

# **Simulation von Erdschlüssen in gelöschten Netzen zum Zweck der Erdschlussendedetektion**

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.- Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert  
DI Fuchs Emanuel

Vorgelegt von

Gebhard Siegfried

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

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

Graz - 2010



## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am .....

.....  
**(Unterschrift)**

## **Danksagung**

Allen voran geht mein Dank an meine Frau Franziska und meine Eltern die mich während meines Studiums stets großartig unterstützten und mir den nötigen Rückhalt gegeben haben.

Dem gesamten Personal des Institutes für elektrische Anlagen mit Institutsvorstand Univ.-Prof. DI Dr. tech. Lothar Fickert möchte ich für das angenehme Arbeitsklima und die stets offene Tür für Anliegen jeglicher Art danken. Insbesondere denke ich dabei an meinen Betreuer DI Emanuel Fuchs, der mir bei der Durchführung der Diplomarbeit immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Meinen Studienkollegen und Freunden möchte ich danken, für die schönen Stunden die ich mit ihnen gemeinsam während des Studiums verbringen durfte.

## **Kurzfassung**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Modell in Matlab® Simulink® zur Simulation von hochohmigen und niederohmigen Erdschlüssen erstellt um in weiterer Folge die Prototypsoftware damit zu testen und Verbesserungen für den Prototypalgorithmus zu finden. Um die Gültigkeit dieses Modells aufzuzeigen wurden Verifikationen hinsichtlich des Einschwingvorganges, des stationären Fehlerstromes über die Fehlerstelle sowie der Verstimmung durchgeführt.

Entsprechend dem Stand der Technik erfolgt eine Erdschlussdetektion anhand der Verlagerungsspannung beim Überschreiten eines Grenzwertes. Die Erdschlussende Detektion erfolgt durch das Unterschreiten dieses Grenzwertes. Diese Art der Erdschlussende-Erfassung ist äußerst ungenau, wodurch keine exakte Erfassung der Erdschlussdauer möglich ist. Um dieses Problem zu beheben wurde ein Prototyp am Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz entwickelt, der aufgrund eines neuen Verfahrens in der Lage ist, das Erdschlussende exakt zu erkennen.

## **Abstract**

This is the abstract of my diploma thesis in English.

In this thesis, a model is created in Matlab ® Simulink ® to simulate high impedance and low impedance earth faults to test them, the prototype software with it and to find improvements for the prototype algorithm. To demonstrate the validity of this model, verifications of the transient effect of steady current at fault location and detuning were tested.

According to the state of technics earth fault detection occurs with the help of path tension when the limit value is over-run. The earth fault detection occurs through the under-running of this limit value. This method of detecting the ground fault is very inaccurate hence an exact recording of the earth fault is not possible. To resolve this problem, a prototype was developed at the Institute of Power Systems at the Technical University of Graz, which is due to a new process in a position to recognize the earth fault exactly.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zeichenerklärung</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>12</b>
2.1    Niederohmig geerdetes Netz.....	12
2.2    Isoliertes Netz.....	13
2.3    Gelöschtes Netz.....	14
2.3.1    Allgemeines.....	14
2.3.2    Verstimmung.....	16
2.3.3    Dämpfung (d).....	17
2.3.4    Betrachtung zur Löschgrenze bei gekoppelten Netzen.....	17
2.3.5    Löschgrenze ( $I_G$ ).....	18
2.3.6    Sternpunktverlagerungsspannung ( $U_{NE}$ ).....	19
2.3.7    Erdschlussreststrom.....	20
2.3.8    Die vier Phasen eines Erdschlusses.....	22
2.3.9    Ausschwingvorgang des Erdschlusses.....	24
2.3.10    Kenngrößen aus dem Ausschwingvorgang.....	25
2.3.11    Verhalten des Netzes im Fehlerfall.....	27
2.3.12    Beeinflussung durch parallel geführte Leitungen.....	28
<b>3 Berechnungsgrundlagen</b> .....	<b>29</b>
3.1    Symmetrische Komponenten.....	29
3.2    Mathematische Zusammenhänge.....	31
3.3    Freileitungen und Kabel.....	32
3.4    Der Erdschluss in Symmetrischen Komponenten.....	34
<b>4 Methoden zur Erdschlussdetektion</b> .....	<b>35</b>
4.1    Änderung der Kreisfrequenz $\omega(t)$ .....	36

4.2	Änderung des Stromes im Gegensystem.....	37
4.3	Oberschwingungsverhältnisse .....	38
4.4	Sensitiv-Kriterium .....	39
<b>5</b>	<b>Verifikation .....</b>	<b>40</b>
5.1	Einfacher Netz- Aufbau .....	42
5.1.1	Berechnung.....	42
5.2	Einfacher Netz- Aufbau mit Leitungskapazitäten .....	43
5.3	Netz- Aufbau mit Leitungskapazitäten und Koppelimpedanzen.....	45
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	46
5.5	Verifikation eines vollständigen Modells.....	47
5.5.1	Überprüfung der Verstimmung.....	49
5.5.2	Überprüfen des Einschwingvorganges .....	50
5.5.3	Ausschwingvorgang .....	55
5.5.4	Überprüfen des Fehlerstromes .....	57
5.5.5	Vergleich des THN von $U_{NE}$ .....	57
<b>6</b>	<b>Auswertung .....</b>	<b>59</b>
6.1	Fehlerwiderstand: 100 $\Omega$ .....	61
6.1.1	Häufigkeit der angesprochenen Methoden .....	62
6.2	Fehlerwiderstand: 1 k $\Omega$ .....	64
6.2.1	Häufigkeit der angesprochenen Methoden .....	65
6.3	Fehlerwiderstand: 10 k $\Omega$ .....	67
6.3.1	Häufigkeit der angesprochenen Methoden .....	68
6.4	Fehlerwiderstand: 40 k $\Omega$ .....	70
6.4.1	Häufigkeit der angesprochenen Methoden .....	71
6.5	Ergebnisse .....	73
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>74</b>
7.1	Einsatzmöglichkeit des Prototypen .....	74

<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>76</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>79</b>



## Zeichenerklärung

$0, 1, 2$ , ,	Indizes für Null-, Mit- und Gegensystem
a	Drehoperator
$C_E$	Kapazität Freileitung-Erde
$C_{EL1, EL2, EL3}$	Leiter-Erde Kapazitäten
$C_K$	Kapazität Kabel-Erde
d	Dämpfung
$f_A$	Überlagerte Frequenz des Ausschwingvorgangs
$f_N$	Betriebsfrequenz
$f_s$	Frequenz der Schwebung
$G_E$	ohmsche Querableitwert
$I_1, I_2, I_3$	Phasenströme
$I_C$	Kapazitiver Erdschlussstrom
$I_{CF}$	kapazitiver Anteile über die Freileitung
$I_{CK}$	kapazitiver Anteile über die Kabel
$I_G$	Löschgrenze
$I_K$	Kompensationsstrom ( $I_L$ und $I_{RD}$ )
$I_N$	Netzstrom ( $I_C$ und $I_{RQ}$ )
$I_{os}$	Oberschwingungsströme
$I_{RD}$	Löschspulenverluststrom
$I_{rest}$	Erdschlussreststrom
$I_{RQ}$	Querableitverluststrom
$I_W$	Wattreststrom
k	Unsymmetriefaktor
$L_P$	Induktivität der Petersenspule
N	Anzahl der Abtastwerte pro Periode
$R_E$	Querableitwiderstant
$R_P$	ohmscher Widerstand der Petersenspule
$R_Q$	Querableitwiderstand des Netzes
$\underline{S}$	Symmetrierungsmatrix
$\underline{I}$	Entsymmetrierungsmatrix
$t_1$	Zeitpunkt der Messung von $U_{NE1}$
$t_2$	Zeitpunkt der Messung von $U_{NE2}$
$U_1, U_2, U_3$	Phasenspannungen
$U_L$	Phasenspannung

$U_N$	Nennspannung
$U_{NE}$	Verlagerungsspannung
$U_{NE(n)}$	Effektivwert der n-Oberwelle der Verlagerungsspannung
$v$	Verstimmung
$\omega_0$	Kreiseigenfrequenz
$\omega_N$	Kreisnennfrequenz
$\Delta C_0$	Kapazitive Unsymmetrie
$T$	Zeitkonstante der abklingenden Schwingung

# 1 Einleitung

Etwa 70-80 % der Fehler in gelöscht betriebenen Netzen mit hohem Freileitungsanteil sind sogenannte Erdschluss-„Wischer“. Gelöscht betriebene Netze haben den Vorteil, dass sie trotz eines Erdschlusses die Versorgung eines Kunden aufrecht erhalten können. Die Abbildung 2.1 stellt ein gelöschtes Netz mit seinen charakteristischen Kenngrößen, die Leiter-Erde Kapazitäten sowie der regelbaren Kompensationsspule dar. Entsprechend dem Stand der Technik erfolgt die Erdschluss-Detektion anhand der Verlagerungsspannung, durch das Über- bzw. unterschreiten eines Grenzwertes. Üblicherweise liegt dieser Grenzwert zwischen 10% und 30% der Nennspannung  $U_N$  eines Netzes [4][1].

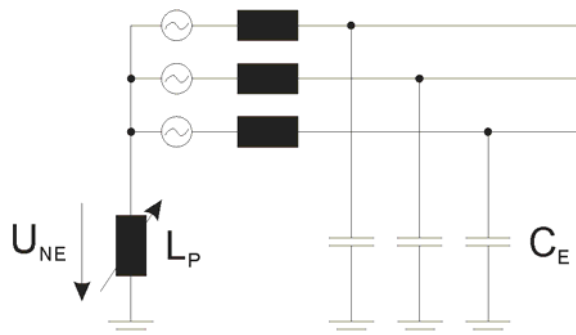


Abbildung 1.1: Vereinfachtes Prinzipsatzschaltbild eines gelöschtes Netz

Eine exakte Erdschlussdauerbestimmung ist nicht möglich, da sich die Zeitpunkte der realen Verlöschung und der Grenzwertunterschreitung stark unterscheiden können. Dadurch kann eine mögliche Trennung der Netze bei einem nicht selbstlöschenden Erdschluss zum falschen Zeitpunkt erfolgen (siehe Kapitel 2.3.4). Der Fehlereintritt wird bei einem niederohmigen Erdschluss durch den Anstieg des Effektivwertes der Verlagerungsspannung  $U_{NE}(t)$  wahrgenommen. Diese Art der Erfassung des Erdschlussanfangs ist, aufgrund des steilen Anstiegs der Verlagerungsspannung, für niederohmige Erdschlüsse präzise. Die Herausforderung liegt nun beim Erfassen des Zeitpunktes des Verlöschens eines Erdschlusses, um schnell auf Änderungen reagieren zu können. Zur sicheren Detektion des Erdschlussendes gibt es neue Methoden, basierend auf der Verlagerungsspannung und den Phasenströmen sowie daraus hergeleiteten Größen [4].

Ziel der Diplomarbeit ist nun das Erstellen eines Simulationsmodells in Matlab<sup>®</sup> Simulink<sup>®</sup> für die Simulation von hochohmigen und niederohmigen Erdschlüssen um in weiterer Folge die Prototypsoftware mit diesen Störschrieben zu testen und Verbesserungen für den Prototypalgorithmus zu finden.

## 2 Grundlagen

In Abhängigkeit von speziellen Anforderungen, wie Minimierung des Schadensumfangs, Minimierung der Schadenshäufigkeit und den Aufgaben der unterschiedlichen Netzebenen werden nachstehende genannte Arten der Sternpunktbehandlungen eingesetzt.

### 2.1 Niederohmig geerdetes Netz

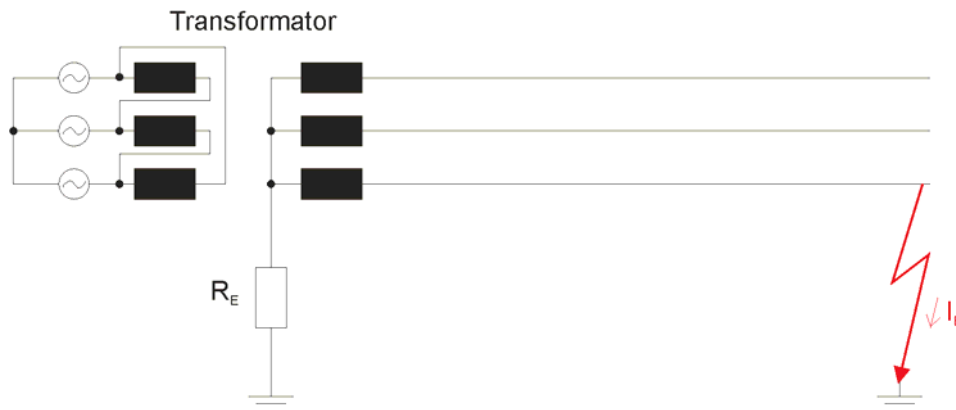


Abbildung 2.1: Netz mit niederohmiger Sternpunktserdung

In Netzen mit niederohmiger Sternpunkterdung (siehe Abbildung 2.1) werden die Transformatorsternpunkte über den Widerstand  $R_E$  mit Erde verbunden, um den Erdkurzschlussstrom einerseits so groß zu halten, dass er vom Netzschutz sicher erfasst wird und andererseits nicht zu unzulässigen thermischen und dynamischen Kurzschlussbeanspruchungen kommt [20]. Der Vorteil dieser Netzform liegt in der geringeren Isolationsbeanspruchung im Fehlerfall durch die geringe Anhebung der Leiter-Erde-Spannungen in den gesunden Leitern, und in der einfacheren Erkennung des Fehlerortes durch die selektive Schutzeinrichtung[1].

- **Vorteile** [2]:
  - einfache Ausführung
  - einfache selektive Erdschlusserfassung, AWE möglich
  - Netzausdehnung nahezu unbegrenzt
  - verminderter Isolationspegel bei starrer Erdung ausreichend

- **Nachteile [2]:**

- höherer Aufwand für die Erdungsanlagen zur Beherrschung der Berührungs- und Schrittspannungen sowie der induktiven Beeinflussung
- häufigere kurzfristige Abschaltungen (ca. 0,1 ... 1 s) von Leitungen

## 2.2 Isoliertes Netz

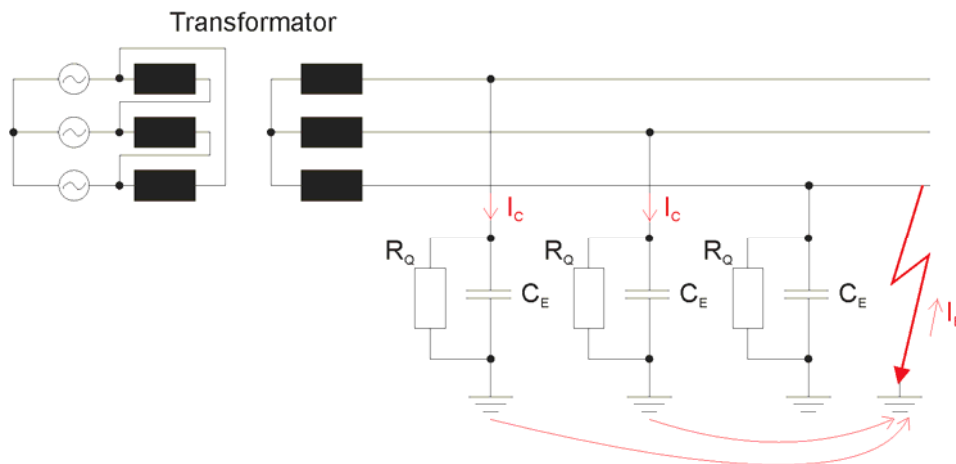


Abbildung 2.2: Netz mit isoliertem Sternpunkt

In Abbildung 2.2 ist das Ersatzschaltbild eines isolierten Netzes dargestellt. Alle Sternpunkte sind gegenüber der Erde isoliert. Isolierte Netze werden vorzugsweise bei Großgeneratoren und kleinen Mittelspannungsnetzen geringer Ausdehnung angewendet. Bei einem Erdschluss wird die Leiter-Erde-Spannung in den fehlerfreien Phasen auf den  $\sqrt{3}$  fachen Wert von  $U_{\text{Phase}}$  angehoben [1]. In Freileitungsnetzen kann man mit der Selbstlöschung des Lichtbogens rechnen, wenn der kapazitive Erdschlussstrom  $I_{\text{CE}}$  kleiner als 35 A (für 10-kV oder 20-kV-Netze), oder kleiner als 60 A (für 60-kV-Netze) ist [20].

- **Vorteile [2]:**

- einfache Ausführung
- geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen

- **Nachteile [2]:**

- intermittierende Erdschlüsse sind möglich
- erhöhte Überspannungsbeanspruchung, insbesondere bei intermittierenden Erdschlüssen
- Dauererdschlüsse und damit die Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
- keine sichere selektive Erdschlusserfassung in allen Fällen

## 2.3 Gelöschtes Netz

Die Idee einer Löserspule zur Erdschlusskompensation in elektrischen Energieversorgungsnetzen stammt von Waldemar Petersen (\* 10. Juni 1880 in Athen; † 27. Februar 1946 in Darmstadt) und wurde im Jahre 1917 patentiert. Durch die Kompensation des Fehlerstromes an der Fehlerstelle kommt es zum selbstständigen Verlöschen des anstehenden Lichtbogens. Die Petersen-Spule ist somit eine wirkungsvolle Methode, die Sicherheit der Versorgung mit elektrischer Energie zu erhöhen.

### 2.3.1 Allgemeines

Zur Löschung eines Erdschlusses gibt es mehrere Möglichkeiten wie eine Petersenspule, Polerdung oder den Bauch'schen Löschtransformator [10]. Die zwei zuletzt genannten haben jedoch den Nachteil, dass sie bereits im fehlerfreien Betrieb Wirkleistungsverluste verursachen. Die weiteren Betrachtungen in dieser Diplomarbeit erfolgen nach der Methode vom Petersen. In gelöschten Netzen werden Löserspulen, die zwischen Sternpunkt und Erde geschaltet sind, so eingestellt, dass sie den am Fehlerort auftretenden kapazitiven Erdschlussstrom kompensieren. Häufig verwendet man Tauchkernspulen um eine genaue Einstellung des induktiven Löschstromes zu ermöglichen, da man dadurch in der Lage ist, die Induktivität der Spule an die Netzgegebenheiten anzupassen. Von einer Vollkompensation spricht man, wenn die Induktivität der Löserspule vollständig auf die Kapazität des Netzes gegen Erde abgestimmt ist. Hier fließen bei einen einpoligen Fehler nur mehr die nicht kompensierbaren Oberschwingungsströme und der sog. Wattreststrom. Durch die Erdschluss-Kompensation wird erreicht, dass der Erdschlusslichtbogen von selbst erlischt. Um jedoch eine sichere Löschung zu gewährleisten, muss der Erdschlussreststrom, je nach Netzspannung, auf einen Höchstwert  $I_G$  begrenzt werden [2].

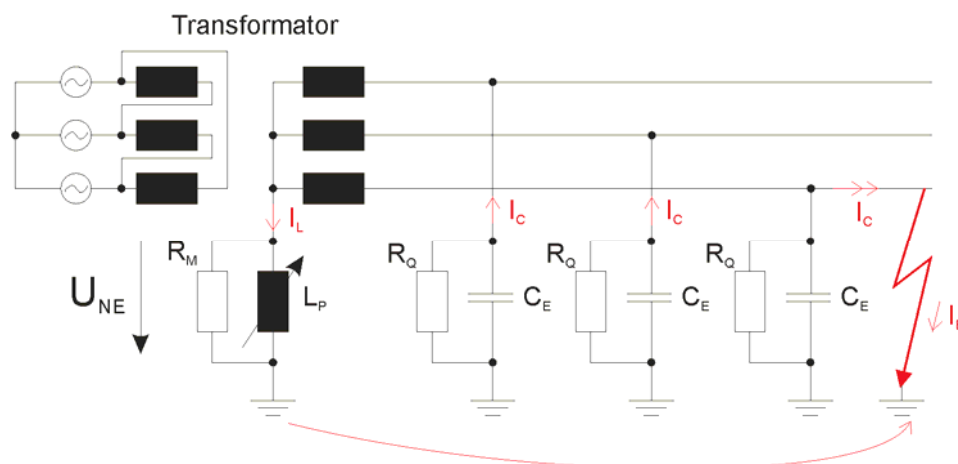


Abbildung 2.3: Gelöschtes Netz [14]

Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, kommt der kapazitive Anteil des Erdschlussstromes über die Leiter-Erde Kapazitäten der Freileitungen bzw. Kabel zustande. Seine Größe hängt vor allem von der Netzausdehnung ab.

- **Vorteile des kompensierten Netzes [3]:**

- Geringer Reststrom an der Fehlerstelle
- Geringe Anzahl von Abschaltungen
- Fehler verlöschen meistens von selbst
- Wiederkehrende Spannung steigt wesentlich langsamer an, als bei einem isolierten Netz

- **Nachteile [3]:**

- Spannungserhöhung der fehlerfreien Phasen um den Faktor  $\sqrt{3}$
- Dauererdschlüsse und somit die Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
- Erdschlussreststrom begrenzt die Netzausdehnung
- Oft unsichere selektive Erdschlusserfassung
- Mehraufwand durch Einbau und Regelung der Löserspule
- Isolation der Betriebsmittel gegen Erde bis zur verketteten Spannung

- **Auswirkungen hinsichtlich Erdschlusslöschung**

Die Auswirkungen hinsichtlich der Erdschlusslöschung sind, dass durch den Einsatz von Kabeln eine symmetrierende Wirkung im Netz auftritt und damit ein Betrieb der Petersenspulen näher am Resonanzpunkt durch eine geringere Verlagerungsspannung möglich wird. Im Gegensatz dazu liefern Kabel jedoch einen viel größeren Beitrag zum kapazitiven Fehlerstrom im Netz, der durch zusätzliche Kompensationsspulen kompensiert werden muss. Dies bewirkt auch eine Erhöhung des Erdschlussreststromes, der nicht kompensiert werden kann, und dadurch kommt es zu einer Annäherung an die Löschgrenze (ÖVE B1/1976). Diese hat zur Folge, dass es zu einer Ausbauproblematik im Netz kommen kann. Weiters sind Kabelstrecken im Erdschlussbetrieb besonders zu beachten. Durch Herausschalten von Kabelstrecken zur Fehlereingrenzung kann es zu einer beträchtlichen Verstimmung kommen, die zu gefährlichen Strömen an der Fehlerstelle führen können. Hier ist, wenn möglich, ein Mit Schalten von Spulen zu überlegen [2].

### 2.3.2 Verstimmung

Die gewollte Verstimmung ergibt sich mit:

$$v = \frac{I_L - I_C}{I_C} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E} - 1 \quad 2.1$$

Damit der zulässige Grenzwert für den Erdschlussreststrom  $I_G$  nicht überschritten wird, darf die Verstimmung einen Wert  $v_{\max}$  nicht überschreiten [1].

$$v_{\max} \leq \frac{\sqrt{I_G^2 - (d \cdot I_C)^2} - I_{os}^2}{I_C} \quad 2.2$$

In der folgenden Abbildung 2.4 sieht man die prinzipiellen Verhältnisse zwischen Verstimmung ( $v$ ), Dämpfung ( $d$ ), Reststrom ( $I_{\text{Rest}}$ ) und Sternpunktverlagerungsspannung ( $U_{\text{NE}}$ ). Aus einer solchen Grafik lässt sich dann der zulässige Betriebsbereich, der vom maximalen Reststrom bei Erdschluss und von der maximalen Verlagerungsspannung im Normalbetrieb abhängig ist, ablesen. Auch deutlich ersichtlich ist, dass die Dämpfung eine Erhöhung des Erdschlussreststromes im Resonanzfall ( $v=0$ ) zur Folge hat. In der Praxis werden gelöschte Netze mit einer Verstimmung von ca. 4% betrieben (Überkompensation), um bei Ausfall oder Abschaltung einer Leitung Resonanz zu vermeiden. Das Netz mit Verstimmung zu betreiben, ist bei nichtverdrillten Freileitungsnetzen (nicht ausgekreuzte Leiterseile) oder Netzen mit einem nennenswerten Anteil aus nichtverdrillten Freileitungen meist notwendig, da sonst auf Grund der Unsymmetrien im fehlerfreien Betrieb eine unzulässig große Sternpunktverlagerungsspannung auftreten kann [1].

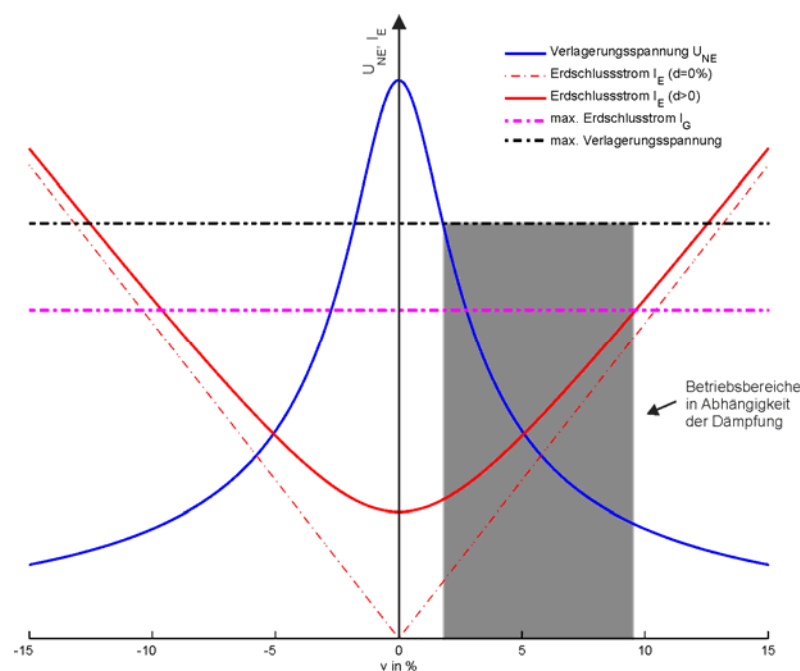


Abbildung 2.4: Betriebsbereich [15]



### 2.3.3 Dämpfung (d)

Die Dämpfung gibt das Verhältnis der Querableitwirkströme und der Löschspulenwirkströme zum kapazitiven Erdschlussstrom an und ist somit ein Maß für den Wattreststrom [2]. Zuzüglich zu diesen so definierten Strom sind die Verluste im Nullsystem zu berücksichtigen.

$$d = \frac{1}{\omega_N \sum C_E} \left( \frac{1}{R_P} + \sum \frac{1}{R_Q} \right) \quad 2.3$$

Weiters hat die Dämpfung einen starken Einfluss auf das Verhalten der wiederkehrenden Spannung nach Abklingen eines Fehlers. Eine hohe Dämpfung verhindert ein übermäßiges Schwingen des Spannungseffektivwertes bis zum endgültig eingeschwungenen Zustand[11].

### 2.3.4 Betrachtung zur Löschgrenze bei gekoppelten Netzen

Gelöschte Mittelspannungsnetze sind entsprechend dem Stand der Technik auf eine Netzausdehnung von  $I_{CE} \leq 500$  A begrenzt. Sind wie in Abbildung 2.6 zwei Netze mit jeweils einen  $I_{CE}$  von 500A miteinander verbunden, müssen sie im Erdschlussfall entkoppelt werden. Diese Entkoppelung findet z.B. bei einem Erdschluss mit einer Zeitverzögerung von  $t_{an}=0,3$  Sekunden statt, sofern  $U_{NE} \geq 0,3 U_N$  besteht. Dadurch kann eine unnötige Trennung erfolgen, obwohl der Erdschluss bereits verloschen ist. Entsprechend der Abbildung 2.5 würde für den Erdschluss 1 eine nutzlose Entkoppelung der Netze erfolgen, da nach der derzeitigen Erdschlussende-Erfassung (siehe Kapitel 4) zu diesem Zeitpunkt keine Erdschlussende Detektion erfolgt ist.

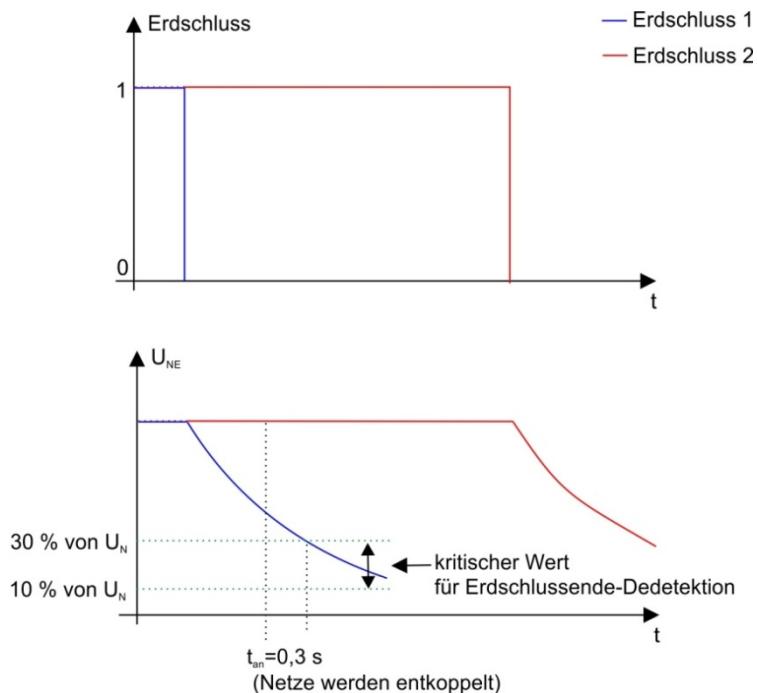


Abbildung 2.5: Verlauf des Erdschlusses

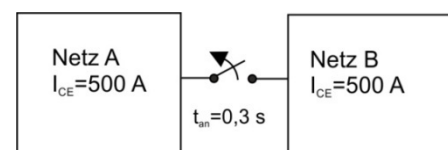


Abbildung 2.6: Gekoppelte Netze

### 2.3.5 Löschgrenze ( $I_G$ )

Um ein selbstständiges Erlöschen des Lichtbogens zu gewährleisten, darf der Erdschlussreststrom einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Weiteres wird diese Grenze auch durch bei diesem Reststrom auftretende Fehler- und Berührungsspannungen begrenzt. In der österreichischen Norm ÖVE B1/1976 [16] (siehe Tabelle 2.1) und in der deutschen Norm VDE 0228 Teil 2 [16] (siehe Abbildung 2.7: Löschgrenzen laut VDE 0228 Teil 2 [15]) wird verlangt, dass der Reststrom in gelöschten Netzen bei einem Dauerfehler unter einer nennspannungsabhängigen Löschgrenze bleibt.

Nennspannung des Netzes [kV]		3...20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom, A. Maßgebend ist die Grundwelle	Tabelle a	60	63	67	78	90	132	180
	Tabelle b	35	37	40	50	60	-	-

Tabelle a für Netze mit Erdschlusskompensation; für Kabelnetze bis 20 kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteilen gilt Tabelle a auch bei isoliertem neutralem Punkt, Tabelle b für Netze mit isoliertem neutralem Punkt.

**Tabelle 2.1: Löschgrenze laut ÖVE B1/1976 [16]**

Wird die Löschgrenze überschritten, muss nach geltender Normenlage der Doppelerdschluss hinsichtlich ohmscher und induktiver Beeinflussung untersucht werden. Gegebenenfalls müssen Maßnahmen gesetzt werden, z.B. durch geeignete Erdungsmaßnahmen, um die Dauerfehlerspannungen auf die maximal zulässigen Werte zu begrenzen, oder der Fehlerstrom muss in geeigneter Zeit abgeschaltet werden [1].

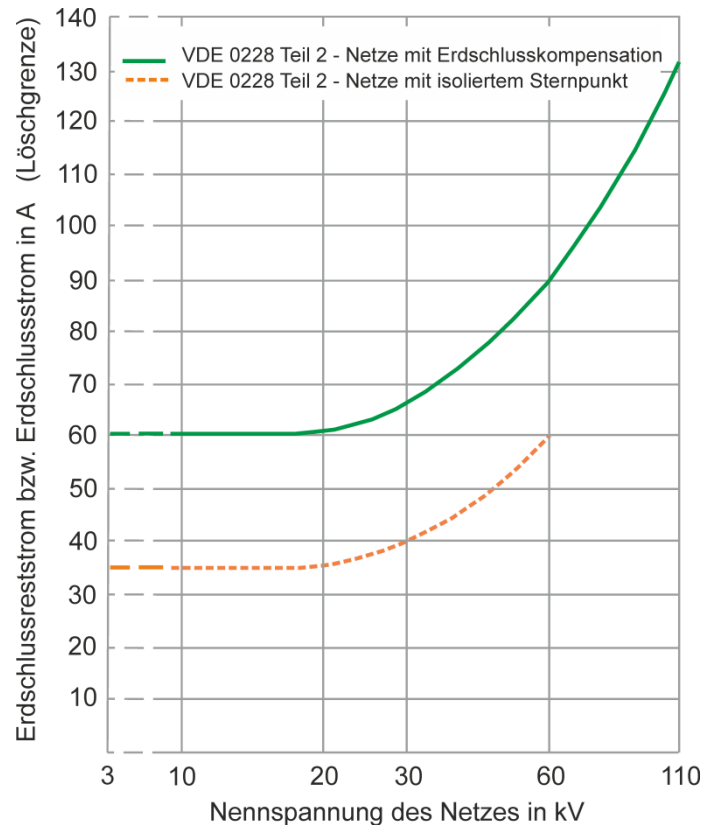


Abbildung 2.7: Löschgrenzen laut VDE 0228 Teil 2 [15]

### 2.3.6 Sternpunktverlagerungsspannung ( $U_{NE}$ )

Im erdschlusskompensierten Netz stellt sich eine Sternpunktverlagerungsspannung  $U_{NE}$  bereits im ungestörten Betrieb ein. Grund dafür sind die ungleichen Leiter-Erde Abstände einer Freileitung, welche unterschiedliche Leiter-Erde-Kapazitäten zur Folge haben. Im Gegensatz zu reinen Freileitungsnetzen sind bei reinen Kabelnetzen die Unsymmetrien aufgrund der Bauweise deutlich kleiner [2].

$$U_{NE} = \frac{k}{\sqrt{v^2 + d^2}} \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad 2.4$$

$$k = \left| \frac{C_{EL1} + a^2 \cdot C_{EL2} + a \cdot C_{EL3}}{C_{EL1} + C_{EL2} + C_{EL3}} \right| = \frac{\Delta C_E}{3C_E} \quad 2.5$$

Durch bauliche Maßnahmen (Verdrillung) oder durch zusätzliche Kabelstrecken lässt sich der Unsymmetriegrad verkleinern. Während sich für die sichere Lichtbogenlöschung niedere Verstimmungsgrade sehr vorteilhaft auswirken, ist für die Verlagerungsspannung das Gegenteil festzustellen. Bei einer Resonanzabstimmung erreicht sie ihr Maximum, wie aus der Formel 2.4 ersichtlich ist [2].

### 2.3.7 Erdschlussreststrom

Der Erdschlussstrom  $I_E$  in einem kompensierten Dreiphasennetz besteht in der Regel aus 3 Komponenten, nämlich einer 50-Hz-, einer 250-Hz- und einer 350-Hz-Komponente. Der 50-Hz-Anteil besteht im Wesentlichen aus dem Wirkstrom und dem kapazitiven Blindstrom, der von der Spannungsebene und der Netzausdehnung bestimmt wird. Die höher frequenten Anteile stellen die Oberschwingungsströme dar. Diese kommen durch die Nichtlinearitäten der Netzlasten zustande und können mittels Petersenspule, die auf die Netzfrequenz abgestimmt ist, nicht kompensiert werden. Diese Netzlasten sind im Allgemeinen Phasenanschnittsteuerungen, Netzteile von z.B. Fernsehgeräten, PC's u.s.w. [1].

#### 2.3.7.1 50-Hz-Komponente

Die 50-Hz-Komponente kann weitgehend durch die Petersenspule kompensiert werden. Eine vollständige Unterdrückung kann jedoch nicht erreicht werden (Gründe dafür sind: Kupferverluste der Petersenspule, sowie die Eisenverluste der Sternpunktbildner und Petersenspule, Ableitströme). Ein weiterer Faktor, der die vollständige Kompensation erschwert, ist die Unsymmetrie des Netzes. Es ist mit einem einzigen Bauteil nicht möglich, die drei geringfügig unterschiedlichen Leiter-Erde Kapazitäten der drei Phasen entsprechend zu kompensieren. Daher ergeben sich leicht unterschiedliche 50-Hz-Restströme, bei Erdschlüssen in den unterschiedlichen Phasen [1].

#### 2.3.7.2 Oberschwingungsanteile

Die zwei prägenden Faktoren z.B. für die 250-Hz-Komponente sind:

1. Größe der fünften Oberschwingung in der Netzspannung
2. Leiter-Erde Kapazitäten im Netz

Mit wachsender Netzgröße erhöhen sich die Leiter-Erde Kapazitäten. Trotz zusätzlichem Einbau von Kompensationsspulen gelingt keine 100 % Kompensation aufgrund verschiedener Einflussgrößen wie zum Beispiele Spulenverluste oder der Netzensymmetrie. Aus diesem Grunde steigen die 50-Hz- und die 250-Hz-Komponenten mit wachsender Netzgröße. Das bedeutet, dass trotz Kompensation der Pegel des Erdschlussreststromes bei Netzerweiterung steigt [1].

#### 2.3.7.3 Resultierender Erdschlussreststrom

Der resultierende Erdschlussreststrom setzt sich aus dem kapazitiven Erdschlussstromanteil  $I_C$ , sowie dem induktiven Löschspulenstrom  $I_L$ , dem ohmschen Ableitströmen  $I_W$  und aus dem Oberschwingungsanteil  $I_{OS}$  zusammen. Die entscheidende Größe für den Betrag des Erdschlussstromes ist im Wesentlichen die gesamte Nullkapazität des Netzes, die sich aus den einzelnen Leiter-Erde-Kapazitäten der Freileitungen und Kabeln zusammensetzt [1].

$$I_E = \sqrt{(I_C - I_L)^2 + I_W^2 + I_{OS}^2} \leq I_G \quad 2.6$$

Den kapazitiven Anteil kann man in den Anteil der Kapazitäten der Kabel und der Freileitungen aufteilen.

$$I_C = I_{CF} + I_{CK} \quad 2.7$$

$$I_C = 3\omega_N U_L (C_F + C_K) = \sqrt{3}\omega_N U_N (C_F + C_K) \quad 2.8$$

Der Wattreststrom  $I_W$  setzt sich zusammen aus den Wirkverlusten der Löschspulen, den Längsverlusten der Leitungen, den Ableitströmen über die Freileitungsisolatoren und der Kabelisolation zuzüglich der Stromverluste im Strompfad. Der Wattreststrom wird mit Hilfe der Dämpfung proportional zu den kapazitiven Erdschlussrestströmen beschrieben.[1]

$$I_W = I_{WF} + I_{WK} = d_F I_{CF} + d_K I_{CK} = d I_C \quad 2.9$$

Der induktive Löschspulenstrom, ist um  $180^\circ$  phasenverschoben zum kapazitiven Strom und kompensiert diesen an der Fehlerstelle:

$$I_L = \frac{U_N}{\sqrt{3}\omega_N L_P} \quad 2.10$$

Die einzige frei verstellbare Größe ist  $L_P$ , womit der Kompensationsstrom so eingestellt wird, dass eine gewünschte Verstimmung erreicht werden kann (siehe Formel 2.1).

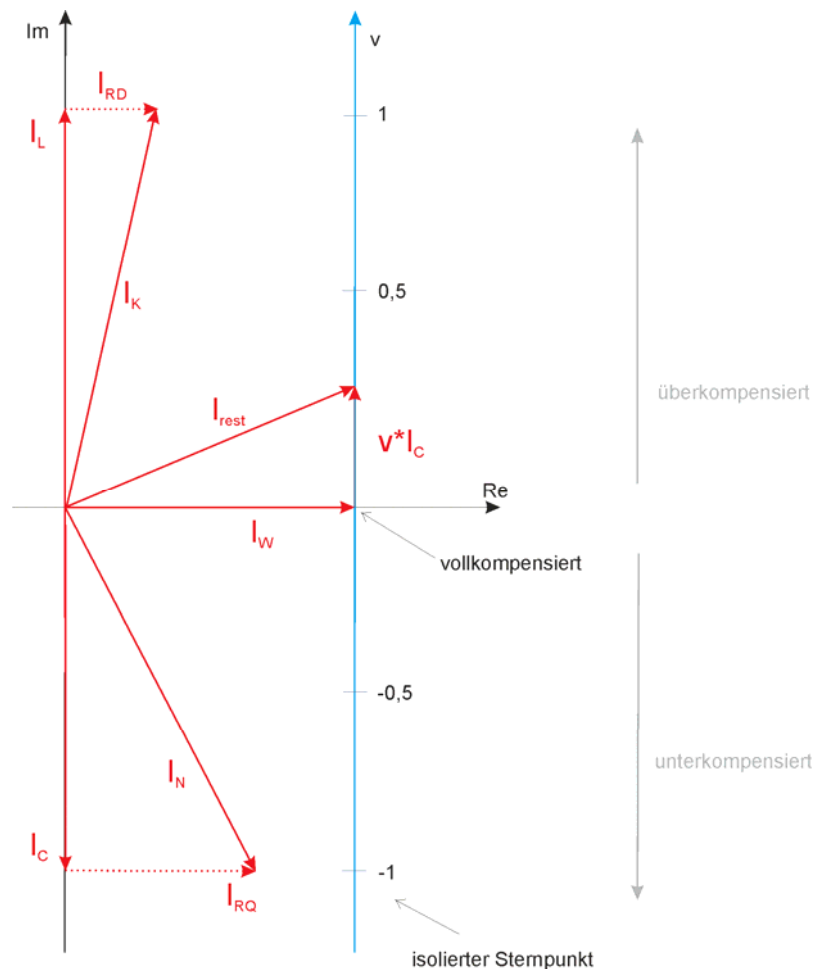


Abbildung 2.8: Ortskurve des Reststromes [15]

Wie in Abbildung 2.8: Ortskurve des Reststromes ersichtlich ist, teilt sich bei einem isolierten Sternpunkt der resultierende Strom auf in die kapazitive Komponente  $I_C$  (verursacht durch die Leitungskapazitäten) und einen Querableitverluststrom  $I_{RQ}$  (verursacht durch die ohmsche Komponente der Leitung). Bei Vollkompensation bleibt nur eine ohmsche Komponente am Fehlerort über, während bei Überkompensation ein induktiver Anteil, verursacht durch die Petersenspule, und ein ohmscher Anteil verbleiben.

### 2.3.8 Die vier Phasen eines Erdschlusses

Der Übergang vom erdschlussfreien in das erdschlussbehaftete Netz und umgekehrt wird von Ausgleichsvorgängen begleitet, die sich nicht vermeiden lassen. Dabei handelt es sich zum Teil um erwünschte Vorgänge, wie das aus hochspannungstechnischer Sicht langsame Wiederkehren der Spannungen an der Fehlerstelle nach einem Erdschluss. Dagegen treten jedoch beim Erdschlusseintritt unerwünschte Ausgleichsvorgänge auf, die mit teilweise hohen Überspannungen verbunden sind [18].

Der Verlauf eines Erdschlusses lässt sich in folgende vier Abschnitte einteilen[1]:

- Entladungsvorgang der Erdschlussphase
- Umladungsvorgang der gesunden Phasen
- Stationärer Fall
- Abschaltung / Erlöschen des Fehlers

### **Entladevorgang der Erdschlussphase**

Beim Auftreten eines einpoligen Erdschlusses bricht an der Fehlerstelle die Spannung der fehlerbehafteten Leitung zusammen. Die Leiter-Erde-Kapazität  $C_E$  der betroffenen Leitung wird kurzgeschlossen. Diese bis dahin geladenen Kapazitäten, bauen ihre Ladung über die Fehlerstelle ab. Bei diesen mit Lichtgeschwindigkeit verlaufenden Wanderwellenvorgängen treten in der Regel große Ausgleichsströme auf, da die frequenzabhängigen Reaktanzen der Kapazitäten sehr klein werden. Aufgrund der hohen frequenzabhängigen Dämpfung klingen die Entladeströme in kürzester Zeit wieder ab [18] [19].

### **Umladungsvorgang der gesunden Phasen**

Die Umladung der Leiter- Leiterkapazitäten auf die mit dem Erdschluss verbundenen neuen Spannungsverhältnisse verursachen einen weiteren Ausgleichsvorgang. Diese Umladung erfolgt über die Netzreaktanzen. Form und Höhe des Stroms ist von der Netzgröße, Kurzschlussleistung, Phasenlage der Spannungen beim Erdschlusseintritt und vom Fehlerort abhängig [18].

### **Stationärer Fall**

Der stationäre Fall schließt sich an die Ent- bzw. Umladung der Leiter-Erde-Kapazitäten an. Er kann von wenigen Millisekunden bis hin zu Stunden dauern. Der verbleibende Fehlerstrom wird als Erdschlussreststrom  $I_{Rest}$  bezeichnet. Dieser Erdschlussreststrom ist im wesentlichen abhängig von der Dämpfung  $d$  im Fehlerfall, sowie von der Verstimmung  $v$  [1].

### **Abschaltung / Erlöschen des Fehlers**

Nach dem Erlöschen des Fehlers wird die Spannung der betroffenen Phase von selbst allmählich wieder hergestellt. Das hat den Vorteil, dass ein Wiederezünden des Erdschlusses erschwert wird. Wenn der Resonanzkreis des Nullsystems nicht exakt abgestimmt ist ( $n \neq 0$ ) kommt es, aufgrund der Überlagerung der Netzfrequenz mit der Eigenfrequenz des Nullsystems, zu einer Schwebung im Ausschwingvorgang [1].

### 2.3.9 Ausschwingvorgang des Erdschlusses

Ein Erdschluss lässt sich sehr einfach in symmetrischen Komponenten entsprechend Abbildung 2.9 unter Vernachlässigung der Mit- und Gegenimpedanzen darstellen. In diesem vereinfachten Ersatzschaltbild kann man die Zusammenhänge beim Ausgleichsvorgang nach der Erdschlusslöschung besonders gut erkennen. Solange der Fehler besteht, schwingt die Nullspannung zwangsläufig mit der Netzfrequenz von 50 Hz. Wenn die Löschbedingungen erfüllt sind, dann erlischt der Lichtbogen im Stromnulldurchgang. Es kann jedoch auch zur Wiederzündung kommen [11].

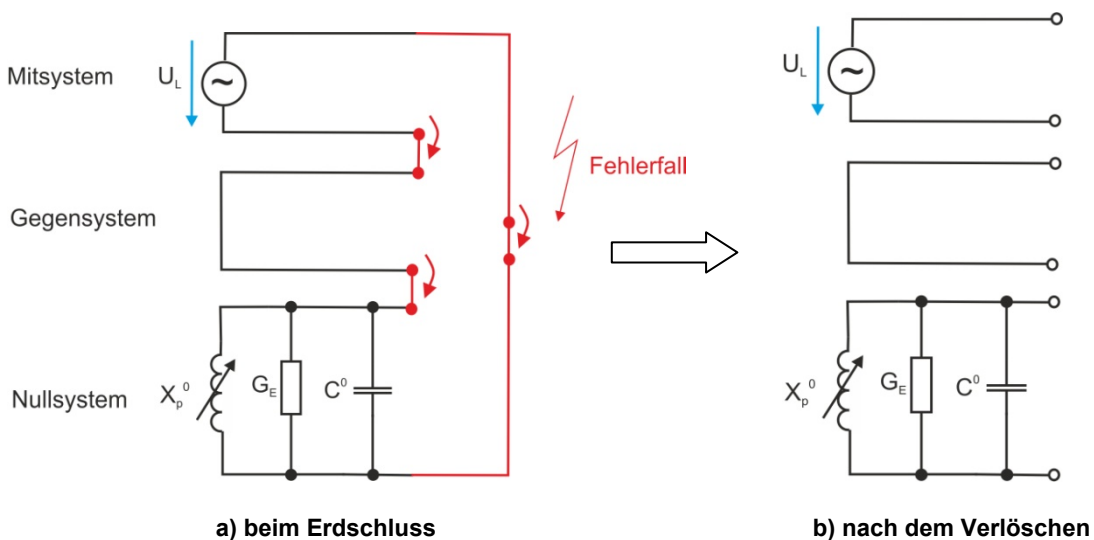


Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild symmetrische Komponenten

Im Ersatzschaltbild werden dabei die rote Verbindung zwischen den Komponentensystem geöffnet. Das Mitsystem wird weiterhin mit 50 Hz gespeist. Die Spannung des Gegensystems wird vernachlässigbar klein. Der aus der Löschspule und Leiter-Erde-Kapazitäten bestehende Parallelschwingkreis schwingt mit seiner Eigenfrequenz aus. Bei genauer Abstimmung der Erdschlusslöschspule auf die Leiter-Erde-Kapazitäten ist die Eigenfrequenz des Nullsystems gleich der Netzfrequenz. Bei ungenauer Abstimmung weicht die Eigenfrequenz von der Netzfrequenz ab. Aus der Überlagerung dieser beiden Frequenzen ergibt sich eine Schwebung, die unmittelbar nach der Erdschlusslöschung in allen drei Leiter-Erde-Spannungen auftritt [11].

Die Resonanzfrequenz des Nullsystems wird bestimmt durch:

$$\omega_E = \sqrt{\frac{1}{L_p^0 \cdot C^0} - \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1}{R_E \cdot C^0} \right)^2} \approx \frac{1}{\sqrt{L_p^0 \cdot C^0}} = \omega_0 \quad 2.11$$

$R_E \gg$  daher vernachlässigbar



### 2.3.10 Kenngrößen aus dem Ausschwingvorgang

In Abbildung 2.10 ist der Ausschwingvorgang eines Parallelschwingkreises (Abbildung 2.9) dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass der Lichtbogen im Stromnulldurchgang verlöscht und dies bei einer Verstimmung von  $v=0$ , zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs stattfindet, da es sich, um einen rein ohmschen Strom handelt ergibt sich folgender Strom und Spannungsverlauf [17].

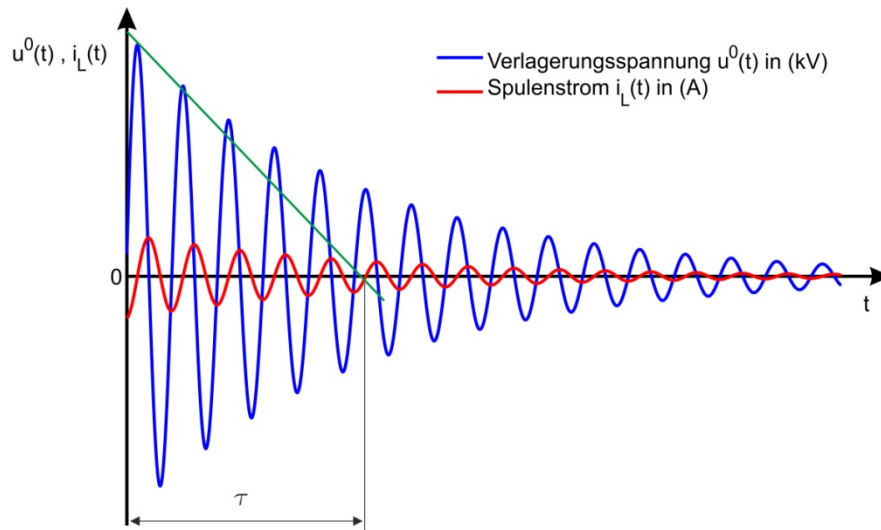


Abbildung 2.10: Ausschwingvorgang eines Parallelschwingkreises[15]

- Verstimmung

Aus der Frequenz der Verlagerungsspannung  $f_A$  und aus der Betriebsfrequenz  $f_N$  kann die Verstimmung  $v$  auf folgender Art bestimmen werden [2]:

$$v = 1 - \frac{f_A^2}{f_N^2} \quad 2.12$$

Näherung für :

$$f_A = f_N + \Delta f \quad 2.13$$

$$v = 1 - \frac{f_N^2 + 2 \cdot f_N \cdot \Delta f + \Delta f^2}{f_N^2} \approx 2 \cdot \frac{\Delta f}{f_N} \quad 2.14$$

- Dämpfung

Durch die Zeitkonstante der abklingenden Verlagerungsspannung lässt sich die Dämpfung  $d$  ermitteln (siehe Formel 2.15, 2.16 und 2.17) [2].

$$d = \frac{2}{\omega\tau} \tag{2.15}$$

$$\omega = 2\pi f_A \tag{2.16}$$

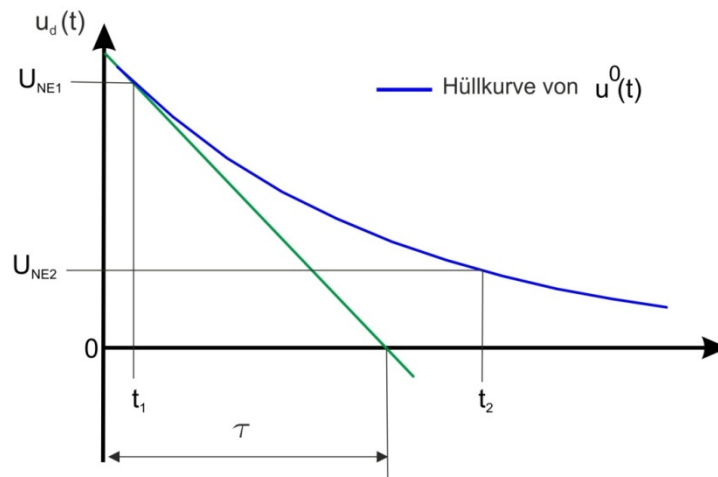


Abbildung 2.11: Hüllkurve von  $u^0(t)$

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(U_{NE1}) - \ln(U_{NE2})} \tag{2.17}$$

### 2.3.11 Verhalten des Netzes im Fehlerfall

In Abbildung 2.12 sieht man den Übergang des Netzes vom Normalzustand in den gestörten Fall anhand der Spannungsverläufe. Die Spannung  $U_2$  bricht beim Erdschlusseintritt zusammen während sich die zwei anderen Phasenspannungen  $U_1$  und  $U_3$  auf den Wert der verketteten Spannung erhöhen. Die Verlagerungsspannung  $U_{EN}$  vergrößert sich auf die Phasenspannung. Nach dem Erlöschen des Erdschlusses schwingt das System mit der Eigenfrequenz  $\omega_f$  aus. Während des Ausschwingvorgangs nimmt der Effektivwert der Verlagerungsspannung entsprechend einer e-Funktion langsam ab, und das Netz schwingt sich wieder auf die Nennfrequenz  $\omega_N$  ein. Man kann auch deutlich die Schwebung im Netz erkennen.

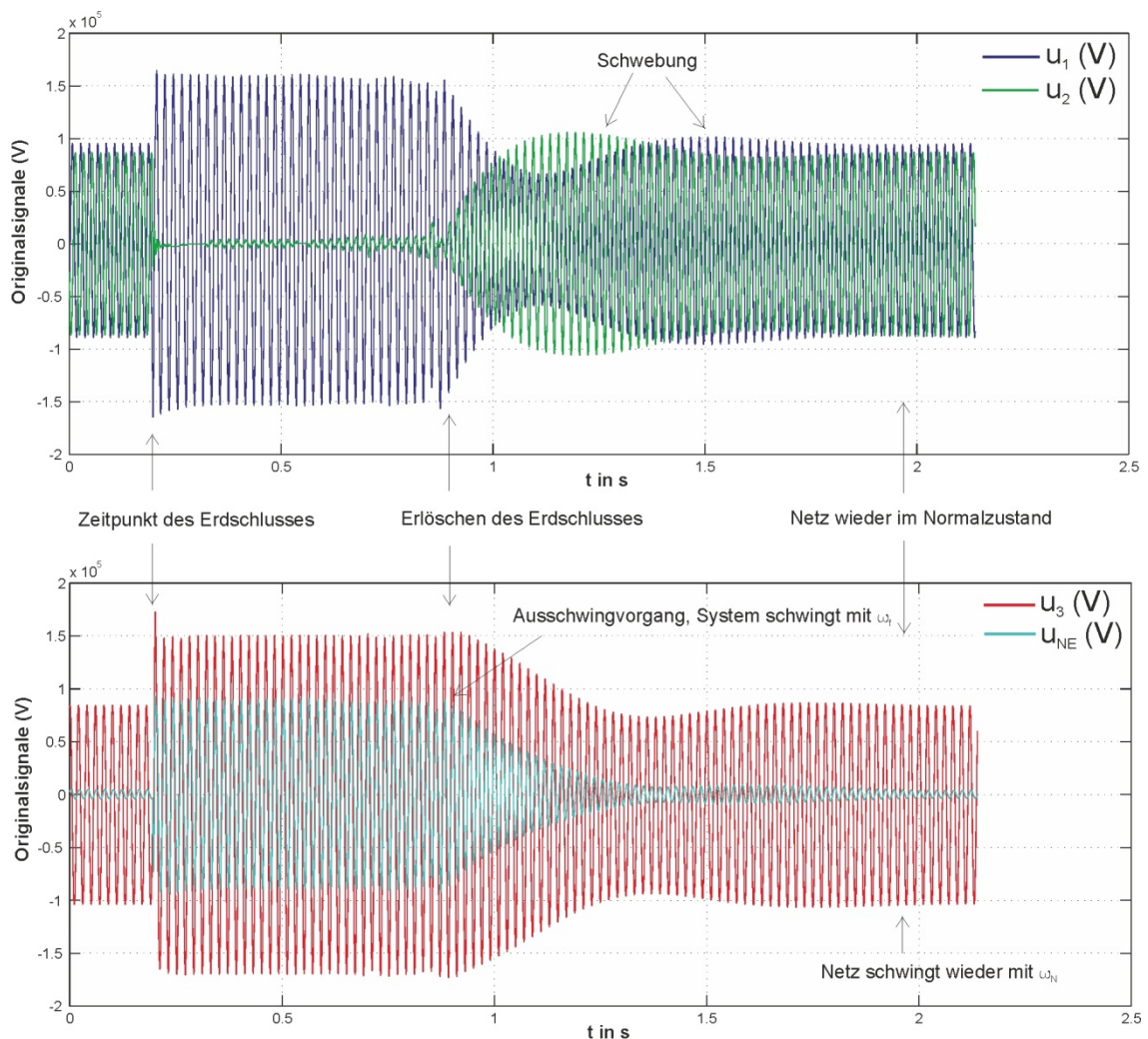


Abbildung 2.12: realer Störschrieb [14]

### 2.3.12 Beeinflussung durch parallel geführte Leitungen

Verlagerungsspannungen treten nicht nur als Folge von kapazitiven Unsymmetrien auf, sondern können in Freileitungsnetzen auch durch Einkopplung unsymmetrischer Koppelkapazitäten paralleler Freileitungen auftreten. Abbildung 2.13 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild zur Darstellung der Einkopplung von Verlagerungsspannungen.

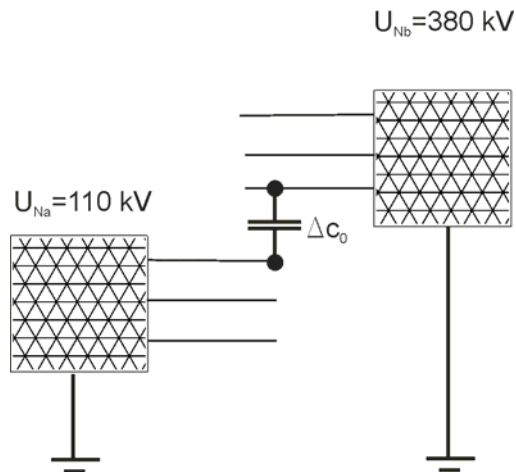


Abbildung 2.13: Vereinfachtes Ersatzschaltbild vom Drehstromsystem

Die kapazitive Einkopplung lässt sich auch mittels der symmetrischen Komponenten wie in Abbildung 2.14 darstellen. Die Verlagerungsspannung ist der kapazitiven Unsymmetrie  $\Delta C_0$  direkt proportional. Der Einfluss auf den Erdschlussstrom  $I_{CE}$  ist vernachlässigbar klein, da die Leiter-Erde-Kapazitäten des Netzes wesentlich größer sind als  $\Delta C_0$  [6].

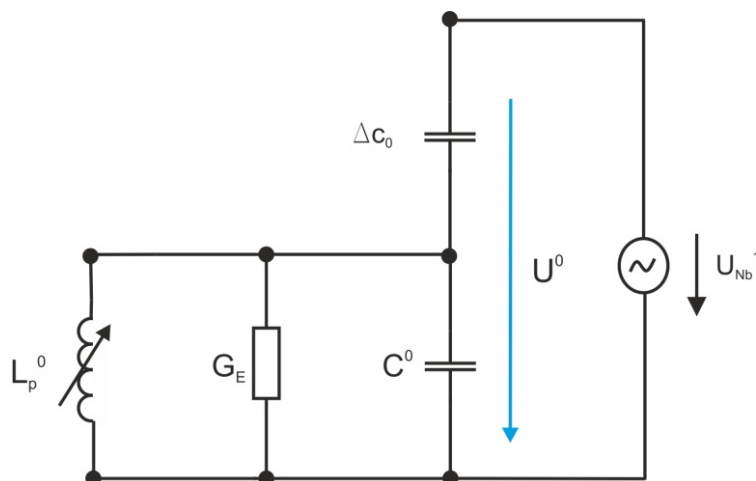


Abbildung 2.14: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten

Die ein gekoppelte Verlagerungsspannung kann Werte annehmen, die bei Abstimmung auf Resonanz zu einer unzulässig hohen Leiter-Erde-Spannung führt. Üblicherweise soll die Verlagerungsspannung im Normalbetrieb unter 10% liegen [6] [12].

## 3 Berechnungsgrundlagen

### 3.1 Symmetrische Komponenten

Mathematisch beschreibt man die 3 Phasen in einem Drehstromnetz, unabhängig ob es sich um Ströme, verkettete- oder Strangspannungen handelt, durch Vektoren im komplexen Raum. Die Effektivwerte werden durch die Länge der Vektoren und die Phasenlagen durch die Lage im Raum wiedergegeben.

Eine wesentliche Erleichterung zur Berechnung stellen die symmetrischen Komponenten dar, deren unterschiedliche Komponenten entkoppelt sind und sich daher nicht mehr beeinflussen. Die Komponenten können somit unabhängig voneinander berechnet werden. Aus der Theorie der symmetrischen Komponenten folgt, dass jedes unsymmetrische 3-Leitersystem sich aus:

- einem symmetrischen System mit gleichem Umlaufsinn (Mitsystem)
- einem symmetrischen System mit gegenläufigen Umlaufsinn (Gegensystem)
- und einem gleichphasigen System (Nullsystem)

zusammensetzen lässt [6].

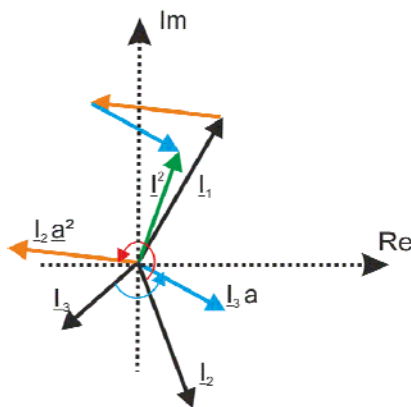


Abbildung 3.1: Gegensystem

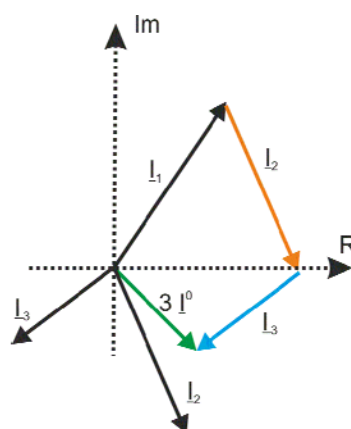


Abbildung 3.2: Nullsystem

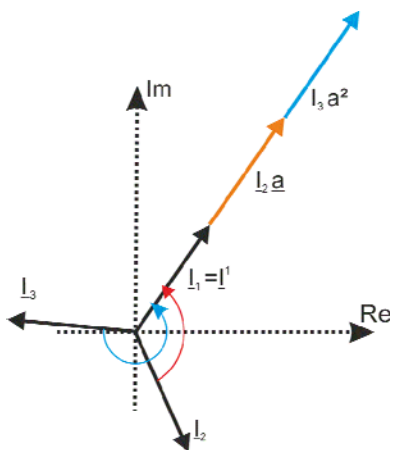


Abbildung 3.3: Mitsystem

- Mitsystem

Ströme und Spannungen im Mitsystem werden aus den einzelnen Phasenwerten durch Drehung gewonnen. Exemplarisch sind hier nur Ströme erwähnt, da die Spannung im Mitsystem nach dem gleichen Verfahren berechnet wird.

$$\underline{I}^1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 \cdot \underline{a} + \underline{I}_3 \cdot \underline{a}^2) \quad 3.1$$

Das angegebene Beispiel in Abbildung 3.3 stellt ein Drehfeld mit symmetrischer Belastung dar. Dabei sind alle Phasenströme von gleicher Größe, und es besteht eine gewünschte Phasenverschiebung von  $120^\circ$ . Der Betrag des Stromes  $I^1$  im Mitsystem ist hier gleich groß wie die einzelnen Phasenströme. Wie aus der Abbildung 3.3 ersichtlich ist, sind Gegen- und Nullsystem nicht vorhanden.

- Gegensystem

Ähnlich wie beim Mitsystem wird das Gegensystem auch durch Drehen der Phasenströme, geometrisches Addieren der Zeiger und Reduktion auf  $1/3$  gewonnen. Die Umlaufrichtung ist im Vergleich zum Mitsystem umgekehrt.

$$\underline{I}^2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 \cdot \underline{a}^2 + \underline{I}_3 \cdot \underline{a}) \quad 3.2$$

Das Beispiel in Abbildung 3.1 beschreibt Phasenströme eines unsymmetrischen Verbrauchers. Hier wird durch die Phasenverschiebungen und die unterschiedlichen Amplituden ein Gegensystem, Mit- und Nullsystem erzeugt. Ein reines Gegensystem wäre nur dann vorhanden, wenn sich im symmetrischen Fall die Phasenfolge im gesamten Netz umkehren würde.

- Nullsystem

Da der Nullstrom  $1/3$  der geometrischen Summe der 3 Phasenströme ist (siehe Abbildung 3.2), kann sich dieser in einem 3-Leiter-System nur über einen von den Phasenleitern unabhängigen Rückleiter schließen. Diese Nullleiter kann ein vierter Leiter oder die Erde sein. Nullspannungen werden als Verlagerungsspannung im Phasensystem sichtbar [13].

$$\underline{I}^0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) \quad 3.3$$

$$\underline{I}_E = 3 \cdot \underline{I}^0 \quad 3.4$$

### 3.2 Mathematische Zusammenhänge

Eine gebräuchliche Darstellung ist die Matrizenschreibweise, bei der die symmetrischen Komponenten und die Phasenwerte in Vektoren (Gleichung 3.5), die Operatoren in einer Symmetrierungsmatrix  $\underline{S}$  (Gleichung 3.7) bzw Entsymmetrierungsmatrix  $\underline{T}$  zusammengefasst werden. Bei der Entsymmetrierung, bei der von symmetrischen Komponenten ausgehend die Phasenwerte bestimmt werden, wird mit der Inversen der Matrix  $\underline{S}$ , der Entsymmetrierungsmatrix  $\underline{T}$ , gerechnet.

$$\underline{I}^S = \begin{pmatrix} \underline{I}^0 \\ \underline{I}^1 \\ \underline{I}^2 \end{pmatrix} \quad \underline{I} = \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{pmatrix} \quad 3.5$$

$$\underline{I}^S = \underline{S} \cdot \underline{I} \quad 3.6$$

$$\underline{S} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} \quad \underline{T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \quad 3.7$$

Impedanzen in Drehstromzweigen, stehen durch die Gleichung 3.8 in Beziehung mit Strom und Spannung.  $\underline{Z}$  ist die Impedanzmatrix. In der Hauptdiagonale stehen die Eigenimpedanzen der einzelnen Elemente. Die Nebendiagonalelemente beschreiben die induktive Kopplung der einzelnen Phasen.

$$\underline{Z} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} \\ \underline{Z}_{31} & \underline{Z}_{32} & \underline{Z}_{33} \end{pmatrix} \quad 3.8$$

Mittels den Gleichungen 3.9 und 3.10 erhält man eine Beziehung zwischen den symmetrischen Strom- und Spannungskomponenten. Bei einem symmetrischen Netzaufbau verschwinden die Nebendiagonalelemente der Matrix  $\underline{Z}^S$ . Dies entspricht der Entkoppelung der symmetrischen Komponenten. Die Impedanzen in der Hauptdiagonalen lassen sich eindeutig dem Mit-, Gegen- und Nullsystem zuordnen, siehe Gleichung 3.12 [7].

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad 3.9$$

$$\underline{Z}^S = \underline{S} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{T} \quad 3.10$$

$$\begin{aligned} \underline{U}^S &= \underline{Z}^S \cdot \underline{I}^S & \underline{U}^0 &= \underline{Z}^0 \cdot \underline{I}^0 \\ & & \underline{U}^1 &= \underline{Z}^1 \cdot \underline{I}^1 \\ & & \underline{U}^2 &= \underline{Z}^2 \cdot \underline{I}^2 \end{aligned} \quad 3.11$$

$$\underline{Z}^S = \begin{pmatrix} \underline{Z}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^2 \end{pmatrix} \quad 3.12$$

### 3.3 Freileitungen und Kabel

Kabel und Leitungen können durch eine  $\Pi$ -Ersatzschaltung (siehe Abbildung 3.4:  $\Pi$ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit der Länge  $a$ ) dargestellt werden. Die auftretenden Leiterverluste werden durch den Wirkwiderstand  $R_L$  nachgebildet. Dagegen erfasst der Ableitwiderstand  $R_A$  die Leckströme, die über die Isolatoren gegen Erde abfließen, sowie die Koronaverluste, welche bei Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen auftreten. Die elektrischen Parameter ( $R'_L, X'_L, R'_A, C'_E$ ) werden auf die Leitungslänge  $a$  bezogen.

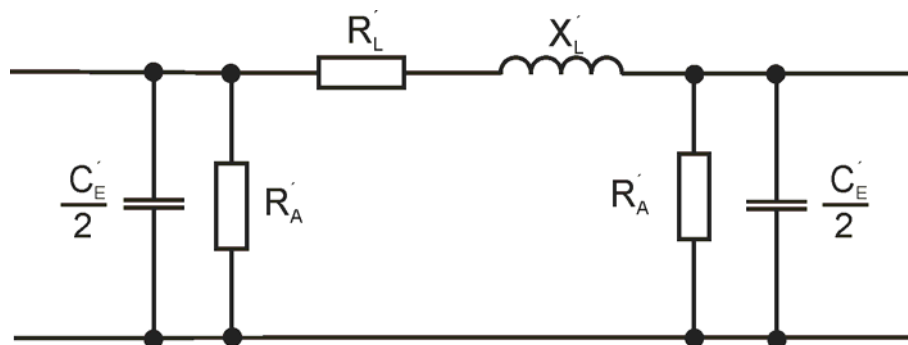


Abbildung 3.4:  $\Pi$ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit der Länge  $a$

Diese  $\Pi$ -Ersatzschaltung beschreibt Vorgänge im Bereich der Kreisfrequenz  $\omega_N$  nur so lange genau, wie die Beziehung für die Eigenfrequenz  $f_L$  der Leitung erfüllt ist [12].

$$\omega_N \ll \omega_L \quad \omega_L = 2 \cdot \pi \cdot f_L = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'_E} \cdot a} \quad 3.13$$

Für Berechnungen von längeren Leitungen oder Vorgängen im kHz Bereich ist es notwendig, mehrere solcher  $\Pi$ - Leitungsglieder hintereinander zu schalten.



Bei  $n$  Gliedern vermindert sich die Leitungslänge pro Glied auf [12],

$$a_L = \frac{a}{n} \quad 3.14$$

sodass gilt:

$$\omega_N \ll \frac{n}{\sqrt{L' \cdot C'_E} \cdot a} \quad 3.15$$

Für übliche Netzberechnungen ist die Genauigkeit ausreichend, sofern dieser Zusammenhang einen Wert von acht mal  $\omega_N$  liefert. Die Anzahl der erforderlichen Glieder  $n$  errechnet sich dann mit [12]:

$$n = 8 \cdot \omega_N \cdot \sqrt{L' \cdot C'_E} \cdot a \quad 3.16$$

Art	Bezeichnung	Spannungsebene	$R^1$	$L^1$	$C_b$	$C^0$	$R^0$	$L^0$
		kV	$\Omega/\text{km}$	$\Omega/\text{km}$	nF/km	nF/km	$\Omega/\text{km}$	$\Omega/\text{km}$
Freileitung								
	Stalu 95/15	20	0,306	0,355	10	6	1,071	1,242
	6x150 Al/1x50 St	110	0,196	0,416	8,7	4,7	0,355	1,18
Kabel								
	N2XSy 1x95 RM()	20	0,193	0,131	216	216	0,83	0,73
	3x1x400 RM()	110	0,092	0,182	294	294	0,37	0,13

Tabelle 3.1: Typische Werte für Leitungs- und Kabelimpedanzen [1]

Wen man die Formel 3.16 auf typ. Leitungsparameter (siehe Tabelle 3.1, Stalu 95/15) mit einer Leitungslänge von 20 Kilometer anwendet, ergibt sich für die Anzahl der erforderlichen Glieder:

$$a = 20 \text{ km}, \quad \omega_N = 314 \text{ s}^{-1}, \quad L' = 0,355 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad 3.17$$

$$C'_E = 10 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$$

$$n = 8 \cdot \omega_N \cdot \sqrt{L' \cdot C'_E} \cdot a \approx 3 \quad 3.18$$

### 3.4 Der Erdschluss in Symmetrischen Komponenten

Mit Hilfe der symmetrischen Komponenten kann man ein Drehstrom- Netz (symmetrischer Aufbau und symmetrische Lasten) vorteilhaft nachbilden und berechnen. In der folgenden Abbildung 3.5 sieht man das Ersatzschaltbild eines Erdschlusses in symmetrischen Komponenten im Fehlerfall. An der Fehlerstelle werden Mit-, Gegen- und Nullsystem in Form einer Serienschaltung verbunden.

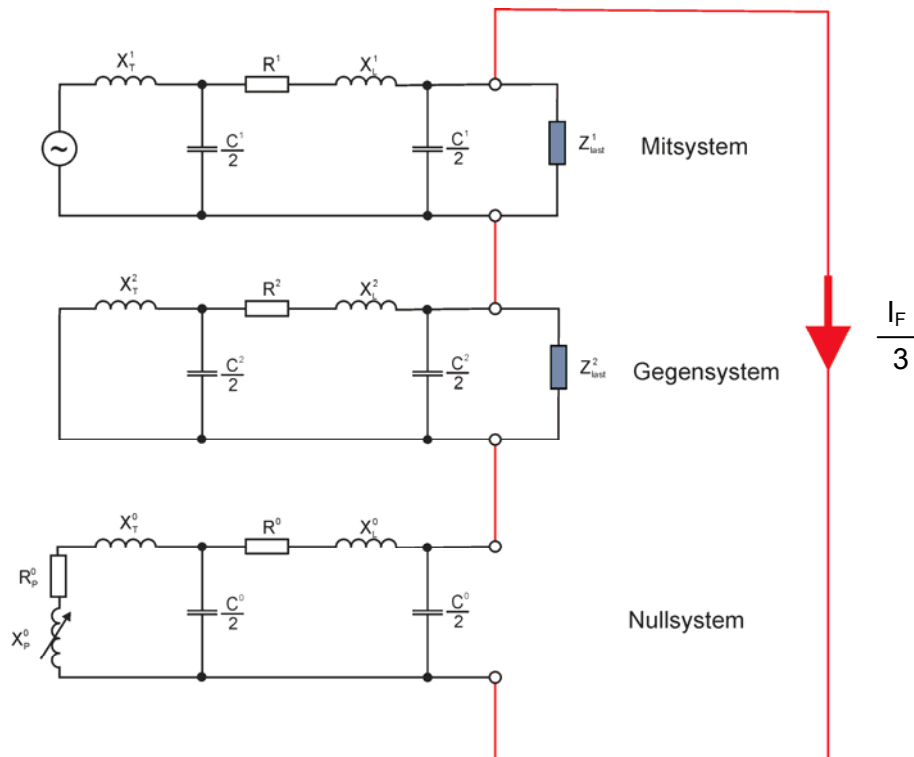


Abbildung 3.5: Symmetrische Komponenten – Ersatzschaltbild [15]

## 4 Methoden zur Erdschlussdetektion

Das neue Erdschluss- Detektionsverfahren welches am Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz entwickelt wurde, zeichnet sich dadurch aus, dass es in der Lage ist, die exakte Erdschlussdauer zu erfassen. In Abbildung 4.1 ist der Stand der Technik, bei dem die Erdschlussdauer durch über/unterschreitung eines Grenzwertes ( $\Delta 30\%$  bzw.  $\Delta 10\%$ ) ermittelt wird, angegeben. Diese Ungenauigkeiten können abhängig vom Ausschwingvorgang Größenwerte bis in den Sekundenbereich annehmen [4].

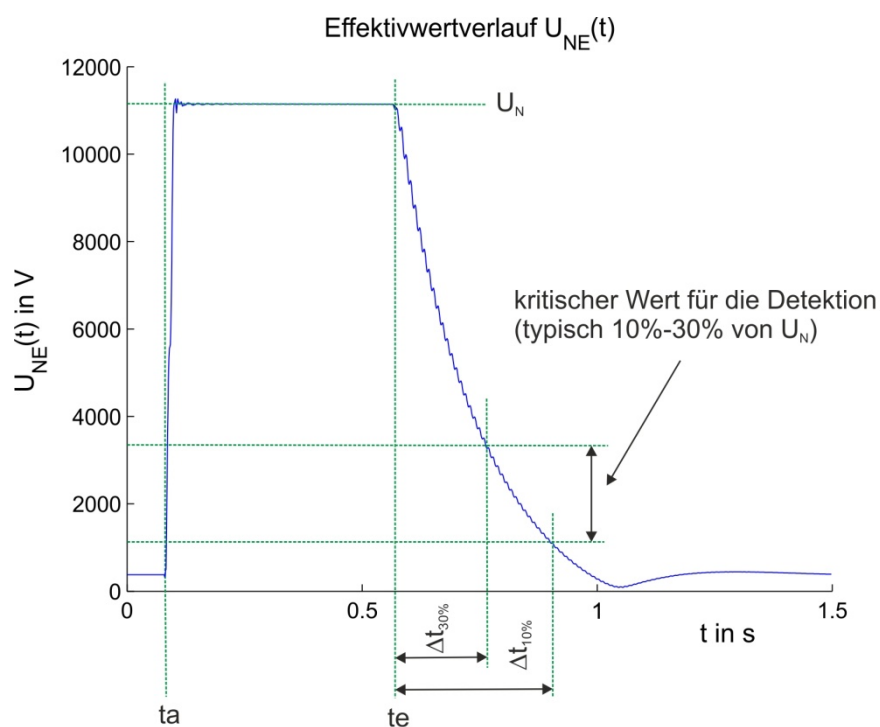


Abbildung 4.1: Effektivwertverlauf von  $U_{NE}(t)$  und Erdschlussende [4]

Die Methoden für das neue Verfahren basieren auf der Verlagerungsspannung und den Phasenströmen sowie daraus abgeleiteten Größen. Die charakteristischen Größen, sind:

- Änderung der Kreisfrequenz  $\omega(t)$
- Änderung des Stromes im Gegensystem
- Oberschwingungsverhältnisse
  - der Verlagerungsspannung
  - des Summenstromes

### 4.1 Änderung der Kreisfrequenz $\omega(t)$

Man erkennt, dass sich zum Zeitpunkt des Verlöschens ( $t_E$ ) die momentane Kreisfrequenz  $\omega(t)$  von der Netzfrequenz  $\omega_N$  auf die Eigenfrequenz bzw. die Resonanzfrequenz  $\omega_R$  des Nullsystems ändert. Diese sprunghafte Änderung der Kreisfrequenz  $\omega(t)$  tritt nur ein, wenn die Verstimmung  $v \neq 0$  ist. Diese Änderung der Kreisfrequenz  $\omega(t)$  kann zur Detektion des Erdschlusses verwendet werden.

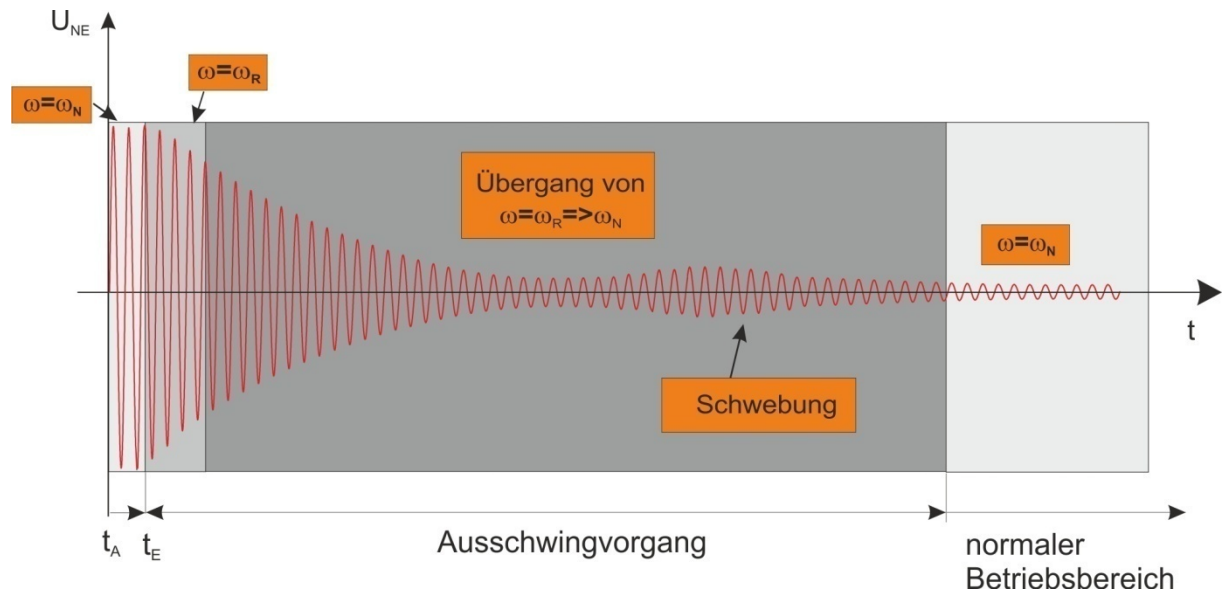


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Erdschlusses mit  $\omega(t)$  [4]

In Abbildung 4.3 ist der Frequenzverlauf der Verlagerungsspannung dargestellt. Man erkennt den Eintritt des Erdschlusses anhand des Phasensprungs im Signal, sowie das Verlöschen des Erdschlusses aufgrund der sprunghaften Änderung der Frequenz.

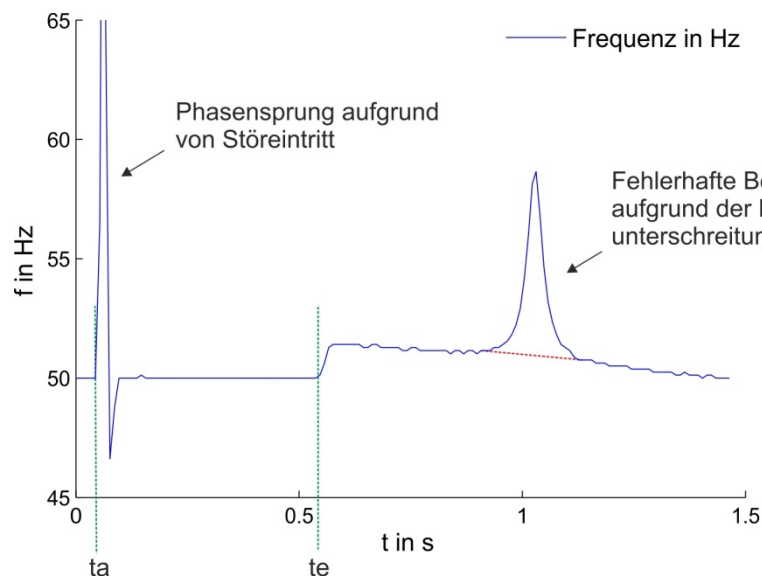


Abbildung 4.3: Frequenzverlauf [4]

Die Fehlerhafte Bestimmung der Frequenz aufgrund der Minimalwertunterschreitung von  $u_{NE}(t)$  wie sie auch in Abbildung 4.3 ersichtlich ist, kommt dadurch zustande, da es einen Zeitpunkt gibt wo die Amplitude der ein gekoppelten inneren Unsymmetrie welche mit 50 Hz schwingt gleich groß wird wie die Amplitude der mit der Eigenfrequenz ausschwingenden Nullspannung. Dadurch ergibt sich kurzfristig eine reine Schwebung deren resultierende Amplitude durch null geht. In Abbildung 4.4 ist eine Schwebung entsprechend der Gleichung 4.1 dargestellt.

$$y(t) = A \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + A \cdot \cos(\omega_R \cdot t) \quad 4.1$$

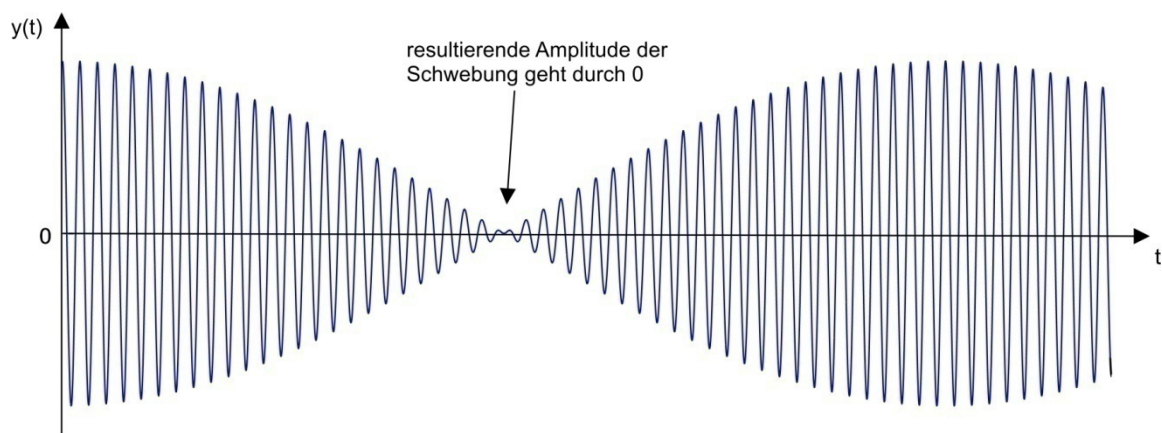


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung einer reinen Schwebung

## 4.2 Änderung des Stromes im Gegensystem

Eine weitere Methode, um das Erdschlusssende zu bestimmen, basiert auf der Grundlage des Stroms im Gegensystem. Mit Hilfe der Gleichung 4.2 kann der Strom im Gegensystem  $I^2$ , aufbauend auf den Effektivwerten der Phasenströme, berechnet werden [5][7].

$$I^2 = \frac{1}{3} \cdot (I_1 + I_2 \cdot a^2 + I_3 \cdot a) \quad 4.2$$

Im Fehlerfreien Betrieb existiert ein Strom im Gegensystem infolge unsymmetrischer Lasten. Bei einem einpoligen Erdschluss kommt es zu einer Koppelung von Mi-, Gegen- und Nullsystem (siehe Abbildung 3.5). Dadurch erreicht der Gegenstrom den Wert des Reststromes, da  $I^1 = I^2 = I^0$  gilt.

Die Abbildung 4.5 stellt den Verlauf des Stromes im Gegensystem dar. Der Zeitpunkt des Erdschlusseintritts und des Verlöschens, lässt sich deutlich aufgrund der Pegeländerung erkennen.

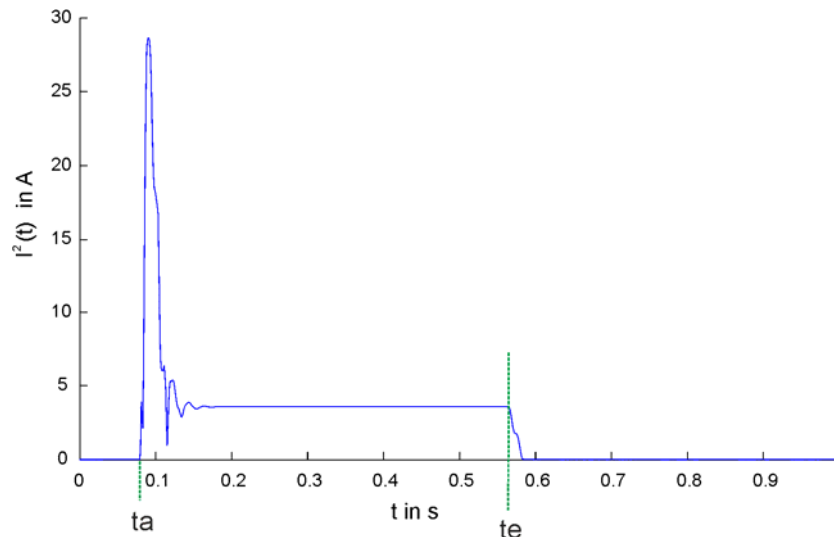


Abbildung 4.5: Verlauf des Stroms im Gegensystems [4]

### 4.3 Oberschwingungsverhältnisse

Zwei weitere Möglichkeiten bedienen sich des Effektes der auftretenden Oberschwingungen bei sich ändernden Signalverläufen. Als Ausgangssignale für diese Betrachtung dient die Verlagerungsspannung  $u_{NE}(t)$  sowie der Summenstrom  $i_{\Sigma}(t)$ . Die Berechnung beider Signale erfolgt auf Basis der Nennfrequenz über eine DFT bzw. eine FFT. Das führt dazu, dass der THN durch die beim Erdschlusseintritt eintretende Frequenzänderung größer wird, was wiederum eine leichtere Erdschlussdetektion ermöglicht [4].

Der THN der Verlagerungsspannung ist definiert als das Oberschwingungsverhältnis bezogen auf die Nennspannung  $U_N$  des Netzes [4].

$$THN_U = \frac{\sqrt{U_{NE(2)}^2 + \dots + U_{NE\left(\frac{N}{2}-1\right)}^2}}{U_N} \quad 4.3$$

Beim THN des Summenstromes wird als Basis der eingestellte induktive Löschstrom  $I_L$  verwendet.

$$THN_{I_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{I_{\Sigma(2)}^2 + \dots + I_{\Sigma\left(\frac{N}{2}-1\right)}^2}}{I_L} \quad 4.4$$

Der Vorteil in diesem Fall ist, dass die Einstellung der Petersenspule und somit der Löschstrom, bekannt ist [4].

Aufgrund des Shannon Theorems welches besagt, dass man ein Signal mit mehr als der doppelten Frequenz abtasten muss um es rekonstruieren zu können ergibt sich in den Gleichungen 4.3 und 4.4 der Term  $\left(\frac{N}{2} - 1\right)$ , wobei N die Anzahl der Abtastungen darstellt.

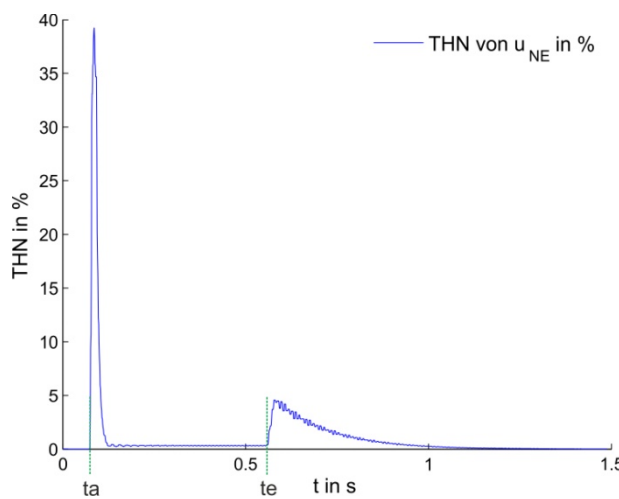


Abbildung 4.6: THN von  $u_{NE}$

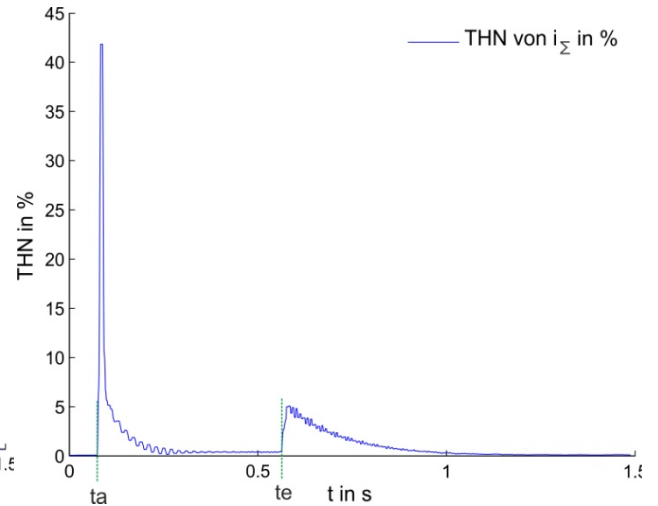


Abbildung 4.7: THN von  $i_{\Sigma}$

Die Abbildung 4.6 zeigt den THN der Verlagerungsspannung. Es lässt sich deutlich der Erdschlussanfang sowie auch das Erdschlussende erkennen, dasselbe ist auch in Abbildung 4.7 ersichtlich, wo der THN des Summenstromes abgebildet ist.

Der THN am Erdschlussende bekommt seine deutliche Ausprägung aufgrund der besonderen Eigenschaft der DFT, dass nämlich, wenn man als Grundlage für die Berechnung anstatt der Eigenfrequenz der Schwingung die Netznennfrequenz verwendet. Es muss beachtet werden, dass der so berechnete THN keine qualitative Aussage über das Oberschwingungsverhältnis trifft [4] [17].

#### 4.4 Sensitiv-Kriterium

Dieses Versuchs-kriterium ist eine mögliche Zusatzfunktion, die nur zum Einsatz kommt, wenn durch die vorhin genannten Methoden keine Erdschlussdetektion erfolgt aber bei allen eine Änderung auftritt. In Abbildung 4.8 ist das Prinzip dieses Kriteriums dargestellt.

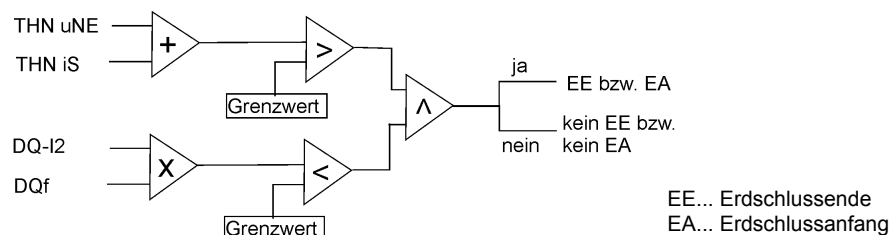


Abbildung 4.8: HOHM-Prinzip

## 5 Verifikation

Um zu erkennen, wie aussagekräftig die durch die Simulation aus Matlab<sup>®</sup> ermittelten Werte sind, werden mehrere Variationen zuerst händisch durchgerechnet und mit den Werten aus dem Simulationsmodell verglichen. Zu diesem Zweck wurde die Verifikation in vier Teile gegliedert.

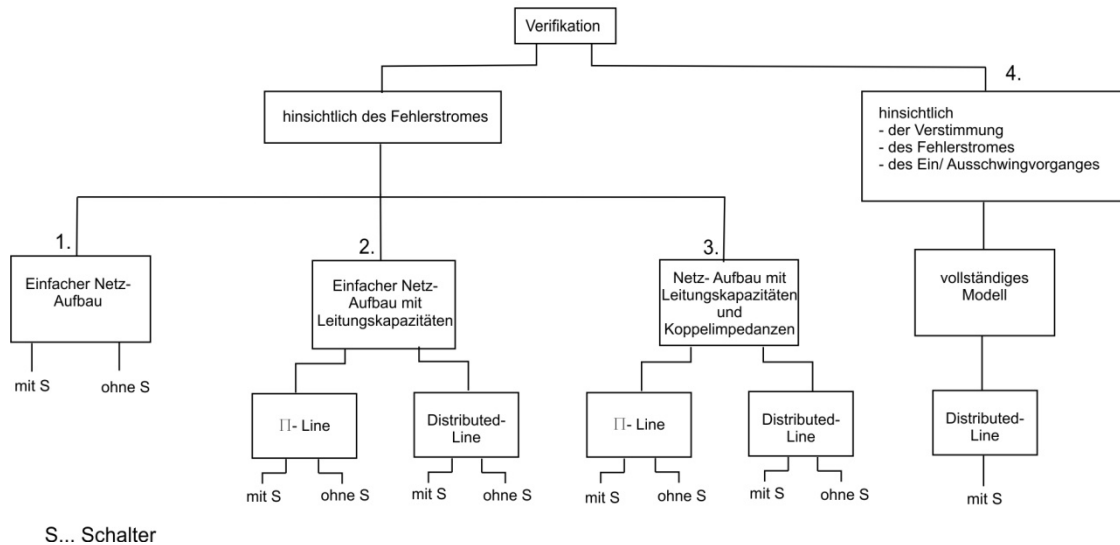


Abbildung 5.1: Flussbild der Verifikationen

Für die ersten drei Punkte werden beim Netzaufbau keine Querableitwiderstände sowie Unsymmetrien berücksichtigt. Weiteres werden die aus der Simulation gewonnenen Effektivwerte über 15 Perioden gemittelt. Der Fehler gegen Erde wird über einen idealen Schalter hergestellt. Der Fehlerwiderstand ist somit Null Ohm. Zur Vereinfachung werden keine Lasten berücksichtigt, das restliche Netz wird durch die Kapazität  $C_{\text{netz}}$  dargestellt. Die händische Berechnung erfolgt aus dem Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten (siehe Abbildung 5.2). Die Kapazität  $C_{\text{netz}}$  wird so gewählt, dass sie einen Fehlerstrom von 90 A im Erdschlussfall verursacht. Die Petersen Spule wird auf eine Verstimmung von 10% (überkompensiert) ausgelegt. Dadurch sind alle Komponenten des Ersatzschaltbildes bekannt und es kann der tatsächlich auftretende Fehlerstrom berechnet werden.



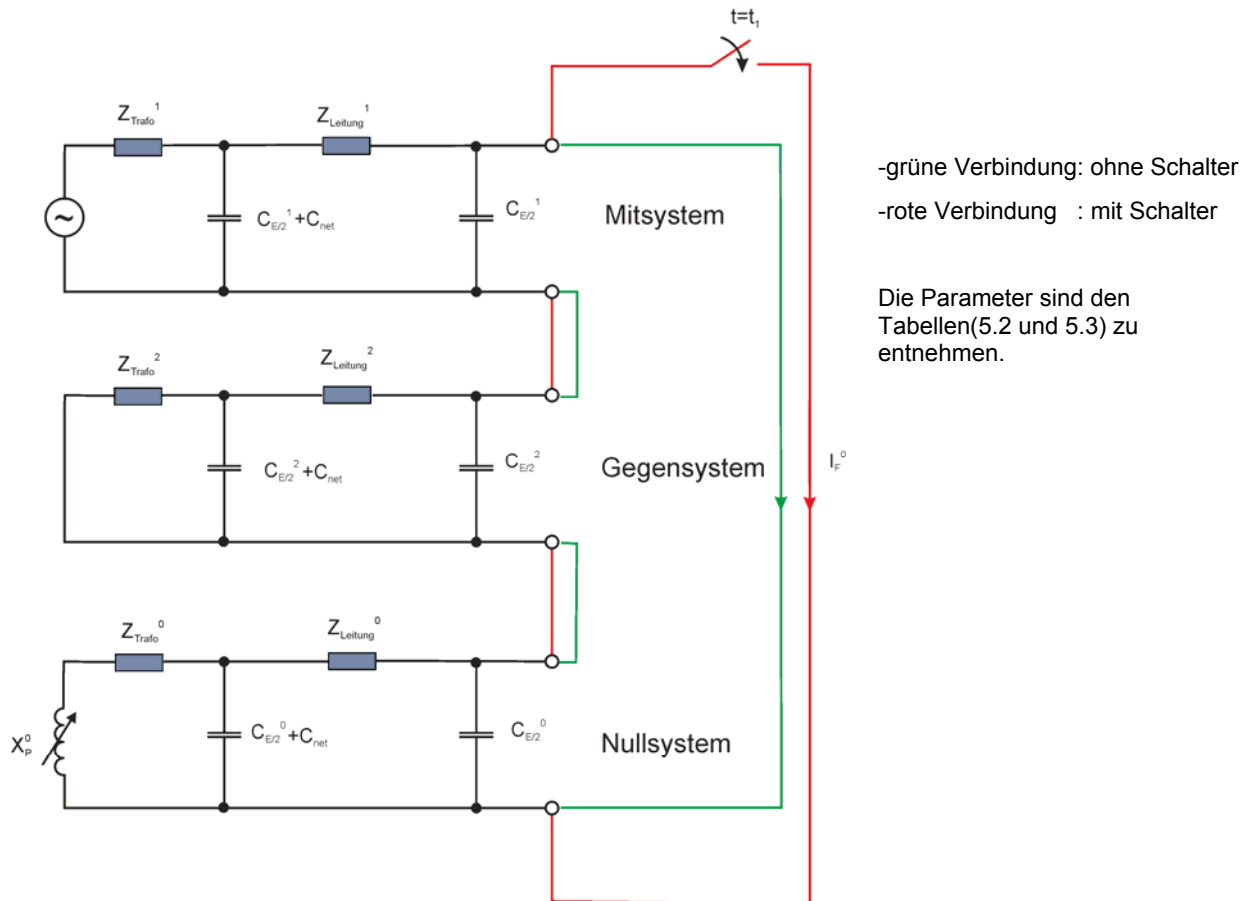


Abbildung 5.2: Darstellung des Fehlers in Symmetrischen Komponenten

Mit und Gegensystem

$Z_{\text{Trafo}}^1 = Z_{\text{Trafo}}^2$ $Z_{\text{Leitung}}^1 = Z_{\text{Leitung}}^2$ $C_{E/2}^1 = C_{E/2}^2$ $C_{\text{net}}^1 = C_{\text{net}}^2$	Mit- bzw. Gegenimpedanz des Transformators Mit- bzw. Gegenimpedanz der Leitung Halbe Betriebskapazität aufgrund der $\Pi$ - Ersatzschaltung der Leitung Konzentrierte Erd-Kapazität, um alle weiteren Abgänge darzustellen
--	---

Nullsystem

$Z_{\text{Trafo}}^0$ $Z_{\text{Leitung}}^0$ $C_{E/2}^0$ $C_{\text{net}}^0$ $X_P^0$	Nullsystem des Transformators Nullsystem der Leitung Halbe Nullkapazität aufgrund der PI Ersatzschaltung der Leitung Konzentrierte Kapazität, um alle weiteren Abgänge darzustellen Reaktanz der Petersenspule
--	--

Tabelle 5.1: Zeichenerklärung

## 5.1 Einfacher Netz- Aufbau

Das Netz besteht nur aus der Transformatorimpedanz, Leitungsimpedanz sowie der Kapazität des restlichen Netzes ( $Z_{\text{Netz}}$ ). Die Simulation wird einmal mit und einmal ohne Schalter durchgeführt. Der Schalter stellt den Fehler gegen Erde her, ohne Schalter bedeutet, dass der Fehler bereits stationär anliegt und es somit keine Ein- und Ausschwingvorgänge gibt (siehe Abbildung 5.2).

Leitung	Werte	
$Z_{\text{Leitung}}^1 = Z_{\text{Leitung}}^2$	2+j4	[Ω]
$Z_{\text{Leitung}}^0$	8+j16	[Ω]
$C_E^1$	0	[F] pro km
$C_E^0$	0	[F] pro km
Transformator		
S	20	[MVA]
$u_k$	0,12	p.u.
$P_k$	100	[kW]
$Z_{\text{Trafo}}^1 = Z_{\text{Trafo}}^0$	0,1+j2,4	[Ω]

Tabelle 5.2: Technische Daten

### 5.1.1 Berechnung

$$U_{\text{nenn}} = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \quad ; I_C = 90 \text{ A} \quad ; I_V = 9 \text{ A} \quad 5.1$$

$$X_{\text{Cnetz}} = -j3 \frac{U_{\text{nenn}}}{I_C} \quad ; X_{\text{pet}}^0 = j3 \frac{U_{\text{nenn}}}{(I_C + I_V)} \quad 5.2$$

Zuerst wird die Impedanz des Nullsystems mithilfe der Formel 5.3 berechnet.

$$\underline{Z}^0 = \frac{1}{\frac{1}{X_{\text{Cnetz}}^0} + \frac{1}{X_{\text{pet}}^0 + \underline{Z}_{\text{Trafo}}^0}} + \underline{Z}_{\text{Leitung}}^0 \quad 5.3$$

Mit Hilfe der Formel 5.4 lässt sich die Impedanz des Gegensystems ermitteln.

$$\underline{Z}^2 = \frac{1}{\frac{1}{X_{\text{Cnetz}}^2} + \frac{1}{\underline{Z}_{\text{Trafo}}^2}} + \underline{Z}_{\text{Leitung}}^2 \quad 5.4$$

Entsprechend der Formel 5.5 wird die Gesamtimpedanz bestimmt. Durch die Impedanzen ( $\underline{Z}^0, \underline{Z}^2$  und  $\underline{Z}_{\text{ges}}$ ) wird in weiterer Folge der Fehlerstrom über die Fehlerstelle berechnet.

$$\underline{Z}_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}^0 + \underline{Z}^2 + \underline{Z}_{Leitung}^1} + \frac{1}{X_{Cnetz}}} + \underline{Z}_{Trafo}^1 \quad 5.5$$

$$3 \cdot I_F^0 = 3 \cdot \frac{U_{nenn} \cdot \left(1 - \frac{1}{\underline{Z}_{ges}} \underline{Z}_{Trafo}^1\right)}{\underline{Z}^0 + \underline{Z}^2 + \underline{Z}_{Leitung}^1} \quad 5.6$$

Ohne Schalter	Einfacher Aufbau
I <sub>F</sub> berechnet in A	8,344068
I <sub>F</sub> aus Simulation in A	8,343991
Abweichung in %	0,001061
Mit Schalter	
I <sub>F</sub> berechnet in A	8,344068
I <sub>F</sub> aus Simulation in A	8,344991
Abweichung in %	0,011053

**Tabelle 5.3: Ergebnisse Einfacher Aufbau**

Wie in Tabelle 5.3 ersichtlich ist beträgt die Abweichung ohne Schalter 0,001 Prozent und mit Schalter 0,01 Prozent.

## 5.2 Einfacher Netz- Aufbau mit Leitungskapazitäten

Hier werden die zwei Leitungsbausteine ( $\Pi$ -Line und Distributed Line), die das Simulink<sup>®</sup> anbietet, verwendet. Als Werte gelten dieselben wie in Tabelle 5.2 mit einer Ausnahme von  $C_E^1$  und  $C_E^0$ , für welche folgende Werte einzusetzen sind  $C_E^1=10e-9$ , sowie  $C_E^0=6e-9$ . Siehe Abbildung 5.3.

Die  $\Pi$ -Line entspricht vom Aufbau her der klassischen  $\Pi$ -Ersatzschaltung der Leitung (Abbildung 3.4). Eine gute Annäherung für den maximalen Frequenzbereich, der durch die  $\Pi$ -Line abgedeckt wird, ist aus Formel 3.15 ersichtlich. Aufgrund der Tatsache, dass  $f_{max}$  mit größer werdender Leitungslänge immer kleiner wird, eignet sich dieses Leitungsmodell nur für kurze Leitungsstrecken und ist eher ungeeignet für transiente, hochfrequente Vorgänge.

Ein ungefähres Modell der Distributed Line wird hypothetisch durch unendliche Kaskadierung identischer  $\Pi$ -Lines gewonnen, wie in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt ist [15].

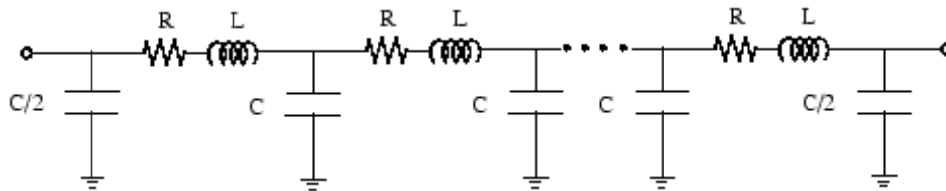


Abbildung 5.3: Schematisches Modell der Distributed Line [15]

Dieses Modell wird über die Wellengleichung gelöst und repräsentiert im Vergleich zur  $\Pi$ -Line, Wellenausbreitungsphänomene, Reflexionen am Leitungsende und transiente Vorgänge mit viel besserer Genauigkeit [15].

Ohne Schalter	Distributed Line	$\Pi$ -Line
$I_F$ berechnet in A	7,692561	7,692561
$I_F$ aus Simulation in A	7,692988	7,692517
Abweichung in %	0,005558	0,000563
Mit Schalter		
$I_F$ berechnet in A	7,692561	7,692561
$I_F$ aus Simulation in A	7,692424	7,692013
Abweichung in %	0,001764	0,001582

Tabelle 5.4: Ergebnisse Einfacher Netz-Aufbau mit Leitungskapazitäten

In Tabelle 5.4 sind die Abweichungen der Distributed Line mit 0,006 Prozent und der  $\Pi$ -Line mit 0,0006 Prozent ohne Schalter, gegenüber der händischen Berechnung dargestellt. Mit Schalter ergibt sich für das erstgenannte Leitungsmodell eine Abweichung von 0,0018 Prozent und für das zweitgenannte eine Abweichung von 0,0016 Prozent.

### 5.3 Netz- Aufbau mit Leitungskapazitäten und Koppelimpedanzen

Entsprechend Abbildung 5.3 wird der Fehler einmal mit und das andere Mal ohne Schalter simuliert. Als Leitungselemente werden die  $\Pi$ -Line sowie die Distributed-Line verwendet und in weiterer Folge der händischen Berechnung gegenübergestellt.

Leitung	Werte	
$Z_{\text{Leitung}}^1$	0,306+j0,355	[ $\Omega$ ] pro km
$Z_{\text{Leitung}}^0$	1,071+j1,42	[ $\Omega$ ] pro km
$C_E^1$	10e-9	[F] pro km
$C_E^0$	6e-9	[F] pro km
Transformator		
S	20	[MVA]
$U_k$	12%	
$P_k$	100	[kW]
$Z_{\text{Trafo}}^1 = Z_{\text{Trafo}}^0$	0,1+j2,4	[ $\Omega$ ]

Tabelle 5.5: Technische Daten

Ohne Schalter	Distributed Line	$\Pi$ -Line
$I_F$ berechnet in A	7,684646	7,684646
$I_F$ aus Simulation in A	7,685017	7,684603
Abweichung in %	0,004829	0,00056
Mit Schalter		
$I_F$ berechnet in A	7,684646	7,684646
$I_F$ aus Simulation in A	7,685016	7,684602
Abweichung in %	0,004817	0,001582

Tabelle 5.6: Ergebnisse Einfacher Netz- Aufbau mit Leitungskapazitäten und Koppelimpedanzen

Entsprechend der Tabelle 5.6 betragen die Abweichungen (ohne Schalter) gegenüber der händischen Berechnung mit der Distributed Line 0,0048 Prozent und mit der  $\Pi$ -Line 0,00056 Prozent. Mit Schalter ergibt sich für das erstgenannte Leitungsmodell eine Abweichung von 0,0048 Prozent und für das zweitgenannte eine Abweichung von 0,0016 Prozent.

## 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Einfacher Aufbau			Aufbau mit Koppelimpedanzen	
	Einfacher Aufbau	Distributed Line	$\Pi$ -Line	Distributed Line	$\Pi$ -Line
<b>Ohne Schalter</b>					
$I_F$ berechnet in A	8,344068	7,692561	7,692561	7,684646	7,684646
$I_F$ aus Simulation in A	8,343977	7,692988	7,692514	7,685017	7,684603
Abweichung in %	0,001091	0,005558	0,000611	0,004829	0,00056
<b>Mit Schalter</b>					
$I_F$ berechnet in A	8,344068	7,692561	7,692561	7,684646	7,684646
$I_F$ aus Simulation in A	8,343969	7,692478	7,692508	7,685016	7,684602
Abweichung in %	0,001186	0,001078	0,000688	0,004817	0,00057

**Tabelle 5.7: Zusammenfassung der Ergebnisse**

Für die Abweichungen sind grundsätzlich der gemittelte Effektivwert des Fehlerstromes über 15 Perioden, die Magnetisierungsimpedanz des Transformators, welche im Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten nicht berücksichtigt wird, sowie die endliche Abtastfrequenz aus der Simulation verantwortlich. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind die Abweichungen marginal.

Die genauesten Ergebnisse liefert die  $\Pi$ -Line, ein Grund dafür dürfte sein, dass sie vom Aufbau her im Gegensatz zur Distributed Line der klassischen  $\Pi$ -Ersatzschaltung der Leitung entspricht (siehe Abbildung 3.4) welches für das Ersatzschaltbild in den symmetrischen Komponenten verwendet wird und die Grundlage für die händische Berechnung bildet. Matlab® Simulink® eignet sich aufgrund der geringen Abweichungen für die Berechnung der zukünftigen Simulationsmodelle.

## 5.5 Verifikation eines vollständigen Modells

Um die Verstimmung, die Dämpfung, den Fehlerstrom an der Fehlerstelle und den Einschwingvorgang zu überprüfen, wurde ein 20kV Netz mit folgenden Parametern (siehe Tabelle 6.8) im Simulink® aufgebaut. Die Netzparameter(v,d), wurden dann in weiterer Folge aus dem Ausschwingvorgang der Verlagerungsspannung ermittelt. Als Leitungsbaustein im Simulationsmodell wird die "Distributed Line" verwendet, da sie gegenüber der  $\Pi$ -Line für transiente Vorgänge besser geeignet ist, wie in Kapitel 5.2 beschrieben. Aufgrund der symmetrisch aufgebauten Leitungen wird im Modell eine minimale Unsymmetrie gegen Erde benötigt, da ansonsten keine Verlagerungsspannung im fehlerfreien Betrieb auftritt, welche jedoch in einem Netz aufgrund von ungleichen Leiter- Erde Abständen auftritt.

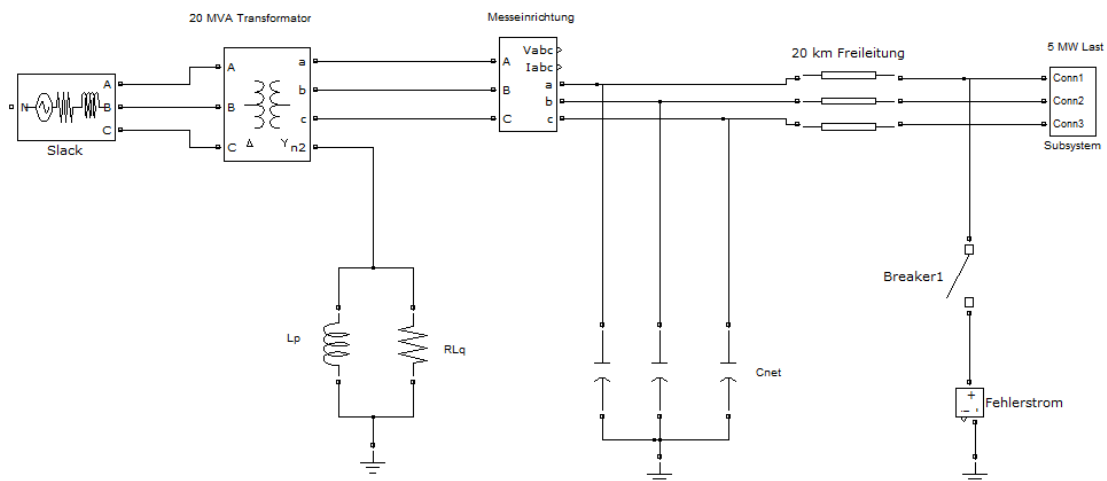


Abbildung 5.4: Simulationsmodell in Matlab® Simulink®

Wie in Abbildung 5.4 ersichtlich ist, wird zur Vereinfachung der Verifikation der Fehlerwiderstand vernachlässigt, sowie das restliche Netz mit einer konzentrierten Kapazität  $C_{net}$  dargestellt. Da die Leitungsmodelle im Matlab® Simulink® keine Querableitwiderstände berücksichtigen, wird der Parallelwiderstand ( $R_{Lq}$ ) zur Peterson-Spule mittels der Formel 5.7 so ausgelegt, dass er näherungsweise der gewünschten Dämpfung entspricht. Dieser Vereinfachung liegt zugrunde, dass in fast allen praktischen Fällen der Spulenwiderstand deutlich größer als die Ableitwiderstände ist.

$$R_{Lq} = \frac{U_L}{d \cdot I_c} \quad 5.7$$

Das Simulationsmodell wird im ersten Schritt auf eine Verstimmung von  $v=0$  abgestimmt. Dies erfolgt durch einen iterativen Vorgang bei dem die Spuleninduktivität solange variiert

wird bis der Imaginärteil des Fehlerstromes verschwindet. Ausgehend von diesem Punkt wird der kapazitive Strom  $I_C$  ermittelt (siehe Formel 5.8) und der gewünschte Verstimmungsstrom  $I_V$  über die Spuleninduktivität  $L_P$  wie in Formel 5.9 ersichtlich ist eingestellt.

$$I_c = \frac{U_L}{L_P \cdot \omega_N} \quad 5.8$$

$$L_P = \frac{U_L}{(I_c + I_V) \cdot \omega_N} \quad 5.9$$

Der Lichtbogen und eventuelle Oberschwingungen in Spannung und Strom werden nicht berücksichtigt.

Leitung	Werte	
$Z_{Leitung}^1$	0,306+j0,355	[Ω] pro km
$Z_{Leitung}^0$	1,071+j1,42	[Ω] pro km
$C_E^1$	10e-9	[F] pro km
$C_E^0$	6e-9	[F] pro km
Transformator		
S	20	[MVA]
$u_k$	0,12	p.u.
$P_k$	100	[kW]
$Z_{Trafo}^1 = Z_{Trafo}^0$	0,1+j2,4	[Ω]
Restnetz		
$C_{net}$	6,48	[μF]
Netzparameter		
$I_{CE}$	72	[A]
d	3%	
v	5%	
$L_P$	0,4850	[H]
$R_{Pq}$	5,369	[kΩ]

**Tabelle 5.8: Technische Daten**

Ausgehend von  $I_{CE}=72$  A wurde mittels Gleichung 5.10 die konzentrierte Kapazität  $C_{net}$  berechnet.

$$C_{net} = \frac{I_{CE}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \omega_N} - C_E^0 \cdot 20 km = 6,49 \mu F \quad 5.10$$



### 5.5.1 Überprüfung der Verstimmung

In Abbildung 5.5 ist der Ausschwingvorgang der Verlagerungsspannung nach dem Erlöschen des Erdschlusses dargestellt. Bei 0,6 Sekunden beginnt der Ausschwingvorgang, aus dem sich die Verstimmung und Dämpfung, wie in Kapitel 2.3.10 beschrieben, ermitteln lassen.

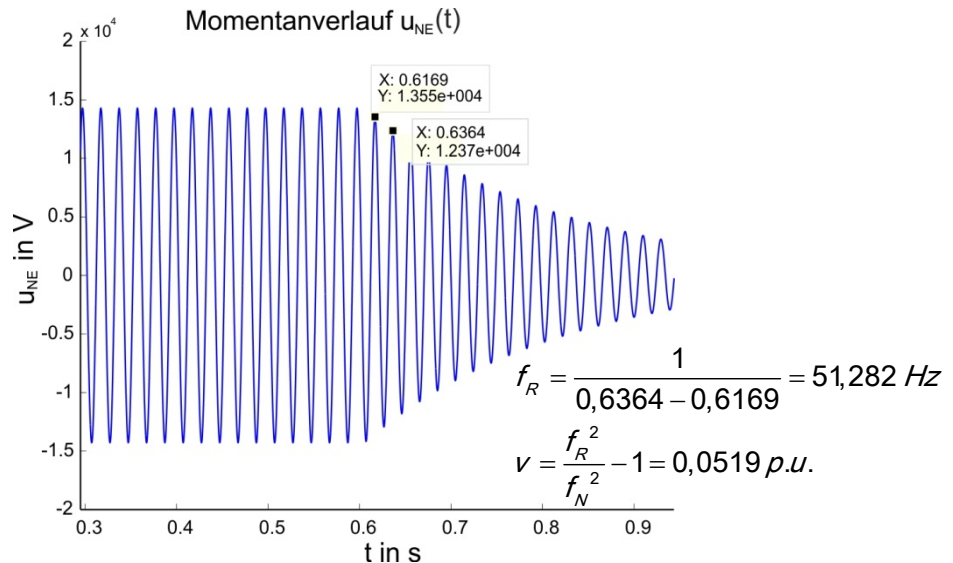


Abbildung 5.5: Momentanverlauf der Verlagerungsspannung

	v in p.u.	d in p.u.
Vorgabe	0,05	0,03
Berechnet	0,0519	0,029
Abweichung in %	3,8	3,3

Tabelle 5.9: Vergleich von v und d

Die Abweichung der Verstimmung folgt aus der endlichen Abtastrate von 20 kHz, die eine Ungenauigkeit von ca. 0.5% verursacht, sowie aus den Simulationsschritten in Simulink® und Rundungen der Messwerte in Matlab®. Wie aus Tabelle 5.9 ersichtlich ist, beträgt die Abweichung der Dämpfung 3,3 Prozent.

- Einfluss der Abtastung auf die Verstimmung

Die kleinste Schrittweite bei einer Abtastung mit 20 kHz beträgt [14]:

$$t_{\text{Schritt}} = \frac{1}{20\text{kHz}} = 0.00005\text{ s}$$

5.11

Die Eigenfrequenz des Nullsystems berechnet sich wie folgt:

$$f_A = \sqrt{(\nu + 1) \cdot f_N^2} = 51,2375 \text{ Hz} \quad 5.12$$

Eine Abweichung des zu ermittelten Samplewerts des Zeitstempels um einen einzigen Sample ergibt eine Änderung in der Momentanfrequenz von [14]:

$$f[m] = \frac{1}{t[m+2] - t[m] \pm t_{\text{Schritt}}} \quad 5.13$$

Der Startzeitpunkt  $t[m]$  wird mit  $t=0$  festgelegt somit ergibt sich für  $t[m+2]$  die Periodendauer von  $f_A$ . Weiters wird  $t_{\text{Schritt}}$  negativ angenommen. Diese Werte, eingesetzt in die Gleichung 5.13 ergeben:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{f_A} - 0.00005} = 51,3663 \quad 5.14$$

Wie in der Gleichung 5.15 zu sehen ist, ergibt sich durch die Abtastung eine Änderung von 0,54 Prozent gegenüber der vorgegebenen Verstimmung von  $\nu=0,05$  p.u.

$$\nu = \frac{51,3663^2}{50^2} - 1 = 5,54 \% \quad 5.15$$

### 5.5.2 Überprüfen des Einschwingvorganges

Der Einschwingvorgang wird mit Hilfe des Ersatzschaltbildes der symmetrischen Komponenten (siehe Abbildung 5.6) über Differentialgleichungen nachgebildet [18]. Wobei dies nur für die fehlerbehaftete Phase gilt. Beim Lösen der Differentialgleichungen entstehen nur reelle Werte und somit ist die Rücktransformation der symmetrischen Komponenten in Phasengrößen über die Entsymmetrierungsmatrix (siehe Formel 5.16) nur für jene Phase möglich, in der keine komplexen Drehoperatoren ( $a, a^2$ ) vorkommen. Als Solver in Matlab<sup>®</sup> Simulink<sup>®</sup> wird der ode23tb angewendet.

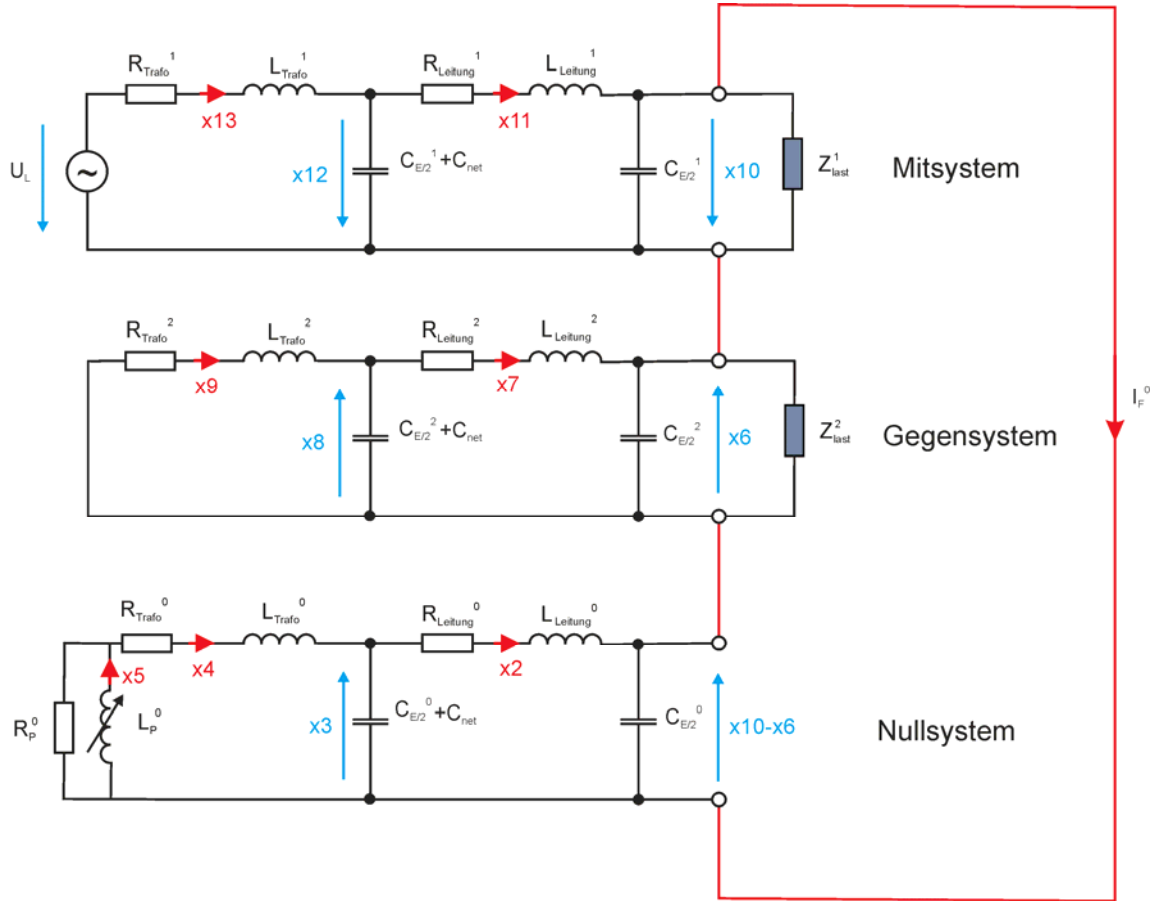


Abbildung 5.6: Ersatzschaltbild- Symmetrische Komponenten

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{Lsg}^0}{L_{Lsg}^0} & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{Lsg}^0} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_{Dsg}^0 + R_p^0}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_p^0}{L_{Trafo}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_p^0}{L_p^0} & -\frac{R_p^0}{L_p^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{E2}^0 \cdot R_{Lsg}^0} & \frac{-1}{C_{E2}^0} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{E2}^0 \cdot R_{Lsg}^0} & \frac{1}{C_{E2}^0} & 0 & 0 & \frac{C_{E2}^1}{C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & \frac{R_{Lsg}^0}{L_{Lsg}^0} & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_{Dsg}^0}{L_{Trafo}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{(2 \cdot C_{E2}^1 + C_{E2}^0)} & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{E2}^1}{R_{Lsg}^0 \cdot C_{E2}^0 \cdot (2 \cdot C_{E2}^1 + C_{E2}^0)} & \frac{C_{E2}^0}{C_{E2}^0 \cdot (2 \cdot C_{E2}^1 + C_{E2}^0)} & 0 & 0 & \frac{-1}{R_{Lsg}^0 \cdot (2 \cdot C_{E2}^1 + C_{E2}^0)} \cdot \left( \frac{1 + C_{E2}^0}{C_{E2}^0} \right) & \frac{C_{E2}^0}{(2 \cdot C_{E2}^1 + C_{E2}^0) \cdot C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & \frac{R_{Lsg}^0}{L_{Lsg}^0} & \frac{1}{L_{Lsg}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_{Dsg}^0}{L_{Trafo}^0} & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_{Dsg}^0}{L_{Trafo}^0} & 0 & \frac{1}{C_{net} + C_{E2}^0} & 0 & \frac{1}{L_{Trafo}^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \end{bmatrix}$$

Abbildung 5.7: Differentialgleichungssystem (vergrößert im Anhang)

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \underline{T} \cdot \begin{pmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{pmatrix} \tag{5.16}$$

Um die Anfangsbedingungen, wie sie in Abbildung 5.8 ersichtlich sind, bestimmen zu können, muss zuerst definiert werden, zu welchem Zeitpunkt der Spannung der Fehlereintritt stattfindet. Für die weiteren Betrachtungen wurde der Erdschlussanfang im Spannungsmaximum der betreffenden Phase angenommen. Die benötigten Anfangsbedingungen werden dann in weiterer Folge aus dem Mitsystem ermittelt, da im fehlerfreien Betrieb kein Gegen- und Nullsystem vorhanden sind.

- Ermittlung der Anfangsbedingungen:

$$X_L = j \cdot \omega_N \cdot L_{Leitung} \quad 5.17$$

$$X_C = \frac{1}{j \cdot \omega_N \cdot C_{E/2}} \quad 5.18$$

$$X_{Cnet} = \frac{1}{j \cdot \omega_N \cdot C_{net}} \quad 5.19$$

$$X_{Trafo} = j \cdot \omega_N \cdot L_{Trafo} \quad 5.20$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{R_{Last} \cdot X_C}{(R_{Last} + X_C)} + X_L + R_{Ltg} \quad 5.21$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{X_{Cnet} \cdot X_C}{(X_{Cnet} + X_C)} \quad 5.22$$

$$\underline{Z}_{ges} = X_{Trafo} + R_{Trafo} + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \quad 5.23$$

$$\underline{i}_{X13} = \frac{\underline{U}_L}{\underline{Z}_{ges}} \quad 5.24$$

$$\underline{U}_{X12} = \underline{U}_L - \underline{i}_{X13} \cdot (X_{Trafo} + R_{Trafo}) \quad 5.25$$

$$\underline{i}_{X11} = \frac{\underline{U}_{X12}}{\underline{Z}_1} \quad 5.26$$

$$\underline{U}_{X10} = \underline{i}_{X11} \cdot \frac{R_{Last} \cdot X_C}{(R_{Last} + X_C)} \quad 5.27$$

$$\begin{aligned}x_{13}(0) &= \text{real}(\underline{i}_{X13}) \\x_{12}(0) &= \text{real}(\underline{U}_{X12}) \\x_{11}(0) &= \text{real}(\underline{i}_{X11}) \\x_{10}(0) &= \text{real}(\underline{U}_{X10})\end{aligned}$$

5.28

$$x_{13}(0) = 285,3 \text{ A}$$

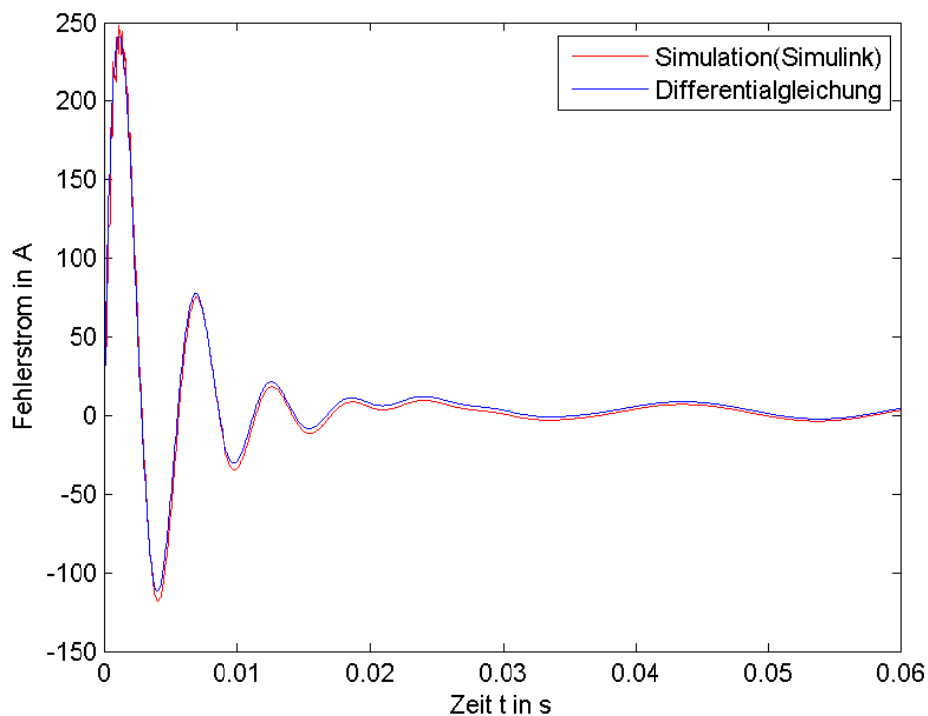
$$x_{12}(0) = 16,2676 \text{ kV}$$

$$x_{11}(0) = 283,9 \text{ A}$$

$$x_{10}(0) = 14,1914 \text{ kV}$$

**Abbildung 5.8: Anfangsbedingungen**

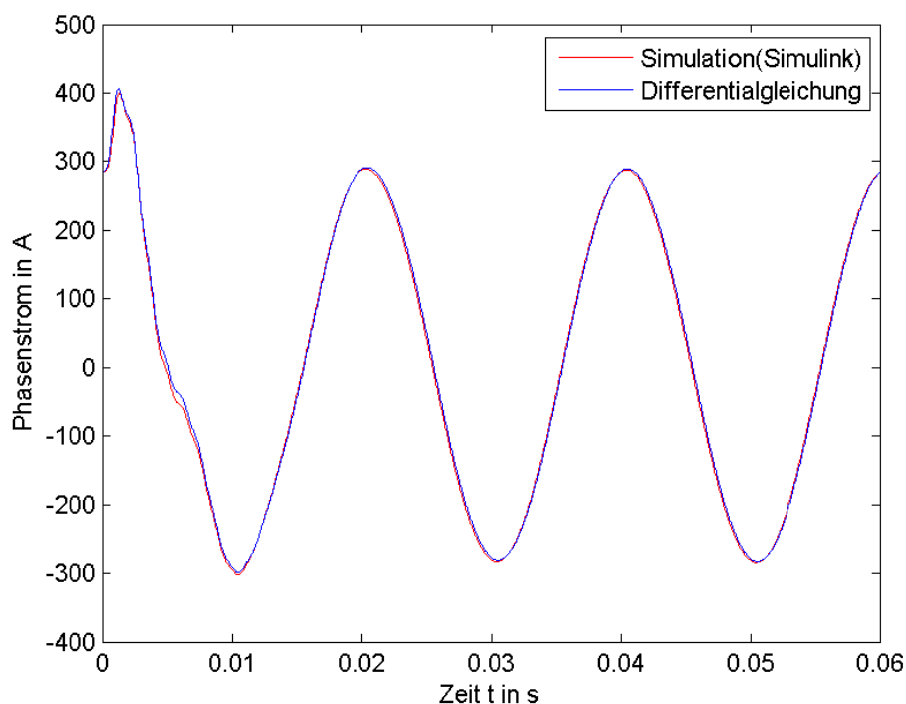
In Abbildung 5.9 ist der Momentanverlauf des Fehlerstromes aus den Differentialgleichungen und der Simulation über die ersten drei Perioden dargestellt.



**Abbildung 5.9: Vergleich der Fehlerstromes an der Fehlerstelle**

Die Abweichungen kommen dadurch zustande, da die Leitungen in den Symmetrischen Komponenten (Abbildung 5.6) als PI- Elemente mit konzentrierten Parametern nachgebildet

werden. Diese PI- Ersatzschaltung ist, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, abhängig von der Leitungslänge und den Leitungsparametern(L,C) nur für einen begrenzten Frequenzbereich geeignet. Beim Entladevorgang der kranken Phase, der ungefähr nach einer Viertelperiode abgeklungen ist, treten mittel- bis hochfrequente Vorgänge auf, die mit dem vorhin genannten PI Leitungsmodell nicht erfasst werden können. Dies erklärt auch, warum das blau gekennzeichnete Signal im Gegensatz zum roten in diesem subtransienten Zeitabschnitt keine Zacken enthält (siehe Abbildung 5.10). Weiters wird im Simulationsmodell die Frequenzabhängigkeit der Leitungsimpedanzen berücksichtigt, wodurch sich Unterschiede in der Amplitude des Stromes ergeben.



**Abbildung 5.10: Vergleich des Phasenstromes**

In Abbildung 5.10 wird der Vergleich der Phasenströme der fehlerbehafteten Phase dargestellt. Der Phasenstrom aus den Differentialgleichungsmodell wird durch Rücktransformation der Ströme  $x_{13}(t)$  aus den Mitsystem,  $x_9(t)$  aus dem Gegensystem und  $x_4(t)$  aus dem Nullsystem über die Entsymmetrierungsmatrix  $\underline{I}$  gewonnen. Für die Abweichungen sind dieselben Einflussfaktoren verantwortlich, wie sie vorhin beim Fehlerstromvergleich beschrieben wurden.

### 5.5.3 Ausschwingvorgang

Nach dem Verlöschen des Lichtbogens kommt es zu einer Entkoppelung von Mit-, Gegen- und Nullsystem. Das Mitsystem schwingt weiterhin mit 50 Hz. Die Spannung des Gegensystems ist vernachlässigbar klein. Das Nullsystem entsprechend der Abbildung 5.11 schwingt mit seiner Eigenfrequenz aus.

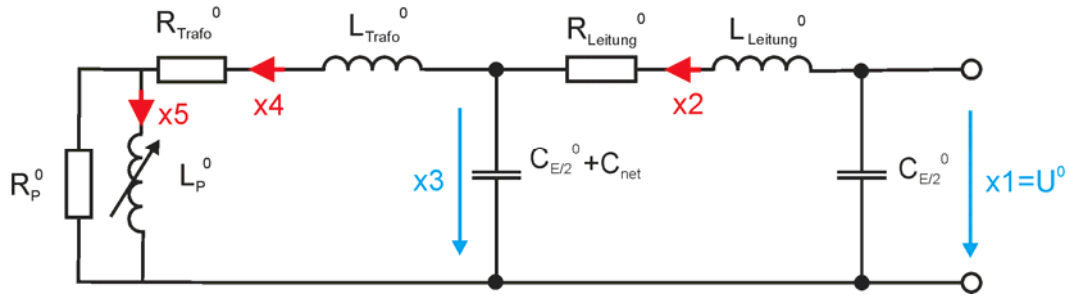


Abbildung 5.11: Nullsystem

Der Ausschwingvorgang wird durch das in Abbildung 5.12 dargestellte Differentialgleichungssystem nachgebildet. In weiterer Folge wird dieses Ergebnis dem aus der Simulation gewonnen Signalverlauf gegenübergestellt.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{C_{E/2}^0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{Ltg}^0} & -\frac{R_{Ltg}^0}{L_{Ltg}^0} & -\frac{1}{L_{Ltg}^0} & & \\ & \frac{1}{C_{E/2}^0 + C_{net}} & & -\frac{1}{C_{E/2}^0 + C_{net}} & \\ & & \frac{1}{L_{Trafo}^0} & -\frac{R_{Trafo}^0 + R_P^0}{L_{Trafo}^0} & \frac{R_P^0}{L_{Trafo}^0} \\ & & & \frac{R_P^0}{L_P^0} & -\frac{R_P^0}{L_P^0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}$$

Abbildung 5.12: Differentialgleichungssystem

Die Anfangsbedingungen(siehe Tabelle 5.10) werden ausgehend von der Annahme, dass im Fehlerstromnulldurchgang der Lichtbogen erlischt, aus dem stationären Fehlerfall mit Hilfe des Differentialgleichungssystems für den Einschwingvorgang (siehe Anhang) ermittelt.

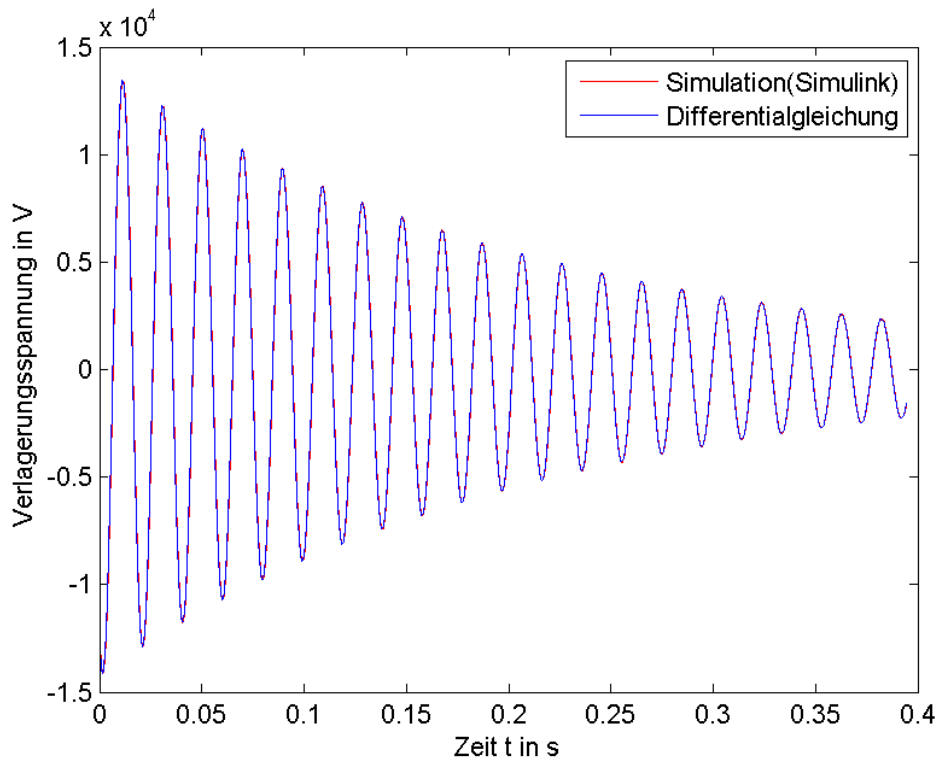
$$x_1(0) = -12,51 \text{ kV} \quad x_2(0) = 0,157 \text{ A}$$

$$x_3(0) = -12,35 \text{ kV} \quad x_4(0) = 14,52 \text{ A}$$

$$x_5(0) = 15,71 \text{ A}$$

**Tabelle 5.10: Anfangsbedingungen**

In Abbildung 5.13 ist der Momentanverlauf der Verlagerungsspannung aus den Differentialgleichungen und der Simulation dargestellt. Die geringfügigen Abweichungen kommen, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, zustande.



**Abbildung 5.13: Vergleich der Verlagerungsspannungen**



### 5.5.4 Überprüfen des Fehlerstromes

Der Fehlerstrom wird ausgehend vom Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten berechnet (Berechnung im Anhang).

$I_F$ berechnet in A	3,6338
$I_F$ aus Simulation in A	3,6339
Abweichung in %	0,003

Die geringfügigen Abweichungen kommen aus den Gründen die in Kapitel 5.4 beschrieben sind zustande.

### 5.5.5 Vergleich des THN von $U_{NE}$

Für diese Verifikation wird ein realer Störschrieb, von dem die Daten, wie Verstimmung, Dämpfung und Spulenstrom, bekannt sind, näherungsweise nachgebildet (siehe Abbildung 5.14). Mittels Formel 2.1 kann der kapazitive Erdschlussstrom  $I_{CE}$  ermittelt werden, der in weiterer Folge die Netzausdehnung vorgibt. Die genauen Parameter des Simulationsmodells sind der Tabelle 5.11 zu entnehmen.

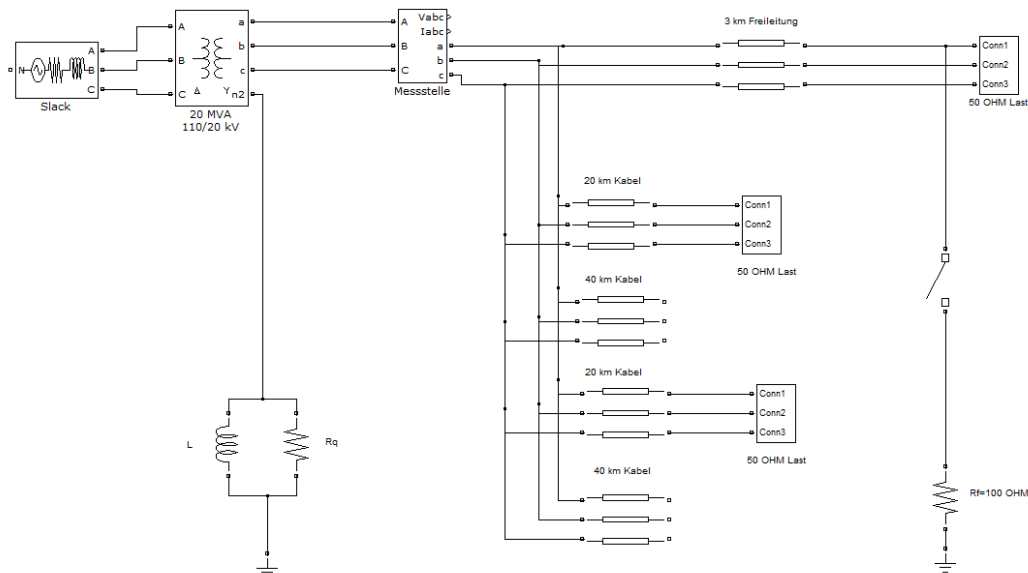


Abbildung 5.14: Simulationsmodell in Matlab Simulink®

Leitung	Werte	
$Z_{Leitung}^1$	0,306+j0,355	[Ω] pro km
$Z_{Leitung}^0$	1,071+j1,42	[Ω] pro km
$C_E^1$	10e-9	[F] pro km
$C_E^0$	6e-9	[F] pro km
Transformator		
S	20	[MVA]
$U_k$	0,12	p.u.
$P_k$	100	[kW]
$Z_{Trafo}^1 = Z_{Trafo}^0$	0,1+j2,4	[Ω]
Kabel		
$Z_{Kabel}^1$	0,193+j0,1316	[Ω] pro km
$Z_{Kabel}^0$	0,83+j0,73	[Ω] pro km
$C_{EK}^1$	2.16e-7	[F] pro km
$C_{EK}^0$	2.16e-9	[F] pro km
Netzparameter		
$I_{CE}$	340	[A]
L	0,116	[H]
$R_q$	243	[Ω]
Rf	100	[Ω]

Tabelle 5.11: Technische Daten

Wie in der Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 zu sehen ist, unterscheiden sich die Signalverläufe nur geringfügig voneinander. Die kleinen Unterschiede zwischen den Signalen kommen aufgrund der fehlenden Netzdaten zustande, ohne die kein exakter Nachbau möglich ist. Die Berechnung erfolgte mit der in Kapitel 6 beschriebenen Software.

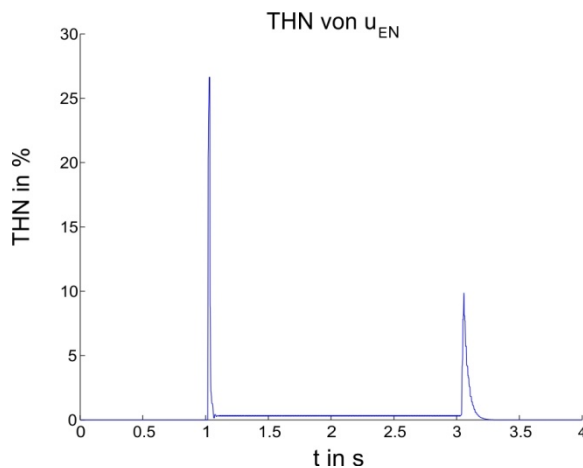


Abbildung 5.15: THN von  $U_{NE}$  aus Simulation

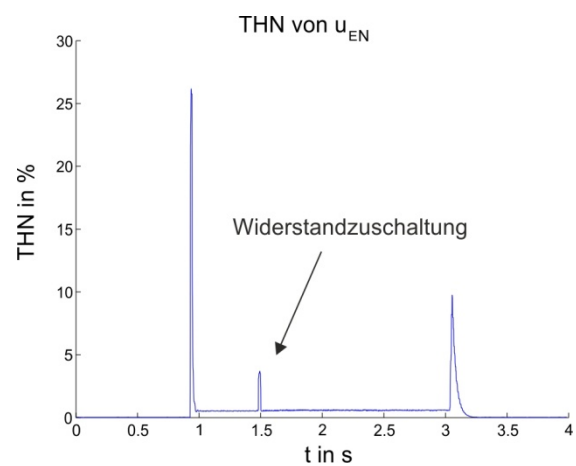


Abbildung 5.16: THN von  $U_{NE}$  aus Störschrieb

## 6 Auswertung

Es wurden Simulationen mit verschiedenen Kombinationen aus Verstimmung, Dämpfung, Kapazitiver Erdschlussstrom und Fehlerwiderstand bei einer vorgegebenen Fehlerdauer von 0,71 Sekunden, sowie einer Nennspannung von 110 kV, durchgeführt. Die eingestellte Fehlerdauer variiert jedoch leicht, da in den Simulationen wie in der Realität, die Unterbrechung immer im Stromnulldurchgang stattfindet, dadurch bewegt sich die reale Erdschlussdauer zwischen 0,71 und 0,72 Sekunden. Der Fehlerort befindet sich für alle Simulationen am Ende einer 100 Kilometer langen Freileitung. Um die verschiedenen Kapazitiven Erdschlussströme zu erreichen, werden parallel zur bestehenden Freileitung entsprechende Abgänge hinzugefügt (Parameter im Anhang). In weiterer Folge wurden die Simulationen mit der in Abbildung 6.1 dargestellten Software (Stand Juli 2010) ausgewertet. Die Erdschlussdetektion erfolgt durch in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren. Der Prototypalgorithmus bildet von den einzelnen Methoden den Differentialquotienten (Gleichung 6.1 zeigt ein exemplarisches Beispiel) und überprüft ob eine Grenzwert Über- bzw. Unterschreitung stattfindet. Für eine erfolgreiche Detektion müssen grundsätzlich mindestens zwei Verfahren gleichzeitig ansprechen.

$$DQ - f = \frac{f_n - f_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = \frac{\Delta f}{\Delta t}$$

6.1

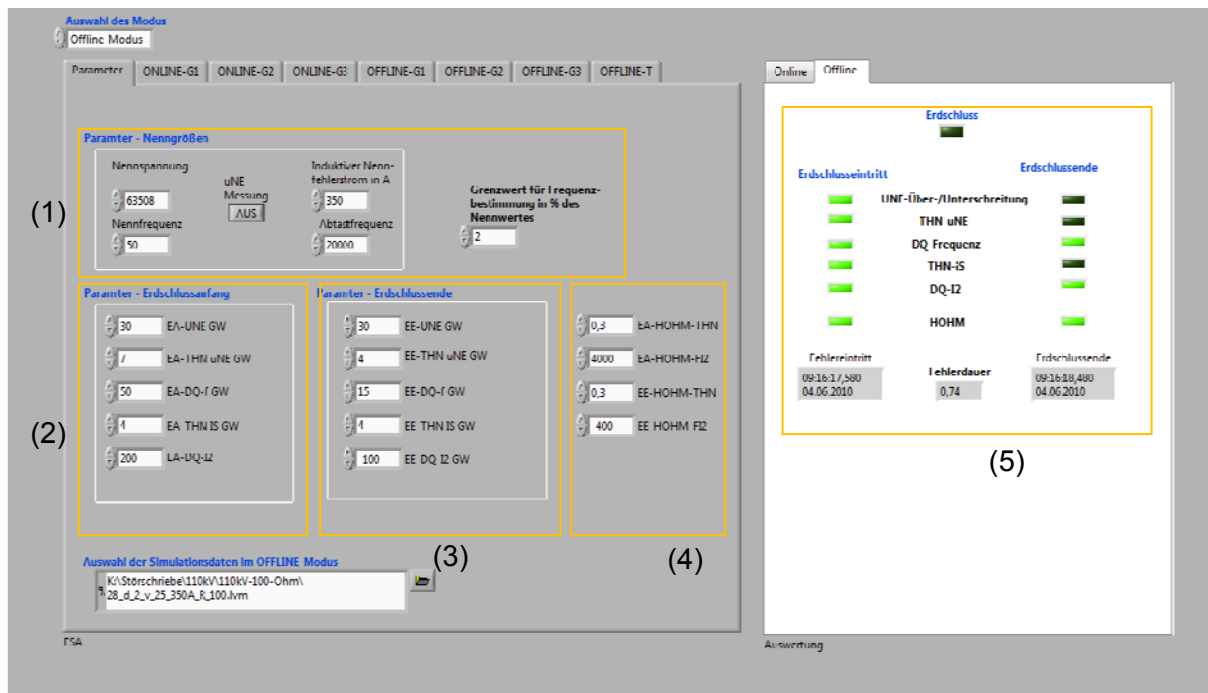


Abbildung 6.1: Auswertungssoftware

- (1)

Eingabefeld für Nenngrößen und Netzparameter, welche in die Berechnung der Detektionsverfahren einfließen.

- (2) und (3)

In diesem Bereich erfolgt die Parametrierung der Grenzwerte der jeweiligen Methoden für den Erdschlussanfang bzw. für das Erdschlussende.

- (4)

Eingabe der Grenzwerte für das Sensitiv-Versuchskriterium.

- (5)

Visualisierung, die Aufschluss gibt, ob ein Erdschluss aufgetreten, bzw. verloschen ist. Weiters werden die angesprochenen Verfahren sowie die Fehlerdauer angezeigt.

Zu Beginn wird mit einem Fehlerwiderstand von  $100 \Omega$  die Simulation durchgeführt, welcher dann schrittweise bis  $40 \text{ k}\Omega$  erhöht wird, um das Verhalten hinsichtlich der Erkennung von hochohmigen Erdschlüssen in gelöschten Netzen zu überprüfen.

Die Auswertungen werden übersichtshalber in Form eines Würfels dargestellt. Die Position eines Simulationspunktes wird durch die Koordinaten:

x: Verstimmungswert

y: Wert des kapazitiven Erdschlussstromes

z: Dämpfungswert

beschrieben. Die Simulationspunkte sind mit verschiedenen Farben in Abhängigkeit von der Erdschlussdetektion gekennzeichnet. Neben dem Würfel befindet sich eine Tabelle mit den jeweiligen Parametern, wie Verstimmung, Dämpfung und kapazitiven Erdschlussstrom.

### 6.1 Fehlerwiderstand: 100 Ω

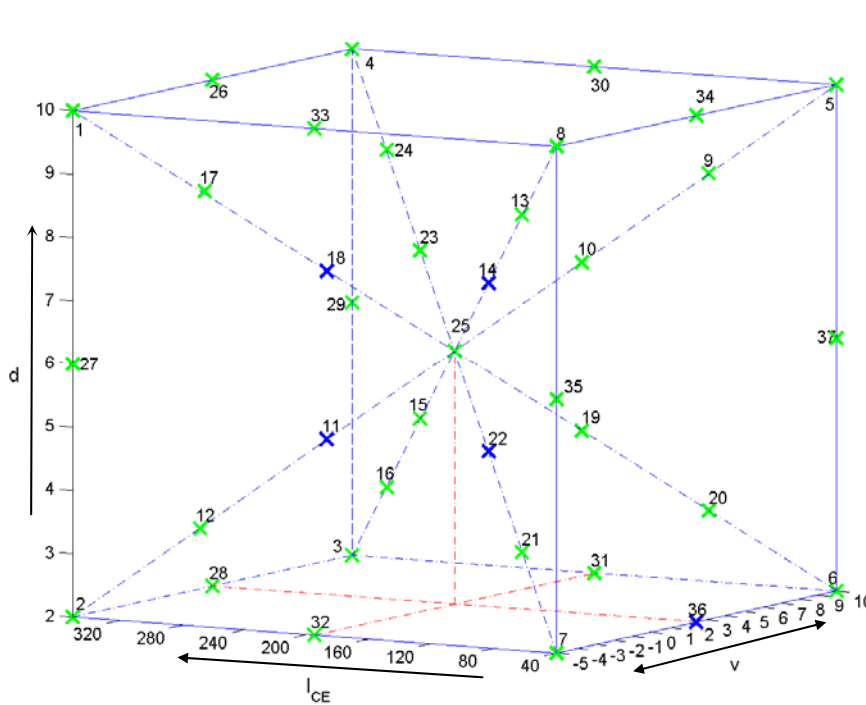


Abbildung 6.2: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 100 Ω

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	EA	EE
1	-5	10	350	■	■
2	-5	2	350	■	■
3	10	2	350	■	■
4	10	10	350	■	■
5	10	10	40	■	■
6	10	2	40	■	■
7	-5	2	40	■	■
8	-5	10	40	■	■
9	7,5	8,6	92	■	■
10	5	7,3	143	■	■
11	0	4,6	247	■	■
12	-2,5	3,3	298	■	■
13	-2,5	8,6	92	■	■
14	0	7,3	143	■	■
15	5	4,6	247	■	■
16	7,5	3,3	298	■	■
17	-2,5	8,6	298	■	■
18	0	7,3	247	■	■
19	5	4,6	143	■	■
20	7,5	3,3	92	■	■
21	-2,5	3,3	92	■	■
22	0	4,6	143	■	■
23	5	7,3	247	■	■
24	7,5	8,6	298	■	■
25	2,5	4	195	■	■
26	2,5	10	350	■	■
27	-5	6	350	■	■
28	2,5	2	350	■	■
29	10	6	350	■	■
30	10	10	195	■	■
31	10	2	195	■	■
32	-5	2	195	■	■
33	-5	10	195	■	■
34	2,5	10	40	■	■
35	-5	6	40	■	■
36	2,5	2	40	■	■
37	10	6	40	■	■

Der geprüfte Bereich bewegt sich zwischen d=2-10 %, v=-5-10 % und I<sub>C</sub>=40-350 A (dargestellt in Abbildung 6.2).

Die Erdschlussdauer konnte bei 86,4 Prozent der Fälle exakt ermittelt werden. Bei den blauen Punkten(11, 14, 18, 22) ist die Verstimmung null. Dies hat zur Folge, dass beim Erdschlussende das Nullsystem mit Nennfrequenz ausschwingt und somit keine Änderung in der Frequenz detektierbar ist. Aufgrund dieser Tatsache ergeben sich auch bei den Oberschwingungsverhältnissen (THN-uNE und THN-iS), die sich diesen Effekt der Frequenzänderung zu Nutze machen, Werte die bei den eingestellten Grenzwert der Software nicht erfasst werden.

Erdschluss Anfang bzw. Ende erkannt   
 Erdschluss Anfang bzw. Ende nicht erkannt

EA.....Erdschlussanfang  
 EE.....Erdschlussende

### 6.1.1 Häufigkeit der angesprochenen Methoden

Auf den Erdschlusseintritt sprechen nahezu alle Verfahren mit hoher Häufigkeit an. Eine Ausnahme stellt hierbei DQ-I2 dar, wie in Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 ersichtlich ist. Für die Erdschlussendeerfassung sind vor allem, dass DQ-f, DQ-I2, THN-uNE und das Sensitiv Verfahren maßgebend. Die verfrühten Auslösungen von DQ-f bei der Erdschlussendedetektion, welche in gelb dargestellt sind, kommen zustande wenn die Frequenzänderung beim Erdschlusseintritt sehr stark ausgeprägt ist. Durch das verfrühte Ansprechen dieser Methode findet jedoch noch keine fehlerhafte Erdschlussdetektion statt, da immer mehrere Verfahren ansprechen müssen.

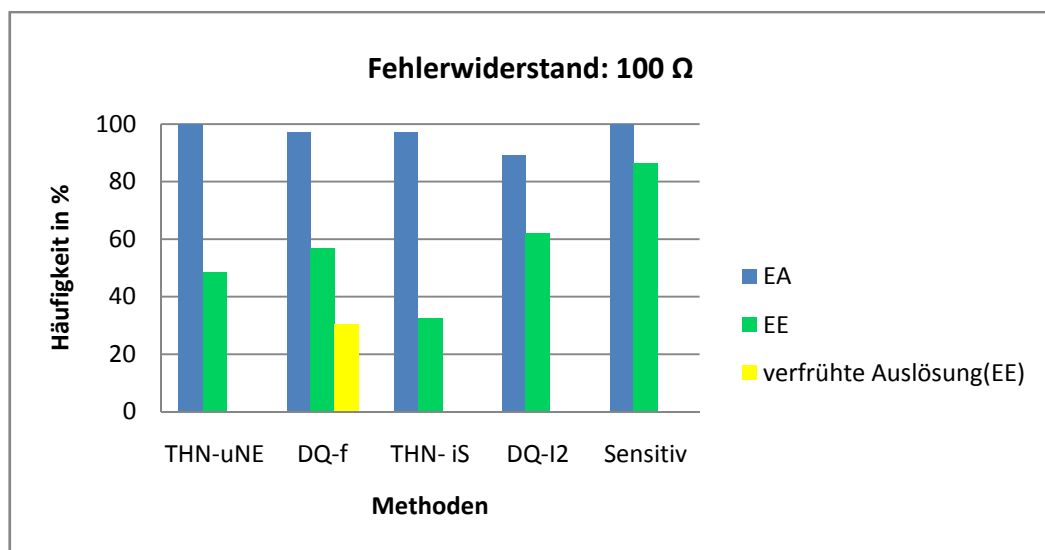


Abbildung 6.3: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben

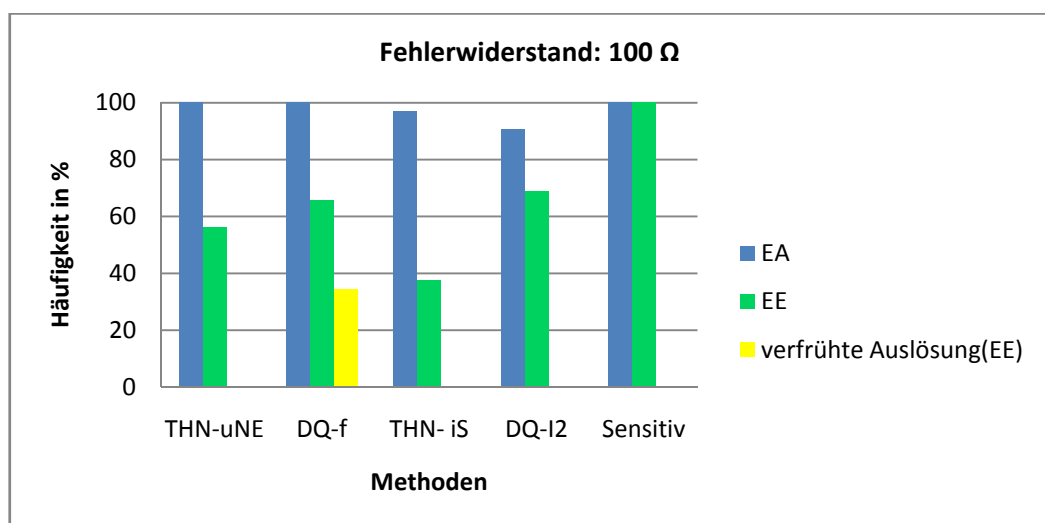


Abbildung 6.4: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben

Aus Abbildung 6.5 ist ersichtlich, dass bei allen Störschrieben mit einem Fehlerwiderstand von  $100 \Omega$  der Erdschlussanfang(EA) korrekt erkannt wurde. Das Erdschlussende konnte bei 86 Prozent richtig ermittelt werden.

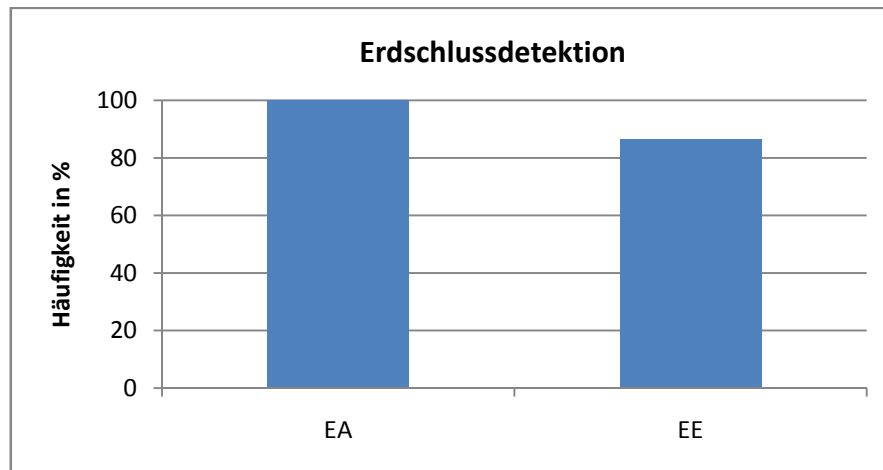
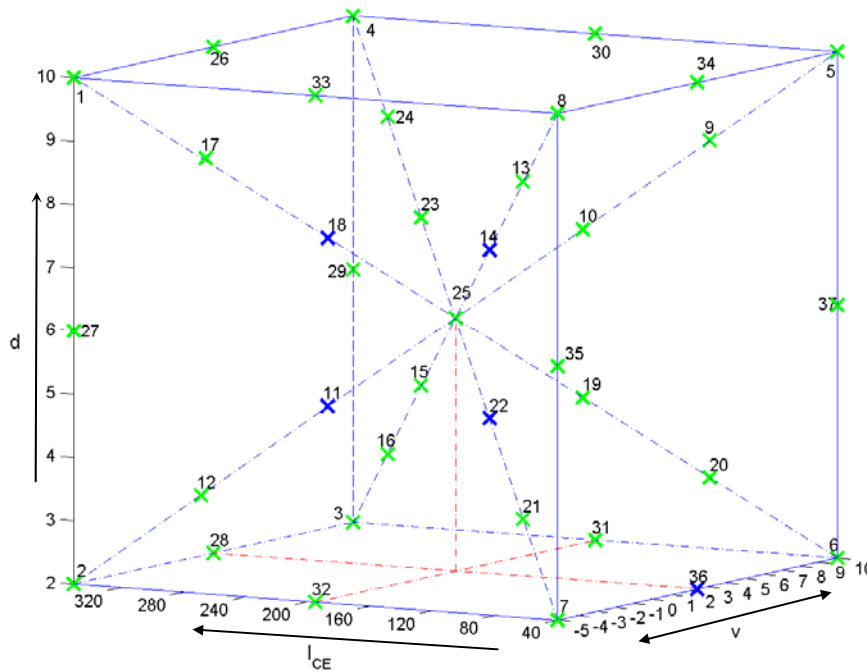


Abbildung 6.5: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung

## 6.2 Fehlerwiderstand: 1 kΩ



Pos.	v in %	d in %	$I_{CE}$ in A	EA	EE
1	-5	10	350	■	■
2	-5	2	350	■	■
3	10	2	350	■	■
4	10	10	350	■	■
5	10	10	40	■	■
6	10	2	40	■	■
7	-5	2	40	■	■
8	-5	10	40	■	■
9	7,5	8,6	92	■	■
10	5	7,3	143	■	■
11	0	4,6	247	■	■
12	-2,5	3,3	298	■	■
13	-2,5	8,6	92	■	■
14	0	7,3	143	■	■
15	5	4,6	247	■	■
16	7,5	3,3	298	■	■
17	-2,5	8,6	298	■	■
18	0	7,3	247	■	■
19	5	4,6	143	■	■
20	7,5	3,3	92	■	■
21	-2,5	3,3	92	■	■
22	0	4,6	143	■	■
23	5	7,3	247	■	■
24	7,5	8,6	298	■	■
25	2,5	4	195	■	■
26	2,5	10	350	■	■
27	-5	6	350	■	■
28	2,5	2	350	■	■
29	10	6	350	■	■
30	10	10	195	■	■
31	10	2	195	■	■
32	-5	2	195	■	■
33	-5	10	195	■	■
34	2,5	10	40	■	■
35	-5	6	40	■	■
36	2,5	2	40	■	■
37	10	6	40	■	■

Abbildung 6.6: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 1 kΩ

Wie in Abbildung 6.6 zu sehen ist, werden bis auf fünf Störschriebe alle korrekt erkannt. Die Erdschlussdauer konnte somit bei 86 Prozent der Simulationen exakt ermittelt werden. Das Erdschlussende wird vor allem bei den Simulationen (11, 14, 18, 22) welche eine Verstimmung von null Prozent aufweisen nicht mehr detektiert. Die Ursache liegt darin, dass bei Vollkompensation keine Frequenzänderung in der Verlagerungsspannung beim Verlöschen des Erdschlusses eintritt. Aus diesem Grund findet beim THN der Verlagerungsspannung, der sich diesen Effekt der Frequenzänderung zu Nutze macht (siehe Kapitel 4.3), keine Grenzwertüberschreitung statt. Es werden im Prinzip dieselben Erdschlüsse, wie bei einem Fehlerwiderstand von 100 Ω, erkannt beziehungsweise nicht erkannt

Erdschluss Anfang bzw. Ende erkannt   
 Erdschluss Anfang bzw. Ende nicht erkannt

EA.....Erdschlussanfang  
 EE.....Erdschlussende



### 6.2.1 Häufigkeit der angesprochenen Methoden

Bei einem Fehlerwiderstand von 1 kΩ ist die Häufigkeit der Methoden und deren Ausprägung für die Erdschlussanfangserfassung dem vorherigen Fehlerwiderstand von 100Ω sehr ähnlich. Die Häufigkeit nimmt jedoch infolge des größeren Widerstandes vor allem für die Erdschlussendeerfassung ab, wie auch in den Abbildungen 6.7 und 6.8 ersichtlich ist.

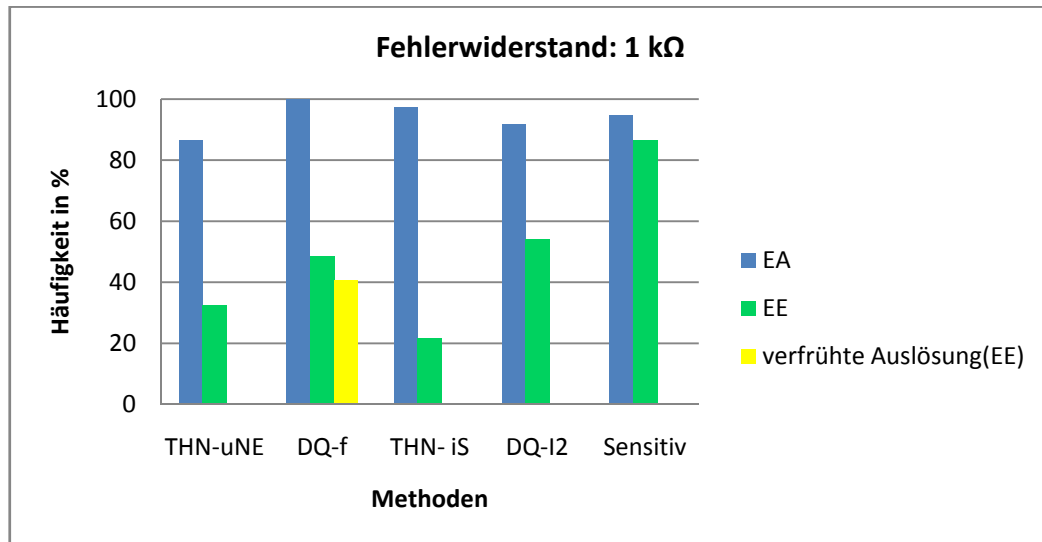


Abbildung 6.7: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben

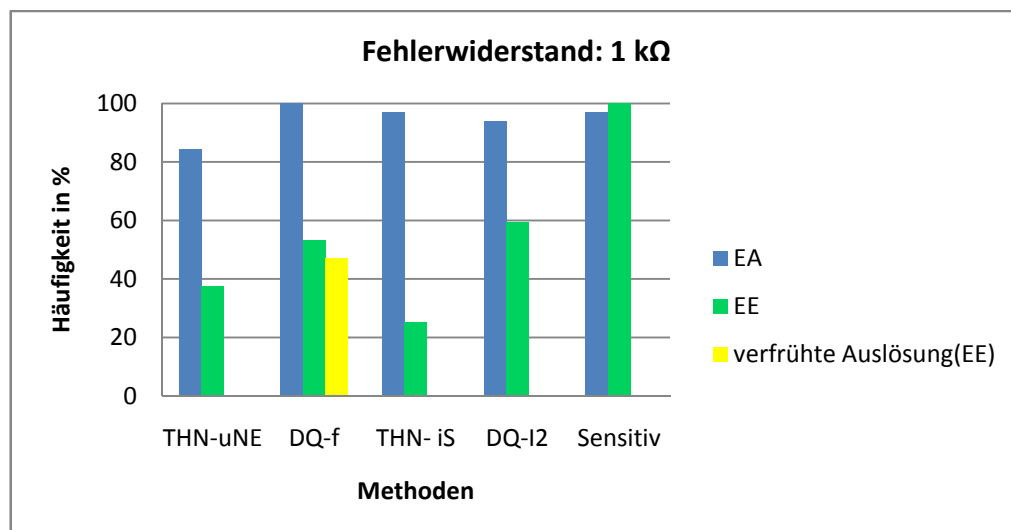


Abbildung 6.8: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben

Da bei diesem Fehlerwiderstand bei einigen Störschrieben nur mehr das Sensitiv Kriterium für die Erdschlussendeerfassung verantwortlich ist, jenes aber verspätet auslöst (siehe Kapitel 4.4), vergrößern sich die detektierten Fehlerdauern.

Wie in Abbildung 6.9 zu erkennen ist, konnte bei allen Störschrieben mit einem Fehlerwiderstand von 1 k $\Omega$  der Erdschlussanfang(EA) korrekt erkannt wurde. Das Erdschlussende (EE) konnte immerhin noch bei 86 Prozent richtig ermittelt werden.

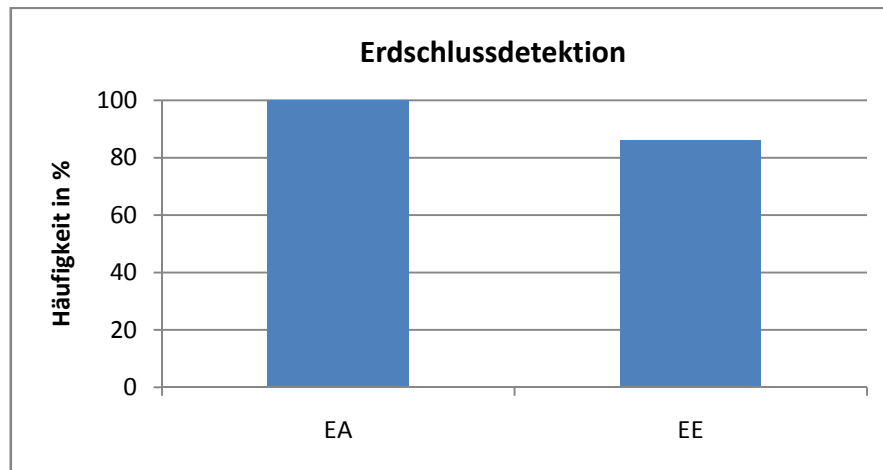


Abbildung 6.9: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung

### 6.3 Fehlerwiderstand: 10 kΩ

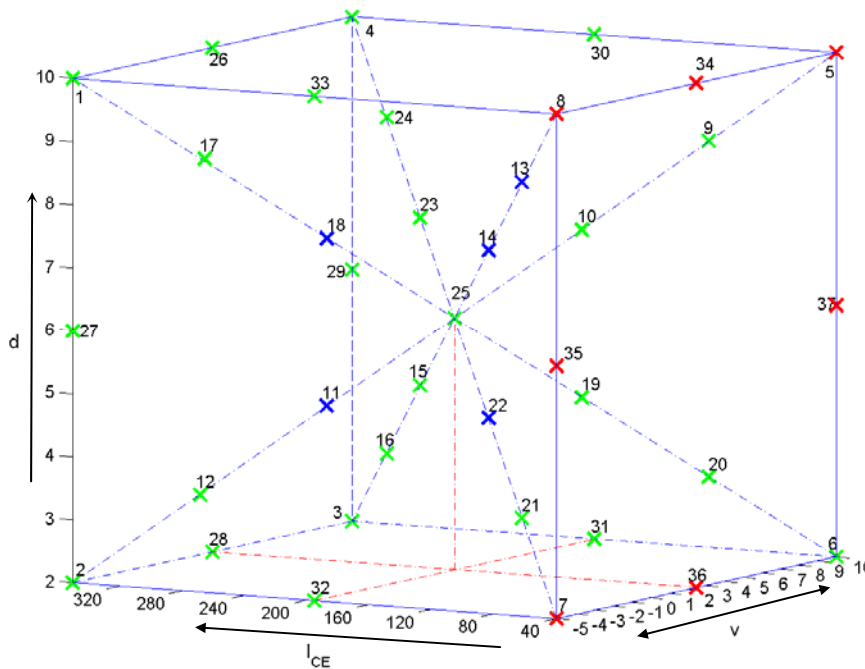


Abbildung 6.10: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 10 kΩ

Pos.	v in %	d in %	$I_{CE}$ in A	EA	EE
1	-5	10	350	■	■
2	-5	2	350	■	■
3	10	2	350	■	■
4	10	10	350	■	■
5	10	10	40	■	■
6	10	2	40	■	■
7	-5	2	40	■	■
8	-5	10	40	■	■
9	7,5	8,6	92	■	■
10	5	7,3	143	■	■
11	0	4,6	247	■	■
12	-2,5	3,3	298	■	■
13	-2,5	8,6	92	■	■
14	0	7,3	143	■	■
15	5	4,6	247	■	■
16	7,5	3,3	298	■	■
17	-2,5	8,6	298	■	■
18	0	7,3	247	■	■
19	5	4,6	143	■	■
20	7,5	3,3	92	■	■
21	-2,5	3,3	92	■	■
22	0	4,6	143	■	■
23	5	7,3	247	■	■
24	7,5	8,6	298	■	■
25	2,5	4	195	■	■
26	2,5	10	350	■	■
27	-5	6	350	■	■
28	2,5	2	350	■	■
29	10	6	350	■	■
30	10	10	195	■	■
31	10	2	195	■	■
32	-5	2	195	■	■
33	-5	10	195	■	■
34	2,5	10	40	■	■
35	-5	6	40	■	■
36	2,5	2	40	■	■
37	10	6	40	■	■

Die blauen Punkte in Abbildung 6.10 weisen alle bis auf den Punkt 13 eine Verstimmung von null auf, dadurch kommt es aufgrund einer fehlenden Frequenzänderung beim Erdschlussende zu keiner Erdschlussendedetektion (siehe Kapitel 6.1). Bei dem Simulationspunkt 13, tritt aufgrund geringer Verstimmung (-2,5%) und hoher Dämpfung (8,6%) keine Grenzwertüberschreitung zum Zeitpunkt des Fehlereintrittes auf. 67 Prozent der simulierten Störschriebe konnten korrekt erkannt werden.

Bei den roten Punkten erfolgt eine verfrühte Auslösung des Sensitiv bzw. DQf Kriteriums, bezüglich der Erdschlussendedetektion aufgrund einer Grenzwertüberschreitung.

- Erdschluss Anfang bzw. Ende erkannt
- Erdschluss Anfang bzw. Ende nicht erkannt
- Erdschluss Ende falsch erkannt

EA.....Erdschlussanfang  
 EE.....Erdschlussende

### 6.3.1 Häufigkeit der angesprochenen Methoden

Die Erdschlussdetektion erfolgt, wie in der Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 ersichtlich ist, vor allem durch das DQ-f und Sensitiv Verfahren. Weiters sind auch Fehlauflösungen ersichtlich, diese treten bei den Simulationen mit einem Kapazitiven Strom von 40 Amper auf.

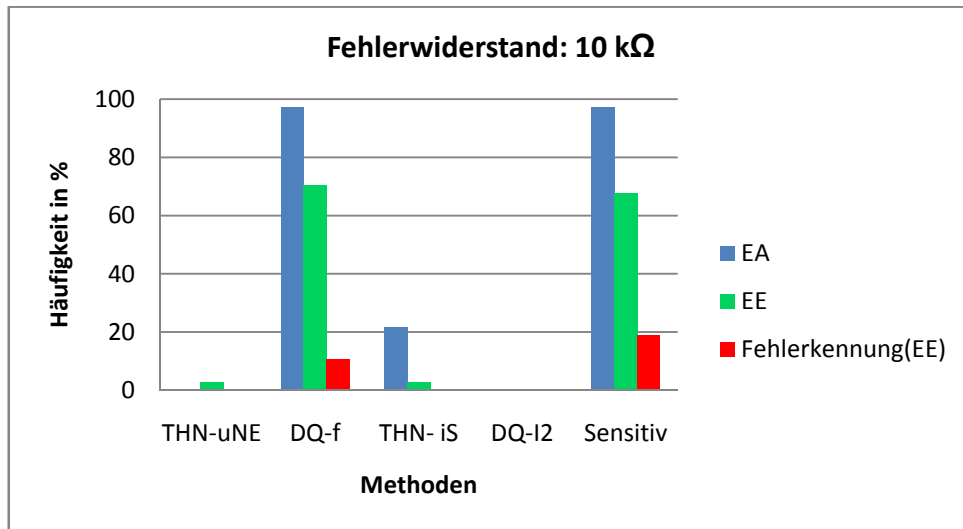


Abbildung 6.11: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben

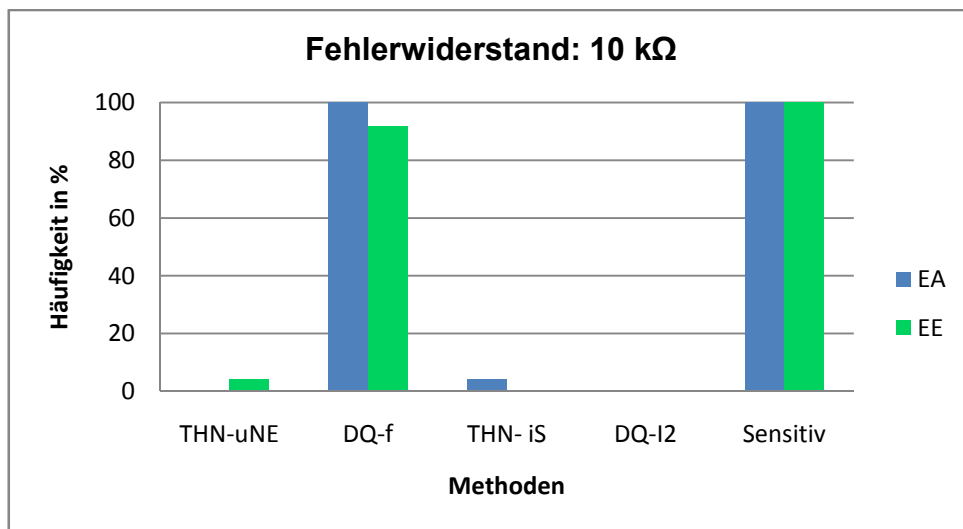


Abbildung 6.12: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben

Durch den großen Widerstand an der Fehlerstelle, wird die Dämpfung beim Erdschlusseintritt drastisch erhöht. Dies führt in weiterer Folge dazu, dass die Änderungen der Ausgleichsvorgänge nicht mehr so stark ausgeprägt sind. Aus diesem Grund kommt es zu einer verspäteten Detektion des Erdschlussanfanges. Der Ausschwingvorgang nach dem Erdschlusseintritt findet jedoch durch die Entkoppelung der symmetrischen Komponenten

wieder mit der ursprünglichen Dämpfung statt, dadurch wird das Ende des Erdschlusses wieder genauer erfasst. Aus diesem Grund und werden geringere Fehlerdauern Detektiert.

Der Erdschlussanfang konnte, wie aus Abbildung 6.13 ersichtlich ist, bei 97 Prozent der Simulationen noch richtig erkannt werden. Aufgrund von Fehlerkennungen hinsichtlich des Erdschlussendes (siehe Abbildung 6.11) konnte nur mehr bei 67 Prozent der Störschriebe das Verlöschen des Lichtbogens korrekt detektiert werden.

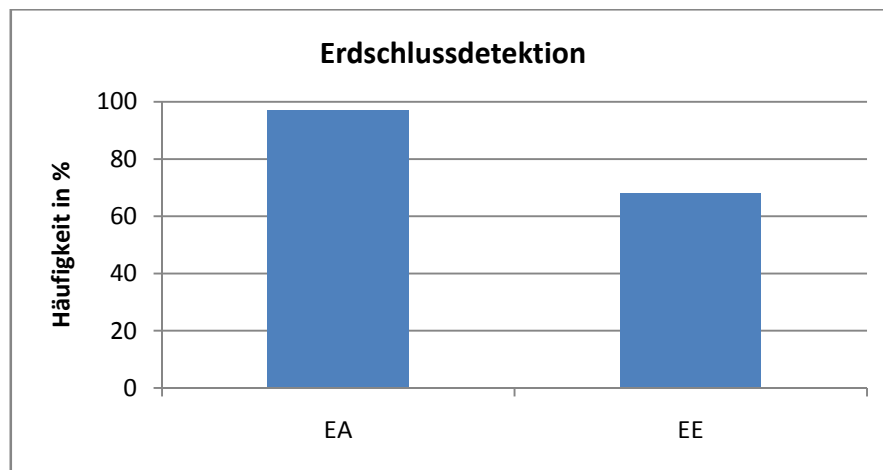


Abbildung 6.13: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung

### 6.4 Fehlerwiderstand: 40 kΩ

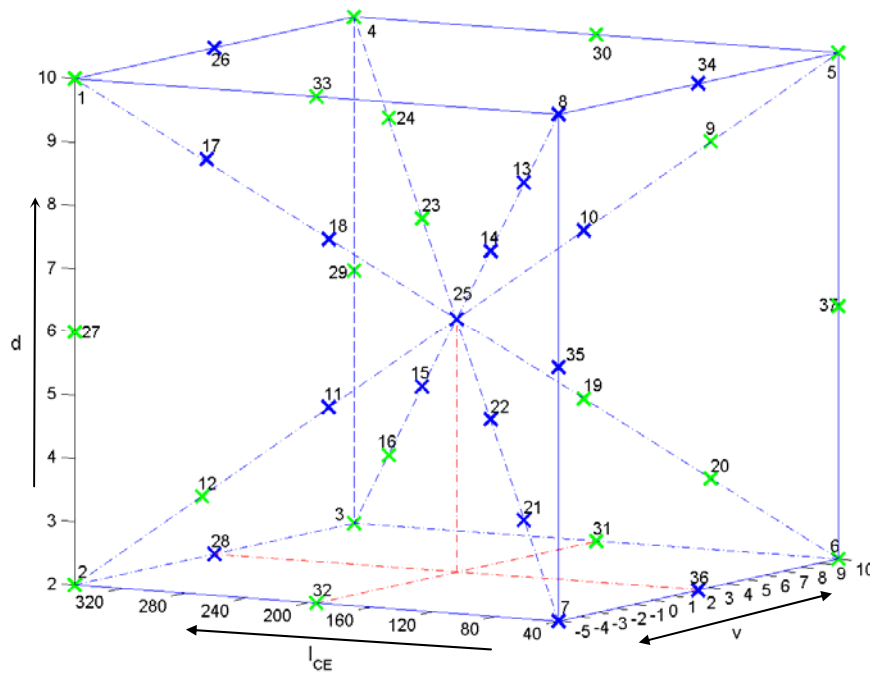


Abbildung 6.14: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 40 kΩ

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	EA	EE
1	-5	10	350	■	■
2	-5	2	350	■	■
3	10	2	350	■	■
4	10	10	350	■	■
5	10	10	40	■	■
6	10	2	40	■	■
7	-5	2	40	■	■
8	-5	10	40	■	■
9	7,5	8,6	92	■	■
10	5	7,3	143	■	■
11	0	4,6	247	■	■
12	-2,5	3,3	298	■	■
13	-2,5	8,6	92	■	■
14	0	7,3	143	■	■
15	5	4,6	247	■	■
16	7,5	3,3	298	■	■
17	-2,5	8,6	298	■	■
18	0	7,3	247	■	■
19	5	4,6	143	■	■
20	7,5	3,3	92	■	■
21	-2,5	3,3	92	■	■
22	0	4,6	143	■	■
23	5	7,3	247	■	■
24	7,5	8,6	298	■	■
25	2,5	4	195	■	■
26	2,5	10	350	■	■
27	-5	6	350	■	■
28	2,5	2	350	■	■
29	10	6	350	■	■
30	10	10	195	■	■
31	10	2	195	■	■
32	-5	2	195	■	■
33	-5	10	195	■	■
34	2,5	10	40	■	■
35	-5	6	40	■	■
36	2,5	2	40	■	■
37	10	6	40	■	■

Für die blauen Punkte in Abbildung 6.14 ist vor allem der große Fehlerwiderstand mit 40 kΩ verantwortlich. Durch diesen erreicht die Verlagerungsspannung nur noch einen sehr kleinen Wert, die Dämpfung hingegen wird sehr groß, wodurch die für die Erdschlusserfassung relevanten Größen nur mehr schwach ausgeprägt sind. Entsprechend Kapitel 4.3 werden die Oberschwingungsverhältnisse auf die Nennspannung bzw. auf den Löschspulenstrom bezogen, jedoch nur bei niederohmigen Fehlern werden diese beiden Werte, welche als Parameter vorgegeben werden, näherungsweise erreicht. Dies führt in weiterer Folge dazu, dass bei den Methoden THN-uNE und THN-iS, welche direkt bzw. indirekt vom Spannungsverlauf im Nullsystem abhängen, keine Grenzwertüberschreitung stattfinden. Die Erfolgsquote der exakten Erkennung dieser hochohmigen Störschriebe liegt bei 54 Prozent.

Erdschluss Anfang bzw. Ende erkannt   
 Erdschluss Anfang bzw. Ende nicht erkannt

EA.....Erdschlussanfang  
 EE.....Erdschlussende

### 6.4.1 Häufigkeit der angesprochenen Methoden

Bei einem sehr großen Fehlerwiderstand, wie in diesem Fall 40 kΩ, sind für die Erdschlussdetektion nur mehr das DQ-f und das Sensitiv Verfahren relevant. Dies ist auch in den Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 klar ersichtlich.

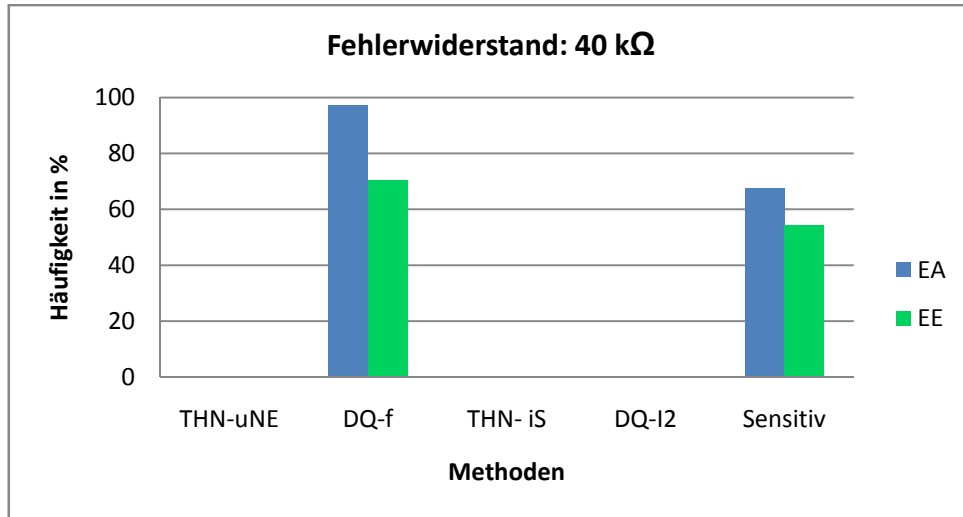


Abbildung 6.15: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben

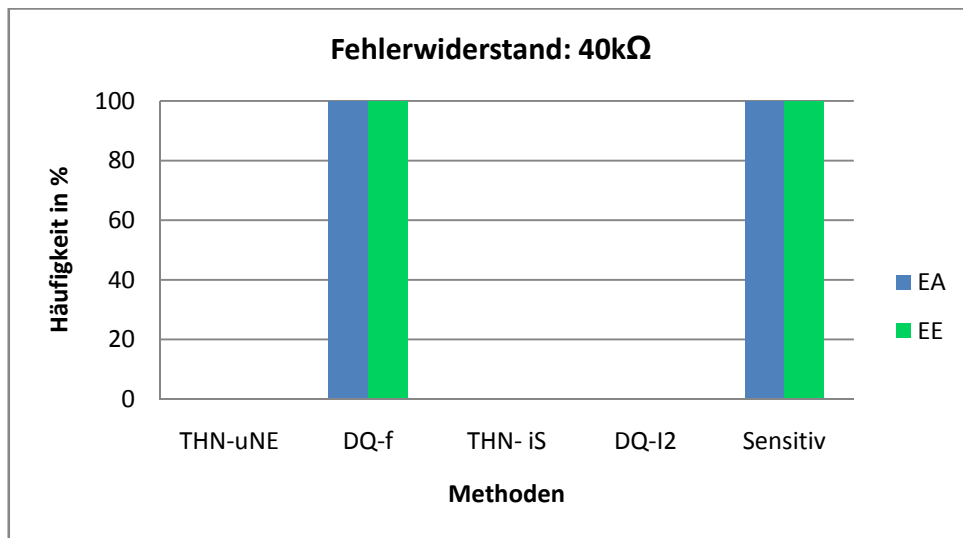


Abbildung 6.16: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben

Durch den großen Widerstand von 40 kΩ an der Fehlerstelle, wird die Dämpfung beim Erdschlusseintritt drastisch erhöht, daher ergeben sich (wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben) geringere Fehlerdauern.

Trotz diesen hochohmigen Fehler wird bei 67 Prozent der Störschriebe der Erdschlussanfang erkannt, sowie bei 54 Prozent das Ende (siehe Abbildung 6.17).

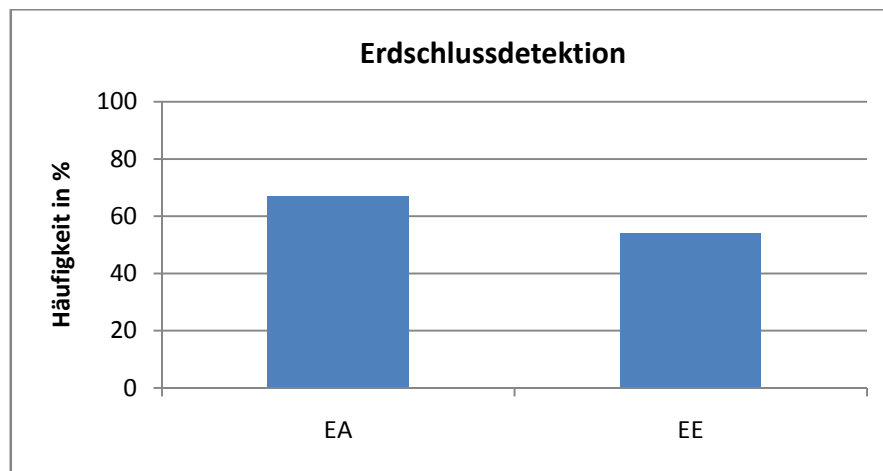


Abbildung 6.17: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung



## 6.5 Ergebnisse

Durch die zusätzliche Einführung des sogenannten Sensitiv-Kriteriums konnte erreicht werden, dass bei den Auswertungen mit 40 k $\Omega$  Fehlerwiderstand 54 Prozent der Erdschlüsse korrekt und bei 67 Prozent der Erdschlussanfang richtig detektiert wurden.

Dass vorhin genannte zusätzliche Kriterium kommt nur zum Einsatz, wenn durch zu kleine Änderungen, wie sie zum Beispiel bei einem hochohmigen Erdschluss auftreten, bei den übrigen Methoden keine Grenzwertüberschreitungen eintreten, aber bei allen Methoden eine Änderung feststellbar ist.

Die Auswertungen zeigen die Grenzen des derzeitigen Prototypalgorithmus auf. Vor allem bei kleinen Verstimmungen sowie bei hohen Fehlerwiderständen wird die Erdschlussendeerkennung schwierig bzw. unmöglich.

- Mögliche Verbesserungen
  - Zum Teil detektieren bestimmte Methoden, wie das DQ-Frequenz und das Sensitiv Verfahren bei der Erdschlusseintrittsänderung auch das Erdschlussende. Eine Möglichkeit, dies zu vermeiden, wäre, dass ein Erdschlusskriterium während einer Änderung, z.B. des Störeintrittes, nur einmal auslösen darf.
  - Bei den hochohmigen Erdschlüssen könnte man die Erfolgsquote erhöhen, indem man die Basis der Oberschwingungsverhältnisse zum Beispiel beim THN- $U_{NE}$  für das Erdschlussende anstatt auf die Nennspannung auf die gemessene Verlagerungsspannung im Fehlerfall beziehen würde. Das Oberschwingungsverhältnis des Summenstromes wäre dann auf den gemessenen Summenstrom zu beziehen. Dadurch könnten die entsprechenden THN- Werte ausreichend groß werden, um eine Grenzwertüberschreitung zu erzielen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit werden Erdschlusssimulationen für gelöschte Netze in Matlab<sup>®</sup> Simulink<sup>®</sup> zum Zweck der Erdschlussendeerfassung durchgeführt, um in weiterer Folge Verbesserungen für den Prototypalgorithmus zu finden. Die Verifikationen (siehe Kapitel 5) zeigen, dass die Ergebnisse aus der Simulation sehr genau mit der händischen Berechnung übereinstimmen. Überprüft wurden die zwei Leitungsbausteine ( $\Pi$ -Line und Distributed Line) die das Simulink<sup>®</sup> anbietet. Für stationäre Untersuchungen lieferte die  $\Pi$ -Line die genauesten Ergebnisse, da sie vom Aufbau her der klassischen  $\Pi$ -Ersatzschaltung der Leitung entspricht, welches für die händische Berechnung verwendet wird. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Distributed Line für transiente, hochfrequente Vorgänge jedoch besser eignet, da dieses Modell über die Wellengleichung gelöst wird, wurden alle weiteren Versuche mit Hilfe dieses Leitungselementes durchgeführt.

In weiterer Folge wurden jeweils 37 Simulationen mit unterschiedlichen Netzparametern ( $v$ ,  $d$  und  $I_{CE}$ ) für verschiedene Fehlerwiderstände durchgeführt, wobei diese ausgehend von  $100 \Omega$  schrittweise auf  $40 \text{ k}\Omega$  erhöht wurde. Die Netzparameter bewegen sich zwischen einem Bereich von  $d=2-10 \%$ ,  $v=-5-10 \%$  und  $I_{CE}=40-350 \text{ A}$ .

Mit Hilfe einer Auswertungssoftware (Stand Juli 2010) werden die aus der Simulation gewonnenen Störschriebe hinsichtlich der Erdschlusserkennung sowie Häufigkeit der angesprochenen Methoden analysiert. Der Prototypalgorithmus lieferte vor allem für kleine Fehlerwiderstände ( $100 \Omega$  und  $1 \text{ k}\Omega$ ) hervorragende Ergebnisse hinsichtlich der Erdschlussanfang- und Erdschlussendeerfassung. Schwierigkeiten bereiteten hierbei nur die Simulationen mit einer Verstimmung von null. Bei großen Fehlerwiderständen ( $10 \text{ k}\Omega$  und  $40 \text{ k}\Omega$ ) stößt der derzeitige Algorithmus auf seine Grenzen. Hier erfolgt die Erdschlussdetektion nur mehr anhand des Sensitiv-Versuchskriteriums.

### 7.1 Einsatzmöglichkeit des Prototypen

Eine mögliche Ausführungsform für das Erdschlussdetektionsgerätes wäre der Einsatz in einem Drehstrom-Netz, in dem es mit einem Distanzschutzgerät kommuniziert.

Die benötigten Daten werden dem Distanzschutzgerät mit Hilfe von Strom- und Spannungswandlern, welche in jeder Phase Strom und die Spannung gegen Erde messen, zur Verfügung gestellt. Die Spannung an einem Sternpunkt des Netzes wird ebenfalls gemessen und an das Distanzschutzgerät übermittelt.

Das Erdschlussdetektionsgerät erhält seine Daten durch das Distanzschutzgerät und ermittelt bei einem Erdschluss daraus den Erdschlussanfang und das Erdschlussende und

gibt diese Daten an das Distanzschutzgerät weiter. Dadurch wird dem Netzbetreiber ein rasches Eingreifen ermöglicht, um z.B. Elektroenergienetze zu entkoppeln.

Der betreffende Leitungsabschnitt kann von dem Rest des Netzes beidseitig durch Schalteinrichtungen getrennt werden. Die Schalteinrichtungen können ausgehend von der Auswertung der Messung über den Distanzschutz abgeschaltet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] 110kV-Kabel /-Freileitung eine technische Gegenüberstellung. Verlag der Technischen Universität Graz, Austria, 2005.
- [2] Clemens Obkircher: Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze. Dissertation, Technische Universität-Graz 2008
- [3] Clemens Obkircher: Probleme bei Einbau von Kabelsystemen in kompensierten Übertragungsnetzen. Diplomarbeit, Technische Universität-Graz 2004
- [4] E. Fuchs et al., Detektion des Erdschlusses, Fachtagungsbeitrag, FNN/ETG Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 - Ulm
- [5] Christian Raunig, Clemens Obkircher, Ernst Schmauzer und Lothar Fickert: Berechnung der Verlagerungsspannung in kompensierten Netzen beeinflusst durch die kapazitive Kopplung. Wissenschaftliche Veröffentlichung, Technische Universität Graz.
- [6] J. Schlabbach, Sternpunktbehandlung - Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze Band 15, VDE VERLAG GMBH Berlin-Offenbach und VWEW Energieverlag GmbH, 2002
- [7] L. Fickert, Elektrische Energiesysteme 1, Technische Universität Graz, Vorlesungsskriptum, 2008
- [8] H. Happoldt und D. Oeding, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 5. völlig neubearbeitete Auflage, 1978
- [9] Lothar Fickert, Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme. Vorlesung Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz.
- [10] ÖVE-B1/1976, Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 1976.
- [11] Josef Poll, Auswertung der Störungsschreiber-Aufzeichnungen von kurzzeitigen Erdschlüssen in kompensierten Netzen. Wissenschaftliche Veröffentlichung Elektrizitätswirtschaft, Jg.82(1983), Heft 9.
- [12] Klaus Heuck, Klaus Dettman, Detlef Schulz: Elektrische Energieversorgung, Springer Verlag, 7. überarbeitete Auflage, 2007
- [13] V. Crasten, Elektrische Energieversorgung 1, Springer Verlag, 2. überarbeitete Auflage, 2007
- [14] Emanuel Fuchs, Auswertung von Erdschlusswischern, Diplomarbeit, Technische Universität-Graz 2008
- [15] MathWorks™, Matlab/Simulink™ Hilfe, Version: R2009, August 2009
- [16] DIN VDE 0228 Teil 2, Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen, vde-verlag gmbh, Dezember 1987
- [17] Emanuel Fuchs, Detektion von Erdschlüssen in gelöschten Netzen, Dissertation, Technische Universität-Graz, geplantes Erscheinungsdatum 2011

- [18] P. Schwarz, Ausgleichsströme beim Erdschluss im gelöschten Netz, Springer-Verlag, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 79 (1980)
- [19] L. Fickert, G. Achleitner und C. Obkircher, Übersicht der Theorie der Erdfehler und Anforderungen in der Netzpraxis, Fachtagungsbeitrag, ETG Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen- 2009 Dresden
- [20] B. R. Oswald ,ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG, Vorlesungsunterlagen am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Universität Hannover: <http://www.iee.uni-hannover.de/>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Netz mit niederohmiger Sternpunktserdung .....	12
Abbildung 2.2: Netz mit isoliertem Sternpunkt.....	13
Abbildung 2.3: Gelöschtes Netz [14] .....	14
Abbildung 2.4: Betriebsbereich [15].....	16
Abbildung 2.5: Verlauf des Erdschlusses .....	17
Abbildung 2.6: Gekoppelte Netze .....	17
Abbildung 2.7: Löschgrenzen laut VDE 0228 Teil 2 [15] .....	19
Abbildung 2.8: Ortskurve des Reststromes [15] .....	22
Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild symmetrische Komponenten .....	24
Abbildung 2.10: Ausschwingvorgang eines Parallelschwingkreises[15].....	25
Abbildung 2.11: Hüllkurve von $u^0(t)$ .....	26
Abbildung 2.12: realer Störschrieb [14] .....	27
Abbildung 2.13: Vereinfachtes Ersatzschalt vom Drehstromsystem .....	28
Abbildung 2.14: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten.....	28
Abbildung 3.1: Gegensystem.....	29
Abbildung 3.2: Nullsystem .....	29
Abbildung 3.3: Mitsystem.....	29
Abbildung 3.4: $\Pi$ -Ersatzschaltbild einer Leitung mit der Länge $a$ .....	32
Abbildung 3.5: Symmetrische Komponenten – Ersatzschaltbild [15] .....	34
Abbildung 4.1: Effektivwertverlauf von $U_{NE}(t)$ und Erdschlussende [4].....	35
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Erdschlusses mit $\omega(t)$ [4].....	36
Abbildung 4.3: Frequenzverlauf [4].....	36
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung einer reinen Schwebung .....	37
Abbildung 4.5: Verlauf des Stroms im Gegensystems [4].....	38
Abbildung 4.6: THN von $U_{NE}$ .....	39
Abbildung 4.7: THN von $i_{\Sigma}$ .....	39
Abbildung 4.8: HOHM- Prinzip.....	39
Abbildung 5.1: Flussbild der Verifikationen.....	40
Abbildung 5.2: Darstellung des Fehlers in Symmetrischen Komponenten.....	41
Abbildung 5.3: Schematisches Modell der Distributed Line [15].....	44
Abbildung 5.4: Simulationsmodell in Matlab® Simulink® .....	47
Abbildung 5.5: Momentanverlauf der Verlagerungsspannung.....	49
Abbildung 5.6: Ersatzschaltbild- Symmetrische Komponenten .....	51
Abbildung 5.7: Differentialgleichungssystem (vergrößert im Anhang).....	51
Abbildung 5.8: Anfangsbedingungen.....	53

Abbildung 5.9: Vergleich der Fehlerstromes an der Fehlerstelle .....	53
Abbildung 5.10: Vergleich des Phasenstromes .....	54
Abbildung 5.11: Nullsystem .....	55
Abbildung 5.12: Differentialgleichungssystem .....	55
Abbildung 5.13: Vergleich der Verlagerungsspannungen .....	56
Abbildung 5.14: Simulationsmodell in Matlab Simulink® .....	57
Abbildung 5.15: THN von $U_{NE}$ aus Simulation .....	58
Abbildung 5.16: THN von $U_{NE}$ aus Störschrieb .....	58
Abbildung 6.1: Auswertungssoftware .....	59
Abbildung 6.2: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 100 $\Omega$ .....	61
Abbildung 6.3: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben .....	62
Abbildung 6.4: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben .....	62
Abbildung 6.5: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung .....	63
Abbildung 6.6: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 1 k $\Omega$ .....	64
Abbildung 6.7: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben .....	65
Abbildung 6.8: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben .....	65
Abbildung 6.9: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung .....	66
Abbildung 6.10: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 10 k $\Omega$ .....	67
Abbildung 6.11: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben .....	68
Abbildung 6.12: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben .....	68
Abbildung 6.13: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung .....	69
Abbildung 6.14: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 40 k $\Omega$ .....	70
Abbildung 6.15: Häufigkeit der angesprochenen Methoden bei allen Störschrieben .....	71
Abbildung 6.16: Häufigkeit der Methoden bei den korrekt erkannten Störschrieben .....	71
Abbildung 6.17: Häufigkeit der Erdschlussanfang- bzw. Erdschlussendeerkennung .....	72

# Anhang A1:

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	Verfahren					Verfahren					Dauer in s	
				EA	1	2	3	4	5	EE	1	2	3		4
1	-5	10	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
2	-5	2	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,74
3	10	2	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
4	10	10	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
5	10	10	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
6	10	2	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
7	-5	2	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,76
8	-5	10	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
9	7,5	8,6	92	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
10	5	7,3	143	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
11	0	4,6	247	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0
12	-2,5	3,3	298	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
13	-2,5	8,6	92	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
14	0	7,3	143	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0
15	5	4,6	247	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
16	7,5	3,3	298	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
17	-2,5	8,6	298	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
18	0	7,3	247	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0
19	5	4,6	143	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
20	7,5	3,3	92	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
21	-2,5	3,3	92	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,74
22	0	4,6	143	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0
23	5	7,3	247	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
24	7,5	8,6	298	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
25	2,5	4	195	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,74
26	2,5	10	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
27	-5	6	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
28	2,5	2	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,74
29	10	6	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
30	10	10	195	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
31	10	2	195	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,74
32	-5	2	195	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
33	-5	10	195	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
34	2,5	10	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
35	-5	6	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72
36	2,5	2	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0
37	10	6	40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,72

Tabelle : Auswertung mit Fehlerwiderstand: 100 Ω



# Anhang A2:

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	Verfahren					Verfahren					Dauer in s	
				EA	1	2	3	4	5	EE	1	2	3		4
1	-5	10	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
2	-5	2	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,74
3	10	2	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
4	10	10	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
5	10	10	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
6	10	2	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
7	-5	2	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,76
8	-5	10	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
9	7,5	8,6	92	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
10	5	7,3	143	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
11	0	4,6	247	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	
12	-2,5	3,3	298	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,74
13	-2,5	8,6	92	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
14	0	7,3	143	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	
15	5	4,6	247	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,74
16	7,5	3,3	298	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
17	-2,5	8,6	298	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
18	0	7,3	247	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	
19	5	4,6	143	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,74
20	7,5	3,3	92	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
21	-2,5	3,3	92	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,74
22	0	4,6	143	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	
23	5	7,3	247	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,74
24	7,5	8,6	298	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
25	2,5	4	195	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,74
26	2,5	10	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
27	-5	6	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
28	2,5	2	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,74
29	10	6	350	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,7
30	10	10	195	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
31	10	2	195	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
32	-5	2	195	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,74
33	-5	10	195	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
34	2,5	10	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	0,72
35	-5	6	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72
36	2,5	2	40	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	
37	10	6	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	0,72

Tabelle: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 1 kΩ

# Anhang A3:

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	EA	Verfahren					EE	Verfahren					Dauer in s
					1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	-5	10	350	Green	Green	Green			Green	Green	Green				Green	0,7
2	-5	2	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,66
3	10	2	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
4	10	10	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
5	10	10	40	Green	Green	Green			Green	Red					Red	0
6	10	2	40	Green	Green				Green	Green					Green	0,72
7	-5	2	40	Green	Green	Green			Green	Red				Red	Red	0
8	-5	10	40	Green	Green	Green			Green	Red				Red	Red	0
9	7,5	8,6	92	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
10	5	7,3	143	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
11	0	4,6	247	Green	Green				Green	Blue						0
12	-2,5	3,3	298	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
13	-2,5	8,6	92	Blue					Blue							0
14	0	7,3	143	Green	Green				Green	Blue						0
15	5	4,6	247	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
16	7,5	3,3	298	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
17	-2,5	8,6	298	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
18	0	7,3	247	Green	Green				Green	Blue						0
19	5	4,6	143	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
20	7,5	3,3	92	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
21	-2,5	3,3	92	Green	Green				Green	Green					Green	0,66
22	0	4,6	143	Green	Green				Green	Blue						0
23	5	7,3	247	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
24	7,5	8,6	298	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
25	2,5	4	195	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
26	2,5	10	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
27	-5	6	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
28	2,5	2	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
29	10	6	350	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
30	10	10	195	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
31	10	2	195	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
32	-5	2	195	Green	Green				Green	Green					Green	0,66
33	-5	10	195	Green	Green				Green	Green					Green	0,7
34	2,5	10	40	Green	Green	Green			Green	Red					Red	0
35	-5	6	40	Green	Green	Green			Green	Red				Red	Red	0
36	2,5	2	40	Green	Green				Green	Red					Red	0
37	10	6	40	Green	Green				Green	Red					Red	0

Tabelle: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 10 kΩ

## Anhang A4:

Pos.	v in %	d in %	I <sub>CE</sub> in A	EA	Verfahren					EE	Verfahren					Dauer in s
					1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	-5	10	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
2	-5	2	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
3	10	2	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,66
4	10	10	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
5	10	10	40	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
6	10	2	40	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
7	-5	2	40	Blue	Green				Blue							0
8	-5	10	40	Blue	Green				Blue							0
9	7,5	8,6	92	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
10	5	7,3	143	Green	Green				Blue							0
11	0	4,6	247	Blue					Blue							0
12	-2,5	3,3	298	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
13	-2,5	8,6	92	Blue					Blue							0
14	0	7,3	143	Blue					Blue							0
15	5	4,6	247	Green	Green				Blue							0
16	7,5	3,3	298	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
17	-2,5	8,6	298	Green	Green				Blue							0
18	0	7,3	247	Blue					Blue							0
19	5	4,6	143	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
20	7,5	3,3	92	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
21	-2,5	3,3	92	Blue	Green				Blue							0
22	0	4,6	143	Blue					Blue							0
23	5	7,3	247	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
24	7,5	8,6	298	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
25	2,5	4	195	Green	Green				Blue							0
26	2,5	10	350	Blue	Green				Blue							0
27	-5	6	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
28	2,5	2	350	Green	Green				Blue							0
29	10	6	350	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,66
30	10	10	195	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
31	10	2	195	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,66
32	-5	2	195	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
33	-5	10	195	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7
34	2,5	10	40	Blue	Green				Blue							0
35	-5	6	40	Blue	Green				Blue							0
36	2,5	2	40	Blue	Green				Blue							0
37	10	6	40	Green	Green				Green	Green	Green				Green	0,7

Tabelle: Auswertung mit Fehlerwiderstand: 40 kΩ

## Anhang A5:

### Parameter und Daten für die 37 Simulationen:

LF Länge Freileitung

LK Länge Kabel

	v in %	d in %	LF in km	LK in km	Ic in A	L in H	IL in A	Rq in Ohm
1	-5	10	100	17,4	350	0,5917	341,65	1,89E+03
2	-5	2	100	17,4	350	0,5917	341,65	1,31E+04
3	10	2	100	17,4	350	0,5110	395,60	1,31E+04
4	10	10	100	17,4	350	0,5110	395,60	1,89E+03
5	10	10	100	0,8	40	4,7389	42,66	1,63E+04
6	10	2	100	0,8	40	4,7389	42,66	7,94E+04
7	-5	2	100	0,8	40	5,4871	36,84	7,94E+04
8	-5	10	100	0,8	40	5,4871	36,84	1,63E+04
9	7,5	8,6	100	3,6	92	2,0657	97,86	8,06E+03
10	5	7,3	100	6	143	1,3460	150,18	6,13E+03
11	0	4,6	100	12	247	0,8063	250,71	5,82E+03
12	-2,5	3,3	100	15	298	0,6812	296,74	7,27E+03
13	-2,5	8,6	100	3,6	92	2,2776	88,76	8,06E+03
14	0	7,3	100	6	143	1,4133	143,03	6,13E+03
15	5	4,6	100	12	247	0,7679	263,24	5,82E+03
16	7,5	3,3	100	15	298	0,6179	327,17	7,27E+03
17	-2,5	8,6	100	15	298	0,6812	296,74	2,54E+03
18	0	7,3	100	12	247	0,8063	250,71	4,E+03
19	5	4,6	100	6	143	1,3460	150,18	9,70E+03
20	7,5	3,3	100	3,6	92	2,0657	97,86	2,10E+04
21	-2,5	3,3	100	3,6	92	2,2776	88,76	2,10E+04
22	0	4,6	100	6	143	1,4133	143,03	9,70E+03
23	5	7,3	100	12	247	0,7679	263,24	4,E+03
24	7,5	8,6	100	15	298	0,6179	327,17	2,54E+03
25	2,5	6	100	9	195	1,0032	201,50	5,55E+03
26	2,5	10	100	17,4	350	0,5484	368,62	1,89E+03
27	-5	6	100	17,4	350	0,5917	341,65	3,30E+03
28	2,5	2	100	17,4	350	0,5484	368,62	1,31E+04
29	10	6	100	17,4	350	0,5110	395,59	3,30E+03
30	10	10	100	9	195	0,9346	216,29	3,30E+03
31	10	2	100	9	195	0,9346	216,29	1,81E+04
32	-5	2	100	9	195	1,0822	186,80	1,81E+04
33	-5	10	100	9	195	1,0822	186,80	3,30E+03
34	2,5	10	100	0,8	40	5,0856	39,75	1,63E+19
35	-5	6	100	0,8	40	5,4871	36,84	2,70E+04
36	2,5	2	100	0,8	40	5,0856	39,75	7,94E+04
37	10	6	100	0,8	40	4,7389	42,66	2,70E+04

**Netz- Parameter**

Leitung	Werte	
$Z_{\text{Leitung}}^1$	0,14+j0,404	[Ω] pro km
$Z_{\text{Leitung}}^0$	0,322+j1,33	[Ω] pro km
$C_E^1$	8,8e-9	[F] pro km
$C_E^0$	3,9e-9	[F] pro km
<b>Transformator</b>		
S	110	[MVA]
$u_r$	4%	
$u_x$	16%	
<b>Kabel</b>		
$Z_{\text{Kabel}}^1$	0,074+j0,121	[Ω] pro km
$Z_{\text{Kabel}}^0$	0,61+j0,19	[Ω] pro km
$C_{EK}^1$	310e-9	[F] pro km
$C_{EK}^0$	310e-9	[F] pro km

**Technische Daten**

# Anhang A6:

**Auswahl des Modus**  
Offline-Modus

Parameter: ONLINE-G1 | ONLINE-G2 | ONLINE-G3 | OFFLINE-G1 | OFFLINE-G2 | OFFLINE-G3 | OFFLINE-T

**Parameter - Nenngrößen**

Nennspannung: 11500  
Nennfrequenz: 50

UNE Messung: AUS

Induktiver Nennfehlerstrom in A: 90  
Abastfrequenz: 20000

Grenzwert für Frequenzbestimmung in % des Nennwertes: 10

**Parameter - Erdschlussanfang**

EA-UNE GW: 30  
EA-THN UNE GW: 7  
EA-DQ-f GW: 50  
EA-THN IS GW: 4  
EA-DQ-12: 200

**Parameter - Erdschlussende**

EE-UNE GW: 30  
EE-THN UNE GW: 4  
EE-DQ-f GW: 15  
EE-THN IS GW: 4  
EE-DQ-12 GW: -100

**Auswahl der Simulationsdaten im OFFLINE-Modus**  
N:\Prototyp ES-Monitoring\Prototyp\Labview v8\SimDaten\004.lvm

ESA

---

Online | Offline

**Erdschluss**

**Erdschlusseintritt**

UNE-Über-/unterschreitung: 09:33:17,397  
THN-UNE: 07:06:2010  
DQ-Frequenz: 2,16  
THN-IS: 09:33:19,577  
DQ-12: 07:06:2010

**Erdschlussende**

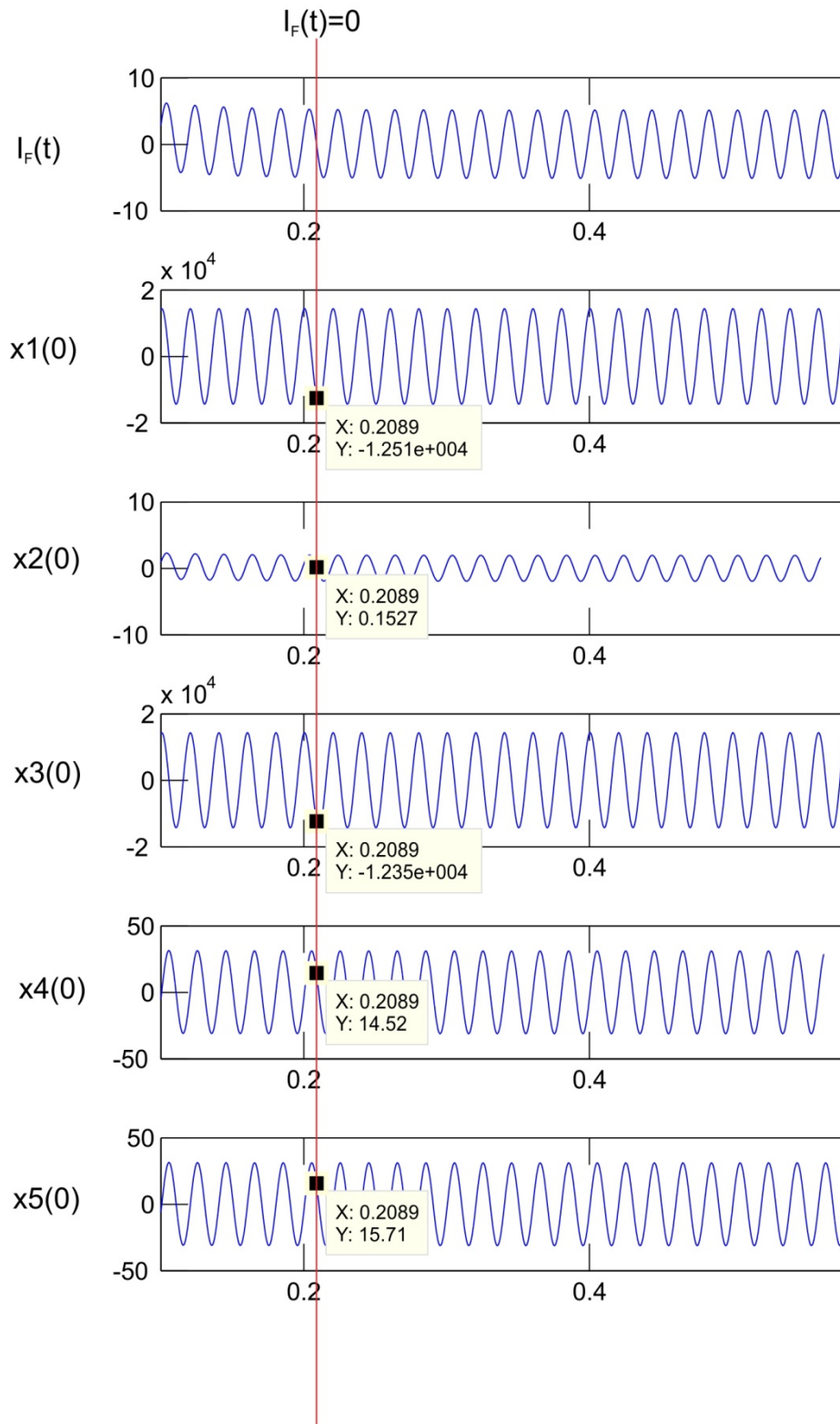
Fehlereintritt: 09:33:17,397  
Fehlerdauer: 2,16  
Erdschlussende: 09:33:19,577

Auswertung

Auswertungssoftware

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{Lg}^0}{L_{Lg}^0} & -\frac{1}{L_{Lg}^0} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{Lg}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{C_{mst} + C_{E2}^0}{1} & 0 & \frac{1}{R_{mst} + C_{E2}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{mgd}^0} & \frac{R_{Lg}^0}{L_{mgd}^0} & \frac{R_{Lg}^0}{L_{mgd}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{Lg}^0}{L_{mgd}^0} & \frac{R_{Lg}^0}{L_{mgd}^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Differentialgleichungssystem des Einschwingvorganges



Ermittlung der Anfangsbedingungen für den Ausschwingvorgang