierte Berechnungen und Herleitungen

$$\Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot \underline{Z}_F^*\} = \Im\{\underline{I}_F \cdot R_F \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot \underline{Z}_F^*\} \quad (\text{B.142})$$

mit $\underline{Z}_F = |\underline{Z}_F| \cdot e^{j\varphi}$ und $\underline{I}_F = \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp}$ folgt:

$$R_F = \frac{\Im\{\underline{U}_A^{(1)} \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot e^{-j\varphi}\}}{\Im\{\underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} \cdot \underline{I}_A^{(1)*} \cdot e^{-j\varphi}\}} \quad (\text{B.143})$$

Berechnung von $\underline{I}_{A,Cmp}$ und $\underline{\delta}_{A,Cmp}$:

Da das Nullsystem und Gegensystem Null ist, müssen für die Berechnung die Vor-Fehler- und Fehlergrößen herangezogen werden.

Der Fehlerstrom \underline{I}_F über den Fehlerwiderstand R_F entspricht $\underline{I}_F = \Delta\underline{I}_A^{(1)} - \Delta\underline{I}_B^{(1)}$ wobei sich die Delta-Größen $\Delta\underline{I}_A^{(1)}$ bzw. $\underline{I}_B^{(1)}$ mit $\underline{I}_{Fehler} - \underline{I}_{Vor-Fehler}$ berechnen lassen.

$$(\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}) \cdot \Delta\underline{I}_A^{(1)} = ((1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}) \cdot \Delta\underline{I}_B^{(1)} \quad (\text{B.144})$$

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{A,Cmp} \cdot \underline{\delta}_{A,Cmp} = \Delta\underline{I}_A^{(1)} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}}{(1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}} + 1 \right) \quad (\text{B.145})$$

$$\underline{I}_{A,Cmp} = \Delta\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{A,Fehler} - \underline{I}_{A,Vor-Fehler} \quad (\text{B.146})$$

$$\underline{\delta}_{A,Cmp} = \frac{\underline{Z}_{NA}^{(1)} + m\underline{Z}_{L1}^{(1)}}{(1 - m)\underline{Z}_{L1}^{(1)} + \underline{Z}_{L2}^{(1)} + \underline{Z}_{NB}^{(1)}} + 1 \quad (\text{B.147})$$

wobei $m = m_{Cmp}$.

Anhang C.

Diagramme

Ergebnisse des 1-poligen Fehlers

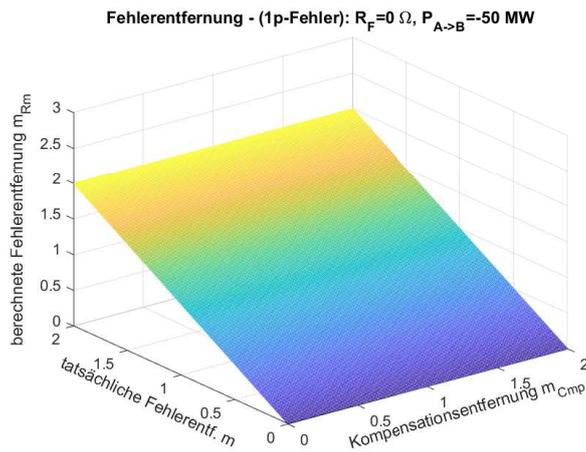


Abbildung C.1.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

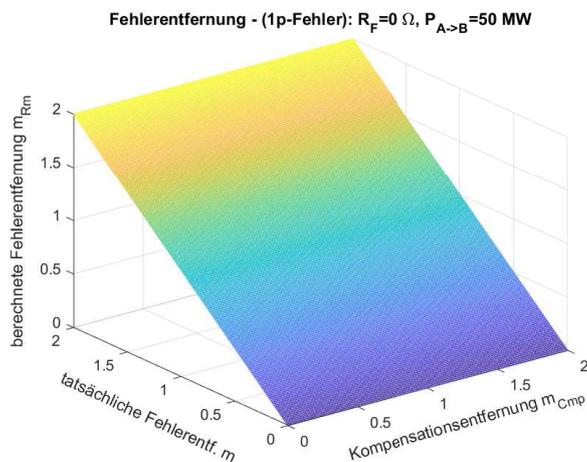


Abbildung C.2.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

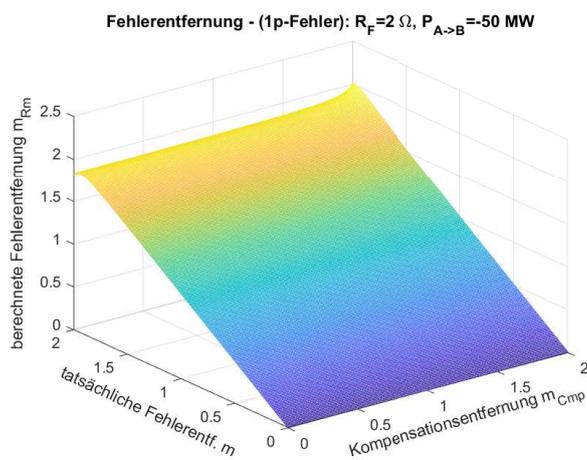


Abbildung C.3.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

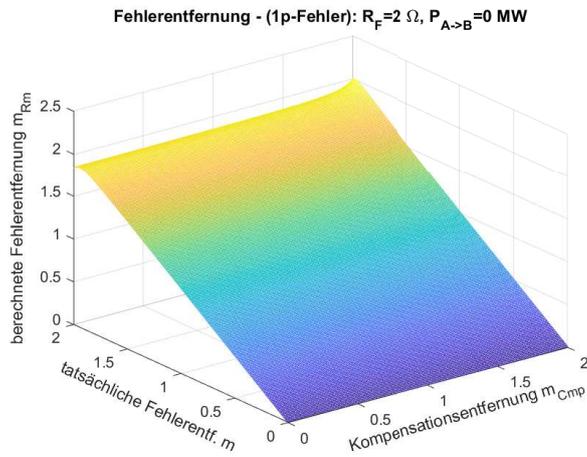


Abbildung C.4.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

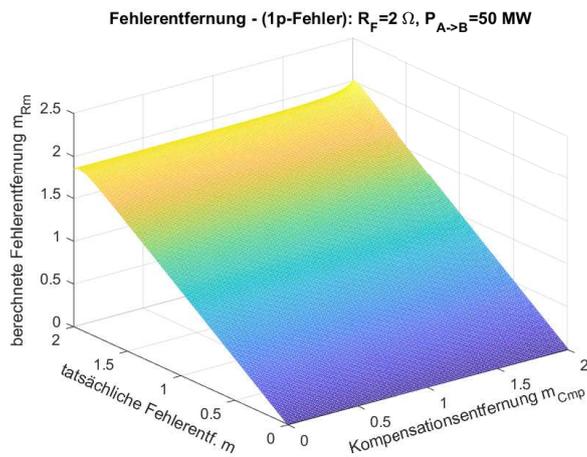


Abbildung C.5.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

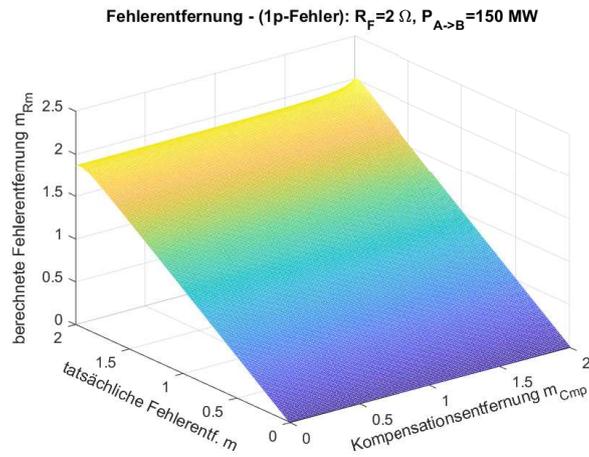


Abbildung C.6.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

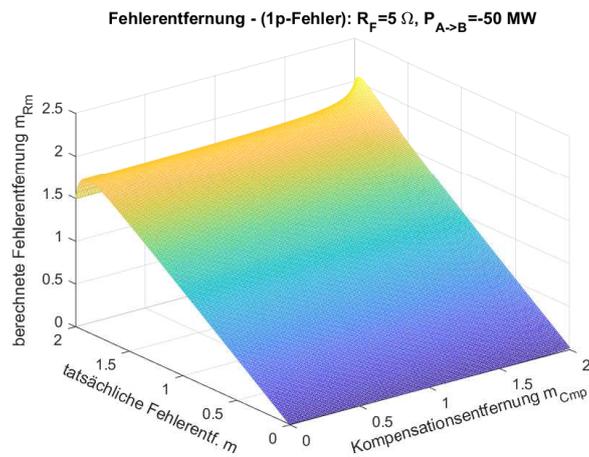


Abbildung C.7.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

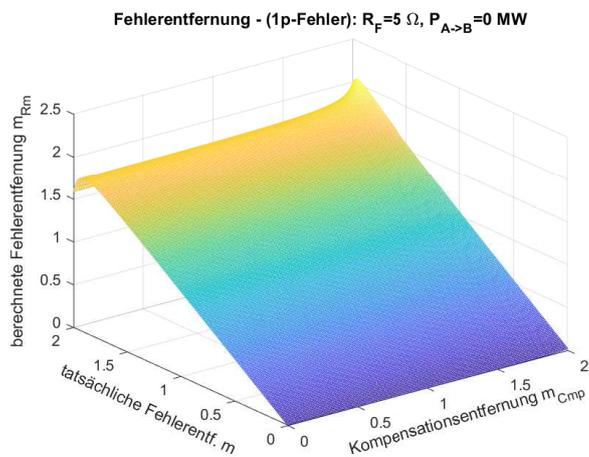


Abbildung C.8.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

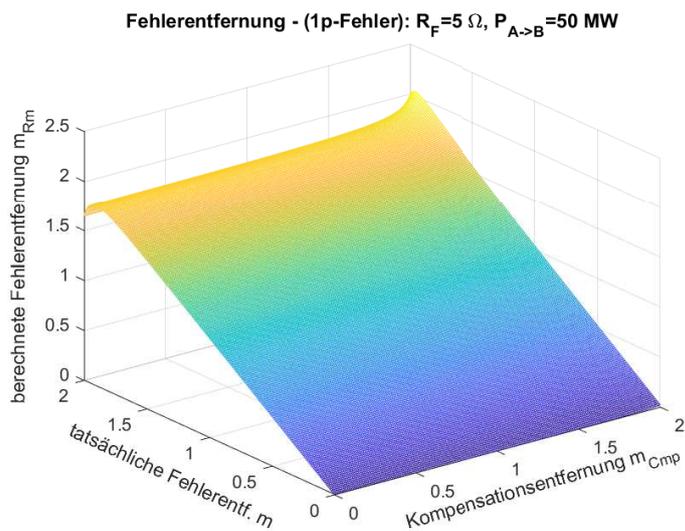


Abbildung C.9.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

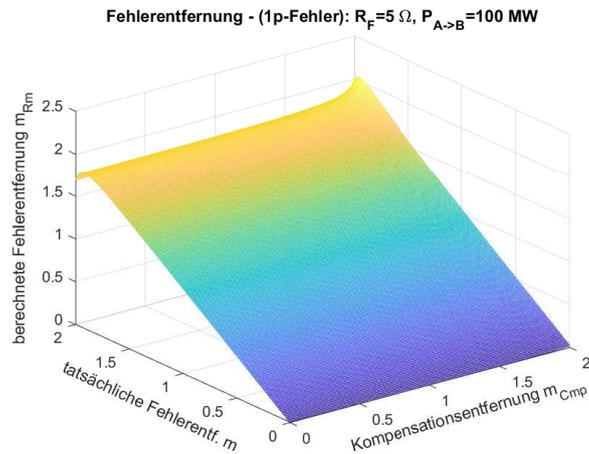


Abbildung C.10.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

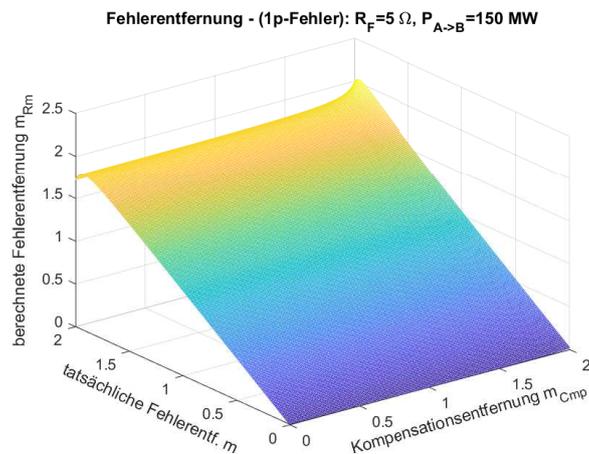


Abbildung C.11.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

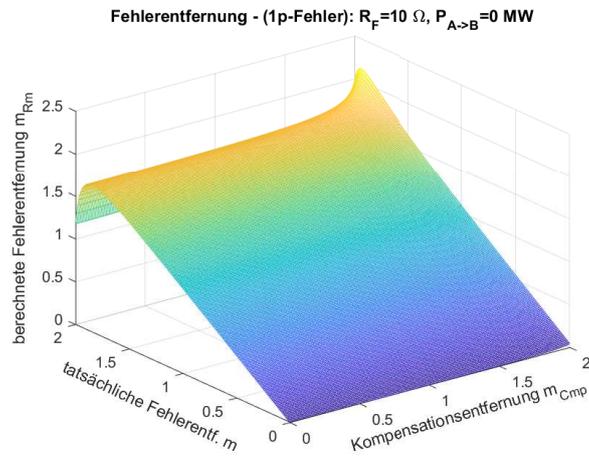


Abbildung C.12.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

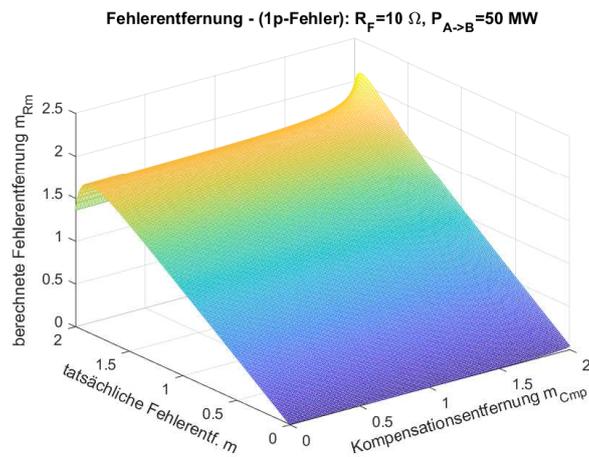


Abbildung C.13.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

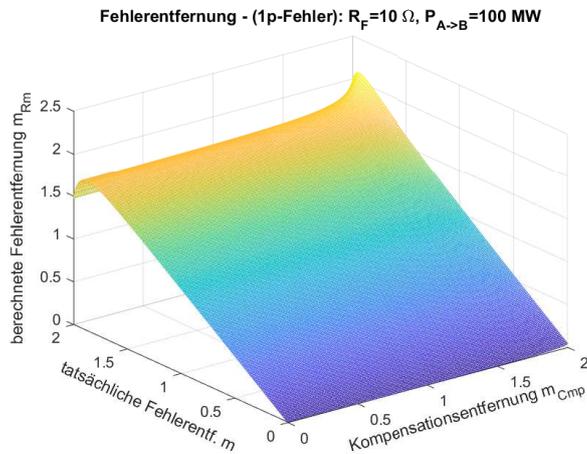


Abbildung C.14.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

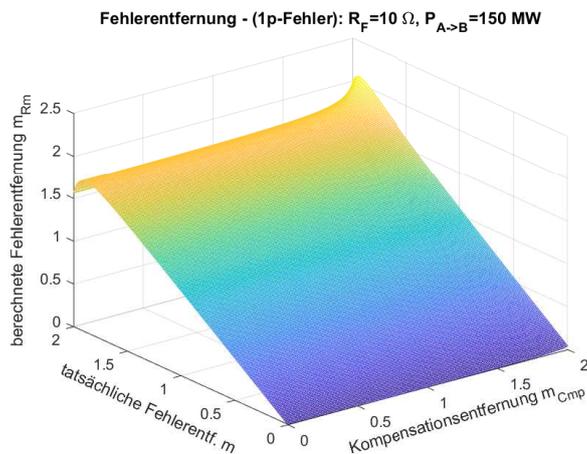


Abbildung C.15.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

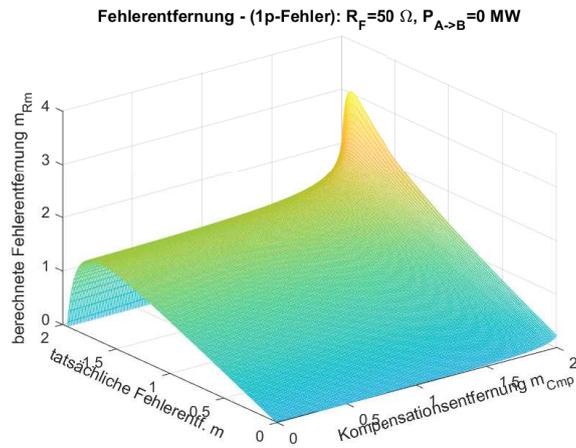


Abbildung C.16.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

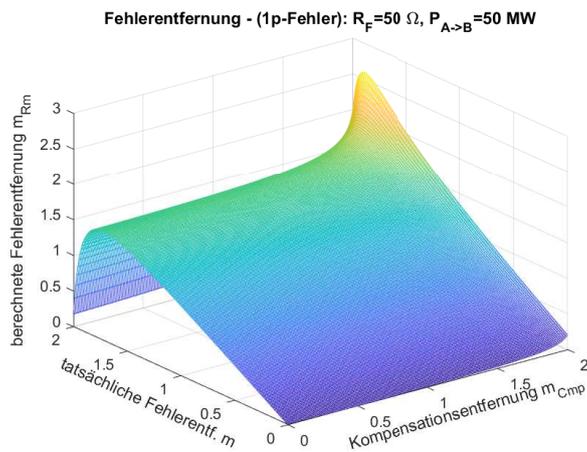


Abbildung C.17.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

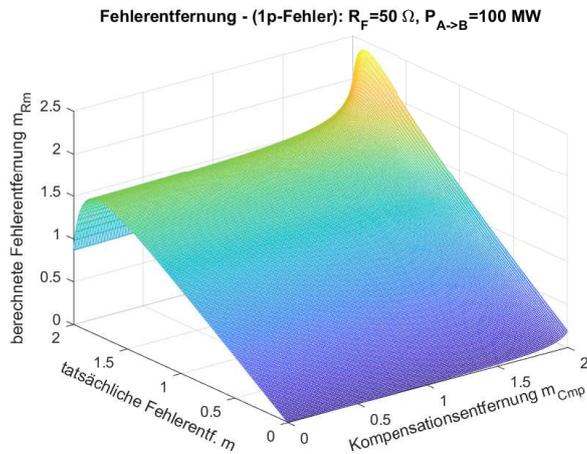


Abbildung C.18.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

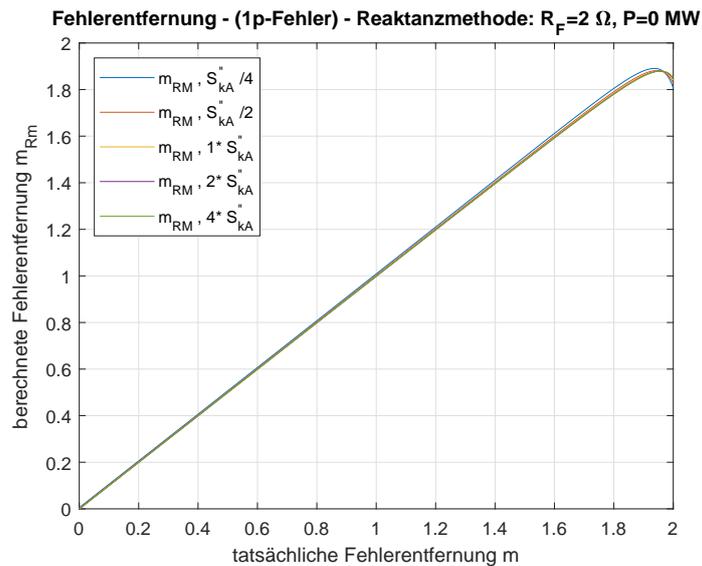


Abbildung C.19.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

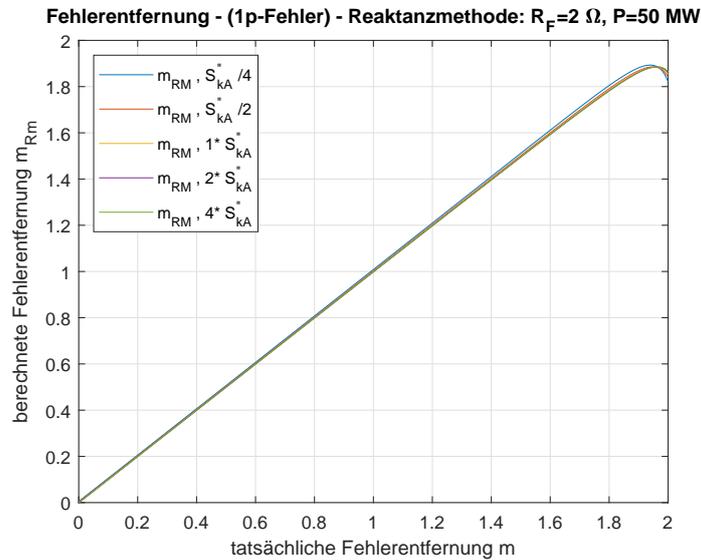


Abbildung C.20.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

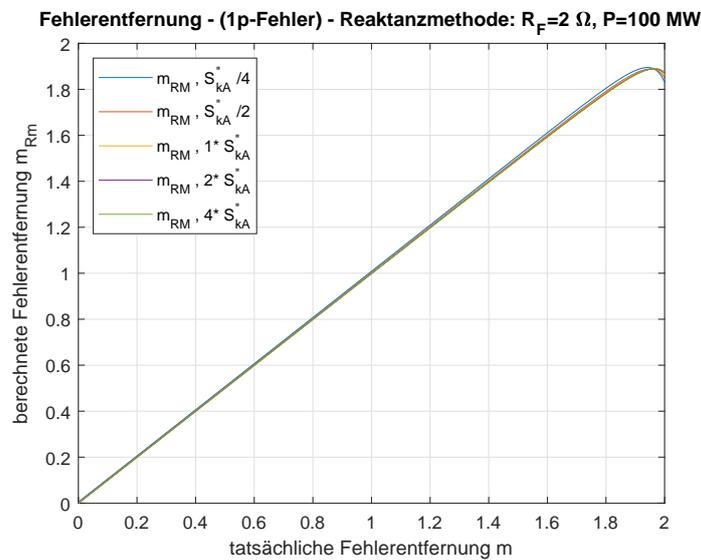


Abbildung C.21.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

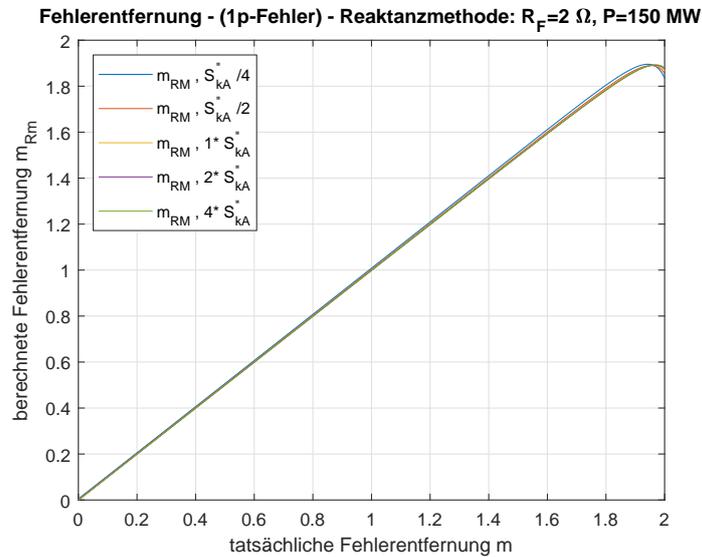


Abbildung C.22.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

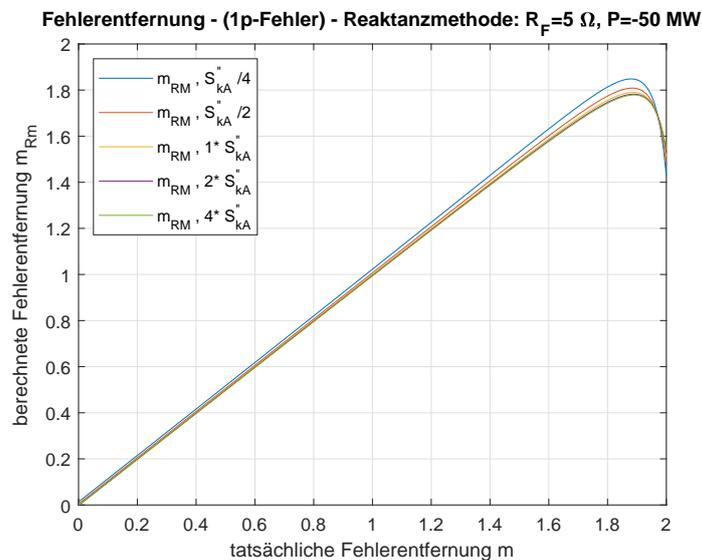


Abbildung C.23.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

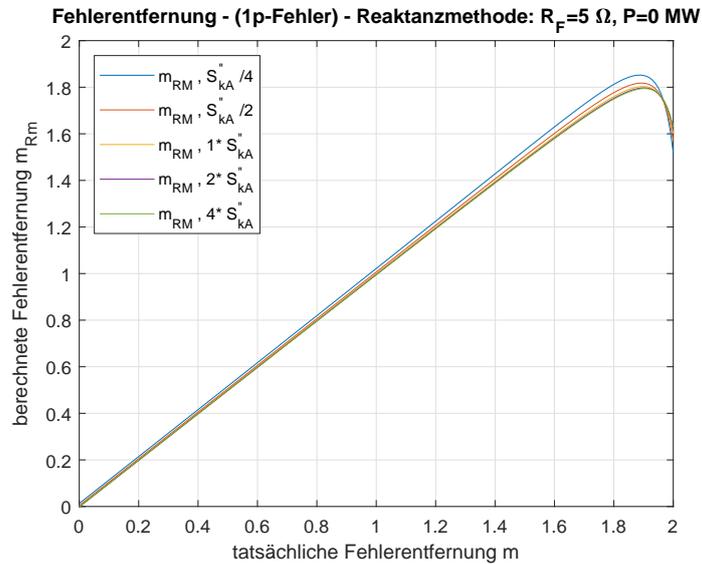


Abbildung C.24.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

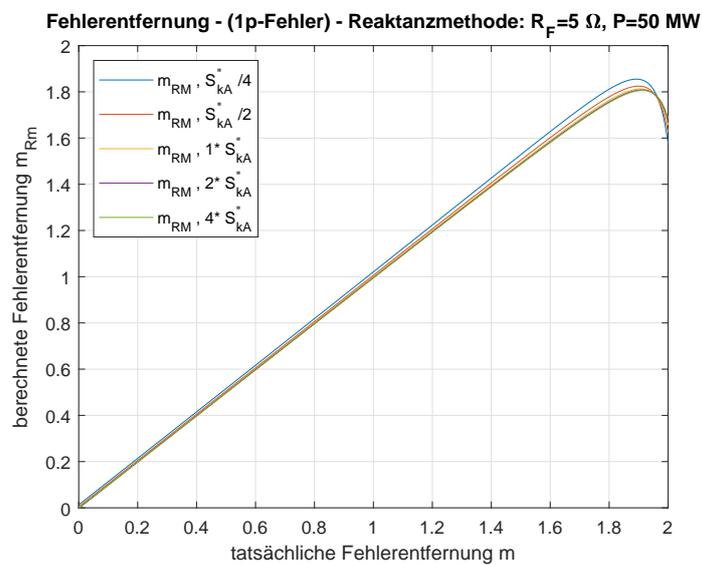


Abbildung C.25.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

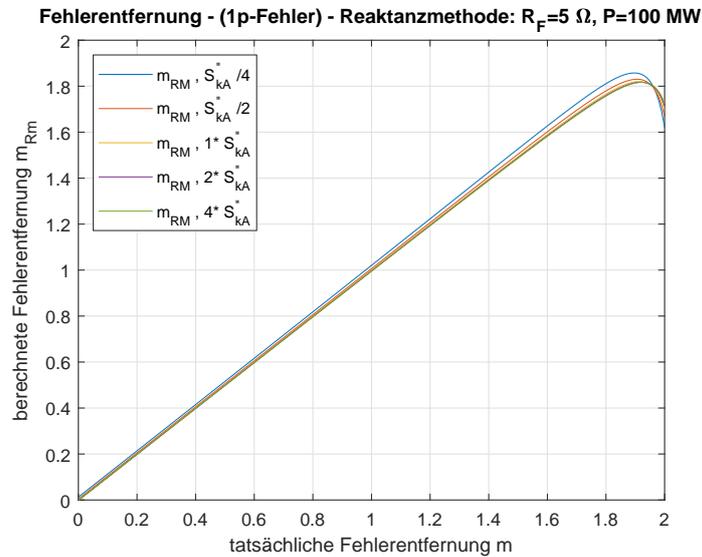


Abbildung C.26.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

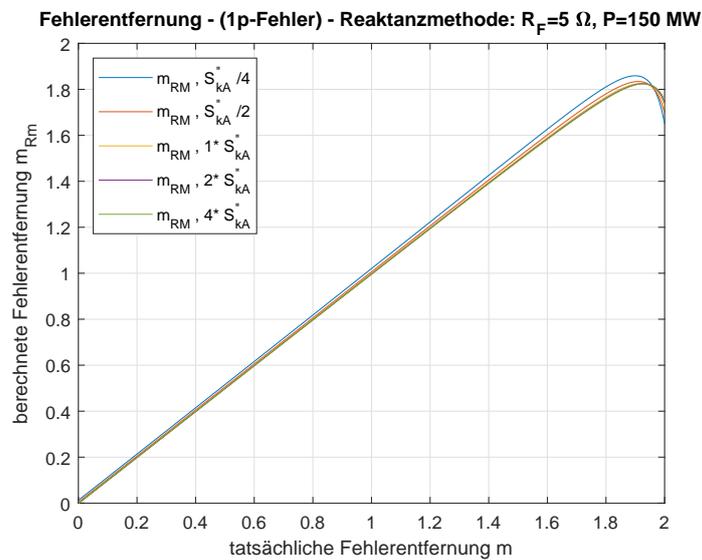


Abbildung C.27.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

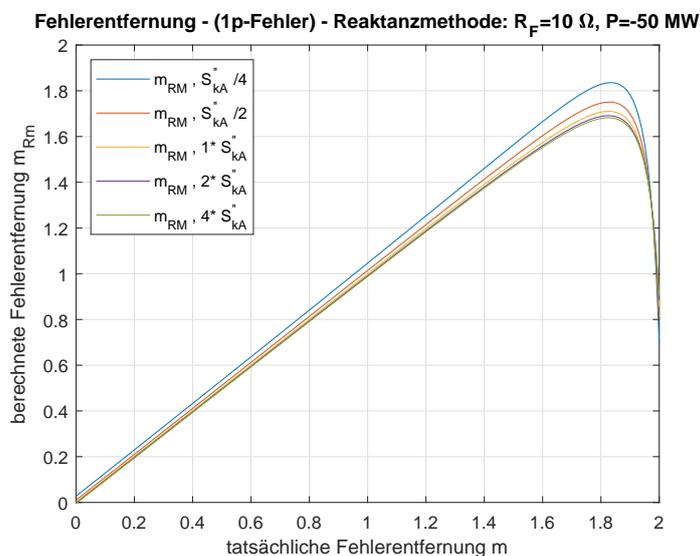


Abbildung C.28.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

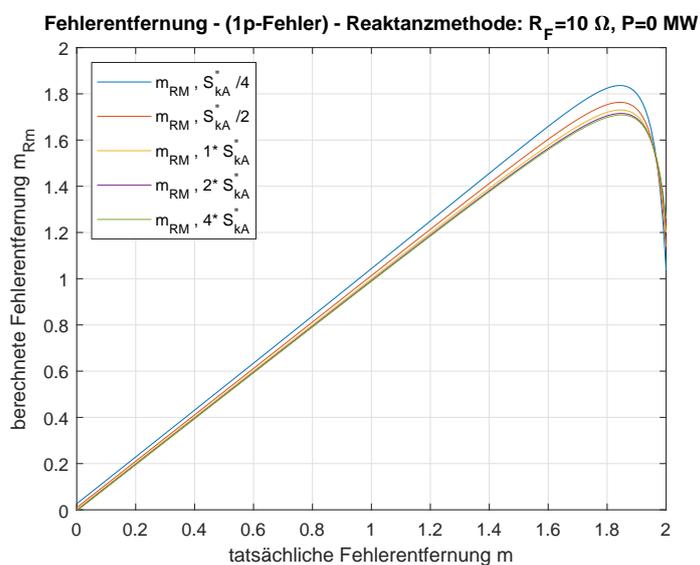


Abbildung C.29.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

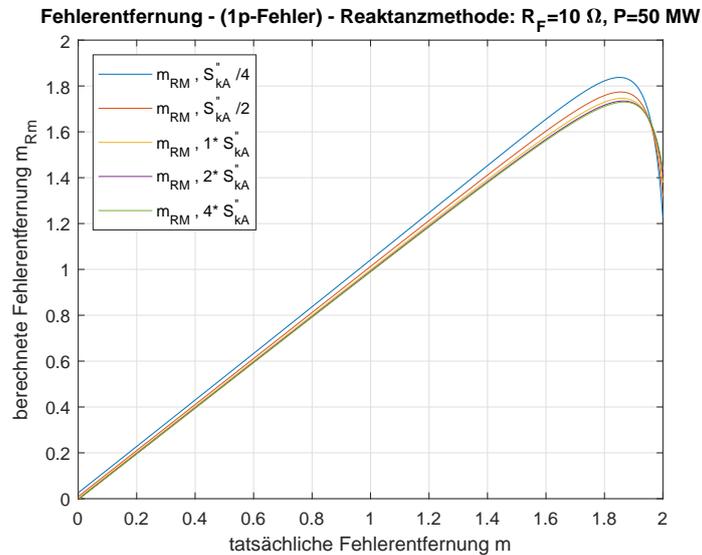


Abbildung C.30.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

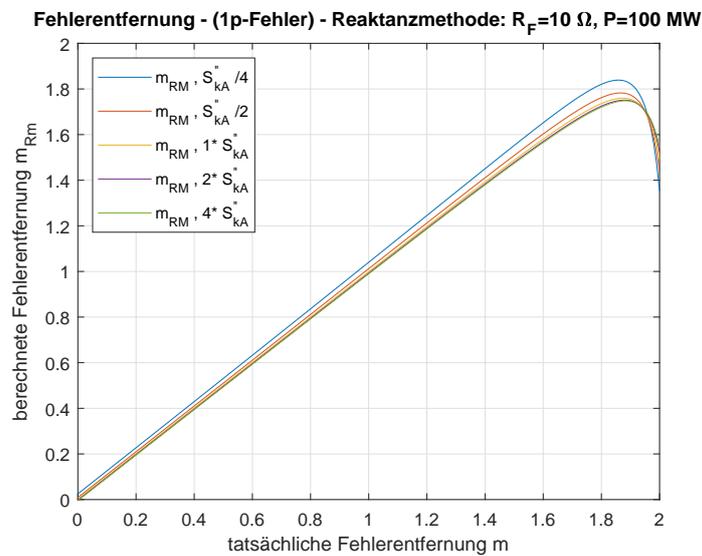


Abbildung C.31.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

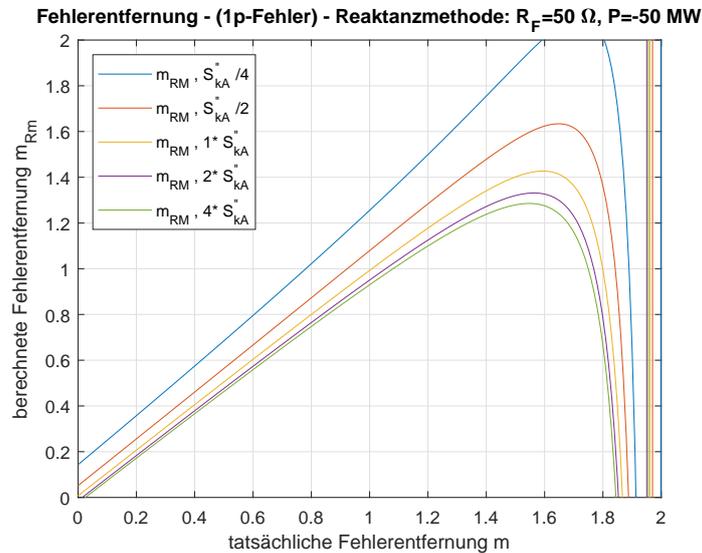


Abbildung C.32.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

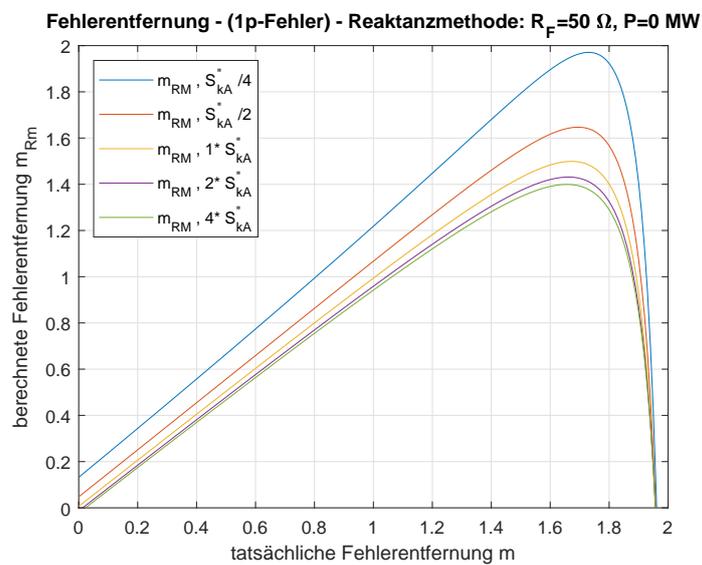


Abbildung C.33.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

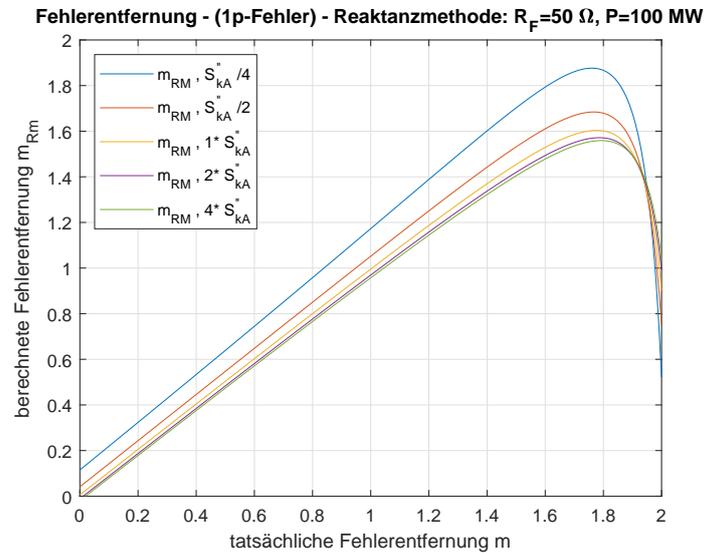


Abbildung C.34.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

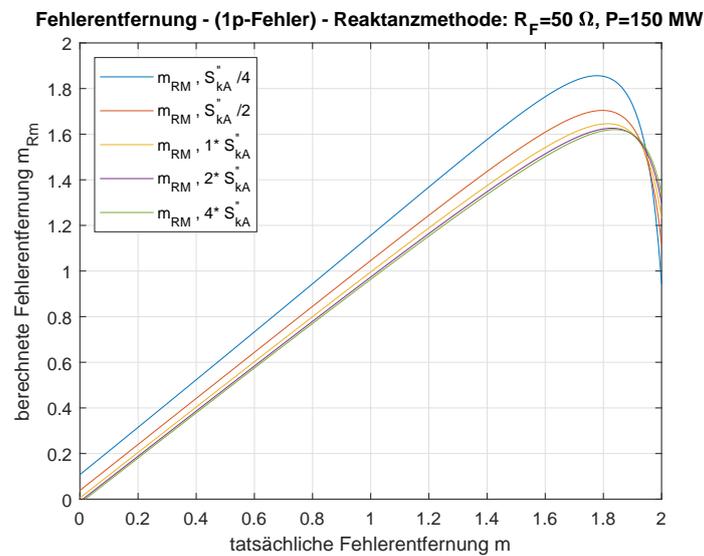


Abbildung C.35.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

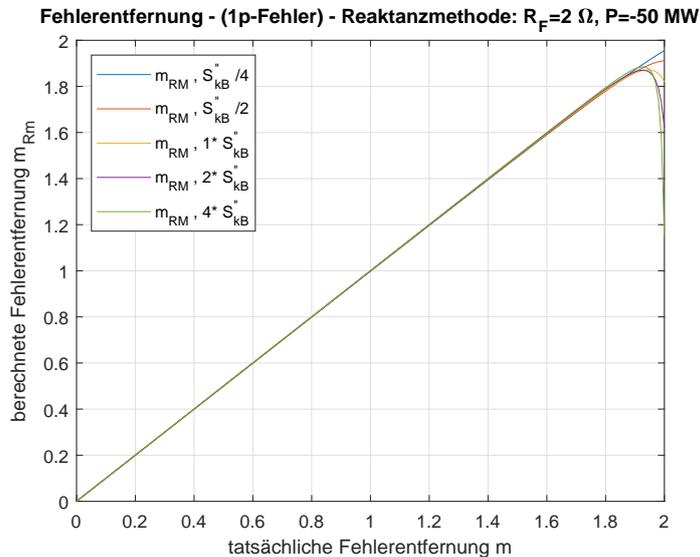


Abbildung C.36.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

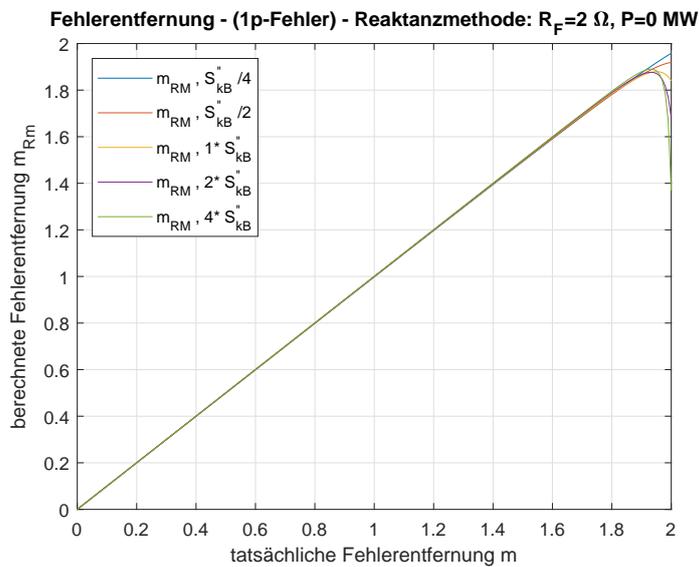


Abbildung C.37.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

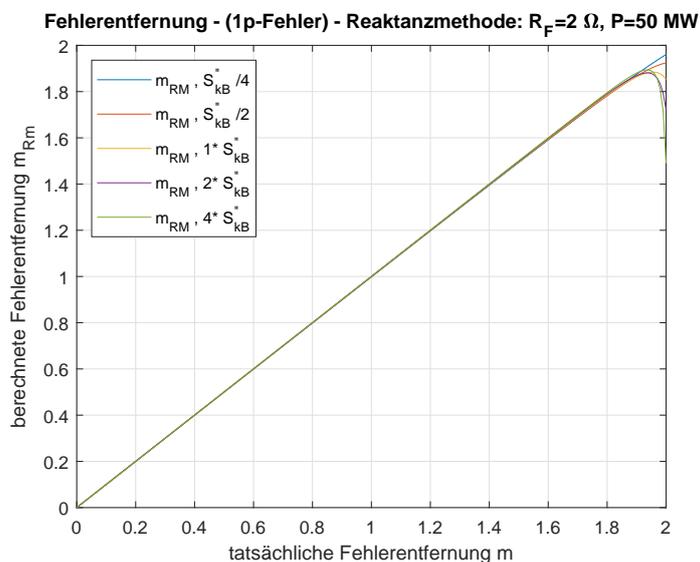


Abbildung C.38.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

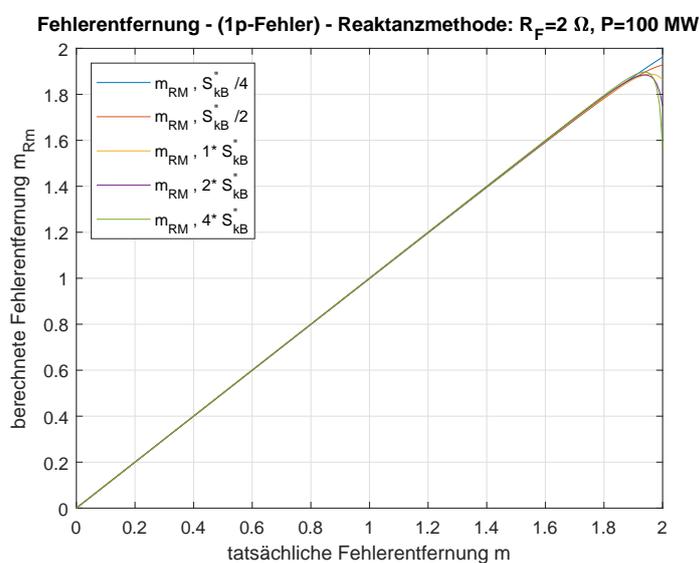


Abbildung C.39.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

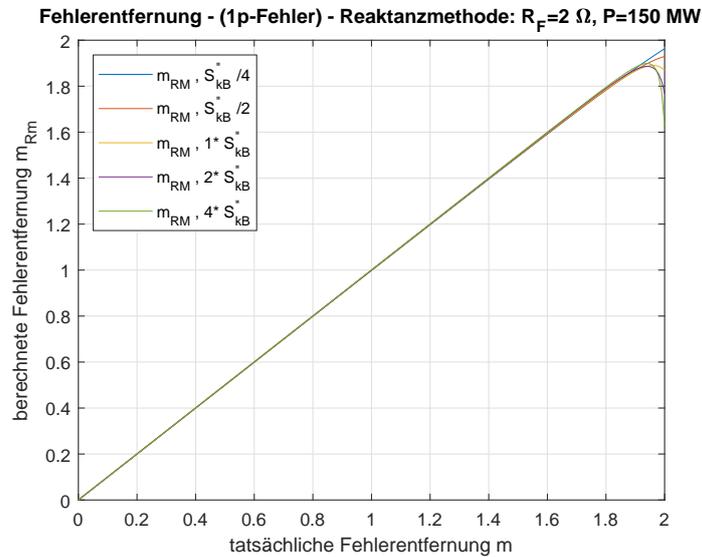


Abbildung C.40.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

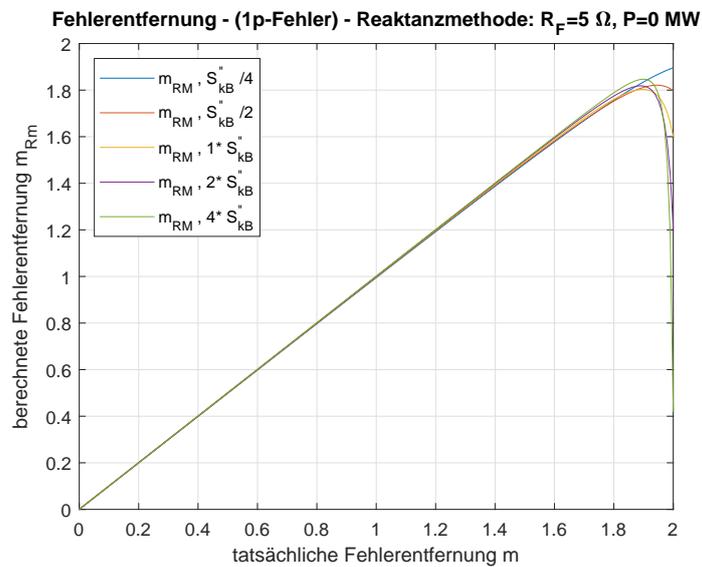


Abbildung C.41.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

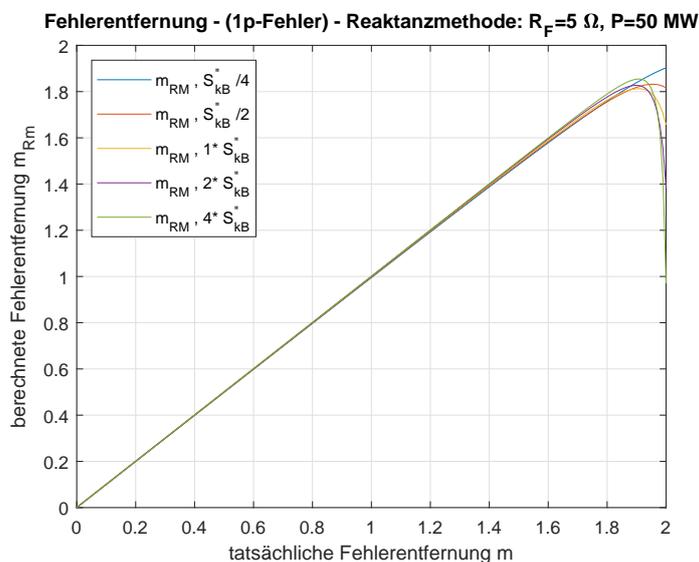


Abbildung C.42.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^+)$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

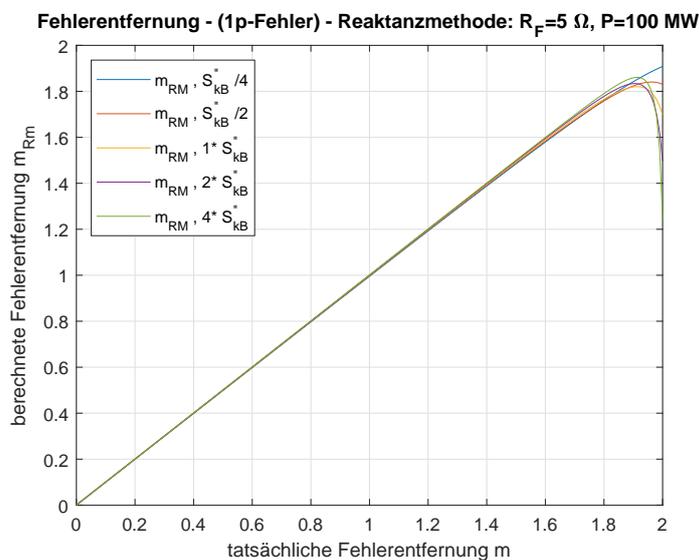


Abbildung C.43.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^+)$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

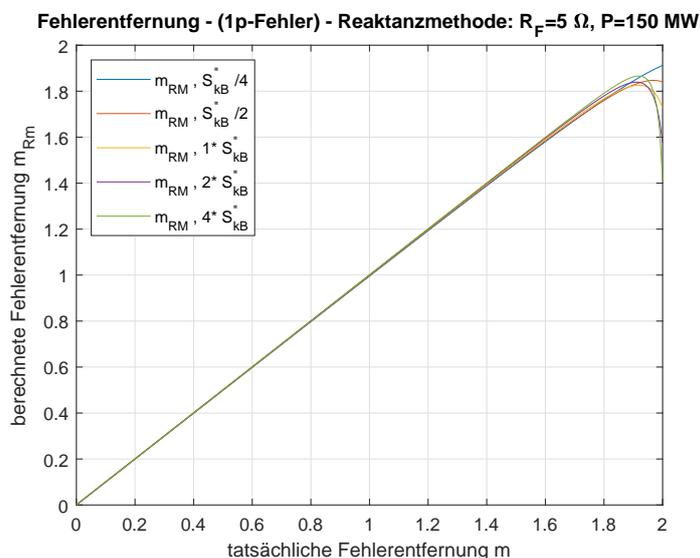


Abbildung C.44.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

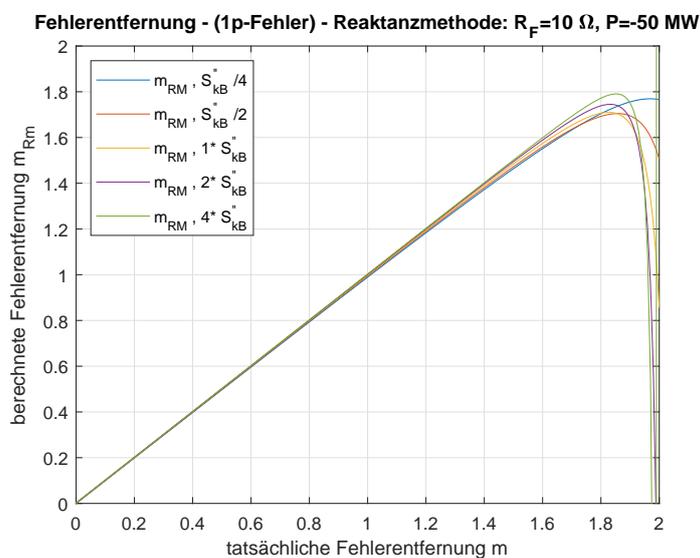


Abbildung C.45.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

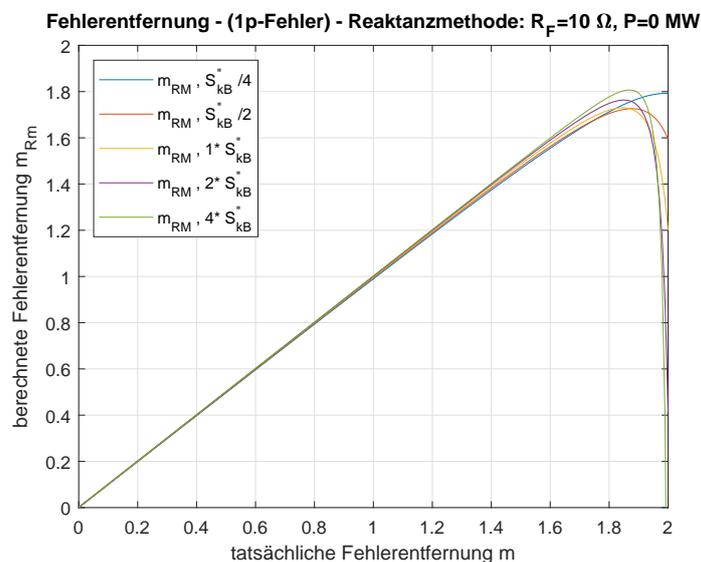


Abbildung C.46.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

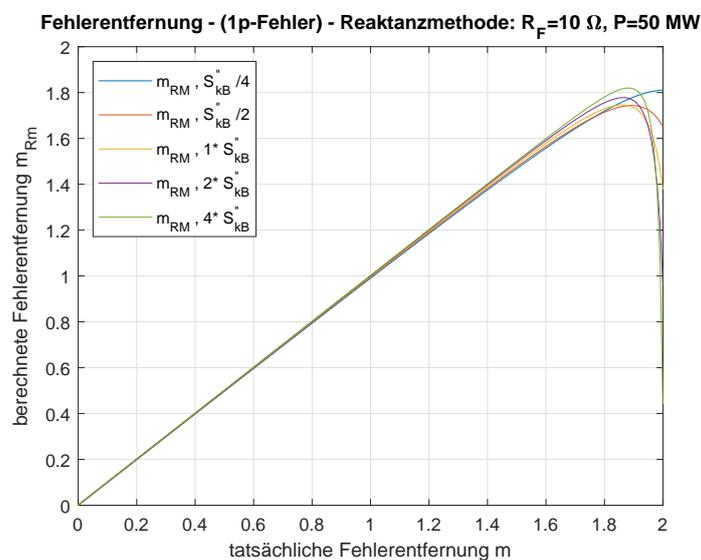


Abbildung C.47.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

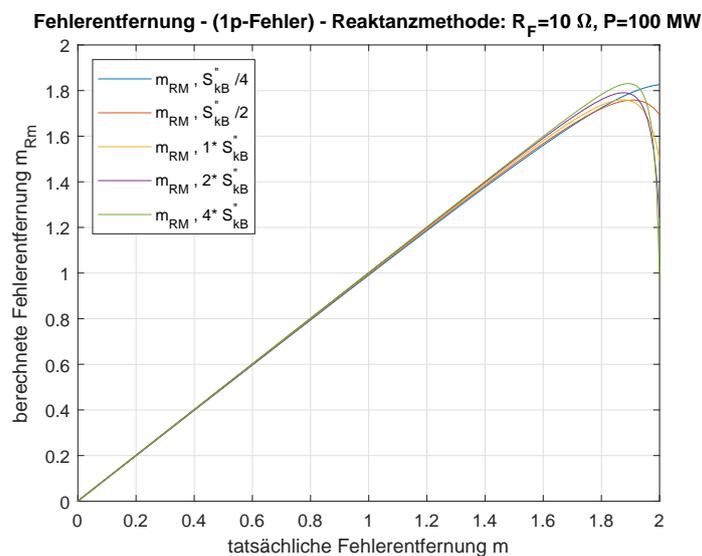


Abbildung C.48.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

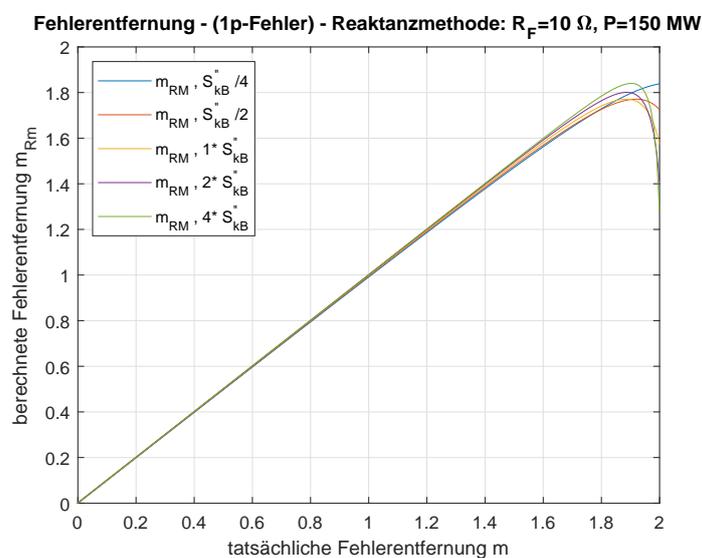


Abbildung C.49.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

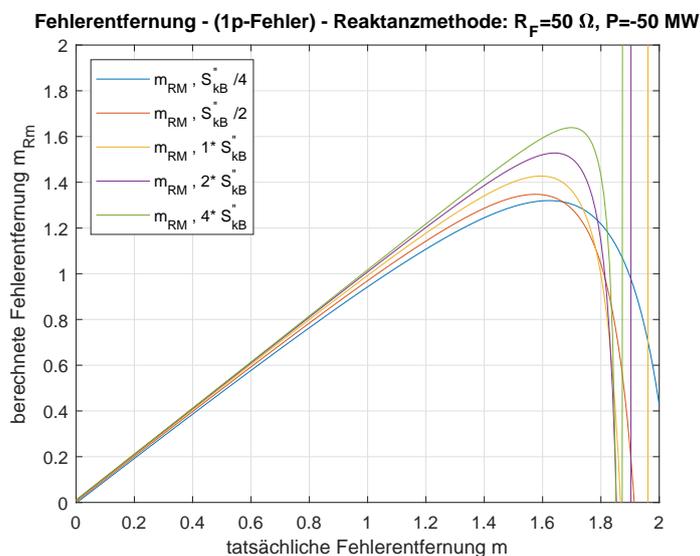


Abbildung C.50.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

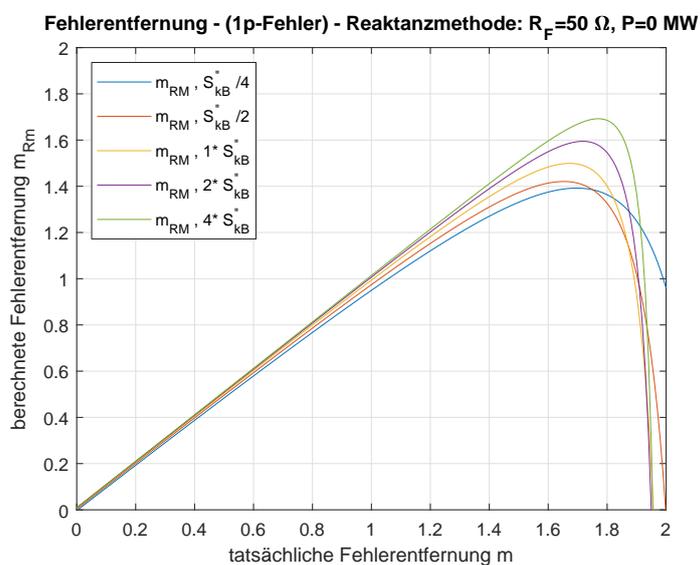


Abbildung C.51.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

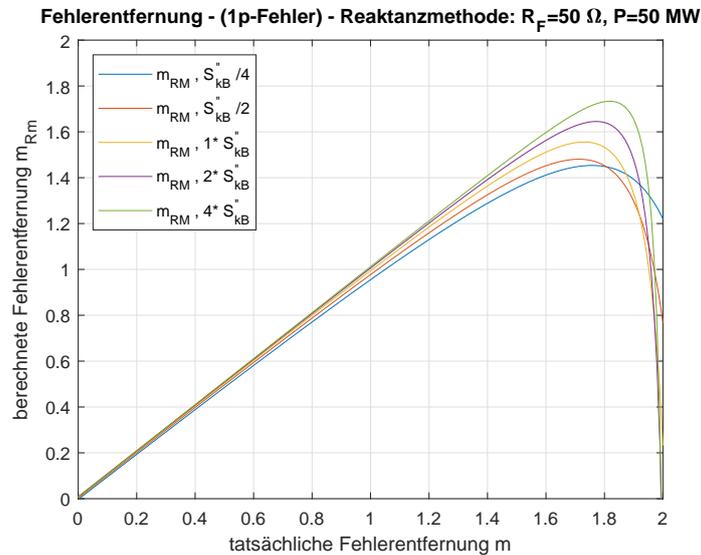


Abbildung C.52.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

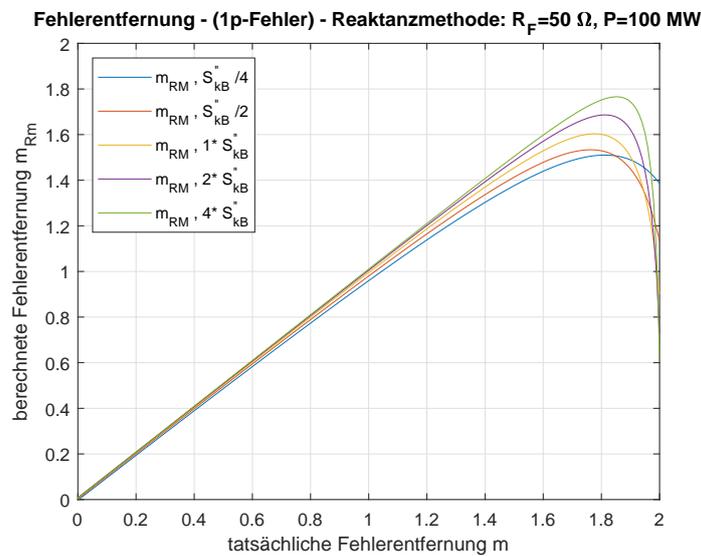


Abbildung C.53.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 1-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 50 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Ergebnisse des 2-poligen Fehlers

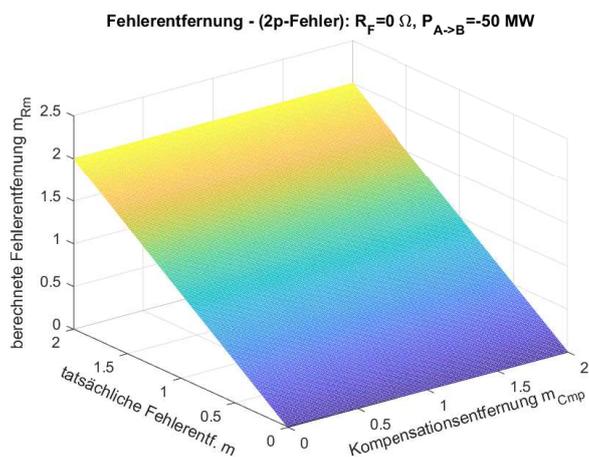


Abbildung C.54.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

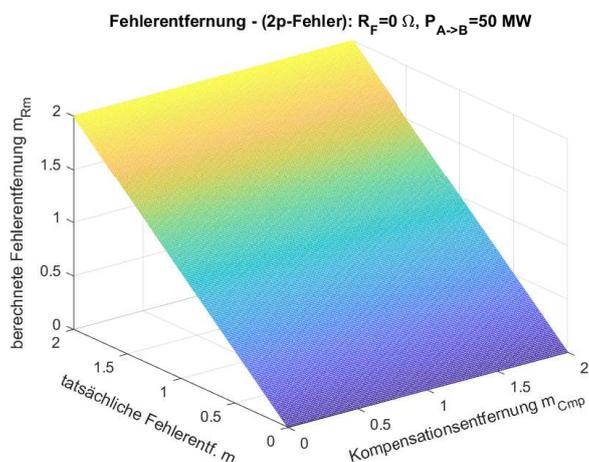


Abbildung C.55.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

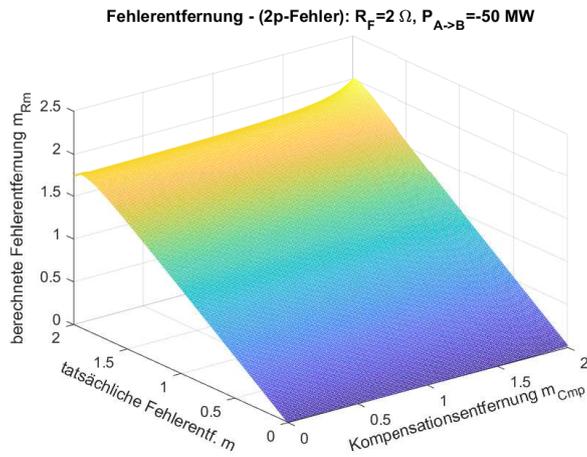


Abbildung C.56.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = -50\ \text{MW}$

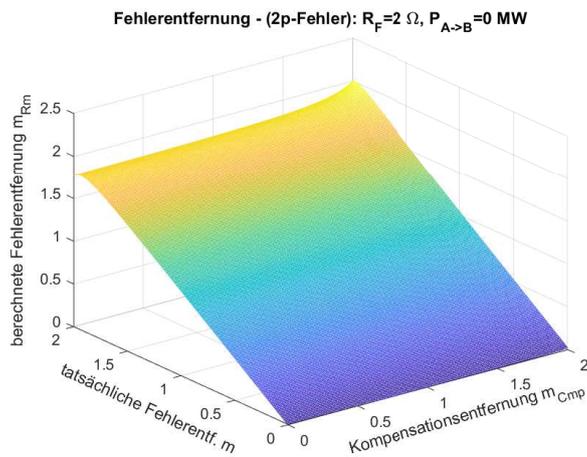


Abbildung C.57.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 0\ \text{MW}$

Anhang C. Diagramme

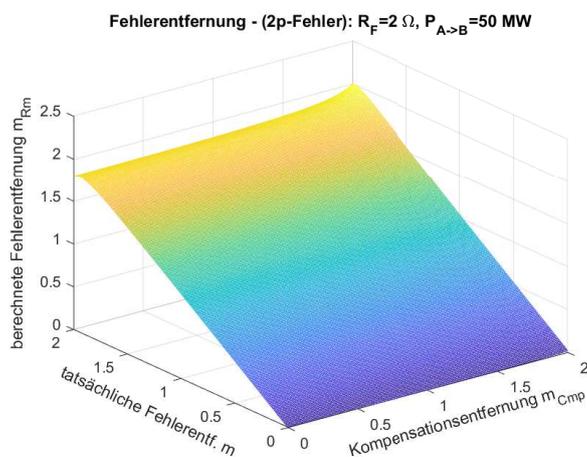


Abbildung C.58.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 50\ \text{MW}$

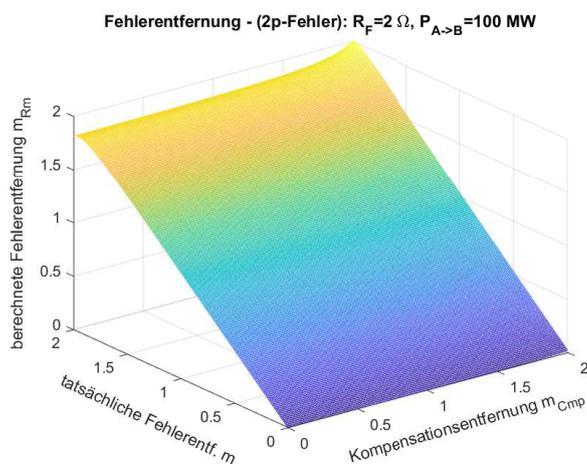


Abbildung C.59.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 100\ \text{MW}$

Anhang C. Diagramme

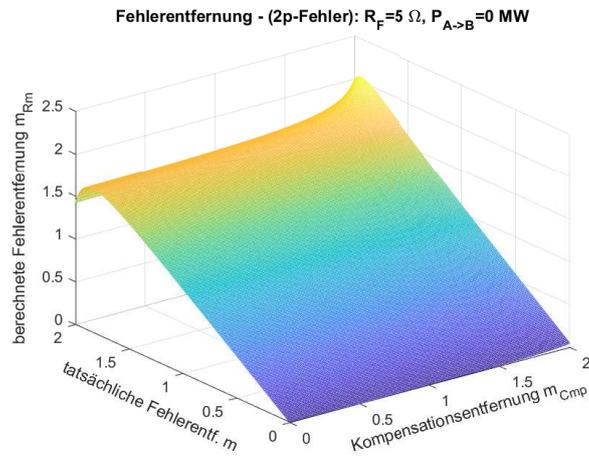


Abbildung C.60.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

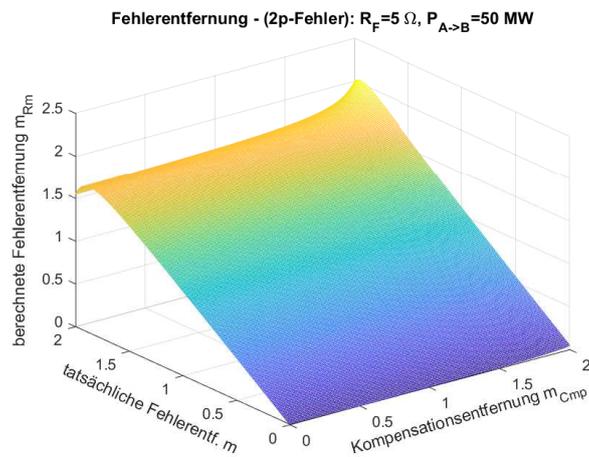


Abbildung C.61.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

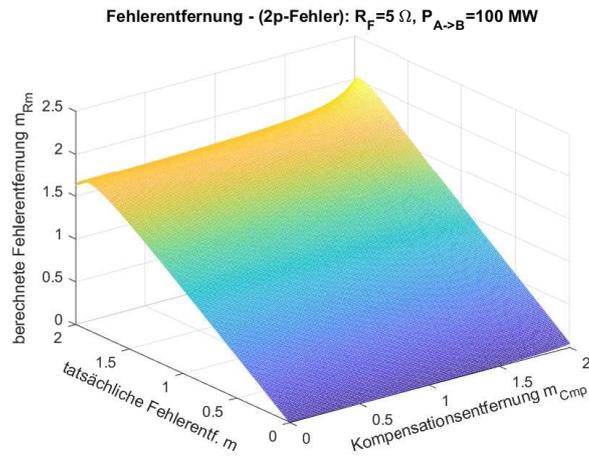


Abbildung C.62.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

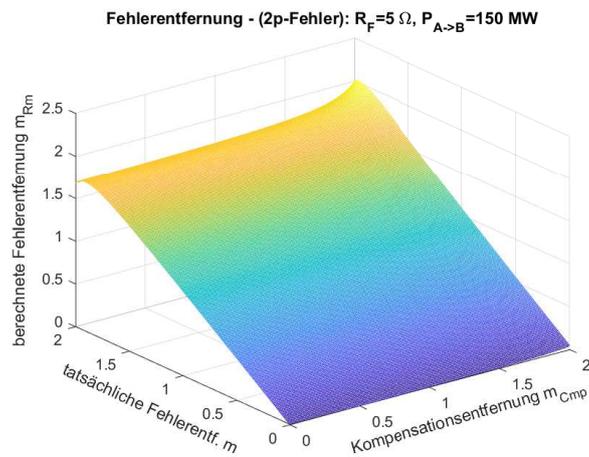


Abbildung C.63.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

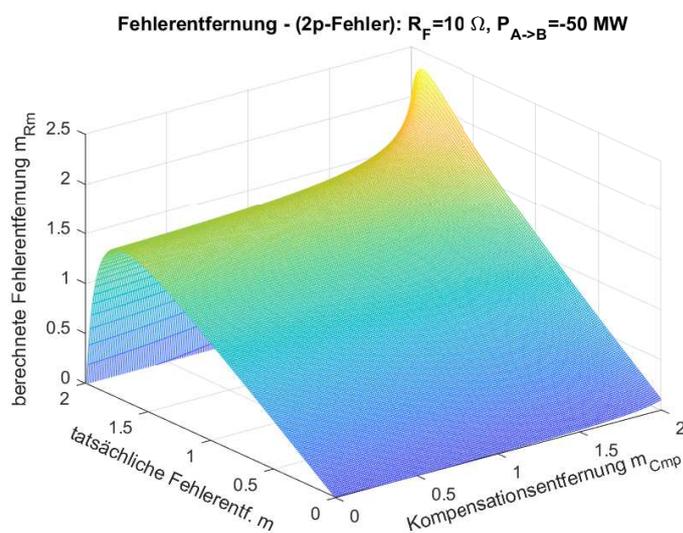


Abbildung C.64.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

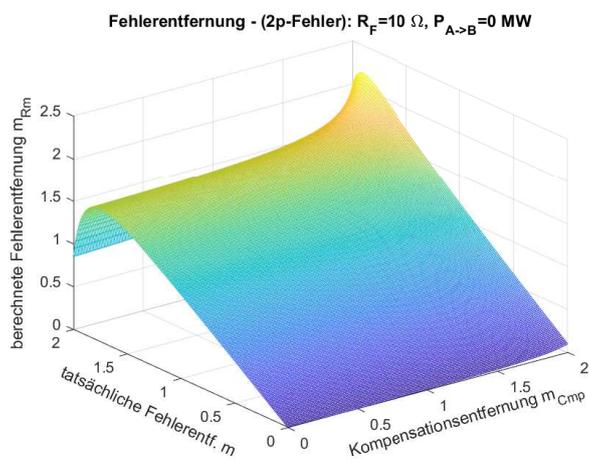


Abbildung C.65.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

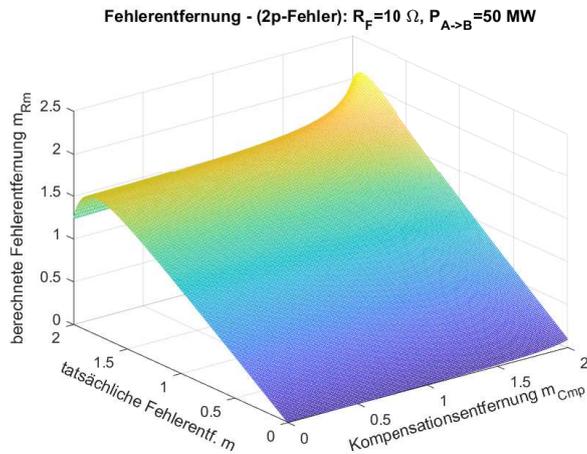


Abbildung C.66.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

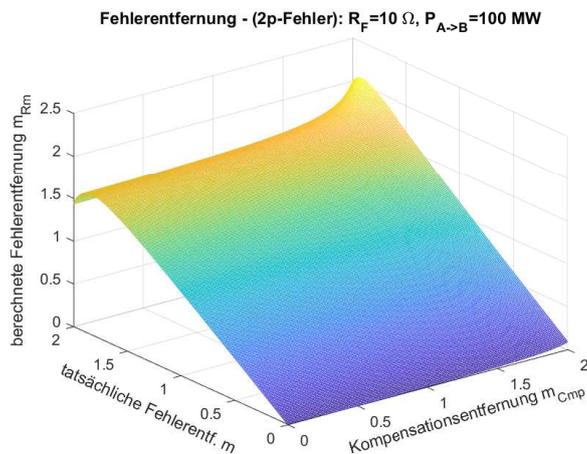


Abbildung C.67.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

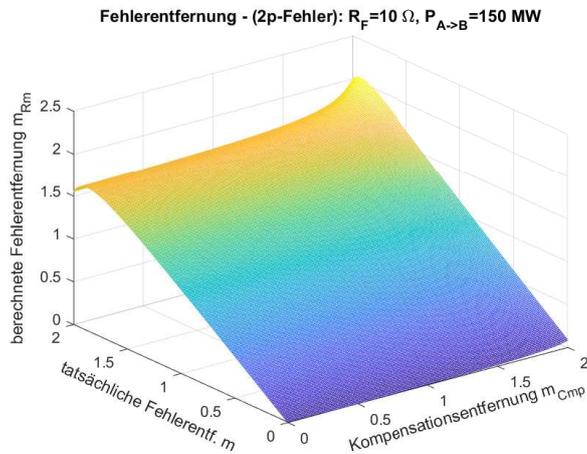


Abbildung C.68.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

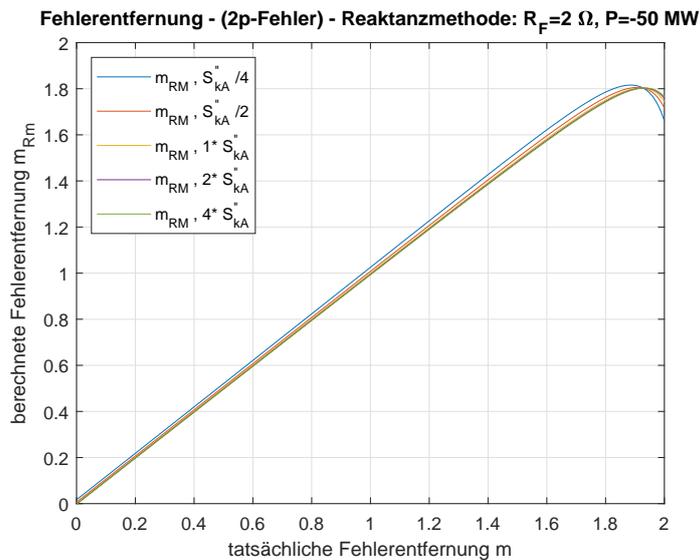


Abbildung C.69.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

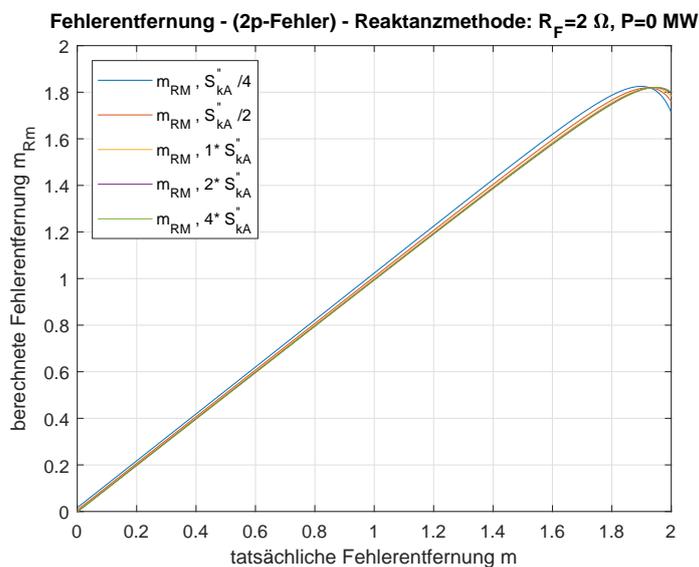


Abbildung C.70.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

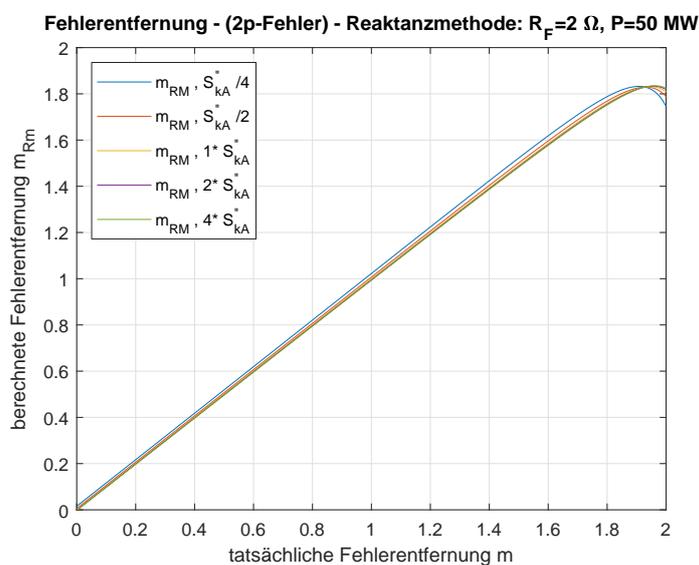


Abbildung C.71.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

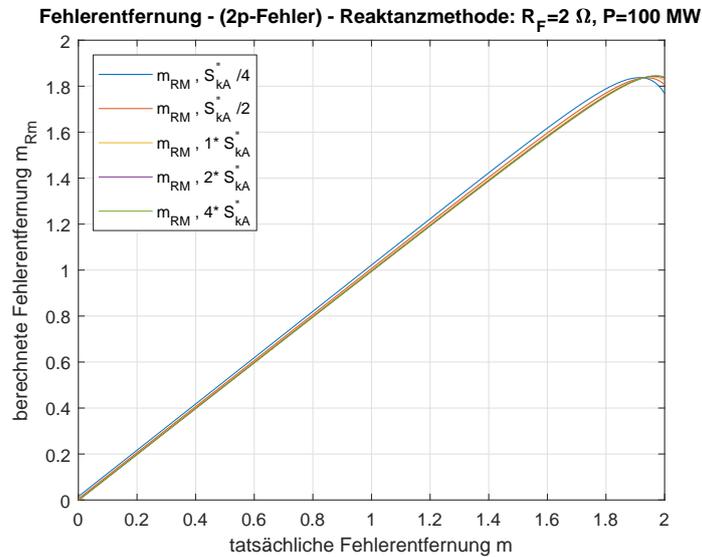


Abbildung C.72.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

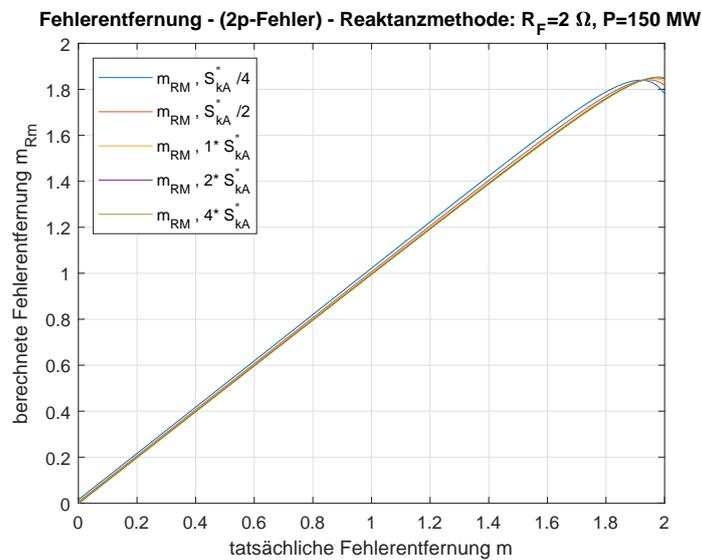


Abbildung C.73.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

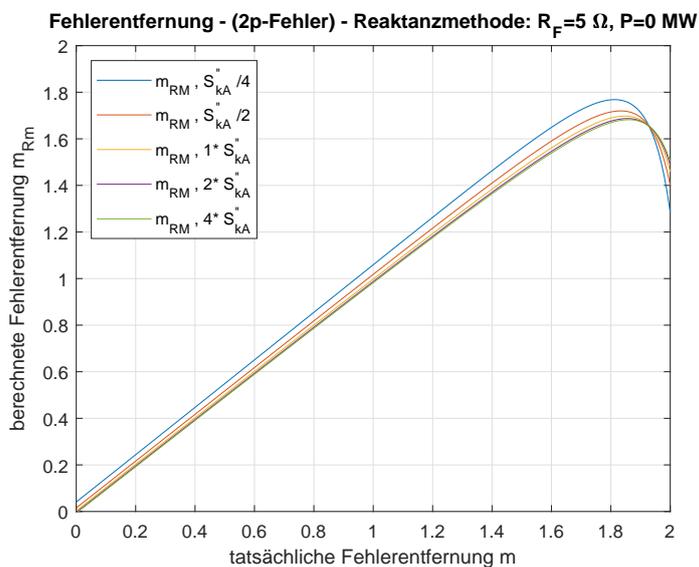


Abbildung C.74.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

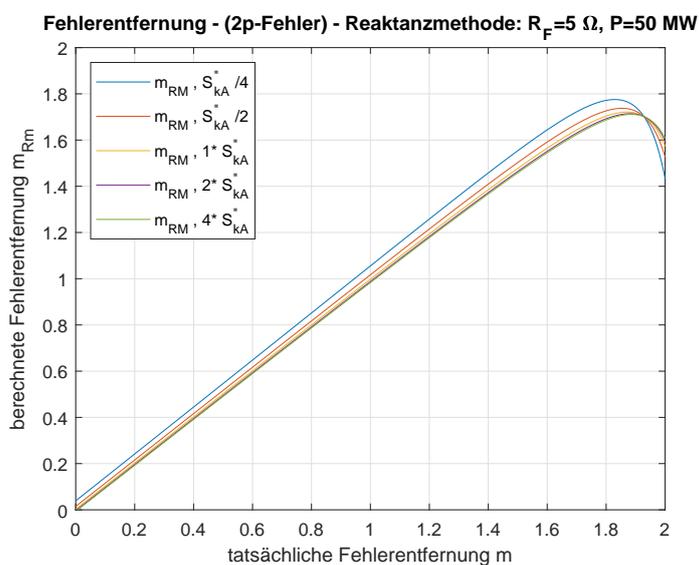


Abbildung C.75.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

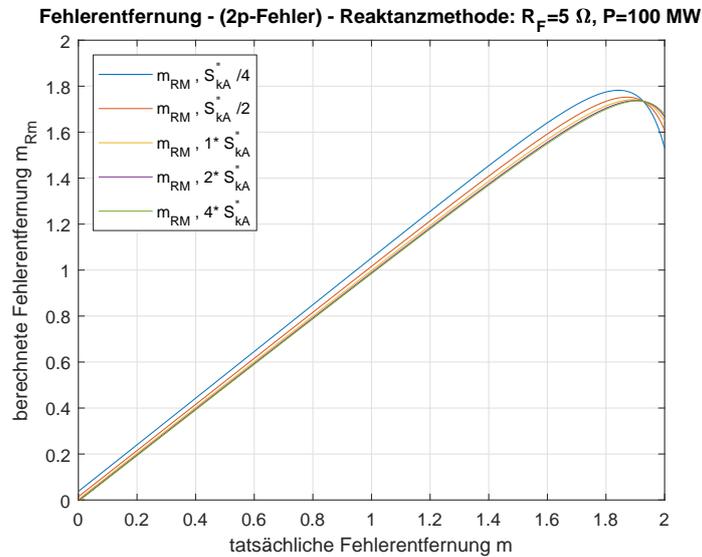


Abbildung C.76.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

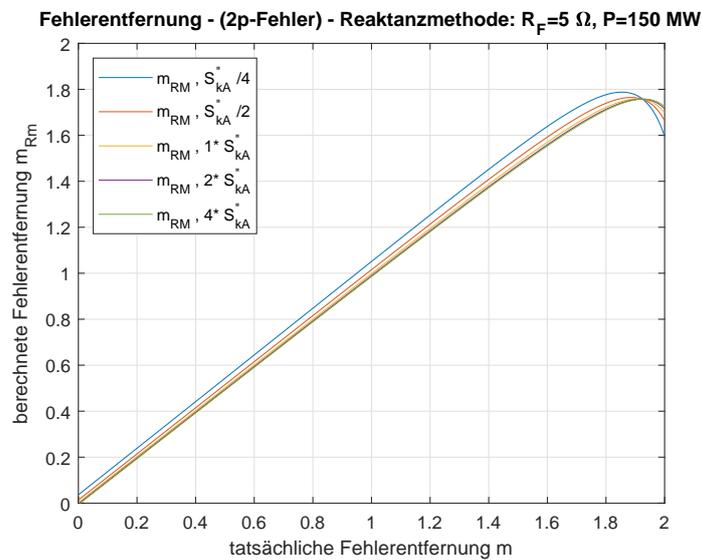


Abbildung C.77.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

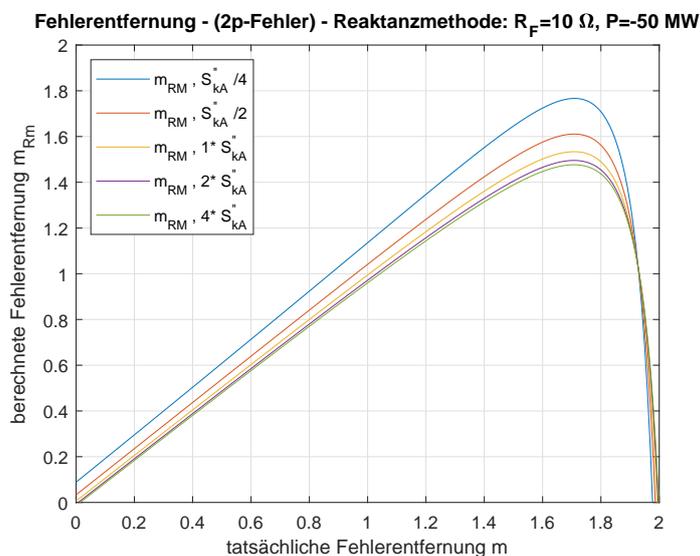


Abbildung C.78.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

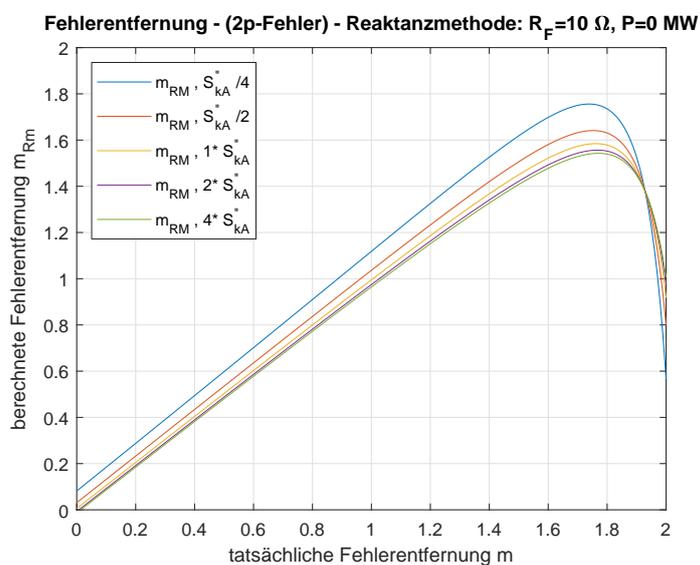


Abbildung C.79.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

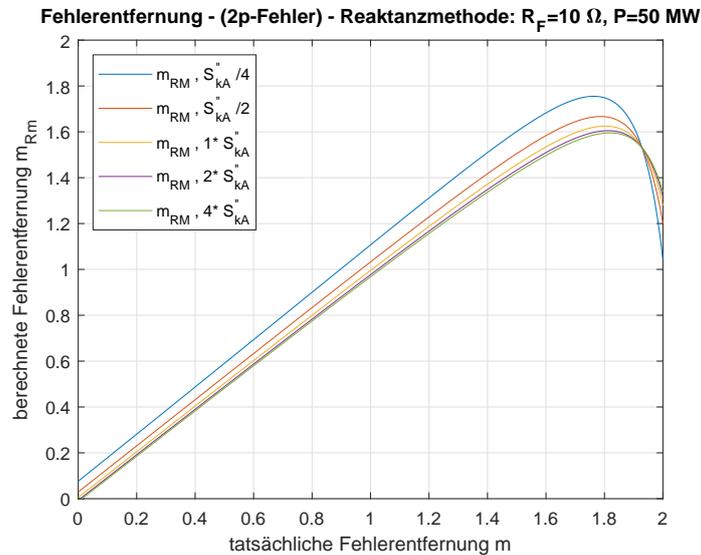


Abbildung C.80.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

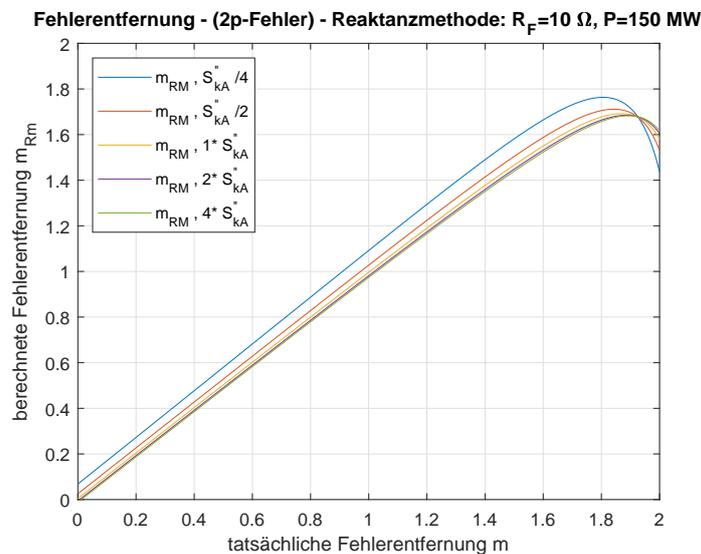


Abbildung C.81.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

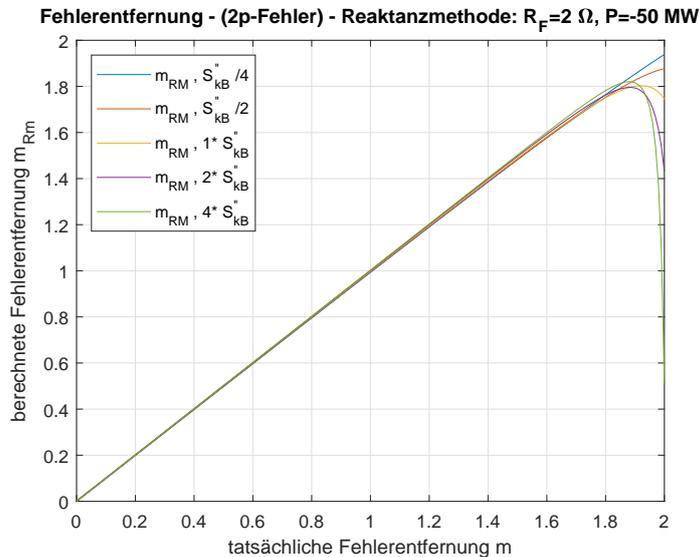


Abbildung C.82.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

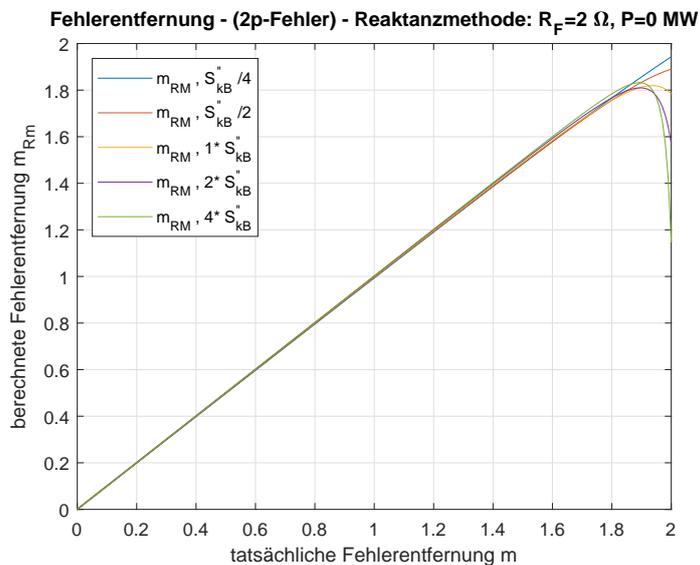


Abbildung C.83.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

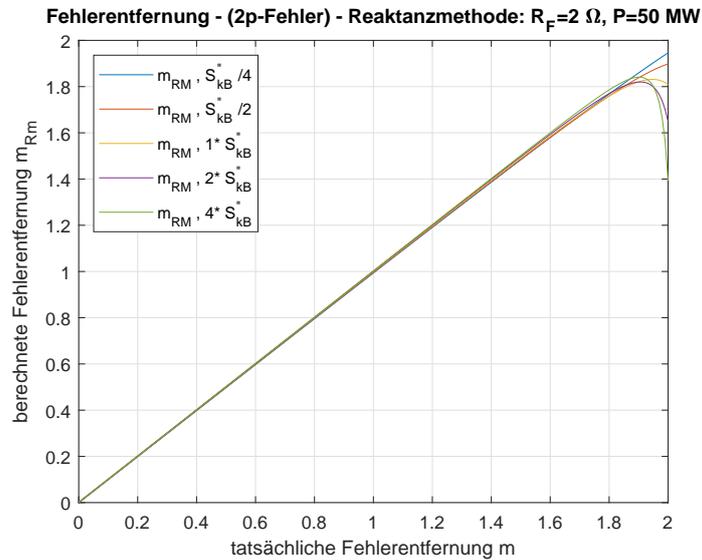


Abbildung C.84.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

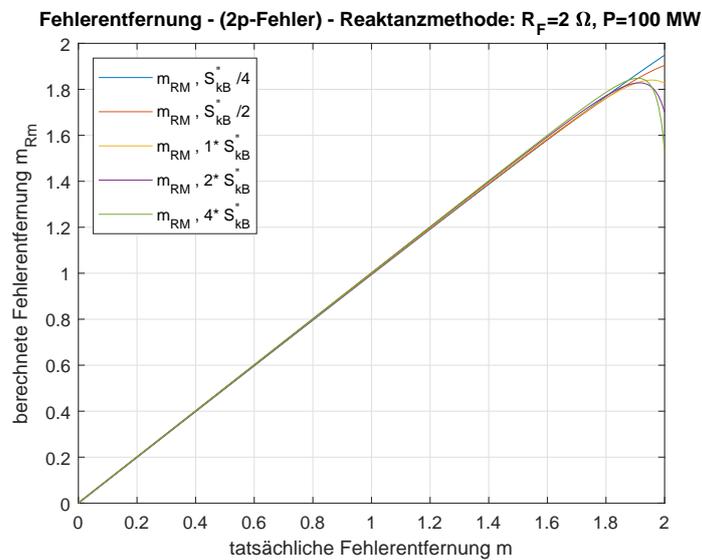


Abbildung C.85.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^{\prime\prime})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

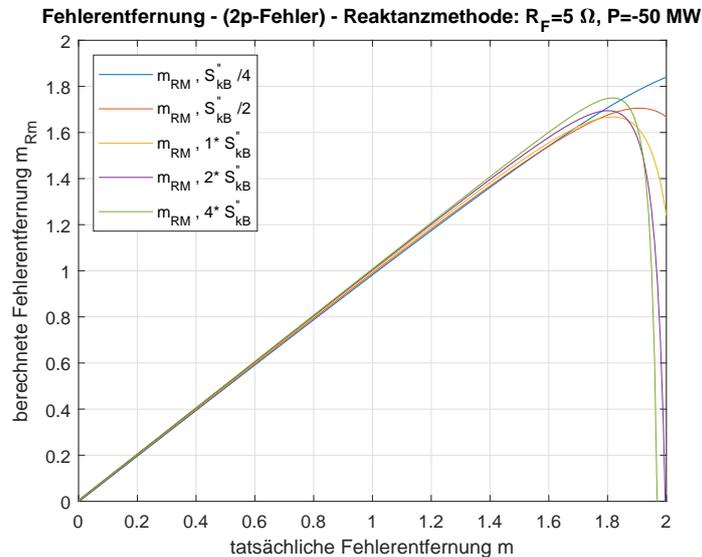


Abbildung C.86.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

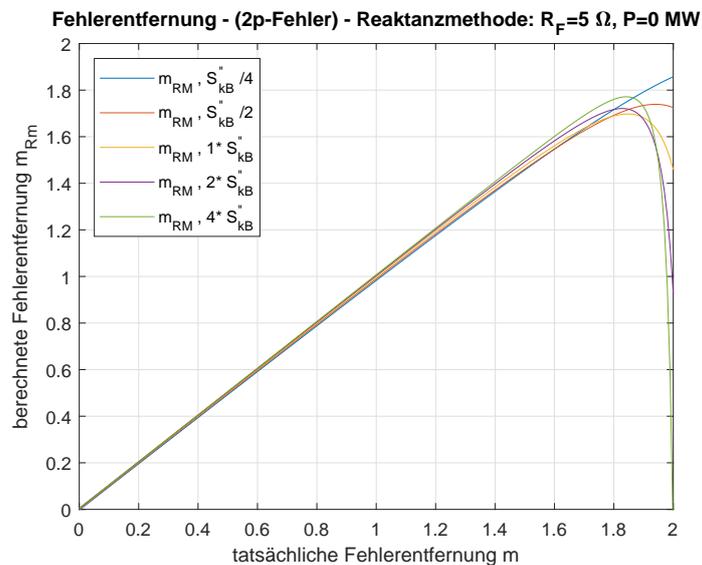


Abbildung C.87.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

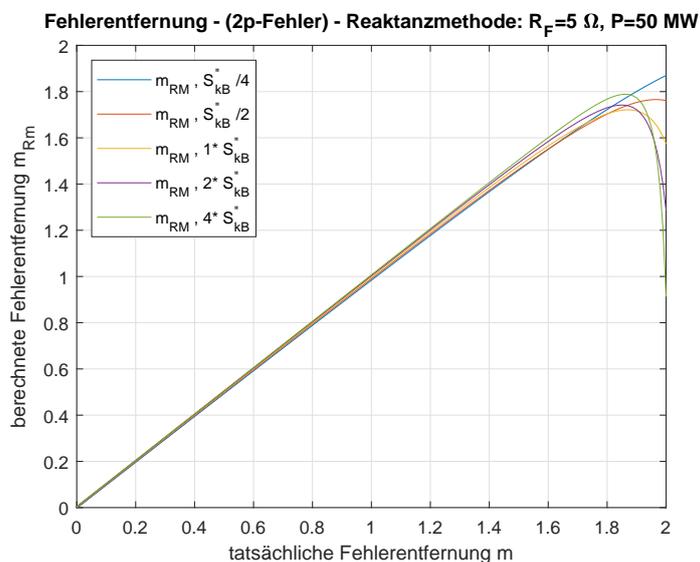


Abbildung C.88.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

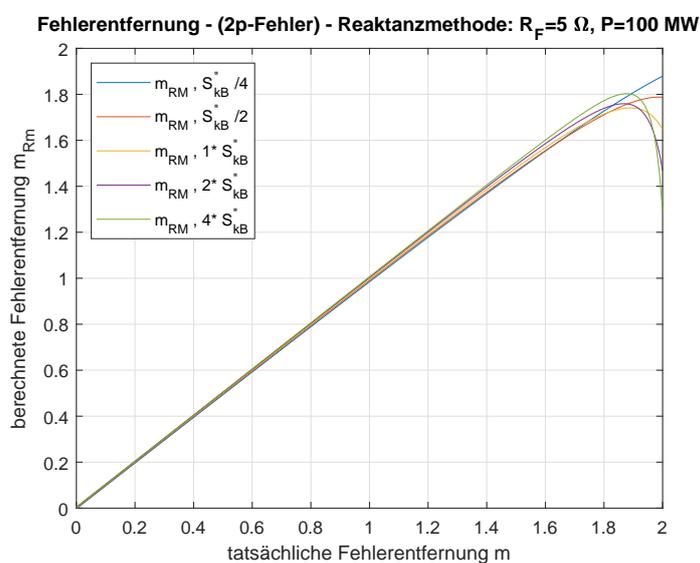


Abbildung C.89.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

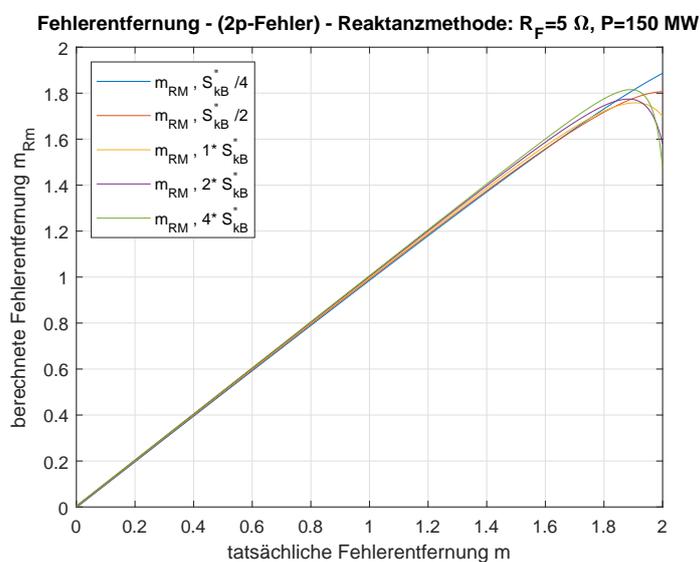


Abbildung C.90.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

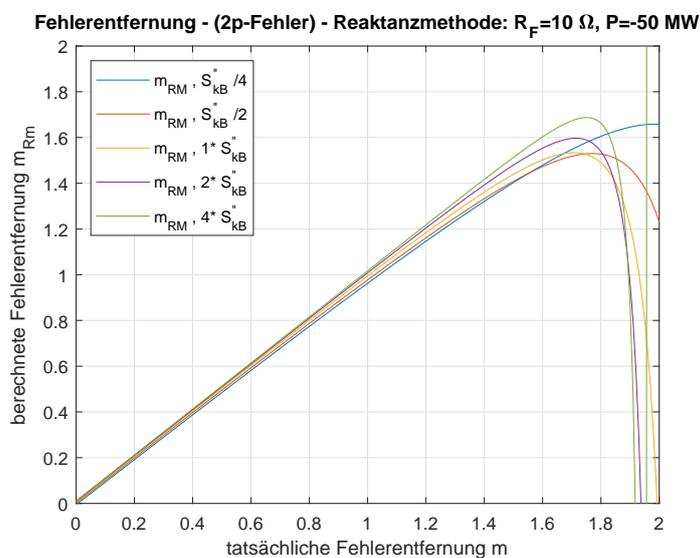


Abbildung C.91.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

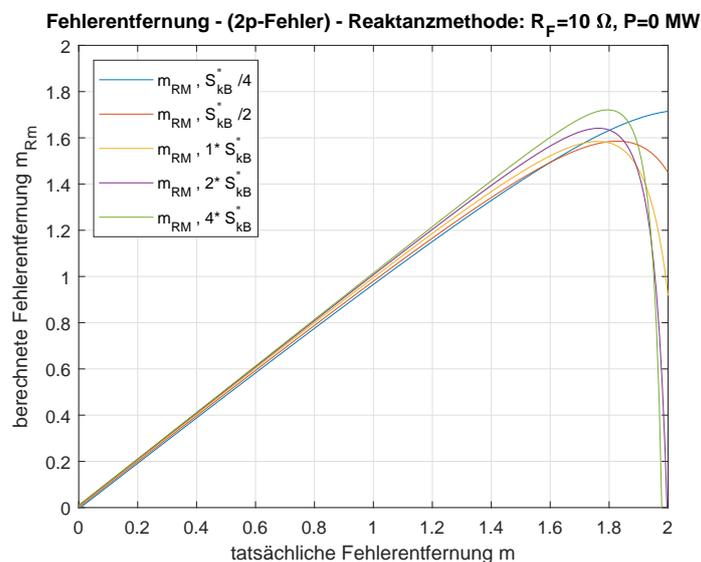


Abbildung C.92.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

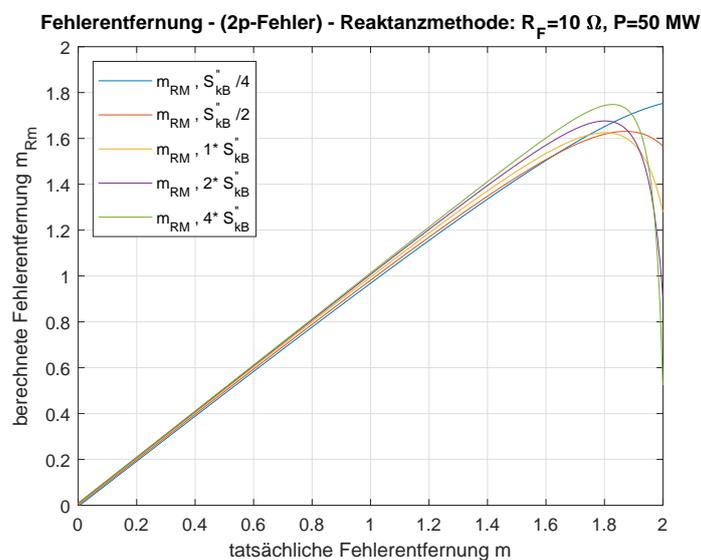


Abbildung C.93.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

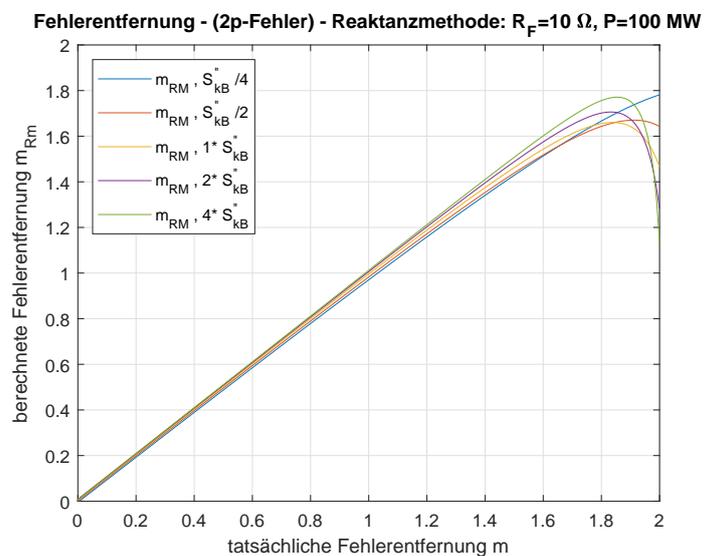


Abbildung C.94.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Ergebnisse des 2-poligen Fehlers mit Erdberührung

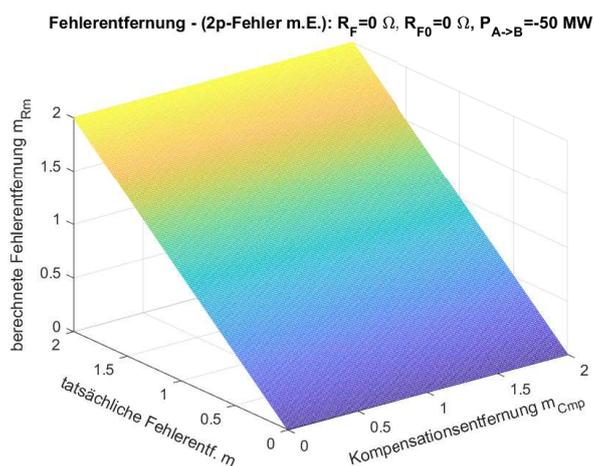


Abbildung C.95.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

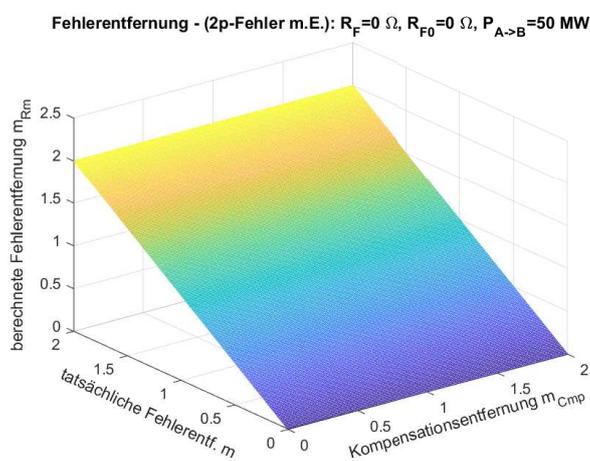


Abbildung C.96.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

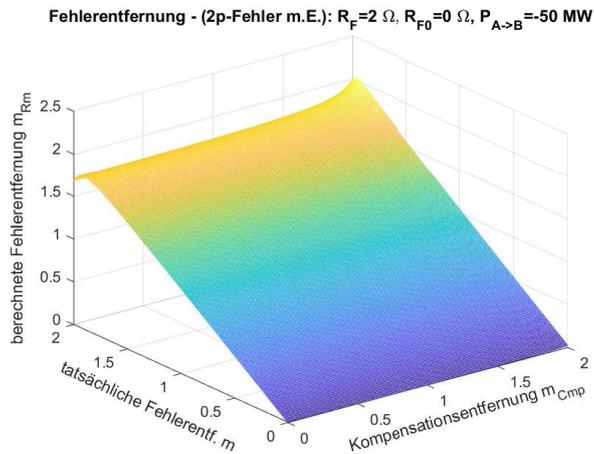


Abbildung C.97.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

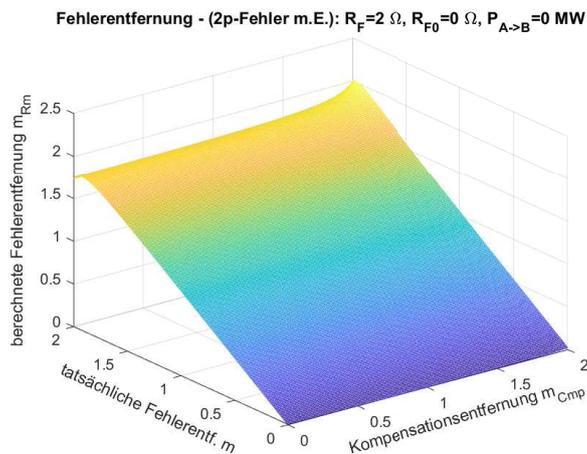


Abbildung C.98.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

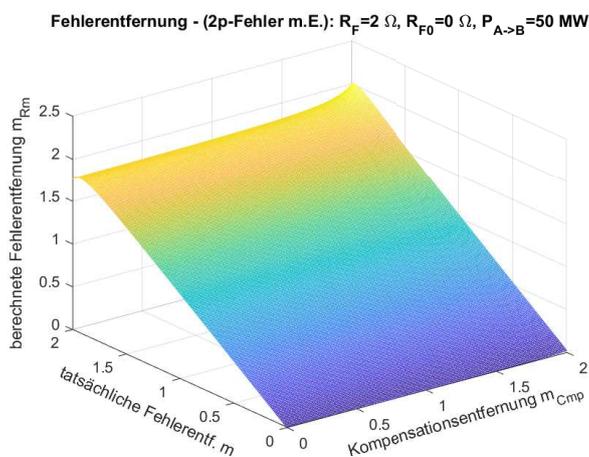


Abbildung C.99.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

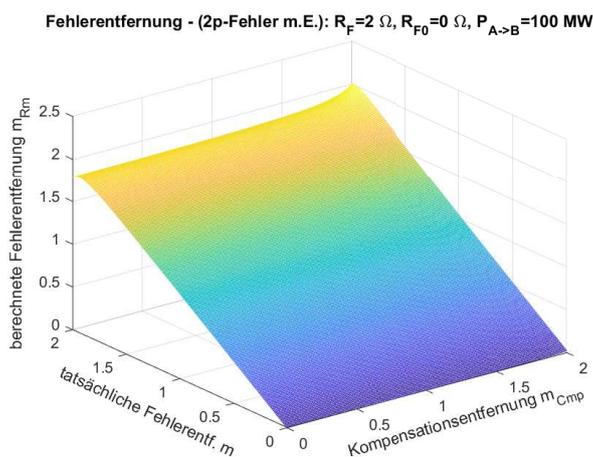


Abbildung C.100.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

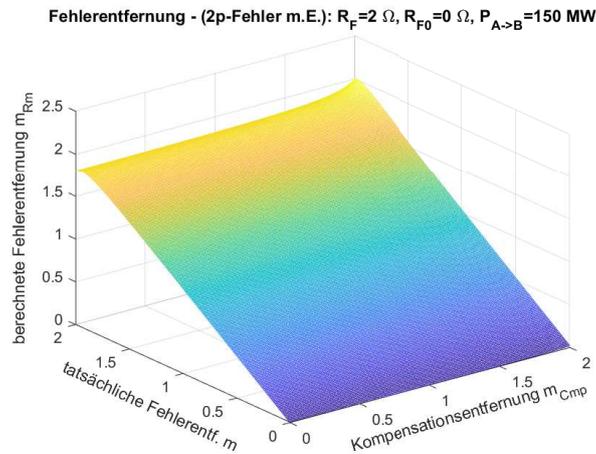


Abbildung C.101.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

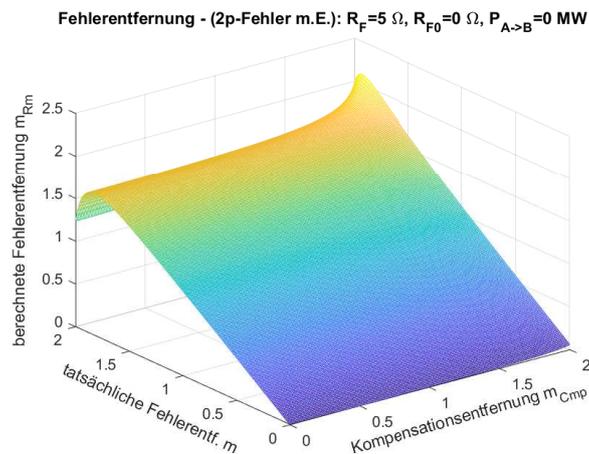


Abbildung C.102.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

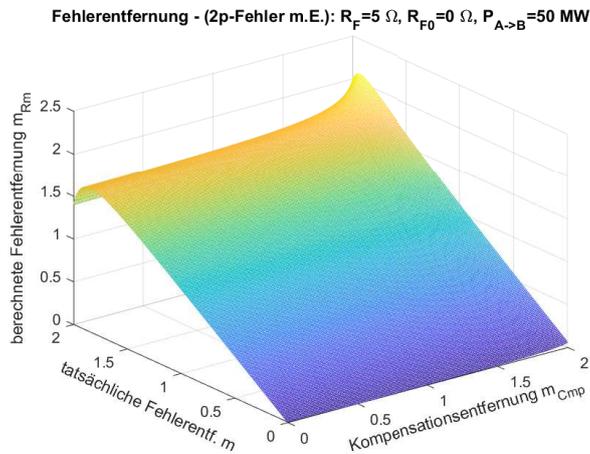


Abbildung C.103.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

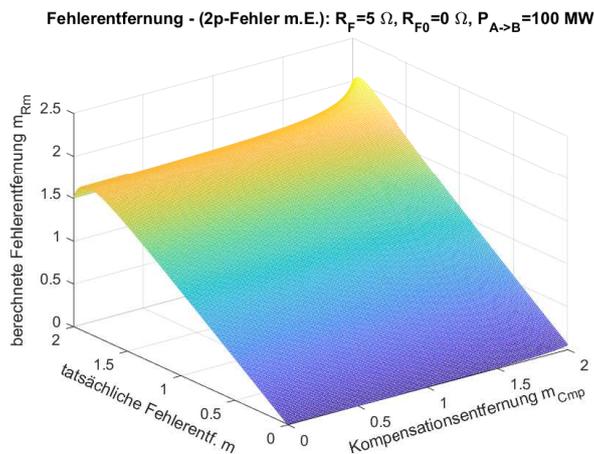


Abbildung C.104.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

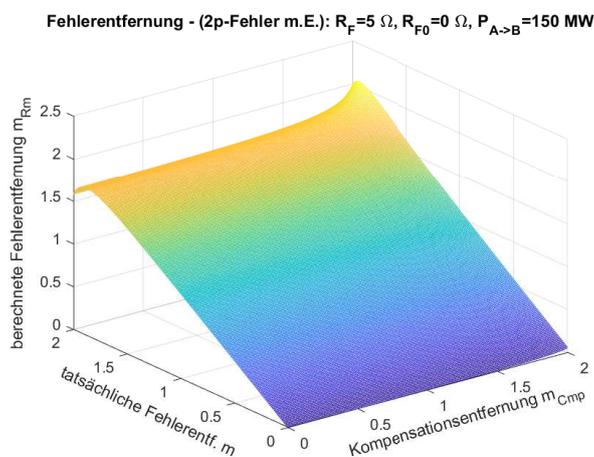


Abbildung C.105.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

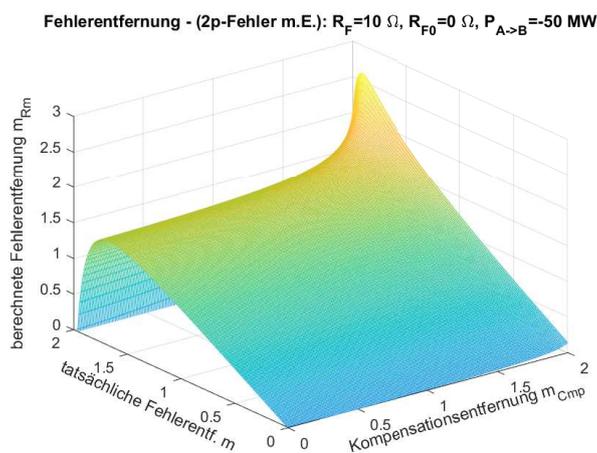


Abbildung C.106.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

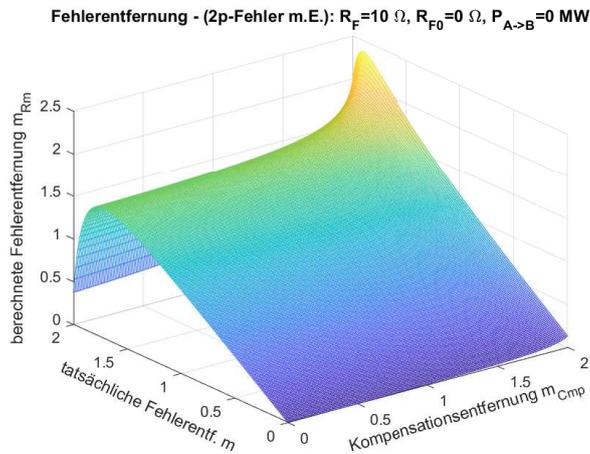


Abbildung C.107.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

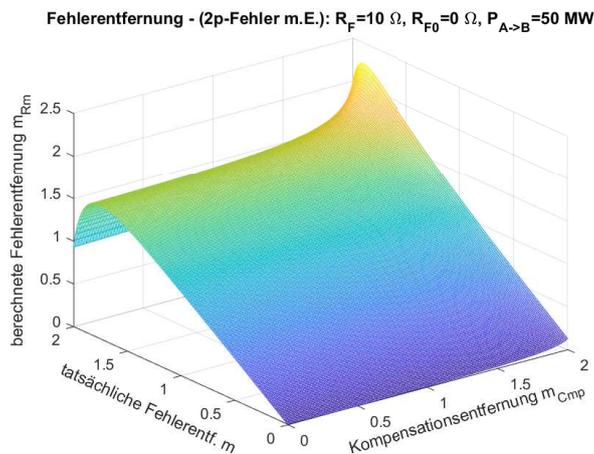


Abbildung C.108.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

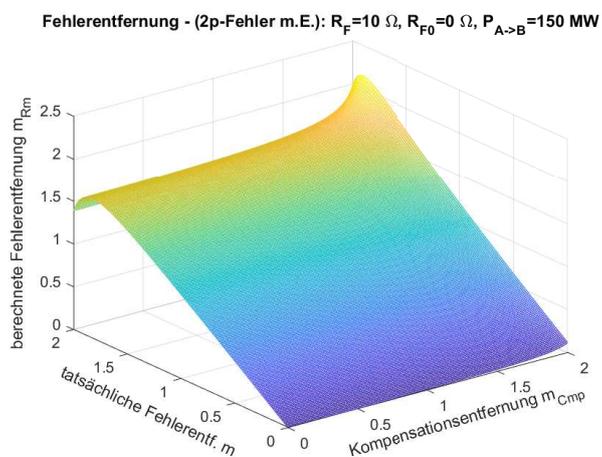


Abbildung C.109.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 150\ \text{MW}$

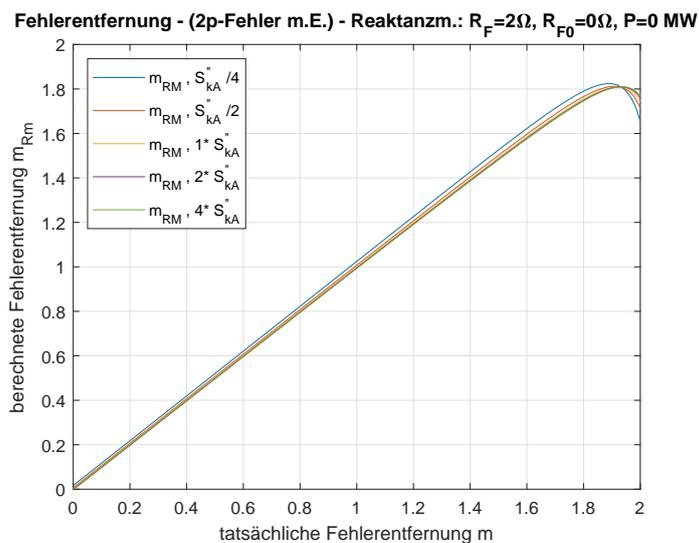


Abbildung C.110.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 0\ \text{MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=50$ MW

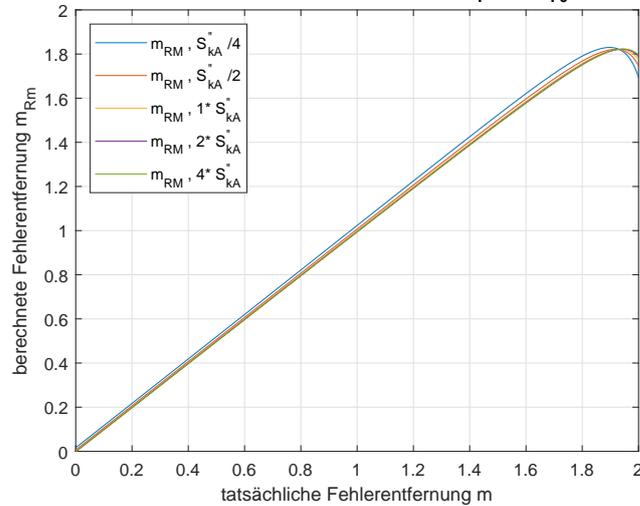


Abbildung C.111.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50$ MW

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=100$ MW

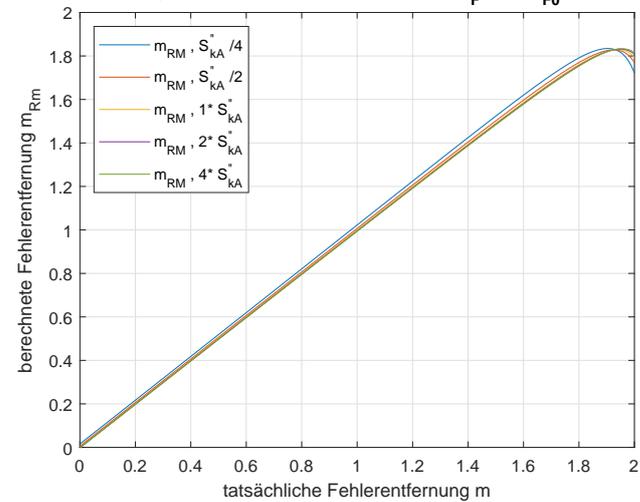


Abbildung C.112.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=150$ MW

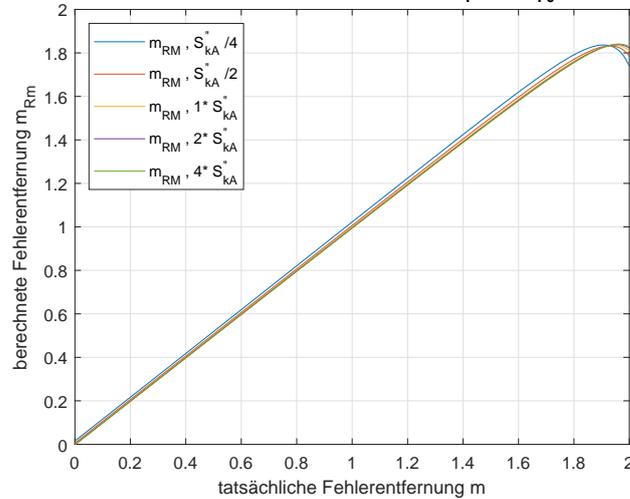


Abbildung C.113.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=-50$ MW

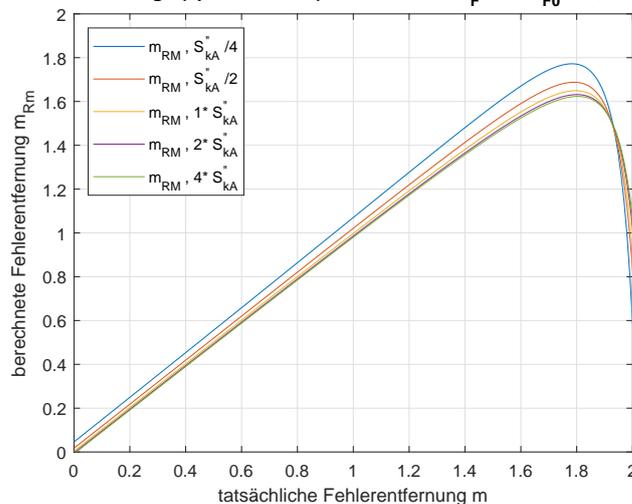


Abbildung C.114.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW

Anhang C. Diagramme

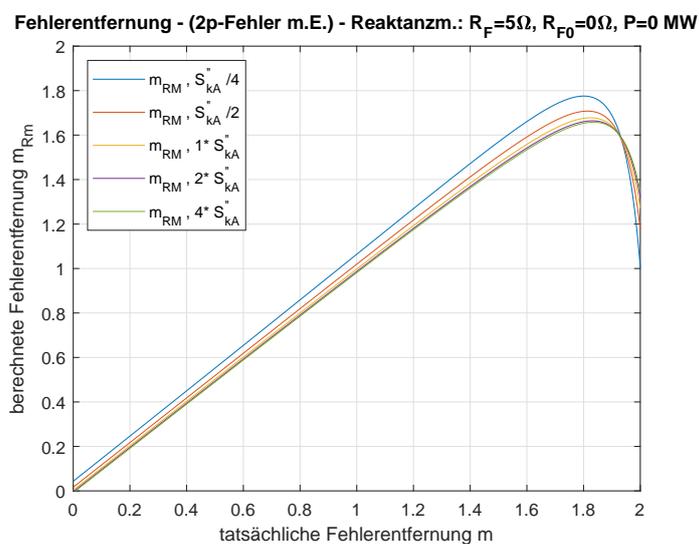


Abbildung C.115.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=100$ MW

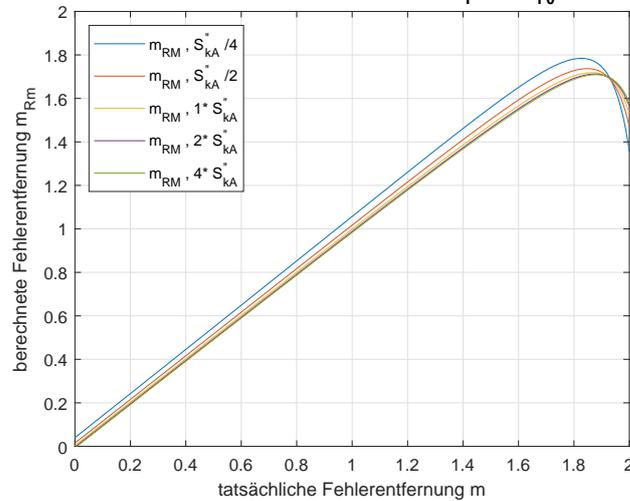


Abbildung C.116.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=150$ MW

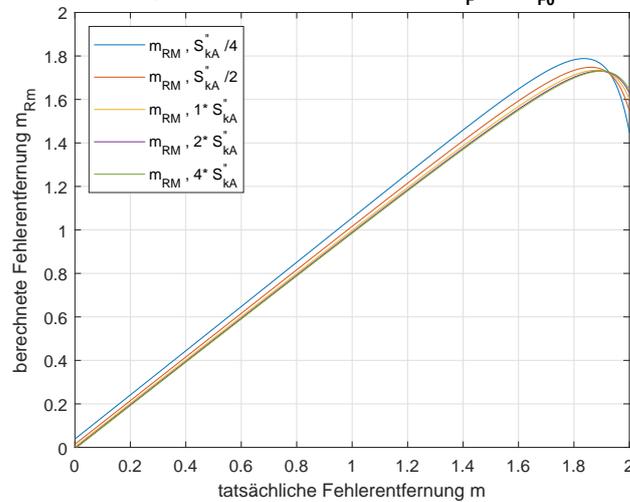


Abbildung C.117.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=-50$ MW

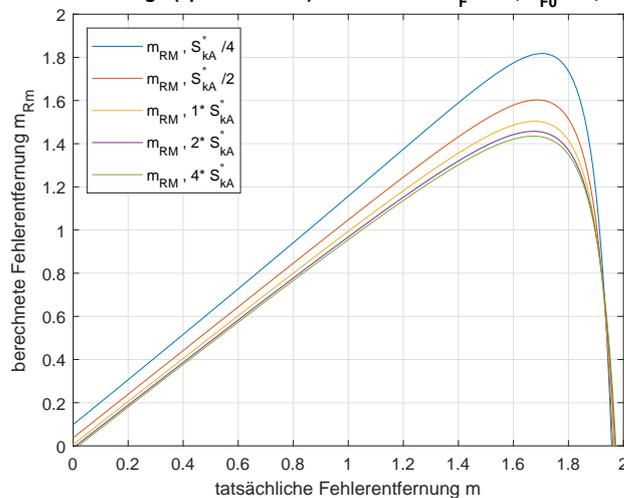


Abbildung C.118.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50$ MW

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=0$ MW

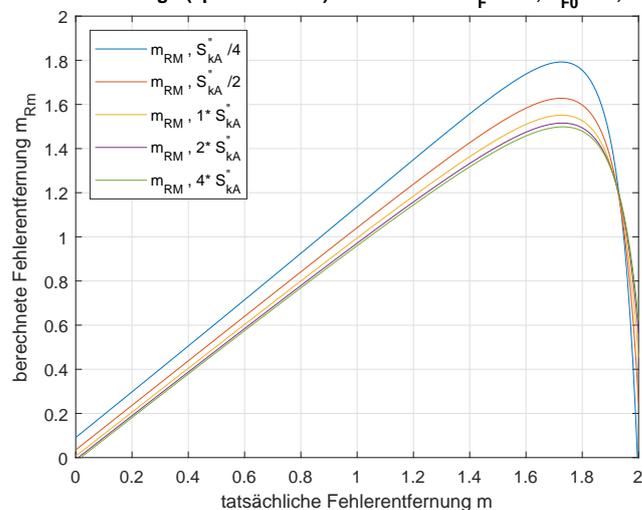


Abbildung C.119.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0$ MW

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=100$ MW

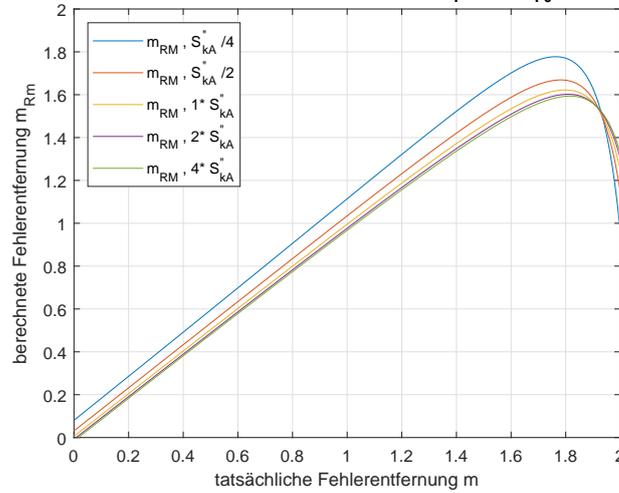


Abbildung C.120.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100$ MW

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10\Omega$, $R_{F0}=0\Omega$, $P=150$ MW

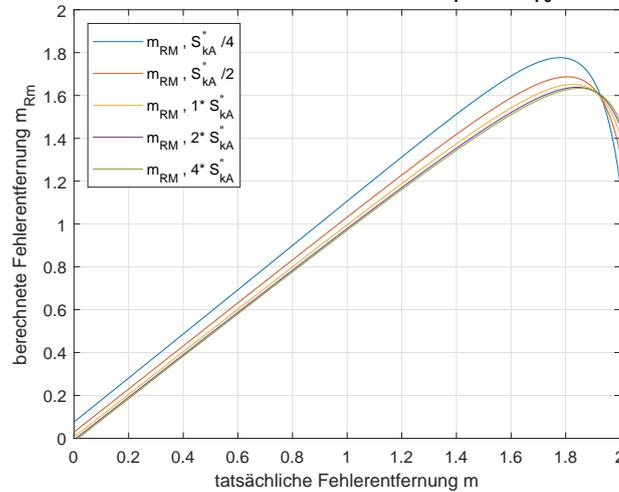


Abbildung C.121.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150$ MW

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=0 \text{ MW}$

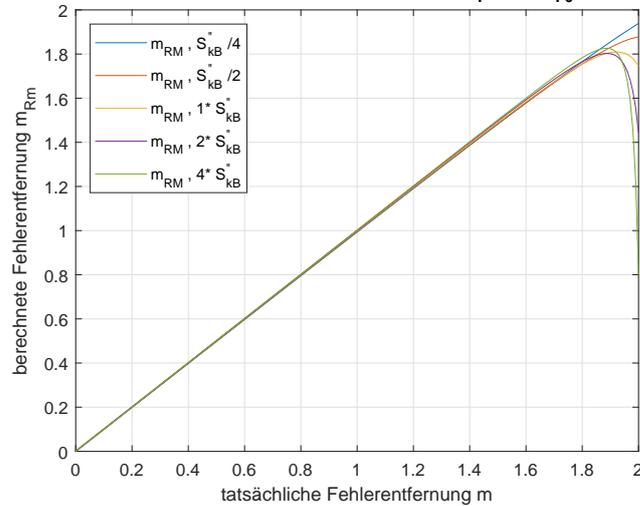


Abbildung C.122.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=50 \text{ MW}$

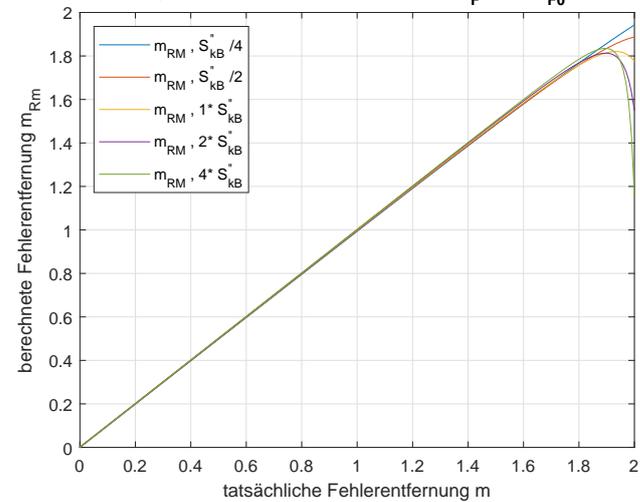


Abbildung C.123.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=100 \text{ MW}$

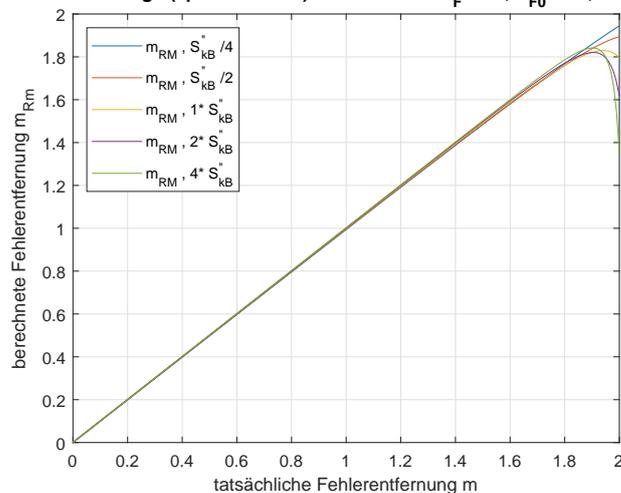


Abbildung C.124.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=2 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=150 \text{ MW}$

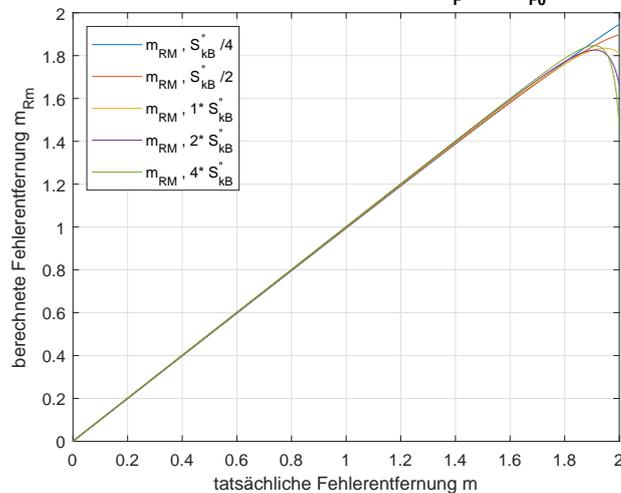


Abbildung C.125.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=-50 \text{ MW}$

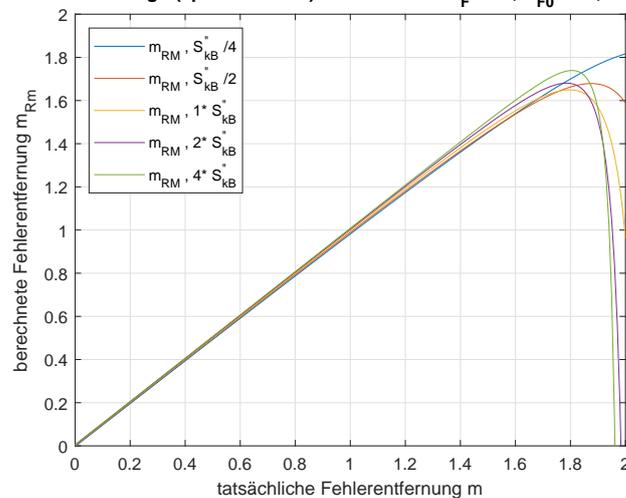


Abbildung C.126.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=0 \text{ MW}$

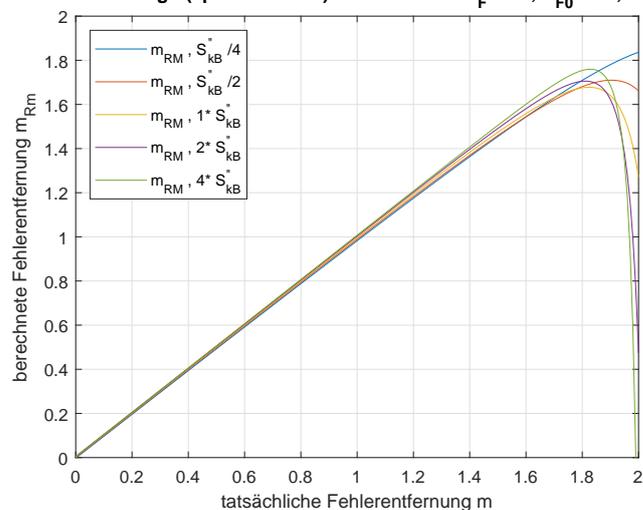


Abbildung C.127.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=50 \text{ MW}$

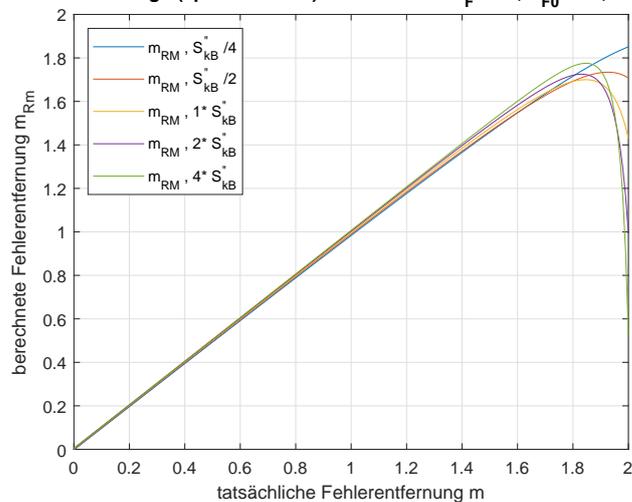


Abbildung C.128.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=100 \text{ MW}$

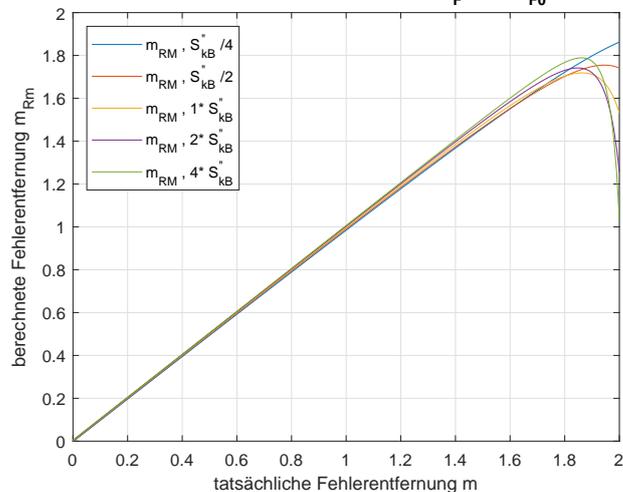


Abbildung C.129.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=5 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=150 \text{ MW}$

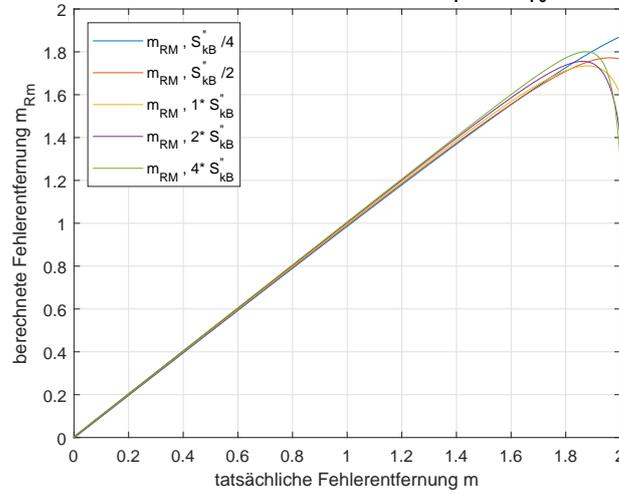


Abbildung C.130.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=50 \text{ MW}$

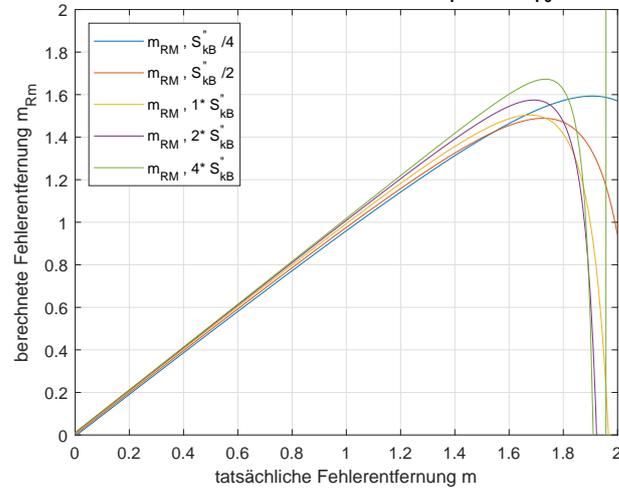


Abbildung C.131.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=0 \text{ MW}$

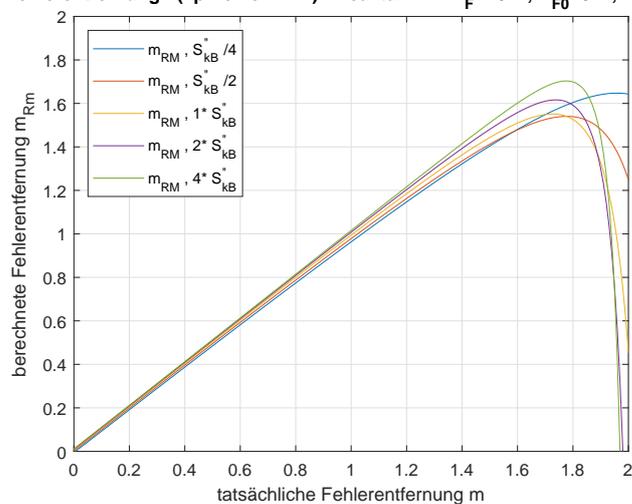


Abbildung C.132.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Fehlerentfernung - (2p-Fehler m.E.) - Reaktanzm.: $R_F=10 \Omega$, $R_{F0}=0 \Omega$, $P=50 \text{ MW}$

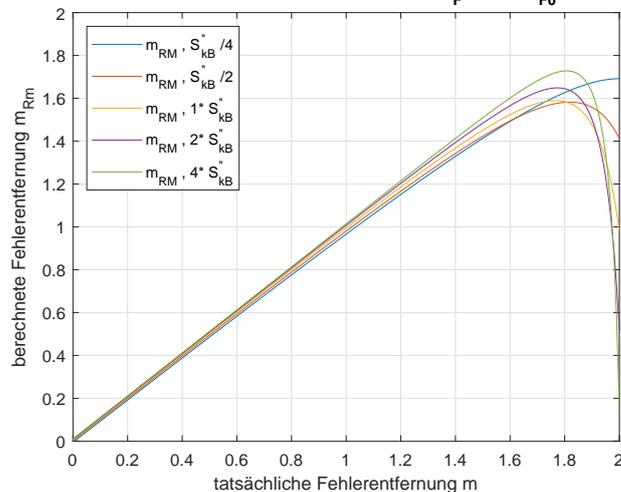


Abbildung C.133.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

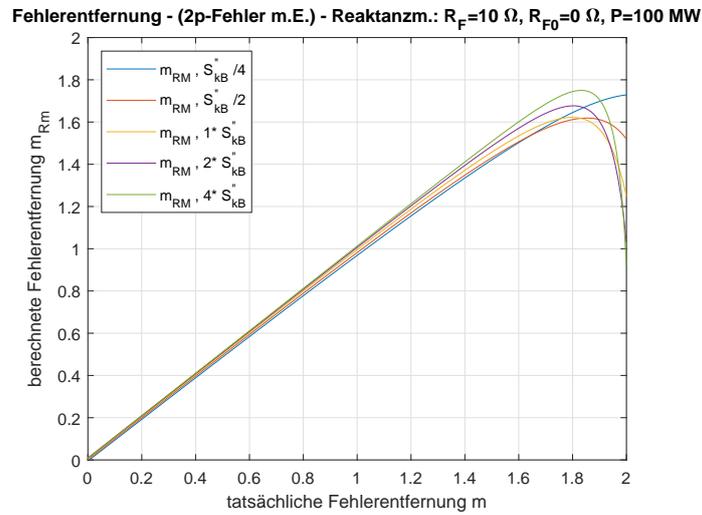


Abbildung C.134.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kB}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 2-poligen Fehler mit Erdberührung, einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Ergebnisse des 3-poligen Fehlers

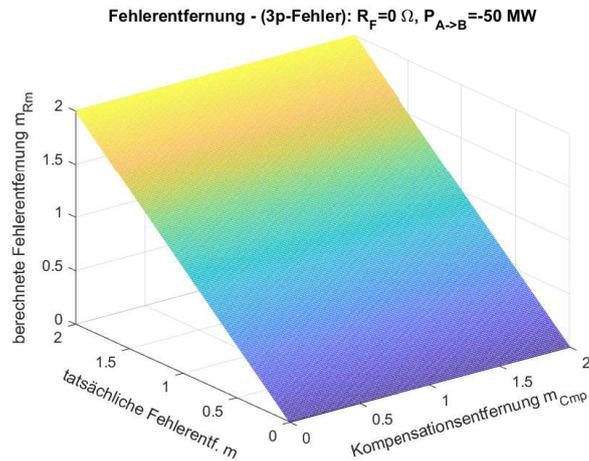


Abbildung C.135.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

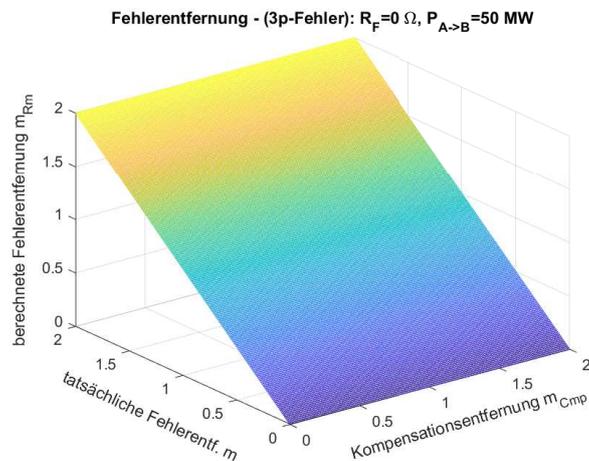


Abbildung C.136.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

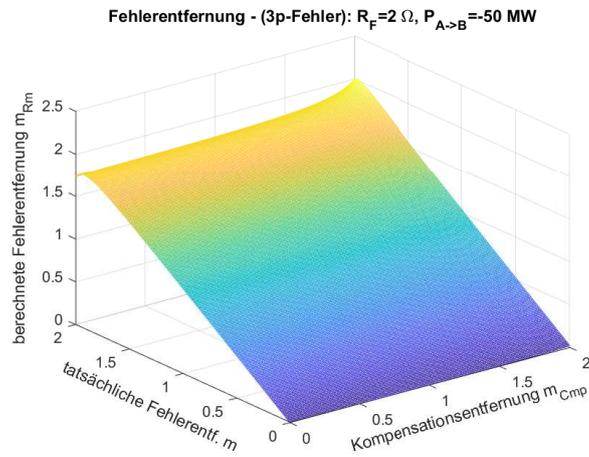


Abbildung C.137.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

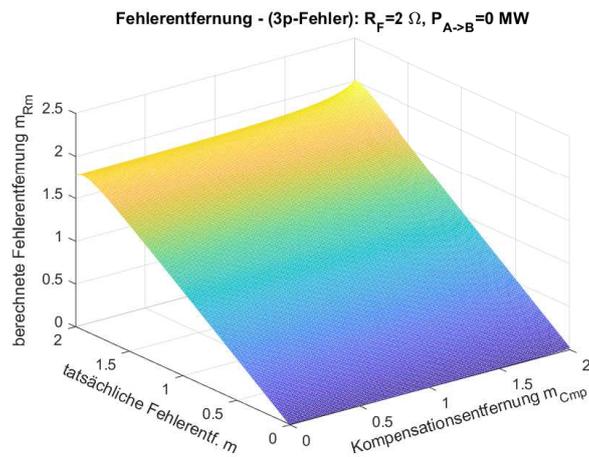


Abbildung C.138.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

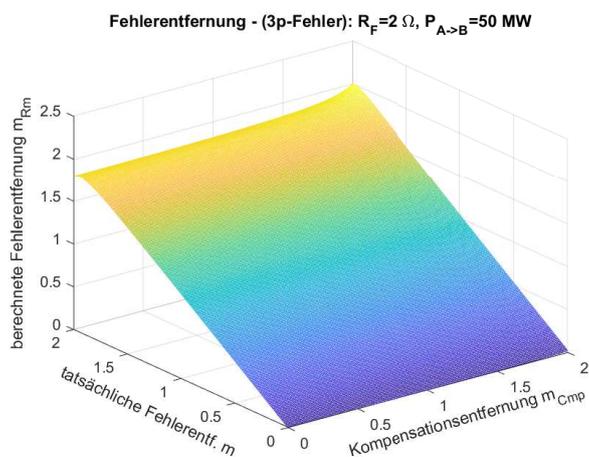


Abbildung C.139.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 50\ \text{MW}$

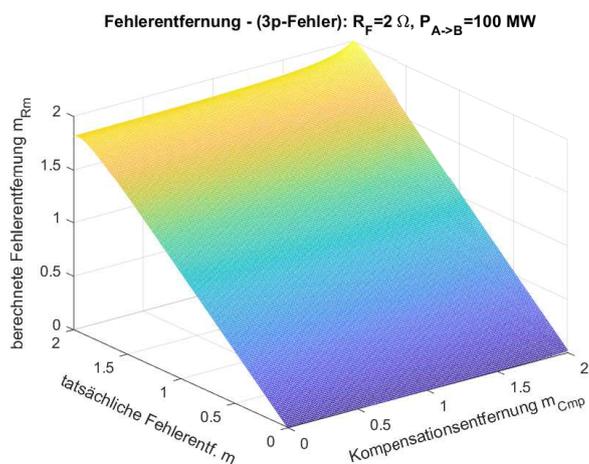


Abbildung C.140.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2\ \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A\rightarrow B} = 100\ \text{MW}$

Anhang C. Diagramme

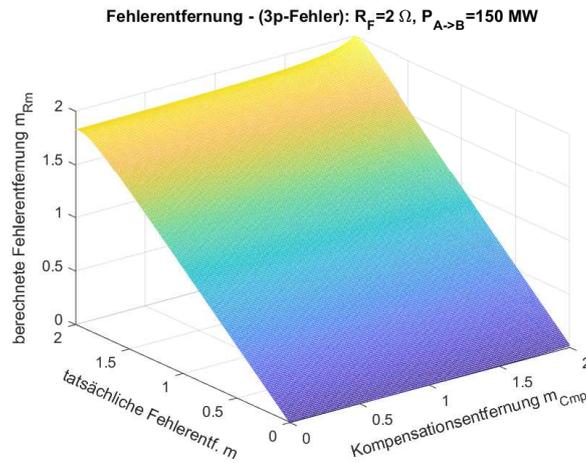


Abbildung C.141.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

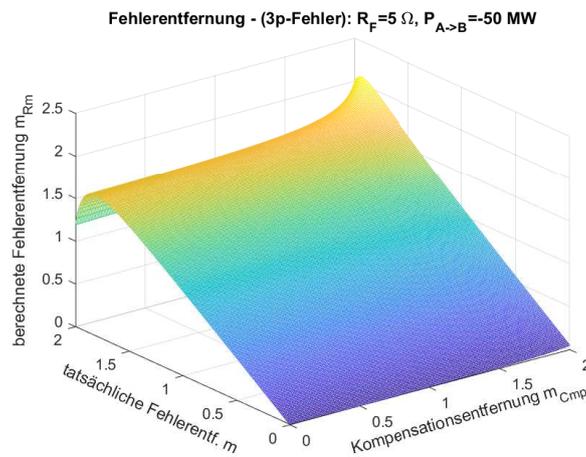


Abbildung C.142.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

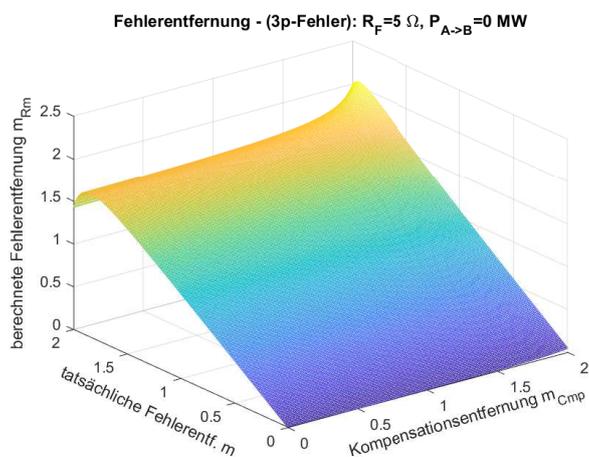


Abbildung C.143.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

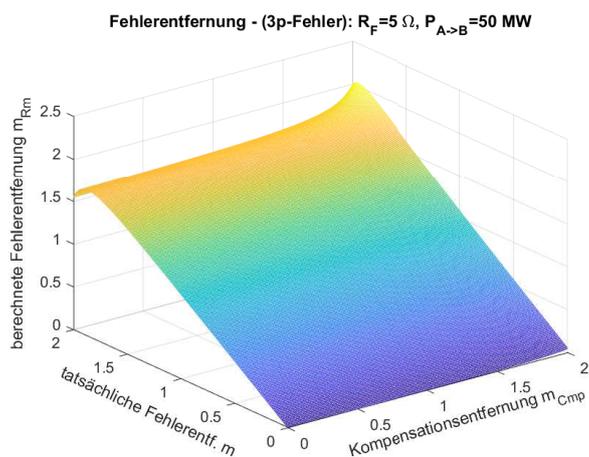


Abbildung C.144.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

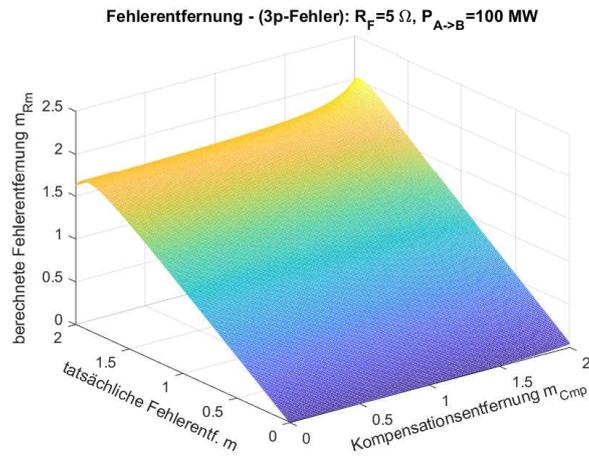


Abbildung C.145.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

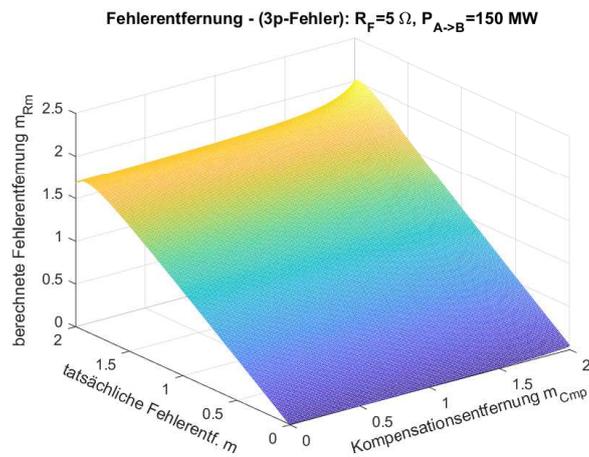


Abbildung C.146.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

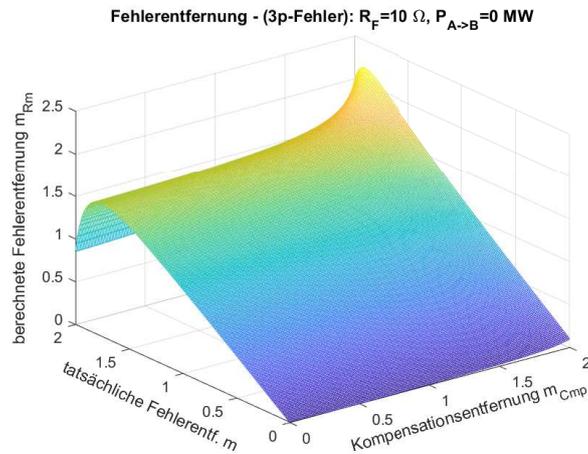


Abbildung C.147.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

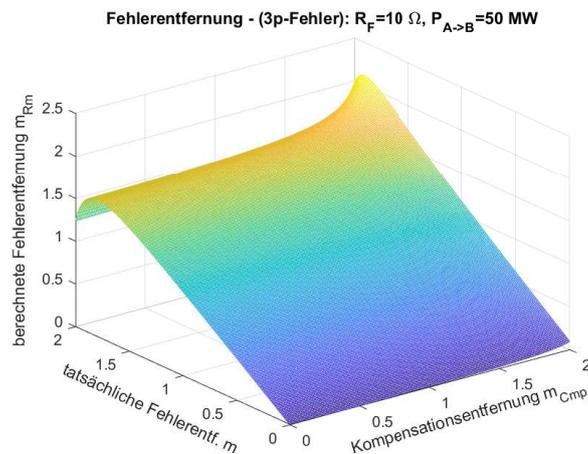


Abbildung C.148.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

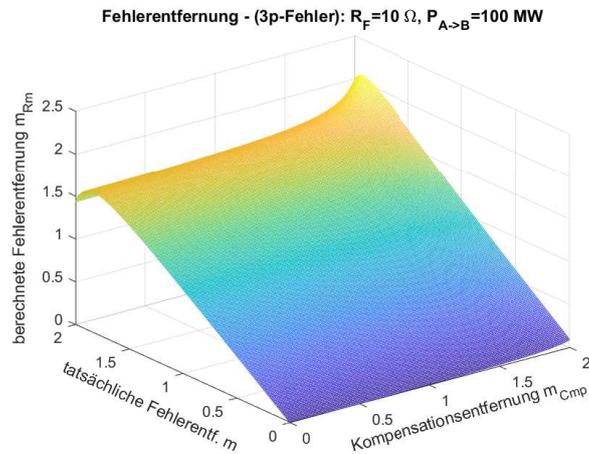


Abbildung C.149.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, m_{Cmp})$, bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

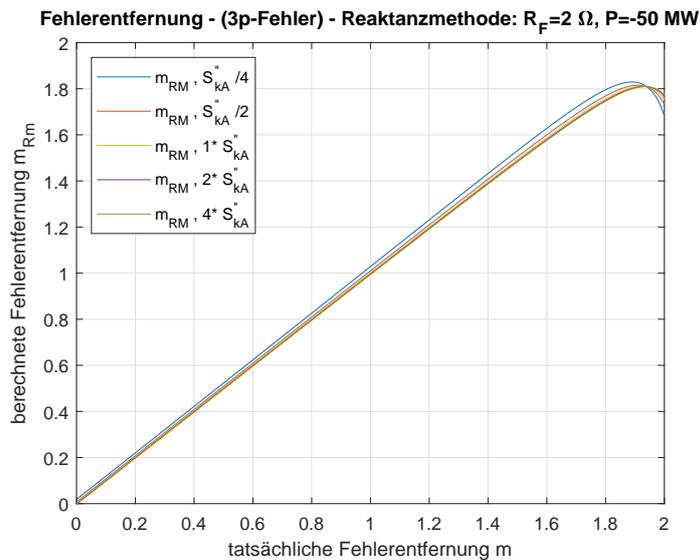


Abbildung C.150.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

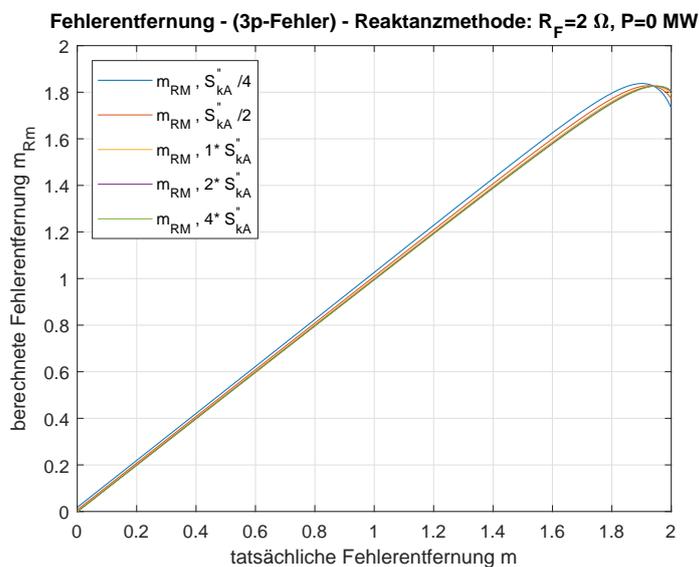


Abbildung C.151.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

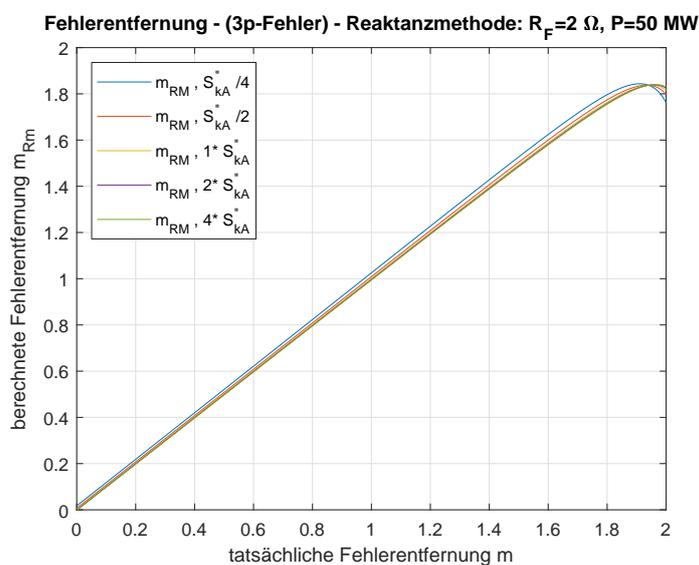


Abbildung C.152.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

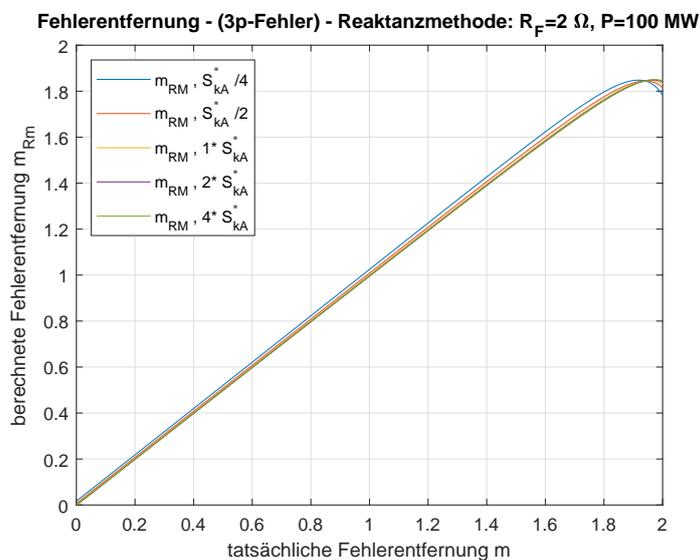


Abbildung C.153.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

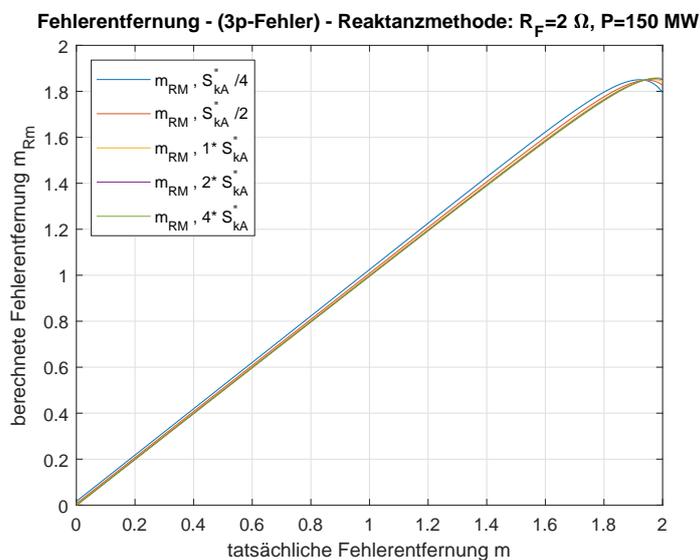


Abbildung C.154.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

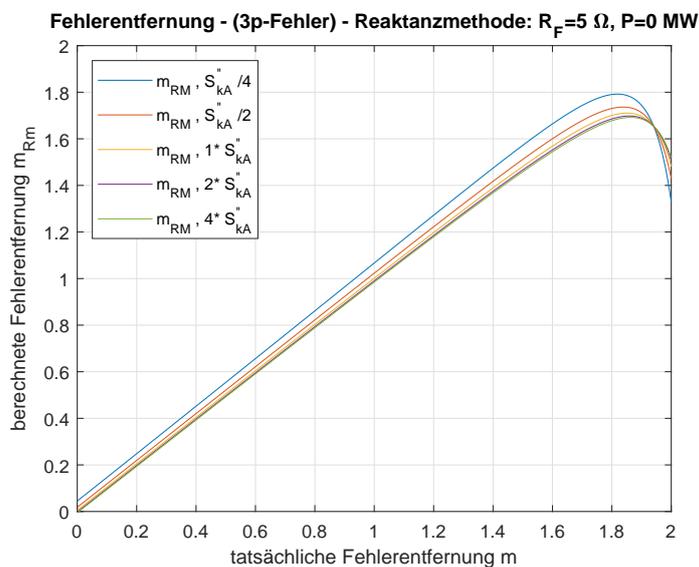


Abbildung C.155.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

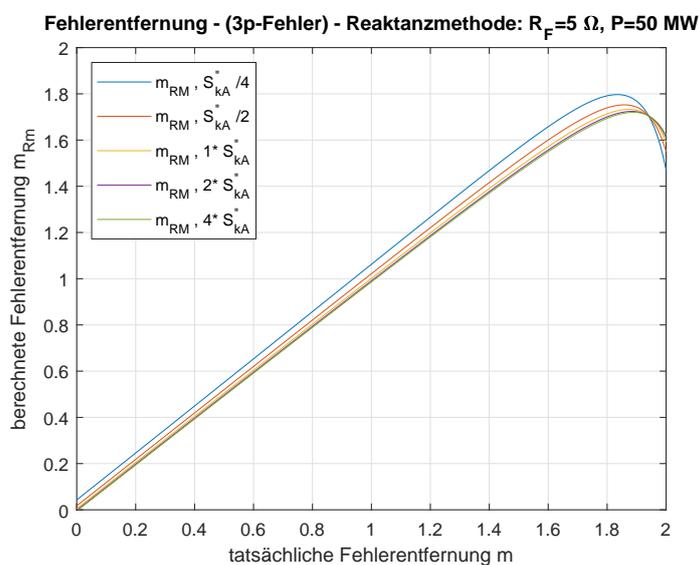


Abbildung C.156.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

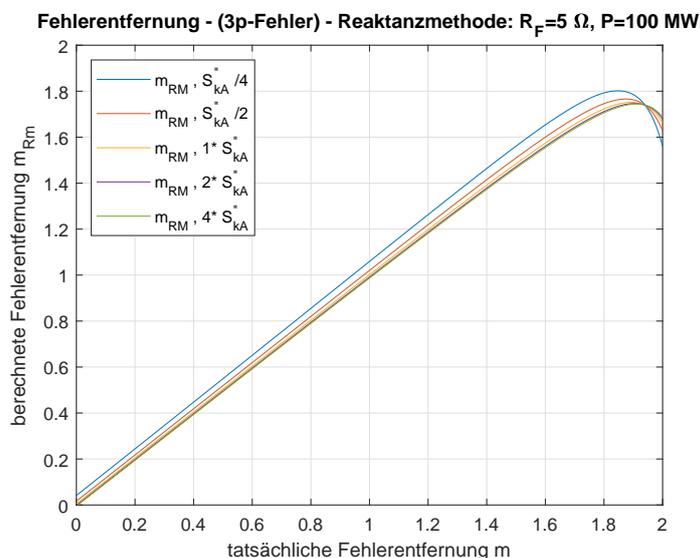


Abbildung C.157.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

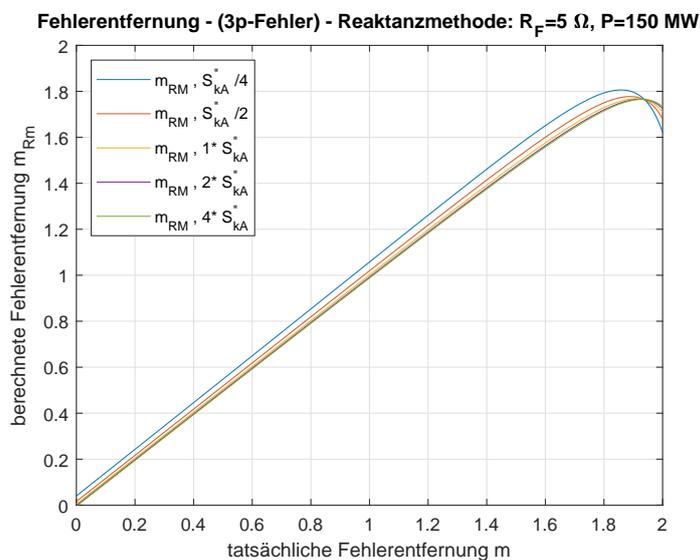


Abbildung C.158.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kA}'')$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

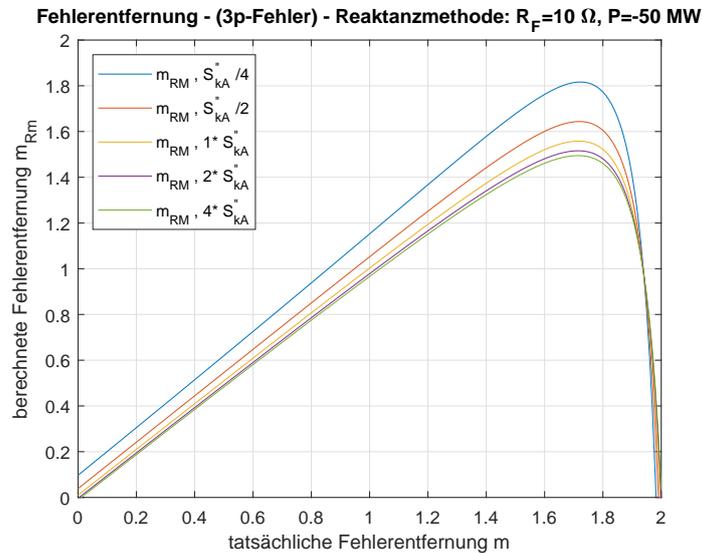


Abbildung C.159.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

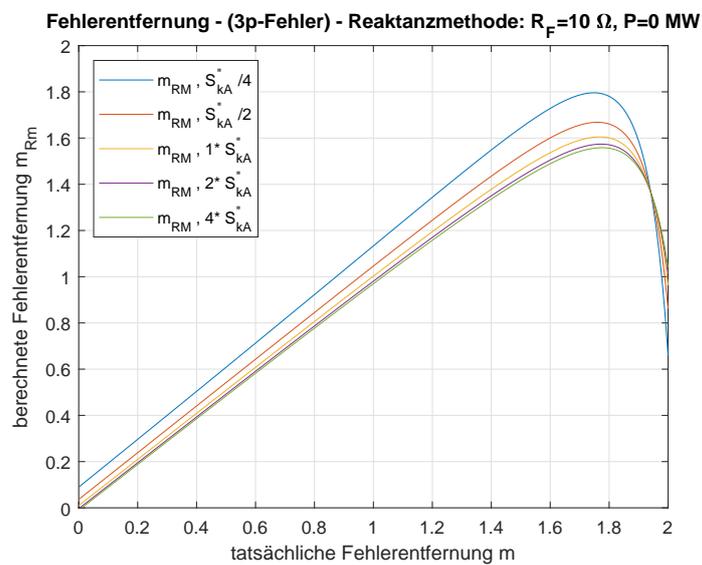


Abbildung C.160.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

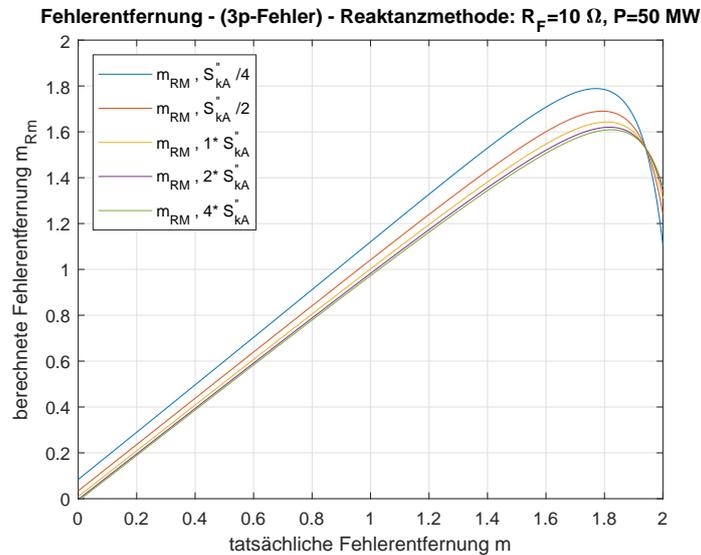


Abbildung C.161.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

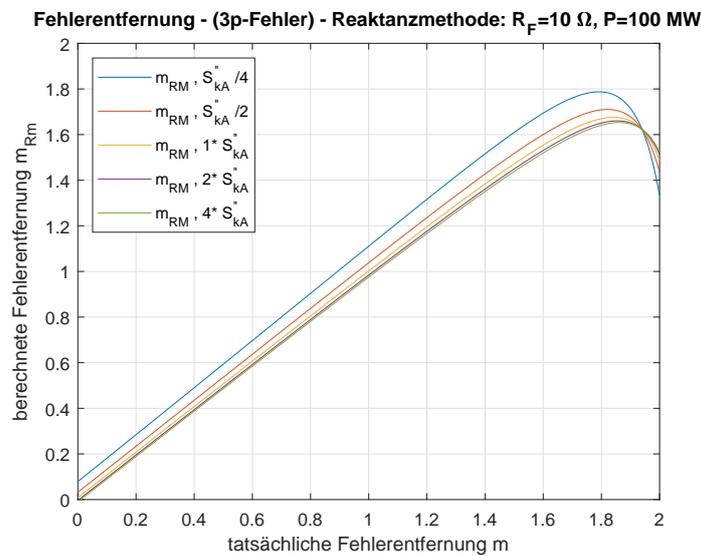


Abbildung C.162.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kA})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

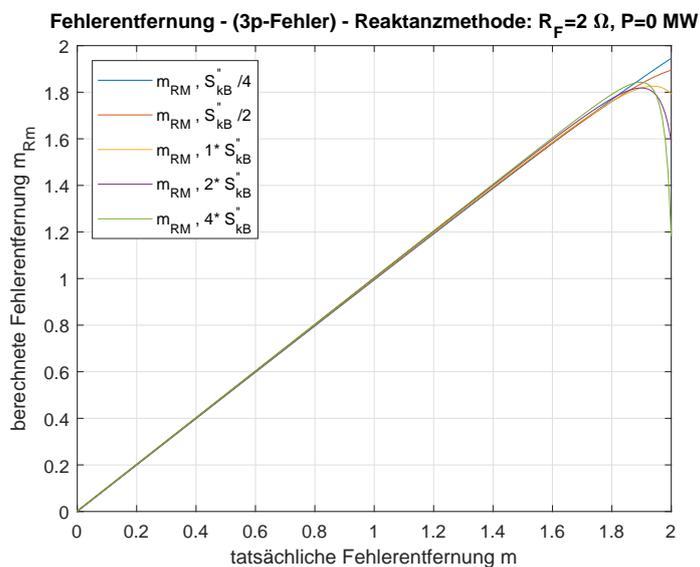


Abbildung C.163.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kB}^+)$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

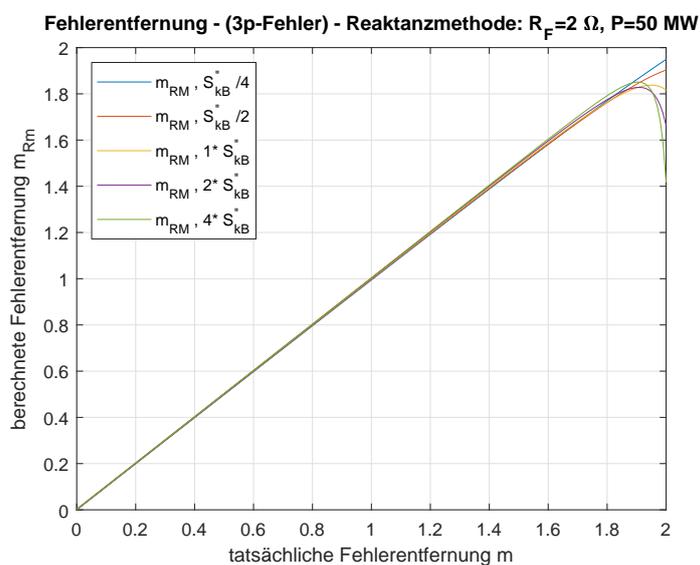


Abbildung C.164.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S_{kB}^+)$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

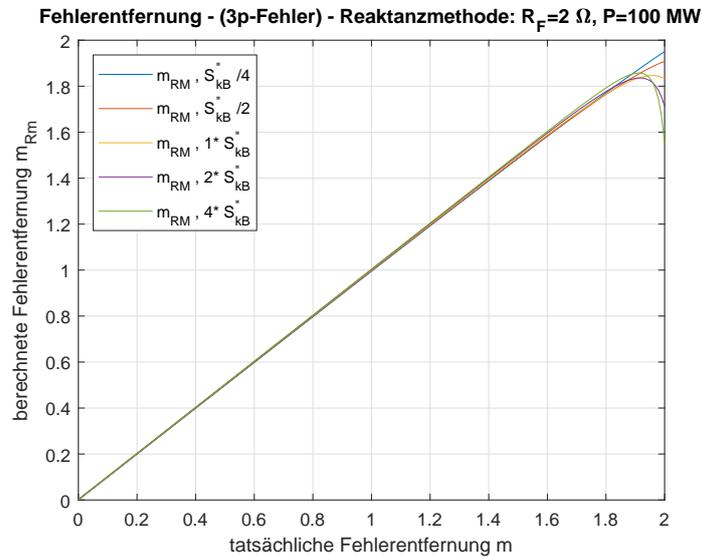


Abbildung C.165.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

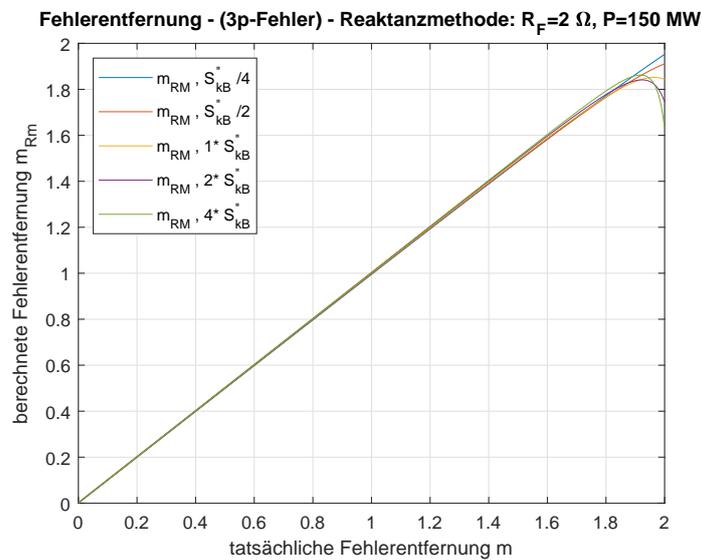


Abbildung C.166.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 2 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

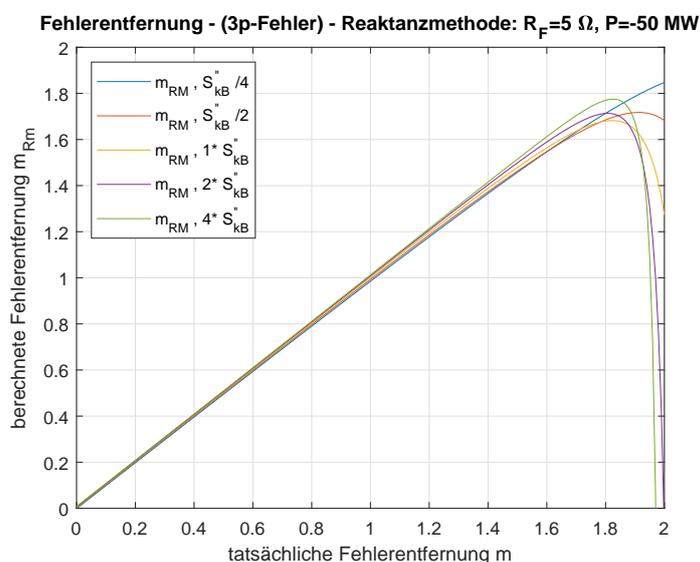


Abbildung C.167.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = -50 \text{ MW}$

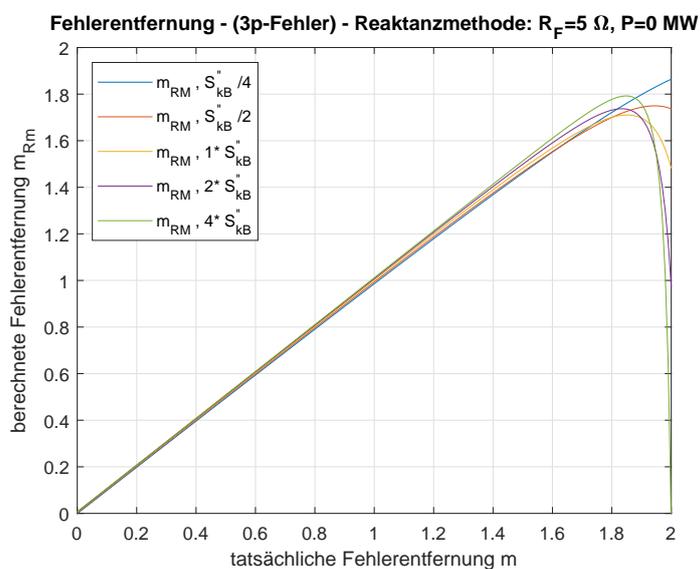


Abbildung C.168.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

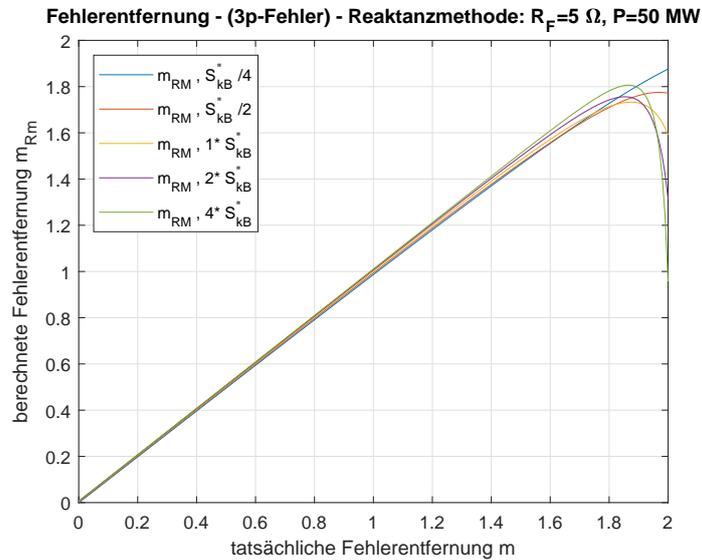


Abbildung C.169.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

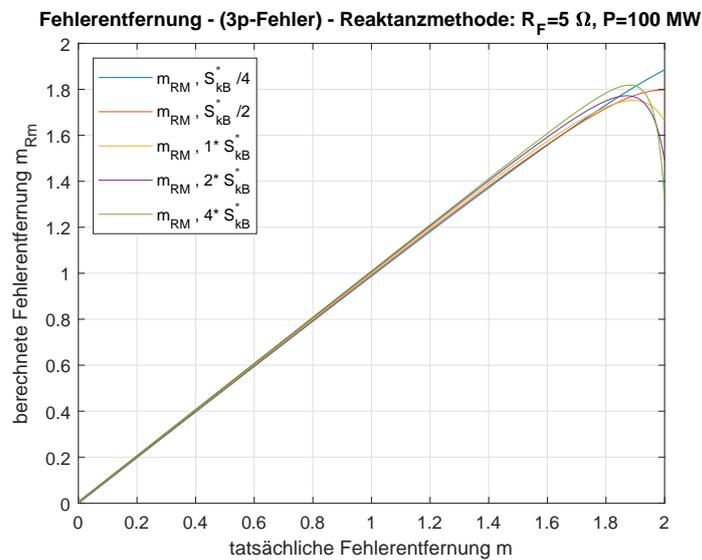


Abbildung C.170.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

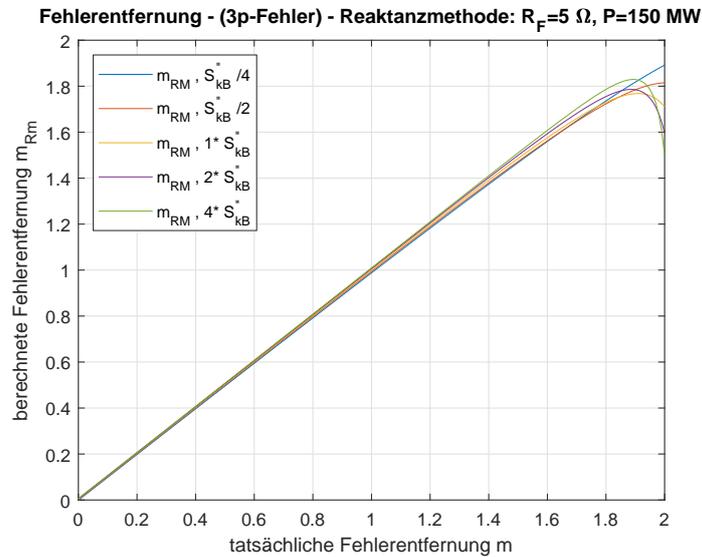


Abbildung C.171.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 5 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 150 \text{ MW}$

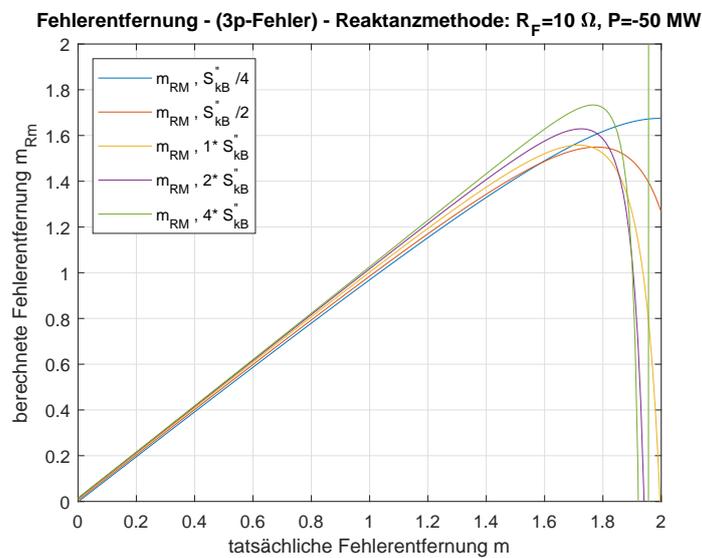


Abbildung C.172.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

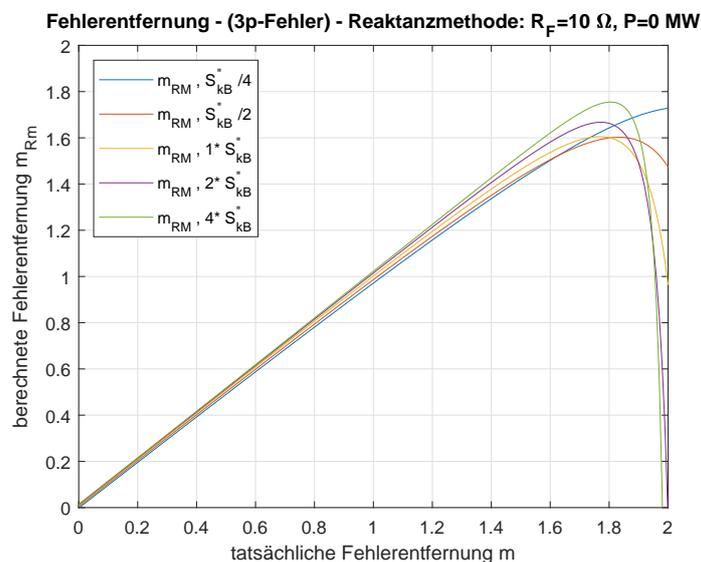


Abbildung C.173.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 0 \text{ MW}$

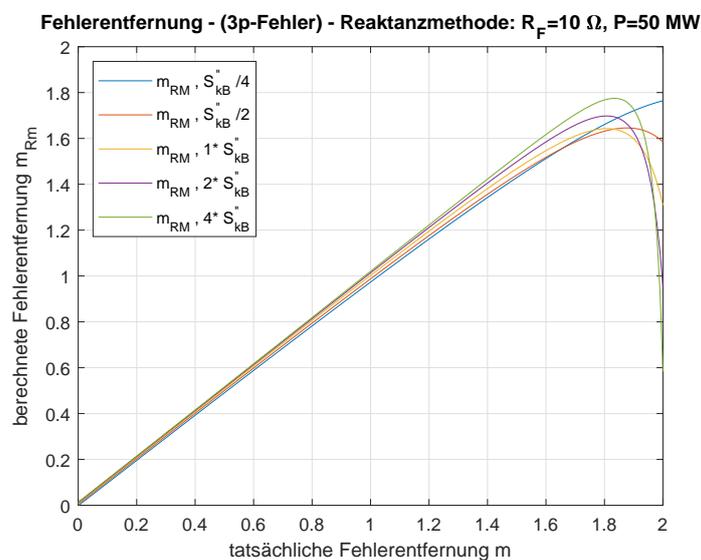


Abbildung C.174.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{Rm} = f(m, S''_{kB})$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 50 \text{ MW}$

Anhang C. Diagramme

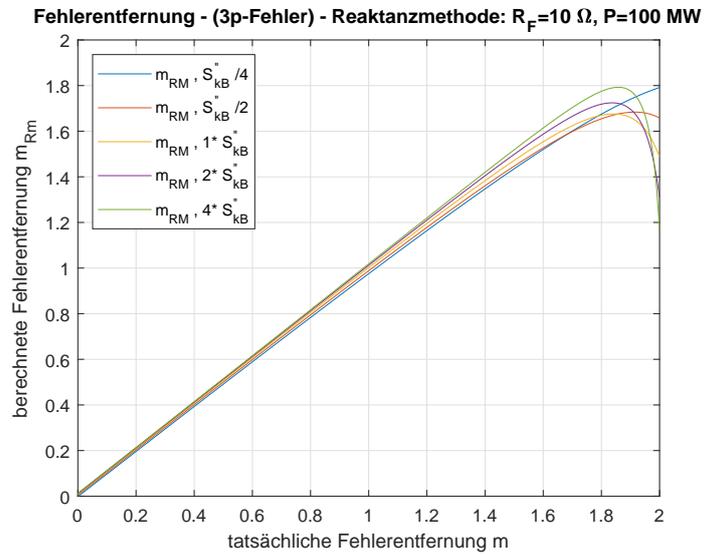


Abbildung C.175.: Berechnete Fehlerentfernung der Reaktanzmethode $m_{RM} = f(m, S_{kB}^+)$ (mit $m_{Cmp} = 0,8$), bei einem 3-poligen Fehler mit einem Fehlerwiderstand von $R_F = 10 \Omega$ und einer übertragenen Leistung von $P_{A \rightarrow B} = 100 \text{ MW}$