

Kritische Betrachtung des Löschverhaltens in kompensierten 20-kV-Netzen

- Auswertung von alten und neuen Erdschlussdaten -

Dipl.-Ing. Emanuel Fuchs

Gutachter:

Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert

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

Kritische Betrachtung des Löschverhaltens in kompensierten 20-kV-Netzen

- Auswertung von alten und neuen Erdschlussdaten -

Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde an der Technischen Universität Graz

Gutachter:

- 1. Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert**
- 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik**

Vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Emanuel Fuchs

Eingereicht im:

Dezember 2013

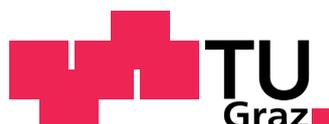
Technische Universität Graz

Institut für Elektrische Anlagen

Inffeldgasse 18/1

8010 Graz

Institutsvorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert



Tho' much is taken, much abides;
and though we are not now that strength
which in old days moved earth and heaven;
that which we are, we are;
one equal temper of heroic hearts,
made weak by time and fate,
but strong in will to strive, to seek, to find, and not to yield.

Alfred Lord Tennyson (Ulysses)

DANKSAGUNG

Ich will dir, meiner geliebten Ehefrau, zuerst danken für all die schönen Tage, die du mir durch deine Anwesenheit geschenkt hast, ohne die ich wohl nicht die notwendige Ruhe gehabt hätte diese Arbeit zu vollenden - ευχαριστώ για την ωραία στιγμή. Meinen Eltern danke ich für den Zuspruch, den ich durch sie erfahren habe, und für die Hartnäckigkeit, die sie mich gelehrt haben. Besonderer Dank gilt auch dem Institutsvorstand Prof. Fickert, der mich bei dieser Arbeit mit seinen Ratschlägen ermutigt hat und mit seinem Wesen das Arbeiten unter ihm sehr angenehm gestaltet hat. Prof. Renner und Dr. Schmutzler danke ich für die vielen Fachgespräche während meiner Zeit am Institut. Dankbar bin ich auch für die Zusammenarbeit mit Frau Dipl.-Ing. Trajanoska, deren gewinnendes Gemüt mich immer wieder erfreut hat. Ein herzliches „Gott vergelts“ geht an Dr. Braunstein für die aufbauenden Worte auf dem gemeinsam zurückgelegten Weg des Doktorats. Es gäbe noch viele weitere Leute, bei denen ich mich bedanken möchte: die nicht namentlich genannten Arbeitskollegen, die Sekretärin, die Werkstätte usw., aber der Einfachheit halber sage ich zu allen anderen vom Institut, mit denen ich das Vergnügen hatte zu arbeiten: „Danke!“. Meinem Sohn Theodor möchte ich für die Zerstreung die er mir immer wieder liefert danken.

Schlussendlich danke ich auch meinem Schöpfer, Jesus von Nazareth, dessen Freundschaft mir stets den notwendigen Halt in meinem Leben gibt. Er ist auch das Licht, das in meinen Nächten mir leuchtet.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	4
Inhaltsverzeichnis	5
Kurzfassung	8
Abstract	10
Symbole	12
Abkürzungsverzeichnis	14
1 Einleitung	15
1.1 Die Basis der Arbeit	15
1.2 Die Motivation	16
1.3 Forschungsaufgabe	16
1.4 Aufbau der Forschungsarbeit	16
1.5 Allgemeine Hinweise	17
2 Grundlagen	18
2.1 Gelöschte Netze	19
2.2 Der einfache Erdschluss	20
2.2.1 Entladevorgang der Erdschlussphase	21
2.2.2 Umladungsvorgang der gesunden Phasen	21
2.2.3 Stationärer Fall	21
2.2.4 Abschaltung / Erlöschen des Fehlers	21
2.3 Kenngrößen	22
2.3.1 Kapazitiver Erdschlussstrom	22
2.3.2 Erdschlussreststrom	22
2.3.3 Oberschwingungsstrom	23
2.3.4 Der Wattreststrom	23
2.3.5 Dämpfungsfaktor	23
2.3.6 Löschgrenze	26
2.3.7 Verstimmung	27
2.3.8 Verlagerungsspannung	27
2.4 Abstimmung der Petersenspule - Betriebsbereich	27
2.5 Symmetrische Komponenten	28
2.5.1 Mathematische Grundlagen	28
2.5.2 Null-, Mit- und Gegensystem	30
2.6 Fourier-Transformation	31
2.6.1 Zeitdiskrete Fourier-Transformation	31
2.6.2 Diskrete Fourier-Transformation	32

2.6.3	Fourier-Transformation periodischer Signale	32
2.6.4	Fensterung von transienten Vorgängen	34
2.6.5	Zero padding	34
3	Das Löschverhalten von kompensierten 20-kV-Netzen	35
3.1	Löschgrenze 20 kV - Ein geschichtlicher Abriss	35
3.1.1	Erste Untersuchungen von 1931 - 1962	35
3.1.2	Grundlagen der aktuellen Norm aus dem Jahr 1963	36
3.1.3	Weiterführende Untersuchungen von 1964 bis heute	38
3.2	Die aktuelle Normenlage	39
3.2.1	Auswirkung der Löschgrenze für 20-kV-Mittelspannungsnetze	40
3.2.2	Auswirkung der Löschgrenze für 110-kV-Hochspannungsnetze	42
3.3	Der Einfluss von Oberschwingungen und Fehlerort auf den Erdschlussreststrom	43
3.3.1	Ausführungen für den Einfluss der Oberschwingungen und des Fehlerorts auf den Erdschlussreststrom	44
3.4	Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 1: Die Löschgrenze für 20-kV-Netze	50
3.4.1	Die Löschgrenze in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom	50
3.4.2	Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung	53
3.4.3	Eine mögliche Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze unter Berücksichtigung der Netzgröße	57
3.5	Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 2: Die Brenndauer in 20-kV-Netzen	58
3.5.1	Die unterschiedlichen Brenndauern in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und der Netzgröße	58
3.5.2	Der Einfluss der Netzgröße auf die Brenndauer	60
3.5.3	Die Brenndauer von Erdschlusslichtbögen in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung	64
3.6	Aktuelle Auswertung von Erdschlüssen (Löschgrenze, Brenndauer) in der 20-kV-Spannungsebene	66
3.6.1	Auswertung der Daten hinsichtlich des 50-Hz-Erdschlussreststroms in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms	67
3.6.2	Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms	68
3.6.3	Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit der Dämpfung	69
3.6.4	Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit des THD bzw. der Oberschwingungen der betroffenen Phase vor dem Fehlereintritt	70
3.6.5	Häufigkeitsverteilung der Brenndauer	72
3.7	Auswertung von Erdschlüssen in der 110-kV-Spannungsebene	73
3.7.1	Häufigkeitsverteilung von Erdschlüssen über Jahr und Zeit	73
3.7.2	Der Verlauf der Dämpfung und der Verstimmung über das Jahr	74

4	Der Ausschwingvorgang	76
4.1	Grundlagen des Ausschwingvorgangs	76
4.2	Ermitteln der Verstimmung und Dämpfung	79
4.2.1	Ermitteln der Verstimmung und der Dämpfung im Zeitbereich	79
4.2.2	Ermitteln der Verstimmung und der Dämpfung im Frequenzbereich	80
4.2.3	Gegenüberstellung der Verfahren anhand eines Beispiels aus der Praxis	81
4.3	Exakte Bestimmung des Zeitpunkts der Verlöschung eines Erdschlusses	84
4.3.1	Stand der Technik	84
4.3.2	Detektion des Erdschlussendes - Theorie	85
4.3.3	Detektion des Erdschlussendes - Ein praktisches Beispiel	87
5	Zusammenfassung	89
6	Ausblick	93
I	Literaturverzeichnis	94
II	Abbildungsverzeichnis	97
	Eidesstattliche Erklärung	101

KURZFASSUNG

Schlüsselwörter:

Gelöschtes Netz, Löschgrenze, Erdschlussreststrom, kapazitiver Erdschlussstrom, Mittelspannung, 20-kV, 110-kV, kompensiert, Brenndauer, Oberschwingungen, Erdschlussende, Verstimmung, Dämpfung, Ausschwingvorgang, Jahreszeit, Frequenzbereich

Inhalt:

Das Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf den ausgewerteten historischen und selbst erhobenen Daten einen mathematische Zusammenhang sowohl zwischen den diversen Löschgrenzen verschiedener Autoren als auch zwischen den mittleren Brenndauern von Erdschlusslichtbögen zu finden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in dieser Arbeit historischen Daten von 1931 bis heute aufbereitet und neu interpretiert. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse der maßgeblichen Veröffentlichungen erfasst und chronologisch dargestellt.

Einen besonderen Bestandteil der historischen Veröffentlichungen bilden die ÖVE-B1/1976 sowie die DIN VDE 0228-2:1987, die den aktuellen normativen Grenzwert des Erdschlussreststroms für kompensierte 20-kV-Netze enthalten. Um den Einfluss dieser normativen Grenzwerte auf heutige kompensierte Netze zu erklären, wird deren Auswirkung dargelegt. Auch Überlegungen hinsichtlich Oberschwingungen und Fehlerort sind in der Arbeit enthalten, wobei erwähnt sei, dass die ÖVE-B1/1976 für den normativen Grenzwert des Erdschlussreststroms nur die Grundwelle in Betracht zieht. Für die Neu-Interpretation der historischen Daten bezüglich der Löschgrenze von kompensierten 20-kV-Netzen werden die Ergebnisse von damals in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms dargestellt. Basierend auf zwei Veröffentlichungen aus dem Jahr 1950 und 1984 wird der Einfluss der wiederkehrenden Spannung berücksichtigt und in die Überlegungen für eine neue experimentell erhärteten Löschgrenze, die vom Erdschlussstrom abhängig ist, einbezogen. Eine neue experimentell bestimmte Formel für die Löschgrenze wird hergeleitet. Für die Neu-Interpretation der historischen Daten bezüglich der Brenndauer von Erdschlüssen in kompensierten 20-kV-Netzen werden die Abhängigkeiten derselben hinsichtlich Erdschlussreststrom und Netzgröße untersucht.

Die Auswertung aktueller Erdschlüsse hinsichtlich der Abhängigkeit der Löschgrenze vom Erdschlussreststrom ergibt aufgrund der geringen Datenbasis keine qualitative Aussage. Dasselbe gilt für die Auswertung hinsichtlich des Einflusses von Oberwellen. Hinsichtlich der Häufigkeit von Erdschlüssen kann aufgrund der Daten des 110-kV-Netzes gezeigt werden, dass die meisten Erdschlüsse zwischen 2:00 und 6:00 auftreten, was vermutlich auf den Taupunkt zurückzuführen ist. Des Weiteren kann bei

der Auswertung der Daten auch eine Veränderung der Dämpfung über das Jahr, aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Erdwiderstandes, dargestellt werden.

Des Weiteren wird ein neues Verfahren zur automatisierten Auswertung von Erdschlüssen vorgestellt. Das neue Verfahren ermittelt die Verstimmung und Dämpfung anhand des Ausschwingverhaltens im Frequenzbereich. Für die automatisierte Auswertung von Erdschlüssen ist des Weiteren die exakte Erfassung des Verlöschzeitpunktes notwendig. Für diese exakte Erfassung wird ein neues Verfahren in dieser Arbeit vorgestellt, das basierend auf der Momentanfrequenz der Verlagerungsspannung den exakten Zeitpunkt des Verlöschens ermittelt.

ABSTRACT

Keywords:

compensated networks, self-extinguishing current limit, earth fault residual current, earth fault current, medium voltage, 20-kV, 110-kV, arc-burning time, harmonics, distinguishing moment of an earth fault, detuning, damping, decay process, season, frequency domain

Content:

The goal of this work is to find a mathematical connection, based on the data of various authors, between different self-extinguishing current limits as well as a mathematical description of the medium arc-burning time. To reach this goal historical data from 1931 until now are reprocessed and reinterpreted. For this reason the results of the relevant publications are included and chronological presented.

A special case of the historical publications are ÖVE-B1/1976 and DIN VDE 0228-2:1987. Both standards include the current limit of the self-extinguishing current limit for compensated 20-kV-power-grids. To demonstrate the influence of the current self-extinguishing current limit on present-days power grids the consequences of it are shown. The work contains considerations in respect of harmonics and the failure location. For that case it is to mention that the ÖVE-B1/1976 just considers the fundamental wave in respect of the self-extinguishing current limit. For the re-interpretation of the historical data concerning the self-extinguishing current limit of compensated 20-kV-power-grids the results are shown in dependency of the earth fault current. Based on two publications as from 1050 and 1984 the influence of the recovering voltage is considered and included in the new self-extinguishing current limit. A novel formula for the self-extinguishing current is derived and proven by results. For the re-interpretation of the historical data regarding the medium arc-burning time in compensated 20-kV-power-grids the dependencies in respect of the earth fault residual current and the earth fault current are investigated.

The analysis of current earth faults in regard of the self-extinguishing current limit and the medium arc-burning time has shown no result because of the minor data amount. Concerning the analysis of the impact of the harmonics the minor data amount leads also to no results. In respect of the frequency of occurrence of earth faults the data of a 110-kV-power-grid are evaluated and it is shown that most of the earth faults occur between 02:00 - 06:00. This is probably a result of the dew point. Furthermore the evaluation of the current data has shown that a change of the damping during the year, because of the change of the soil resistance, occurs.

Furthermore a new method for the automated evaluation of earth faults is introduced. The new method determines the detuning and the damping, based on the decay process, in the frequency domain. For the automated evaluation of earth faults the accurate registration of the distinguishing moment of an earth fault is necessary. For the accurate registration a new method is introduced in this work. This new method is based on the momentary frequency of the displacement voltage which allows the accurate determining of the distinguishing moment of an earth fault.

SYMBOLE

Allgemeine Kennzeichen:

Bei der Darstellung der symmetrischen Komponenten werden die einzelnen Systeme durch folgende Hochzahlen gekennzeichnet:

- ¹ Mitsystem
- ² Gegensystem
- ⁰ Nullsystem

Fett gedruckte Variablen kennzeichnen Vektoren oder Matrizen

Unterstrichene Variablen kennzeichnen komplexe Größen

- a Drehoperator
- C_E Leiter-Erde-Kapazität
- C_{EF} Leiter-Erde-Kapazität Freileitung
- C_{EK} Leiter-Erde-Kapazität Kabel
- C_L Leitungskapazität
- E Erde
- $F(j\omega)$ Fouriertransformierte
- $f(t)$ Funktion im Zeitbereich
- f_N Nennfrequenz
- G_E Leiter-Erde-Leitwert, ohmscher Querableitwert
- G_p Leitwert der Petersenspule
- I_C, I_{CE} kapazitiver Erdschlussstrom
- I_F Fehlerstrom an der Fehlerstelle
- I_G Löschgrenze
- I_L induktiver Löschstrom
- $I_{1,2,3}$ Phasenströme
- I_{OS} Oberschwingungsströme
- I_{Rest} 50-Hz-Komponente des Erdschlussreststroms (Fehlerstroms) an der Fehlerstelle
- I_{RestOS} Erdschlussreststrom (Fehlerstrom) an der Fehlerstelle
- I_{RST} Drehstrom System Phasenströme-Vektor

- I_W Wattreststrom
- \underline{I}_{120} Symmetrische Komponenten Ströme-Vektor
- L_p Induktivität der Petersenspule
- $L1$ Phase 1
- $L2$ Phase 2
- $L3$ Phase 3
- l_L Leitungslänge
- l_{StkL} Leitungsstücklänge eines Π -Elementes
- M Anzahl der Abgänge von der Sammelschiene
- N Sternpunkt eines Transformators
- N Anzahl der Samples einer DFT
- n_{Π} Anzahl der Π -Elemente
- R_E Querableitwiderstand
- R_F Fehlerwiderstand
- R_L Leitungswiderstand
- R_p Widerstand der Petersenspule
- \underline{S} Symmetrierungsmatrix
- \underline{T} Entsymmetrierungsmatrix
- T_a Abtastperiodendauer
- t_A Erdschlussanfang
- t_E Erdschlussende
- \underline{U}_A Spannung an der Messstelle A
- \underline{U}_B Betriebsspannung (Effektivwert der verketteten Spannungen)
- \underline{U}_E Spannung an der Messstelle E
- \underline{U}_F Spannung am Fehlerwiderstand
- \underline{U}^M Spannung des Mitsystems
- \underline{U}_N Nennspannung (Effektivwert der verketteten Spannung)
- \hat{U}_b Spitzenwert der Betriebsspannung
- \underline{U}_{NE} Verlagerungsspannung, Sternpunktverlagerungsspannung
- $u_{NE}(t)$ zeitlicher Verlauf der Verlagerungsspannung
- \hat{U}_{Ph} Spitzenwert der Phasenspannung

<p>$\underline{\mathbf{U}}_{\text{RST}}$..... Drehstrom System Phasenspannungs-Vektor</p> <p>$U_{\text{ü}}$..... transiente Überspannung</p> <p>$\underline{U}_{1\text{E}}$..... Leiter-Erde-Spannung Phase 1</p> <p>$\underline{U}_{2\text{E}}$..... Leiter-Erde-Spannung Phase 2</p> <p>$\underline{U}_{3\text{E}}$..... Leiter-Erde-Spannung Phase 3</p> <p>$\underline{\mathbf{U}}_{120}$..... Symmetrische Komponenten Spannungs-Vektor</p> <p>$u_{1,2,3}(t)$... zeitlicher Verlauf der Phasen-Erde-Spannungen</p> <p>U^0 Spannung des Nullsystems an der Messtelle</p> <p>\hat{U}^0 Spitzenwert der Spannung des Nullsystems</p> <p>$\hat{U}_{\text{extern}}^0$ Spitzenwert der Spannung die von äußeren Einflüssen generiert wird</p> <p>U^1 Spannung des Mitsystems an der Messtelle</p> <p>U^2 Spannung des Gegensystems an der Messtelle</p> <p>$u_{\text{sim}}^0(t)$... Daten der Simulation eines Ausschwingvorgangs</p> <p>$u_{\text{orig.}}^0(t)$. Originaldaten eines Ausschwingvorgangs</p> <p>$W_{[\text{n}]}$..... Fensterfunktion</p> <p>\underline{X}_{C}..... Reaktanz einer Kapazität</p> <p>x_{K}..... korrekter Messwert</p> <p>\underline{X}_{L}..... Leitungsreaktanz</p> <p>\underline{X}_{p}..... Reaktanz der Petersenspule</p> <p>x_{M}..... berechneter Messwert</p> <p>\underline{X}_{T}..... Trafo Reaktanz</p> <p>$x_{[\text{n}]}$..... Eingangsfolge</p> <p>$\underline{\mathbf{Y}}$..... Admittanzmatrix</p> <p>$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{RST}}$..... Drehstromsystem Admittanzmatrix</p> <p>$\underline{\mathbf{Z}}$..... Impedanzmatrix</p> <p>\underline{Z}_{L}..... Leitungsimpedanz</p> <p>$\underline{Z}_{\text{last}}$..... Lastimpedanz</p> <p>$\underline{\mathbf{Z}}_{\text{RST}}$..... Drehstromsystem Impedanzmatrix</p> <p>\underline{Z}_{T}..... Trafoimpedanz</p> <p>$\underline{\mathbf{Z}}_{120}$..... Symmetrische Komponenten Impedanzmatrix</p> <p>δ..... Dämpfung (Dämpfungsfaktor)</p> <p>ε..... Abklingkonstante</p> <p>ε_{R}..... Relativer Fehler</p> <p>υ Verstimmung</p> <p>ϑ..... Dämpfungsgrad</p> <p>τ..... Zeitkonstante</p> <p>ω..... Kreisfrequenz</p> <p>$\Delta\omega$..... Kreisfrequenz der Schwebung</p>	<p>ω_{E}..... Kreiseigenfrequenz</p> <p>ω_{N}..... Kreisnennfrequenz</p> <p>ω_0..... Kreisresonanzfrequenz</p>
---	--

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FT	Fourier Transformation
FFT	Fast Fourier Transformation
TDFT	Time Discrete Fourier Transformation
DFT	Discrete Fourier Transformation
THD	Total Harmonic Distortion
RST-Komponenten	Dreileiter-Drehstromsystem
120-Komponenten	Symmetrisches Komponentensystem



Ein Ziel zu haben ist die größte Triebkraft im Leben eines Menschen.

Viktor Emnil Frankl (†1997)

Die aktuelle Löschgrenze von kompensierten 20-kV-Netzen basiert auf den Untersuchungen von M. Erich und H. Heinze. Die Ergebnisse der damaligen Versuche führten zu dem heute gültigen Grenzwert der ÖVE-B1/1976 bzw. der DIN VDE 0228 Teil 2. Dieser Grenzwert führt im heutigen Netzausbau zu dem Problem, dass die Mittelspannungsnetze nicht beliebig zusammengeschaltet und erweitert werden können. Weiterführende Untersuchungen von K. H. Koch aus dem Jahr 1981 jedoch ergaben, dass der Grenzwert aus den Versuchen von M. Erich und H. Heinze gewissen Änderungen unterworfen sein kann.

1.1 Die Basis der Arbeit

Diese Arbeit baut auf folgende drei einander ergänzenden Teilbereiche auf:

- Historische Daten betreffend des Löschverhalten von kompensierten 20-kV-Netzen
- Aktuelle Daten von Erdschlüssen in kompensierten Netzen
- Das Bestimmen von spezifischen erdschlussrelevanten Daten eines Netzes anhand des Ausschwingvorgangs von Erdschlüssen

Der erste Teilbereich sind die Veröffentlichungen zu dem Thema Erdschlusslöschung, beginnend mit dem Jahr 1931. Viele Aussagen der zahlreichen Veröffentlichungen ergänzen sich, andere wiederum widersprechen sich scheinbar oder offensichtlich. Über das Löschverhalten von kompensierten Netzen gibt es unterschiedliche Angaben der verschiedenen Autoren. Der Gedanke, der dieser Arbeit zugrunde liegt, ist nun jener, dass die unterschiedlichen Angaben zum Löschverhalten auf unterschiedliche Randbedingungen zurückzuführen sind. Es wird also, vom Verfasser dieser Arbeit, davon ausgegangen, dass jede Erkenntnis der damaligen Autoren immer nur ein Teilergebnis bzw. eine mögliche Perspektive des zu untersuchenden Löschverhaltens darstellt.

Der zweite Teilbereich stellt die Auswertung von aktuellen Daten von kompensierten Netzen dar. Anhand dieser Daten soll versucht werden, neue Erkenntnisse zu gewinnen bzw. die Erkenntnisse, basierend auf den historischen Daten, bezüglich des Löschverhaltens zu bestätigen. Aus diesem Grund wurden von unterschiedlichen kompensierten Netzen die Daten von selbstverlöschenden Erdschlüssen in Österreich analysiert. Da für verschiedene Betrachtungen der Beobachtungszeitraum über ein ganzes Jahr notwendig war, liegen manche Ergebnisse nur aus einem 110-kV-Netz vor, das als einziges Netz diesen erforderlichen Beobachtungszeitraum aufweist. Die Daten wurden im Zuge eine Studie erhoben.

Der dritte Teilbereich stellt die notwendige Signalverarbeitung für die Auswertung der aktuellen Daten dar. Zu

diesem Zwecke wurden neue Algorithmen entwickelt, die das automatisierte Auswerten von Erdschlussdaten erlauben. Bei dieser Auswertung der Daten waren besonders die Verstimmung, die Dämpfung sowie die exakte Dauer eines Erdschlusses von besonderer Bedeutung.

1.2 Die Motivation

Die Motivation dieser Arbeit ist es eine Diskussion bezüglich der Löschgrenze von kompensierten 20-kV-Netzen in der ÖVE-B1/1976 bzw. in der DIN VDE 0228-2:1987, da die historischen Daten die Vermutung zulassen, dass der damals erhaltene Grenzwert maßgeblich auch von anderen Größen als den dort beschriebenen beeinflusst worden ist. Es ist daher für den weiteren wirtschaftlichen und sicheren Ausbau von kompensierten Netzen unerlässlich das Löschverhalten neu zu analysieren und zu bewerten.

1.3 Forschungsaufgabe

Der Forschungsbereich dieser Arbeit erstreckt sich, einerseits über das Erfassen und die Neu-Interpretation von historischen Daten betreffend des Löschverhaltens, über die Entwicklung neuer Signalverarbeitungsalgorithmen zur automatischen Auswertung von Erdschlüssen hin zum Versuch, anhand von aktuellen Daten die historischen Daten bezüglich des Löschverhaltens zu untermauern bzw. Möglichkeiten zu finden, dieses anhand von zukünftiger Datenerfassung zu ermöglichen.

Ziel der Arbeit ist es, aufgrund der Gemeinsamkeiten der einzelnen Perspektiven der veröffentlichten Publikationen, einen theoretischen Ansatz für die Löschverhalten bei 20-kV-Mittelspannungsnetzen zu erhalten. Im Speziellen bedeutet das, dass ein mathematischer Zusammenhang zwischen den diversen Löschgrenzen sowie bei der mittleren Brenndauer von Erdschlusslichtbögen gesucht wird.

1.4 Aufbau der Forschungsarbeit

Die Forschungsarbeit gliedert sich in die folgenden drei Teile:

- Grundlagen
- Das Löschverhalten von kompensierten 20-kV-Netzen
- Der Ausschwingvorgang

Der erste Teil beschreibt die aktuellen Grundlagen bezüglich gelöschter Netze und ist für das Verständnis dieser Arbeit notwendig. Sie reichen von der Betrachtung von gelöschten Netzen im Fehlerfall hin bis zur Analyse von Signalen mittels einer Fouriertransformation.

Der zweite Teil beschreibt das Löschverhalten von kompensierten 20-kV-Netzen. Er weist folgende Gliederung auf:

- Löschgrenze 20 kV - Ein geschichtlicher Abriss
- Die aktuelle Normenlage
- Der Einfluss von Oberschwingungen und Fehlerort auf den Erdschlussreststrom
- Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 1: Die Löschgrenze für 20-kV-Netze

- Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 2: Die Brenndauer in 20-kV-Netzen
- Aktuelle Auswertung von Erdschlüssen (Löschgrenze, Brenndauer) in der 20-kV-Spannungsebene
- Auswertung von Erdschlüssen in der 110-kV-Spannungsebene

Der dritte Teil beschreibt die für die automatisierte Auswertung von Erdschlusswischern notwendige Signalanalyse des Ausschwingvorgangs. Zuerst wird ein Verfahren im Frequenzbereich beschrieben, anhand dessen die Verstimmung und die Dämpfung eines Netzes ermittelt wird. Anschließend erfolgt die Ausführung eines Verfahrens zur exakten Erfassung des Zeitpunkts des Verlöschens eines Erdschlusses. Die Kombination beider Verfahren erlaubt die automatisierte Auswertung von Erdschlüssen, welche anhand eines abschließenden Beispiels dargestellt ist.

1.5 Allgemeine Hinweise

Im Zuge der Forschung auf diesem Gebiet wurden Teile dieser Arbeit auch in einer Studie verwendet.

Wer hohe Türme bauen will, muss lange beim Fundament verweilen.

Anton Bruckner (†1896)

Waldemar Petersen ist der Urheber der heutzutage in Österreich und Deutschland sowie anderen Staaten oftmals eingesetzten Petersenspule. Seine Erfindung, die im Jahr 1917 in Deutschland, Österreich und anderen Staaten patentiert wurde, bezog sich auf den Einsatz einer induktiven Löschspule, auch Petersenspule genannt, in elektrischen Mittel- und Hochspannungsnetzen zur „Unterdrückung von Erdfehlern“ - wie es aus der Patentschrift [1], eingereicht in den Vereinigten Staaten von Amerika, hervorgeht. Der Kern seiner Erfindung ist, dass dem kapazitivem Anteil des Erdschlussstroms ein induktiver Anteil entgegensetzt wird, um so den Lichtbogen zum Verlöschen zu bringen.

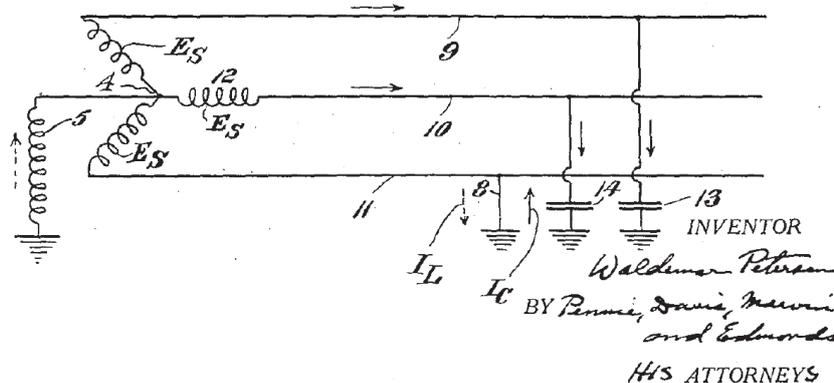


Abbildung 2.1: Originale Darstellung aus dem Patent von Waldemar Petersen [1]

Die Abbildung 2.1 zeigt die originale Darstellung eines gelöschten Netzes aus dem Patent von Waldemar Petersen aus dem Jahr 1925. Man erkennt die mit 5 gekennzeichnete Petersenspule. Die bei einem Erdschluss aktiven Kapazitäten des Netzes sind mit den Nummern 13 und 14 versehen. Der kapazitive Strom ist mit durchgehenden Pfeilen dargestellt und mit I_C benannt. Die strichlierten Pfeile kennzeichnen den induktiven Strom I_L . Durch diese Reduktion des Stroms auf den Erdschlussreststrom an der Fehlerstelle wird dem bestehenden Lichtbogen die benötigte Energie zum „weiterbrennen“ entzogen, es kommt zur Verlöschung des Lichtbogens - das Ziel von Waldemar Petersens Erfindung.

Mit dieser Idee erschuf Waldemar Petersen die Grundlage für sämtliche gelöschte Netze weltweit (welche auch als *self healing grid* bezeichnet werden). Er legte damit einen weiteren Grundstein, basierend auf der Drehstromtechnologie von Nikola Tesla, für die hohe Zuverlässigkeit der elektrischen Energieübertragung in Mittel- und Hochspannungsnetzen.

2.1 Gelöschte Netze

Wie zuvor beschrieben stammt die Idee, Mittel- und Hochspannungsnetze gelöscht zu betreiben, von Waldemar Petersen. Den Kern eines jeden gelöscht betriebenen Netzes stellt die Löschspule bzw. nach ihrem Erfinder benannte Petersenspule dar. Um die einwandfreie Funktion einer Löschspule zu gewährleisten, hat diese auf die Größe des Netzes bzw. auf die Größe des kapazitiven Fehlerstroms des jeweiligen Netzes abgestimmt zu werden.

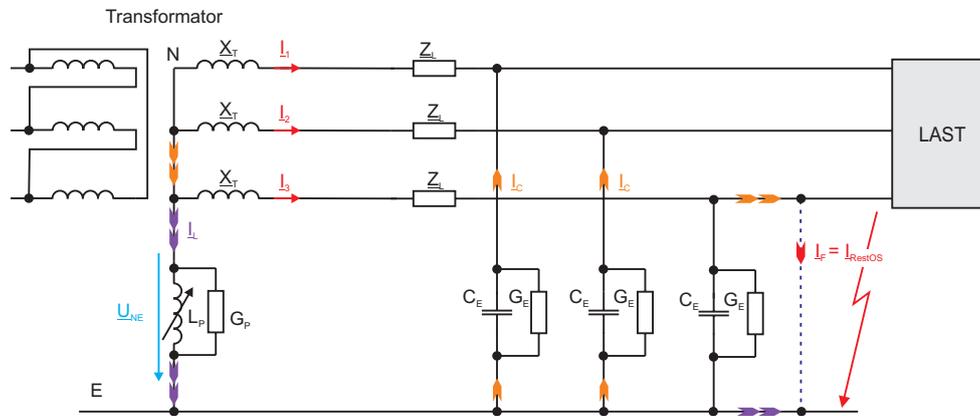


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Prinzipschaltbild eines gelöschten Netzes

In der Abbildung 2.2 ist ein vereinfachtes Prinzipschaltbild eines gelöschten Netzes mit seinen wesentlichen Komponenten dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind die Verlagerungsspannung \underline{U}_{NE} sowie die Phasenströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 und \underline{I}_3 . Der induktive Anteil des Löschspulenstroms \underline{I}_L wird über die veränderliche Induktivität der Löschspule, ausgeführt z.B. als Tauchkernspule, eingestellt. Die Kompensation des Erdschlussfehlerstroms \underline{I}_F erfolgt, aufgrund der Auslegung der Petersenspule auf die Nennfrequenz f_N , nur für die kapazitive Grundschwingung. Aus diesem Grund setzt sich der Erdschlussreststrom $\underline{I}_{\text{RestOS}}$ bei vollständiger Kompensation aus dem ohmschen Wattreststrom \underline{I}_W und den Oberschwingungsströme \underline{I}_{OS} zusammen. Der ohmsche Wattreststrom (verantwortlich für die Verluste im Nullsystem) kommt aufgrund der ohmschen Anteile des Löschspulenstroms \underline{I}_L , und des ohmschen Anteiles des kapazitiven Erdschlussstroms \underline{I}_C (Querableitwiderstände) sowie aufgrund des Längswiderstands des Netzes zustande. Ziel der Kompensation des kapazitiven Anteils des Erdschlussfehlerstroms ist es, dass trotz der Zunahme des kapazitiven Anteils, aufgrund der Netzausdehnung, der in Summe fließende Fehlerstrom nicht die normativen Grenzen der ÖVE-B1/1976 überschreitet, sodass der Lichtbogen von selbst erlischt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „selbstheilenden“ Netzen. Ein gelöscht Netz kann während eines Erdschlusses bzw. während eines Dauererdschlusses weiterbetrieben werden und so die Versorgung eines Kunden fortführen. Dieser Effekt resultiert aus der Anhebung der nicht vom Erdschluss betroffenen Phase-Erde-Spannungen. Die Phase-Erde-Spannung wird, abhängig vom Widerstand an der Fehlerstelle, bis auf das $\sqrt{3}$ -fache angehoben. Dadurch bildet sich wieder ein Spannungsdreieck (siehe Abbildung 2.3), in der Größe der im Betriebsfall auftretenden verketteten Spannungen, aus [3][4].

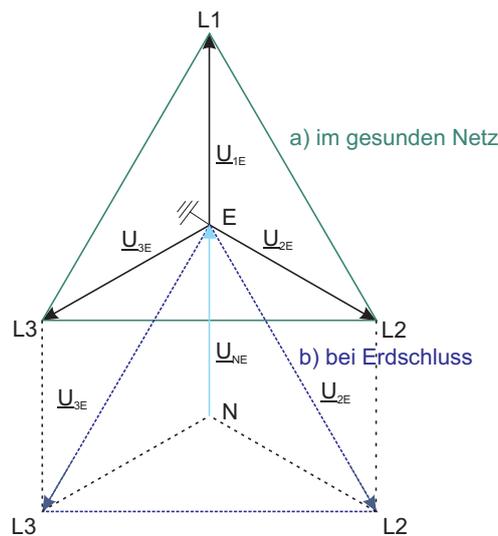


Abbildung 2.3: Spannungsdreieck vor und während eines Erdschlusses (stationär)

Es besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der Überbeanspruchung der Isolation als Folge der Spannungsanhebung ein Doppelerdschluss entsteht. Löschspulen werden in Mittel- und Hochspannungsnetzen eingesetzt (10 kV bis 110 kV) [3][4].

Vorteile von gelöschten Netzen [3]:

- Geringe Fehlerströme - Lichtbögen verlöschen meist von selber
- Vorrübergehende Fortführung des Betriebes bei einpoligem Erdschluss möglich
- Hohe Versorgungssicherheit
- Teilweise geringere Anforderungen an die Erdungsanlage [2]

Nachteile von gelöschten Netzen [3]:

- Netz ist nicht beliebig ausbaubar - Netzausbaugrenze
- Mehrkosten durch den Einbau von Petersenspulen
- Schnellere Alterung der Isolierung sowie erhöhter Anspruch an die Isolierung aufgrund der erhöhten Spannungsbeanspruchung im Erdschlussfall
- Gefahr der vermehrten Entstehung von Doppelerdschlüssen

2.2 Der einfache Erdschluss

Bei einer elektrischen Zustandsänderung finden Ausgleichsvorgänge statt, die sich nicht vermeiden lassen. So finden auch beim Übergang vom erdschlussfreien in das erdschlussbehaftete Netz Entlade- und Umladevorgänge statt. Dabei handelt es sich zum Teil um erwünschte Vorgänge, wie das aus hochspannungstechnischer Sicht langsame Wiederkehren der Spannungen an der Fehlerstelle nach einem Erdschluss. Beim Erdschlusseintritt treten jedoch unerwünschte Ausgleichsvorgänge ein [26].

Der Gesamtverlauf eines Erdschlusses kann in folgende vier Abschnitte unterteilt werden (siehe Abbildung 2.4) [5]:

- a) Entladungsvorgang der Erdschlussphase
- b) Umladungsvorgang der gesunden Phasen
- c) Stationärer Fall
- d) Abschaltung / Erlöschen des Fehlers

Während die betriebsfrequenten Anteile des Fehlerstroms durch die Petersenspule kompensiert werden, fließen die von 50 Hz abweichenden Ausgleichströme ungehindert über die Fehlerstelle. Unmittelbar nach dem Erdschluss prägen sie den Strom an der Fehlerstelle [26]. Die einzelnen Ausgleichsströme haben unterschiedliche Ursachen und werden deshalb gesondert betrachtet.

2.2.1 Entladevorgang der Erdschlussphase

Die Leiter-Erde-Kapazitäten C_E eines gesunden Netzes sind annähernd gleich. Beim Auftreten eines einpoligen Erdschlusses bricht an der Fehlerstelle die Spannung der fehlerbehafteten Leitung zusammen. Die Kapazität der betroffenen Leitung wird kurzgeschlossen. Diese, bis dahin geladene Kapazität baut ihre Ladung über die Fehlerstelle ab. Diese Entladung geschieht zunächst in der unmittelbaren Umgebung der Fehlerstelle und breitet sich, als Wanderwelle, über die ganze Leitung in beide Richtungen aus. Die Frequenzen der Ströme werden durch die Wanderwellenlaufzeit zwischen der Fehlerstelle und den Reflexionspunkten bestimmt. Aufgrund der hohen frequenzabhängigen Dämpfung klingen die Entladeströme in kürzester Zeit wieder ab [5][26].

2.2.2 Umladungsvorgang der gesunden Phasen

Die Umladung der Leiterkapazitäten auf die mit dem Erdschluss verbundenen neuen Spannungsverhältnisse verursacht 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. Der über die Fehlerstelle fließende Umladestrom kann anhand der Ersatzschaltung der symmetrischen Komponenten weitgehend berechnet werden (Lichtbogenwiderstand ist dabei zu vernachlässigen). In weiterer Folge werden die gesunden Leiter durch Umladevorgänge auf bis zu $\sqrt{3} \cdot U_{ph}$, abhängig vom Fehlerwiderstand, angehoben [5][26].

2.2.3 Stationärer Fall

Der stationäre Fall schließt sich an die Ent- bzw. Umladung der Leiter-Erde-Kapazitäten an [5]. Er kann von wenigen Perioden (Millisekunden) bis hin zu Stunden dauern. Der verbleibende Fehlerstrom wird als Erdschlussreststrom I_{Rest} bezeichnet. Dieser Erdschlussreststrom ist im Wesentlichen abhängig von der Dämpfung δ im Fehlerfall, sowie von der Verstimmung ν [5].

2.2.4 Abschaltung / Erlöschen des Fehlers

Nach dem Abschalten bzw. Erlöschen des Fehlers wird die Spannung der betroffenen Phase sukzessiv wieder hergestellt. Das hat den Vorteil, dass ein Wiederezünden des Erdschlusses erschwert wird. Wenn der Resonanzkreis des Nullsystems nicht exakt abgestimmt ist ($\nu \neq 0$), kommt es, aufgrund der Überlagerung der freien Schwingung

des Nullsystems mit der von außen aufgeprägten Nennfrequenz f_{N^*} zu einer Schwebung im Ausschwingvorgang [5].

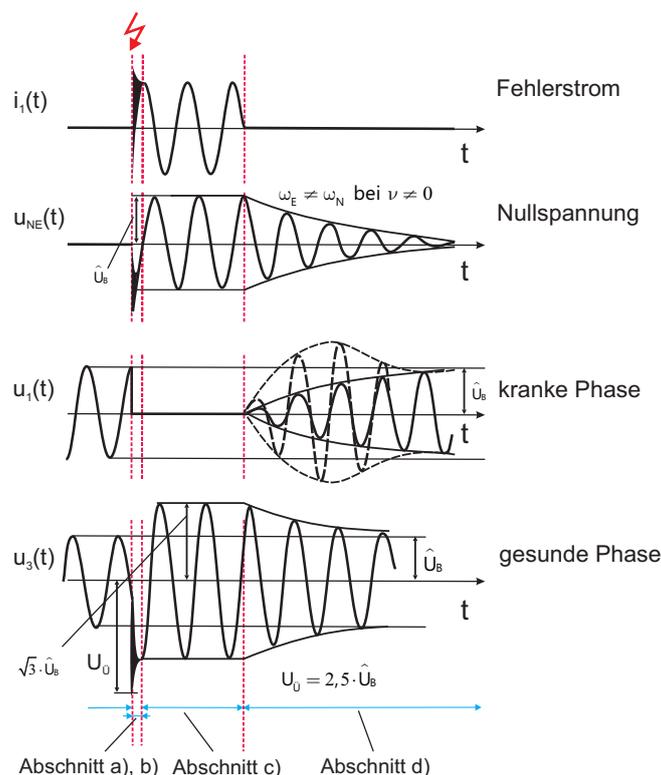


Abbildung 2.4: Verlauf eines Erdschlusses [15]

2.3 Kenngrößen

Um gelöschte Netze beurteilen zu können, ist die Kenntnis diverser Größen notwendig. Im Folgenden werden die relevantesten Größen eines gelöschten Netzes im Zusammenhang mit der Löschgrenze und der Auswertung von Störschrieben beschrieben.

2.3.1 Kapazitiver Erdschlussstrom

Der kapazitive Erdschlussstrom I_C wird bestimmt durch die Erdkapazitäten eines Netzes (siehe Formel 2.1). Dieser Strom dient als Vorgabe für den einzustellenden induktiven Löschspulenstrom I_L . Kabel besitzen aufgrund des kleineren Abstandes der Leiter zu einem (geerdeten) Kabelschirm bzw. bei Gürtelkabeln auch untereinander (der Phasen gegenüber auf Erdpotenzial befindlichen Schirmen/Mäntel) wesentlich höhere Erdkapazitäten C'_E als Freileitungen (bei gleicher Länge), wodurch sich mit wachsendem Kabelanteil in Netzen auch wesentlich größere Erdschlussströme ergeben [3].

$$I_C = \frac{U_B}{\sqrt{3}} 3j\omega C_E = \sqrt{3}U_B j\omega \underbrace{(C_{EF} + C_{EK})}_{C_E} \quad 2.1$$

2.3.2 Erdschlussreststrom

Der resultierende Strom über die Fehlerstelle wird Erdschlussreststrom I_{RestOS} genannt und ist die geometrische

Summe aus dem kapazitiven Erdschlussstrom I_C , dem induktiven Erdschlussstrom I_L , den ohmschen Ableitströmen oder Wattrestströmen I_W , sowie den Oberschwingungsströmen I_{OS} (siehe Gleichung 2.2). Er besteht in der Praxis aus einer 50 Hz-, einer 250 Hz- und einer 350 Hz-Schwingung [5]. I_{Rest} stellt die 50-Hz-Komponente des Erdschlussreststroms dar.

$$|I_{RestOS}| = \sqrt{(I_L - I_C)^2 + I_W^2 + I_{OS}^2} \leq I_G \quad 2.2$$

$$I_{Rest} = \sqrt{3} \cdot U_B \cdot \omega_N \cdot C_E (j\nu + \delta) \quad 2.3$$

$$I_{Rest} = I_C \cdot (j\nu + \delta) \quad 2.4$$

2.3.3 Oberschwingungsstrom

Der Oberschwingungsstrom I_{OS} liefert einen wesentlichen Anteil am Erdschlussreststrom I_{RestOS} . Bei vollständig kompensierten Netzen besteht der Erdschlussreststrom maßgeblich aus dem Oberschwingungsstrom I_{OS} [5].

2.3.4 Der Wattreststrom

Der Wattreststrom I_W beschreibt die Wirkverluste der Löschspule, die durch Erdschlussströme hervorgerufene Erwärmung (Verluste des Trafos), die Längsverluste der Leitung sowie die Ableitströme (Freileitungsisolatoren, Kabelisolation). Der Wattreststrom wird, mit Hilfe des Dämpfungsfaktors δ proportional, zu dem kapazitiven Erdschlussstrom I_C angenommen [5].

$$I_W = \delta \cdot I_C \quad 2.5$$

2.3.5 Dämpfungsfaktor

Der Dämpfungsfaktor δ in einem kompensierten Netz gibt das Verhältnis des Wattreststroms zum kapazitiven Erdschlussreststrom an. Im gelöschten Netz ist δ ein Maß für den ohmschen Anteil des Reststroms und ist in der Literatur mit der folgenden Gleichung angegeben [5]:

$$\delta = \frac{1}{\omega_0 \sum C_E} \left(\frac{1}{R_P} + \sum \frac{1}{R_Q} \right) \quad 2.6$$

In der Praxis ist jedoch der ohmsche Anteil des Reststroms, hervorgerufen durch den Längswiderstand der Leitungen und allfälligen Kabelschrimen nicht vernachlässigbar [46]. Aus diesem Grund wird für die Gleichung zur Berechnung der Dämpfung der Ansatz entsprechend Abbildung 2.5 gewählt. Dabei wird die Dämpfung einer einzelnen Leitung anhand einer PI-Ersatzschaltung bestimmt. Das restliche Netz wird durch mehrere Abgänge dargestellt.

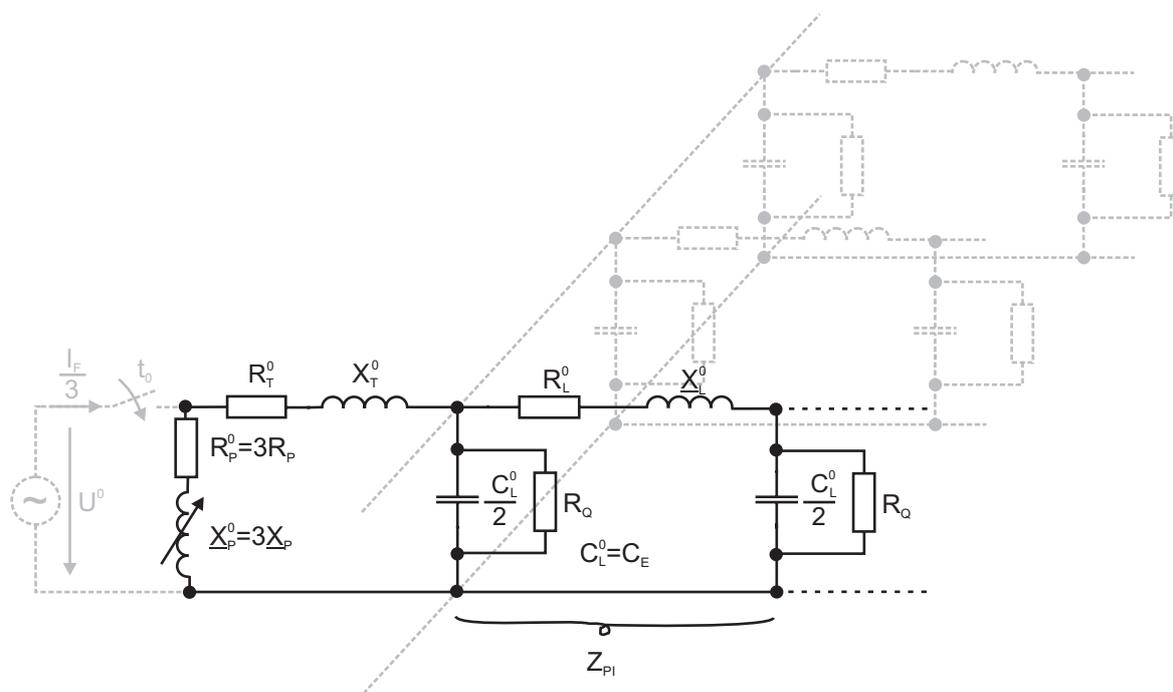


Abbildung 2.5: Ansatz für die Ermittlung der Dämpfung in einem gelöschten Netz im Nullsystem

Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$X_C = \frac{2}{\omega \cdot C_E} \quad 2.7$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{1}{\frac{1}{-j \cdot X_C} + \frac{1}{\underbrace{R_Q}_{\ll}}} \approx -j \cdot X_C \quad 2.8$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_1 + j \cdot X_L^0 + R_L^0 \quad 2.9$$

$$\underline{Z}_{PI} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}} = \frac{1}{\frac{1}{-j \cdot X_C} + \frac{1}{-j \cdot X_C + j \cdot X_L^0 + R_L^0}} \quad 2.10$$

$$\underline{Z}_{PI} = \frac{(j \cdot X_L^0 - j \cdot X_C + R_L^0) \cdot (-j \cdot X_C)}{-j \cdot 2 \cdot X_C + j \cdot X_L^0 + R_L^0} \quad 2.11$$

$$\underline{Z}_{PI} = \frac{R_L^0 \cdot X_C^2}{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2} + j \cdot \left(\frac{3 \cdot X_C^2 \cdot X_L^0}{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2} - \frac{(R_L^0)^2 \cdot X_C}{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2} - \dots \right) \quad 2.12$$

$$\Re\{\underline{Z}_{PI}\} = \frac{R_L^0 \cdot X_C^2}{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2} \quad 2.13$$

Ausgehend von den folgenden typischen Werten für ein repräsentatives 20-kV-Kabel

$$R_L^{0'} = 0.2 \Omega / km$$

$$X_L^{0'} = 0.1 \Omega / km$$

$$C_E' = 0.4 \mu F / km$$

$$\ell = 20 km$$

$$R_L^0 = 4 \Omega$$

$$X_L^0 = 2 \Omega$$

$$X_C = 795.78 \Omega$$

ergeben sich folgende weitere Vereinfachungen:

$$\Re\{Z_{PI}\} = \frac{R_L^0 \cdot X_C^2}{(R_L^0)^2 + \underbrace{(2 \cdot X_C - X_L^0)^2}_{\gg}} \approx \frac{R_L^0 \cdot X_C^2}{\underbrace{(R_L^0)^2}_{\ll} + \underbrace{4 X_C^2}_{\gg}} \quad 2.14$$

$$\Re\{Z_{PI}\} \approx \frac{R_L^0 \cdot X_C^2}{4 \cdot X_C^2} \approx \frac{R_L^0}{4} \quad 2.15$$

Ausgehend von Abbildung 2.5 wird der imaginäre Anteil des PI-Elements berechnet. Das führt basierend auf Gleichung 2.11 zum folgendem Ansatz:

$$\Im\{Z_{PI}\} = j \cdot \left(\frac{\frac{3 \cdot X_C^2 \cdot X_L}{\underbrace{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2}_{\ll}} - \frac{(R_L^0)^2 \cdot X_C}{\underbrace{(R_L^0)^2 + (2 \cdot X_C - X_L^0)^2}_{\ll}} - \dots}{\dots} \right) \quad 2.16$$

$$\Im\{Z_{PI}\} \approx \frac{2 \cdot X_C^3}{\underbrace{(R_L^0)^2}_{\ll} + \underbrace{(2 \cdot X_C - X_L^0)^2}_{\gg}} \approx -j \cdot \frac{X_C}{2} \quad 2.17$$

Daraus folgt, dass die wesentlichen Elemente einer PI-Ersatzschaltung bei einer Freileitung oder einem Kabel der Leitungswiderstand und die Leiter-Erde-Kapazität sind. Dadurch ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild:

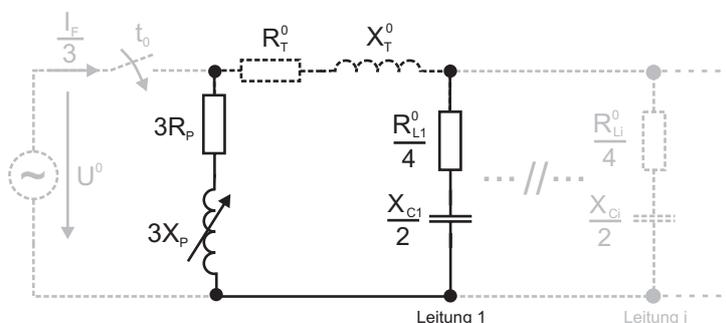


Abbildung 2.6: Vereinfachter Ansatz für die Ermittlung der Dämpfung und Resonanzfrequenz im Nullsystem eines gelöschten Netzes

Als Näherung kann der Trafo vernachlässigt werden. Da die Wirkwiderstände der Petersenspule und der Leitung im Vergleich zu den Blindwiderständen sehr gering sind, kann die folgende Umrechnung zu einem Parallelwiderstand verwendet werden. Aus dem selben Grund wird davon ausgegangen, dass die Kapazitäten und die Induktivität gleich bleiben. Dadurch ergeben sich folgende Gleichungen:

$$R_{LP\text{ar}-i} = \frac{R_{Li}^2 + \frac{X_{Ci}^2}{4}}{R_{Li}} \stackrel{R_{Li} \ll X_{Ci}}{\approx} \frac{X_{Ci}^2}{4 \cdot R_{Li}} \quad 2.18$$

$$R_{PP\text{ar}} = \frac{9 \cdot R_p^2 + 9 \cdot X_p^2}{9 \cdot R_p} \stackrel{R_p \ll X_p}{\approx} \frac{X_p^2}{R_p} \quad 2.19$$

Damit ergibt sich jetzt ein Parallelschwingkreis, der in Abbildung 2.7 dargestellt ist.

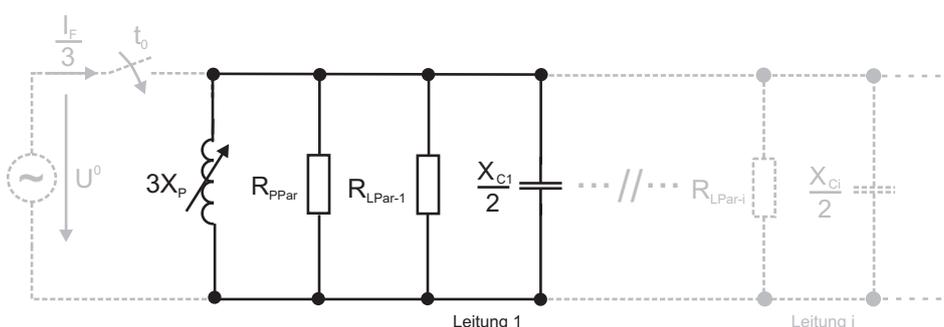


Abbildung 2.7: Ersatzschaltbild Parallelschwingkreis

Damit ergibt sich für den Dämpfungsfaktor folgender Ansatz:

$$\frac{1}{R_{Par}} = 4 \cdot \sum_{i=1}^M \frac{R_{Li}}{X_{Ci}^2} + \frac{R_p}{X_p^2} \quad 2.20$$

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^M C_{Ei} \quad 2.21$$

$$X_{Cges} = \frac{1}{\omega_0 \sum_{i=1}^M C_{Ei}} \quad 2.22$$

$$\delta = X_{Cges} \cdot \frac{1}{R_{Par}} \quad 2.23$$

$$\delta = \frac{1}{\omega_0 \sum_{i=1}^M C_{Ei}} \cdot \left(4 \cdot \sum_{i=1}^M \frac{R_{Li}}{X_{Ci}^2} + \frac{R_p}{X_p^2} \right) \quad 2.24$$

In der Praxis wird in etwa von folgender Aufteilung der Verluste ausgegangen [46]:

- 50 % beruhen auf den ohmschen Verlusten der Petersenspule und des Transformators
- 50 % beruhen auf den ohmschen Verlusten der Leitung

2.3.6 Löschgrenze

Die aktuelle Normenlage (ÖVE-B1/1976) gibt die Löschgrenze (maximaler Erdschlussreststrom) für kompen-

sierte Netze in Abhängigkeit der Spannungsebene an. Die Löschgrenze ist dabei ein für alle Netzgrößen konstanter Faktor. Für erklärende Ausführungen zur aktuellen Löschgrenze siehe Kapitel 3.

2.3.7 Verstimmung

Die Verstimmung ist ein Maß für die Abweichung des Betrags des induktiven Löschstroms von dem Betrag des kapazitiven Erdschlussstroms. Man unterscheidet die Bereiche:

- *Überkompensiert* - der Löschspulenstrom I_L ist *größer* als der kapazitive Löschstrom I_C ($\nu > 0$)
- *Unterkompensiert* - der Löschspulenstrom I_L ist *kleiner* als der kapazitive Löschstrom I_C ($\nu < 0$)

Sie ist definiert als¹ [5]:

$$\nu = \frac{I_L - I_C}{I_C} = \frac{\frac{1}{\omega L_P} - \omega \sum C_E}{\omega \sum C_E} = \frac{1}{\omega^2 L_P \sum C_E} - 1 \quad 2.25$$

Der Betrieb von Hochspannungsnetzen erfolgt üblicherweise mit einer Verstimmung von 2 % bis 6 % (überkompensiert). Bei nichtverdrillten Freileitungsnetzen ist es notwendig, das Netz mit Verstimmung zu betreiben, da es ansonsten, im fehlerfreien Betrieb, zu einer unzulässig hohen Verlagerungsspannung kommen kann. Durch folgende Grenzfälle wird der Bereich der möglichen Verstimmung eingeschränkt [5]:

- Netz mit freiem Sternpunkt, $\nu = -1$ (unterkompensiert)
- Netz mit starrer (induktiver) Sternpunkterdung, $\nu = \infty$ (überkompensiert)

2.3.8 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannung, auch Sternpunktverlagerungsspannung genannt, stellt sich bereits im ungestörten Betrieb aufgrund von kapazitiver Unsymmetrien ein (siehe Gleichung 2.26). Bei 110-kV-Netzen entsteht die kapazitive Unsymmetrie aufgrund der Tatsache, dass bei dieser Spannungsebene kurze Leitungsabschnitte oftmals nicht verdrillt werden [3][6].

$$U_{NE} = \frac{U_B}{\sqrt{3}} \frac{k}{\sqrt{\nu^2 + \delta^2}} \quad 2.26$$

Der zeitlicher Verlauf der Verlagerungsspannung kann über die Summation der drei Leiter-Erde-Spannungen, gemäß Gleichung 2.27, ermittelt werden.

$$u_{NE}(t) = \frac{1}{3} (u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)) \quad 2.27$$

2.4 Abstimmung der Petersenspule - Betriebsbereich

Durch das kontinuierliche Verstellen der Petersenspule wird diese auf die Netzkapazität eingestellt. Die Verlagerungsspannung an der Löschspule nimmt ein Maximum bei $\nu = 0$ % an (insofern keine kapazitiven Beeinflus-

¹ Die hier dargestellte Form ist die heute übliche. Die traditionelle Form bildet die Differenz von $I_{CE} - I_L$.

sungen durch parallel geführte Leitungen vorliegen). Der zulässige Betriebsbereich des gelöschten Netzes wird dabei beschränkt von der Forderung einer maximal zulässigen Verlagerungsspannung sowie von der Löschgrenze I_G . In der Regel wird in der Praxis eine Überkompensation eingestellt. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass sich beim Abschalten von Leitungen der Abstimmungspunkt nicht in Richtung Resonanzpunkt ($\nu = 0\%$) bewegt, da durch die Abschaltung die Leiter-Erde-Kapazitäten C_E verringert werden. Es ist jedoch auch in diesem Fall zu bedenken, dass der zulässige Erdschlussreststrom nicht überschritten werden darf [13]. Die Abbildung 2.8 zeigt schematisch den zulässigen Betriebsbereich eines gelöschten Netzes.

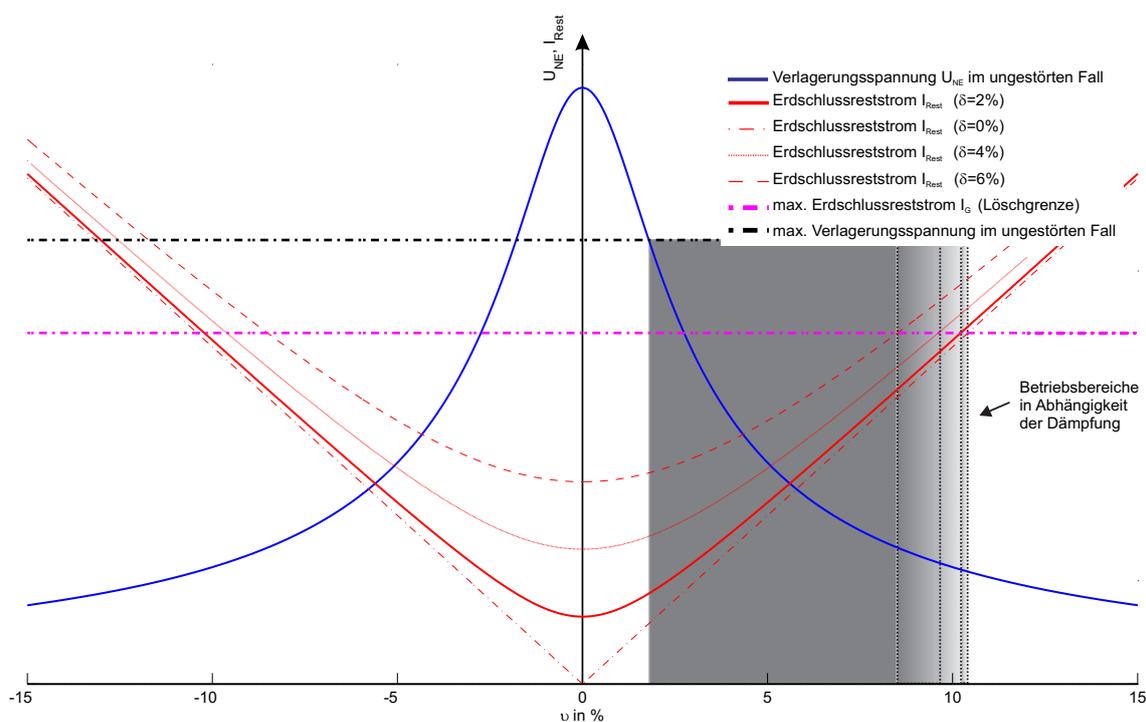


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Betriebsbereichs eines gelöschten Netzes

2.5 Symmetrische Komponenten

Die Einführung der symmetrischen Komponenten wird C.L. Fortescue, mit seiner 1918 veröffentlichten Arbeit, zugeschrieben. Die Methode der symmetrischen Komponenten gestattet es, ein Drehstromsystem mit seinen induktiven und kapazitiven Kopplungen zwischen den drei Leitern unter Einbeziehung des Erdreiches und geerdeter Leiter (Nulleiter, Erdseile...) in drei voneinander unabhängige einpolige Systeme, nämlich in das Mit-, Gegen- und Nullsystem, zu zerlegen. Jedes symmetrisch aufgebaute Drehstromnetz kann in Bezug auf die Phasenfolge von L1 (R), L2 (S), L3 (T) in ein mitläufiges (Mitsystem), gegenläufiges (Gegensystem) und gleichphasiges (Nullsystem) System transformiert werden.

2.5.1 Mathematische Grundlagen

Die folgenden Gleichungen stellen die mathematischen Zusammenhänge für die Symmetrierung (Symmetrierungsmatrix $\underline{\mathbf{S}}$) und die Entsymmetrierung (Entsymmetrierungsmatrix $\underline{\mathbf{T}}$) der Ströme und Spannungen zwischen dem Drehstromkomponenten (Drehstromsystem) und dem 120-Komponenten (symmetrisches Komponentensystem) dar [12]. Der Einfachheit halber wurde statt der heute üblichen Bezeichnung von L1, L2 und L3 die alten

Bezeichnungen R, S und T verwendet (dies erhöht die Lesbarkeit der Formel deutlich).

$$\underline{\mathbf{S}} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 \\ 1 & \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.28$$

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} & 1 \\ \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.29$$

$$\underline{\mathbf{I}}^{120} = \underline{\mathbf{S}} \underline{\mathbf{I}}_{\text{RST}} \quad \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}^1 \\ \underline{\mathbf{I}}^2 \\ \underline{\mathbf{I}}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 \\ 1 & \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{\text{R}} \\ \underline{\mathbf{I}}_{\text{S}} \\ \underline{\mathbf{I}}_{\text{T}} \end{bmatrix} \quad 2.30$$

$$\underline{\mathbf{I}}_{\text{RST}} = \underline{\mathbf{T}} \underline{\mathbf{I}}^{120} \quad \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{\text{R}} \\ \underline{\mathbf{I}}_{\text{S}} \\ \underline{\mathbf{I}}_{\text{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} & 1 \\ \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}^1 \\ \underline{\mathbf{I}}^2 \\ \underline{\mathbf{I}}^0 \end{bmatrix} \quad 2.31$$

$$\underline{\mathbf{U}}^{120} = \underline{\mathbf{S}} \underline{\mathbf{U}}_{\text{RST}} \quad \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}^1 \\ \underline{\mathbf{U}}^2 \\ \underline{\mathbf{U}}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 \\ 1 & \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{\text{R}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{\text{S}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{\text{T}} \end{bmatrix} \quad 2.32$$

$$\underline{\mathbf{U}}_{\text{RST}} = \underline{\mathbf{T}} \underline{\mathbf{U}}^{120} \quad \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{\text{R}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{\text{S}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{\text{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{\mathbf{a}}^2 & \underline{\mathbf{a}} & 1 \\ \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{a}}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}^1 \\ \underline{\mathbf{U}}^2 \\ \underline{\mathbf{U}}^0 \end{bmatrix} \quad 2.33$$

$$\underline{\mathbf{a}} = e^{j120^\circ} \quad 2.34$$

Die Beziehungen zwischen Spannungen und Strömen eines Drehstromsystems können durch Matrixgleichungen, z.B. mit Hilfe der Impedanzmatrix, angegeben werden. Die Impedanzmatrix $\underline{\mathbf{Z}}_{\text{RST}}$ beinhaltet die Eigenimpedanzen sowie die Koppelimpedanzen.

Die Abbildung 2.9 stellt ein differenzielles Teilstück einer Drehstromleitung dar. Die hohe Anzahl an Kopplungen der Leitungen untereinander verkompliziert diverse Lösungsverfahren bei der Berechnung von elektrischen Netzen. Aus diesem Grund verwendet man daher anstelle des RST-Komponentensystems das 120-Komponentensystem. In diesem Fall sind die Ströme und Spannungen der einzelnen Komponenten untereinander entkoppelt [13][14].

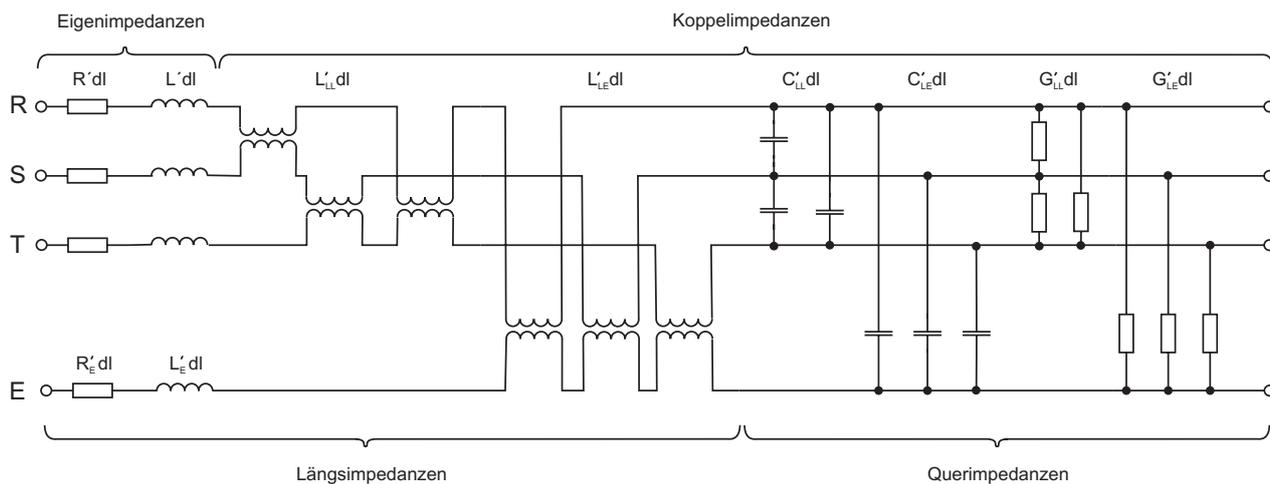


Abbildung 2.9: Differenzielles Teilstück einer homogenen Drehstromleitung in RST-Drehstromsystem [13]

Die Impedanzmatrix \underline{Z} wird verwendet für die vereinfachte Darstellung von Leitungen (als Längsimpedanzen). Lastelemente werden vorzugsweise als Admittanzmatrix \underline{Y} dargestellt (Längs- und Querimpedanzen) [15]. Die Gleichungen 2.35 bis 2.38 beschreiben die mathematischen Zusammenhänge der jeweiligen Matrizen.

$$\underline{U}_{RST} = \underline{Z}_{RST} \underline{I}_{RST} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RT} \\ \underline{Z}_{SR} & \underline{Z}_{SS} & \underline{Z}_{ST} \\ \underline{Z}_{TR} & \underline{Z}_{TS} & \underline{Z}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} \quad 2.35$$

$$\underline{I}_{RST} = \underline{Y}_{RST} \underline{U}_{RST} \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{RR} & \underline{Y}_{RS} & \underline{Y}_{RT} \\ \underline{Y}_{SR} & \underline{Y}_{SS} & \underline{Y}_{ST} \\ \underline{Y}_{TR} & \underline{Y}_{TS} & \underline{Y}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad 2.36$$

$$\underline{Y} = \underline{Z}^{-1} \quad 2.37$$

$$\underline{Z}_{120} = \underline{S} \underline{Z}_{RST} \underline{T} \quad \underline{Z}_{120} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{10} & \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{20} & \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad 2.38$$

Bei symmetrisch aufgebauten Drehstromnetzen sowie symmetrisch gespeisten Drehstromnetzen ergeben sich bei der 120-Komponenten Darstellung drei von einander unabhängige einphasige Ersatzschaltbilder. Die gegenseitigen Kopplungen wurden eliminiert und die Speisespannung tritt nur mehr im Mitsystem auf [12].

2.5.2 Null-, Mit- und Gegensystem

Die Abbildung 2.10 stellt die Ersatzschaltung eines symmetrischen Drehstromnetzes mit einem Transformator, einer Last, einer Petersenspule sowie einer Leitung im Betriebszustand (schwarz - drei entkoppelte Systeme) sowie während des Fehlerfalles (zusätzlich rote Verbindung - gekoppelte Systeme) dar.

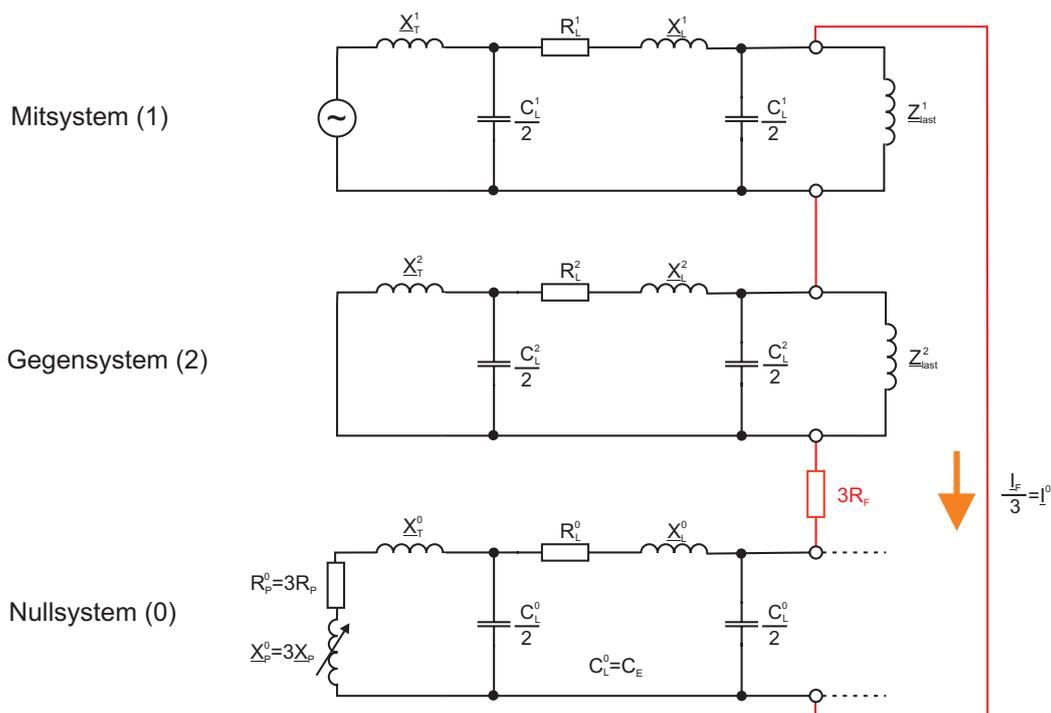


Abbildung 2.10: Null-, Mit- und Gegensystem eines einfachen Drehstromnetzes im Betriebs- und Fehlerfall

2.6 Fourier-Transformation

Die Diskrete-Fourier-Transformation (DFT) wird in dieser Arbeit für die Bestimmung der Dämpfung, der Verstärkung und für die Detektion des Erdschlusses verwendet.

2.6.1 Zeitdiskrete Fourier-Transformation

Die kontinuierliche Fourier-Transformation (FT) und deren Rücktransformation sind durch folgende Gleichungen definiert:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \tag{2.39}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \tag{2.40}$$

Die Gleichung 2.40 stellt dabei die inverse FT dar. Um zu der zeitdiskreten FT zu gelangen, ist das kontinuierliche Signal $f(t)$ durch ein abgetastetes Signal $f(nT_a)$ zu ersetzen. Des Weiteren ist das Integral durch eine Summe auszutauschen, worauf man folgende Gleichung für die zeitdiskrete Fourier-Transformation (TDFT) erhält:

$$F_d(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT_a) \cdot e^{-j\omega nT_a} \tag{2.41}$$

Damit das Eingangssignal zu jener Klasse von Signalen gehört, für welche eine Fourier-Transformierte existiert, muss die Folge $f(nT_a)$ eines der folgenden Kriterien erfüllen [22]:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |f(nT_a)| < \infty \quad 2.42$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |f(nT_a)|^2 < \infty \quad 2.43$$

Die gleichmäßige Konvergenz der Fourier-Transformierten einer Folge fordert, dass die Summe von $f(nT_a)$ absolut summierbar (Gleichung 2.42) ist und die Konvergenz im quadratischen Mittel (das schwächere Kriterium nach Gleichung 2.43) erfordert, dass die Folge $f(nT_a)$ quadratischen summierbar ist [22].

Die Unterschiede zwischen der Spektralfunktion der FT eines kontinuierlichen und eines diskreten Signals sind [24]:

- Die Fouriertransformierte eines diskreten Signals wiederholt sich periodisch mit der Abtastfrequenz
- Erst nach der Multiplikation der Fouriertransformierten eines diskreten Signals mit dem Abtastintervall T_a sind Größe und Einheit gleich der Fouriertransformierten eines kontinuierlichen Signals.

2.6.2 Diskrete Fourier-Transformation

Bei dem Übergang von der TDFT zur DFT ändert sich Gleichung 2.39 wie folgt [24]:

$$F_d(jk\Delta\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) \cdot e^{-jk\Delta\omega nT_a} \quad 2.44$$

Anstelle eines kontinuierlichen Spektrums erhält man nun ein diskretes Spektrum. Dieses diskrete Spektrum stellt die Abtastung des kontinuierlichen Spektrums der TDFT zu den diskreten Frequenzpunkten $k\Delta\omega$ dar. Die Trennschärfe (der Abstand zwischen zwei Frequenzwerten) verhält sich umgekehrt proportional zur Messzeit und ist wie folgt definiert [24]:

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot T_a} \quad 2.45$$

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N \cdot T_a} \quad 2.46$$

Die DFT nach Gleichung 2.44 besitzt gegenüber der FT dieselben Unterschiede wie die TDFT. Die kompaktere Schreibweise der DFT für ein zeitbegrenzt Signal ist durch folgende Gleichung gegeben [22]:

$$c_{[k]} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad 2.47$$

2.6.3 Fourier-Transformation periodischer Signale

Periodische Folgen genügen keiner der beiden Forderung nach Gleichung 2.42 und 2.43, da sie nicht absolut summierbar sind, wenn n gegen $\pm\infty$ strebt. Aus diesem Grund wird für die Berechnung der FT eines periodischen Signales die mathematische Möglichkeit der Multiplikation der Eingangsfolge $x_{[n]}$ mit einer bestimmten Fenster-

funktion $W_{[n]}$ ausgenutzt. Die Fensterfunktionen $W_{[n]}$ müssen dabei das Kriterium erfüllen, dass nach der Multiplikation mit der ursprünglichen Eingangsfolge $x_{[n]}$ die so neu entstandene Funktion konvergiert. Es gibt folgende Kriterien bei der Beurteilung der diversen Fenster [24]:

- Verhältnis aus der Amplitude des höchsten Nebenmaximums zu der Amplitude des Hauptmaximums der DFT

Das Maximum der DFT eines Fensters $W_{[n]}$ tritt bei $\omega = 0$ auf. Die Amplituden der Nebenmaxima sind geringer. Das Verhältnis a wird für den Vergleich unterschiedlicher Fensterfunktionen verwendet [24].

$$a = \frac{\text{Amplitude des höchsten Nebenmaximums}}{\text{Amplitude des Hauptmaximums}} \quad 2.48$$

- Maximaler Abtastfehler

Das Verhältnis b gibt an, um wieviel eine Amplitude höchstens falsch gemessen werden kann und wird als maximaler Abtastfehler bezeichnet [24].

$$b = \frac{\text{Amplitude der Fenster - FT bei } f = \frac{1}{2} \Delta f}{\text{Amplitude der Fenster - FT bei } f = 0} \quad 2.49$$

$$\Delta f = \frac{f_A}{N} \quad 2.50$$

- Breite des Hauptmaximums

Fensterfunktionen mit einem breiten Hauptmaximum haben den Vorteil, dass die Nebenmaxima besonders stark gedämpft sind. Leider besitzen sie jedoch den Nachteil, dass sich das Spektrum da durch verbreitert. Zur Charakterisierung dient die 3 dB Grenzfrequenz. Dies ist jene Frequenz, bei der die Amplitude des Hauptmaximums auf 3 dB abgefallen ist [24].

$$\frac{\text{Amplitude bei } f_0 = 0}{\text{Amplitude bei } f_{3\text{dB}}} = 3 \text{ dB} \quad 2.51$$

Die folgende Tabelle beinhaltet die Kennwerte ausgewählter Fenster [24]:

Tabelle 2.1: Kennwerte von Fensterfunktionen $W_{[n]}$

Fenstertyp	Amplitudenverhältnisse Faktor a	Maximaler Abtastfehler Faktor b	Breite des Hauptmaximums
Rechteck	-13 dB = 0,224	0,64	0,45 Δf
Dreieck	-27 dB = 0,045	0,81	0,64 Δf
Von Hann	-32 dB = 0,025	0,85	0,72 Δf
Hamming	-43 dB = 0,007	0,82	0,65 Δf
Blackman	-58 dB = 0,001	0,88	0,84 Δf

Die Eigenschaften der jeweiligen Fensters sind detailliert beschrieben in [22][24][25].

Durch die Anwendung der Fensterfunktionen $W_{[n]}$ kommt es zu den folgenden zwei primären Auswirkungen auf das Spektrum [22]:

- Reduzierung der Auflösung
Die Auflösung wird vor allem durch die Breite des Hauptmaximums des Fensterspektrums $W(e^{j\omega})$ beeinflusst [22].
- Leakage-Effekt
Die Komponente einer Frequenz wirkt aufgrund der spektralen Verbreiterung, die durch das Anwenden der Fensterfolge $W_{[n]}$ eingebracht wird, auf die Umgebung der anderen Komponenten ein. Der Grad des Leakage-Effekts hängt von den Amplitudenverhältnissen des Hauptmaximums zu den Nebenmaxima des Spektrums der Fensterfunktion $W(e^{j\omega})$ ab [22].

2.6.4 Fensterung von transienten Vorgängen

Da der Ausschwingvorgang ein zeitlich abklingender Vorgang ist, kann nur das Rechteckfenster für die Fensterung verwendet werden, da die anderen Fenster den zeitlichen Verlauf und damit auch das Spektrum verfälschen [24].

2.6.5 Zero padding

Bei der TDFT werden unendlich viele Zeitwerte transformiert, während bei der DFT nur N Zeitwerte transformiert werden. Aufgrund dessen ist das Spektrum der DFT, wie oben ausgeführt, auch ein diskretes. Um nun die Auflösung zu erhöhen, bzw. wieder einen Übergang zu der TDFT zu bekommen, verwendet man Zero Padding (Anhängen von Nullen). Durch Zero Padding wird eine Interpolation zwischen den diskreten Frequenzwerten ermöglicht. Wenn die Anzahl der angefügten Nullen gegen $\pm\infty$ strebt so erhält man wieder das kontinuierliche Spektrum der TDFT [24][22].

Die Geschichte kennt kein letztes Wort.

Willy Brandt (†1992)

Ziel dieses Abschnittes ist es, die unterschiedlichen Betrachtungen der diversen Autoren des letzten Jahrhunderts in einen theoretischen Ansatz überzuführen der die teilweise inkongruenten Ergebnisse berücksichtigt und vereinheitlicht.

3.1 Löschgrenze 20 kV - Ein geschichtlicher Abriss

Bezüglich der Löschfähigkeit von kompensierten Netzen gibt es bereits mehrere Untersuchungen mit teils widersprüchlichen Ergebnissen. Der folgende Abschnitt geht auf die einzelnen maßgebenden Untersuchungen, die bis in das Jahr 1931 zurückreichen, chronologisch ein.

3.1.1 Erste Untersuchungen von 1931 - 1962

Gerhart Meyer hat als Erster eine Untersuchung der Löschfähigkeit von kompensierten Netzen im Jahr 1931 durchgeführt [27]. Er untersuchte die Brenndauer von Lichtbögen im gelöschten Netz in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und der Betriebsspannung. Aufgrund der Resultate von 27 Versuchen, bei teils unterschiedlicher Nennspannung, kam er zu dem Schluss, dass die Brenndauer der Erdschluss-Lichtbögen von einem Kleinstwert von etwa 0,2 s mit dem Quadrat des Erdschlussreststroms wächst. Einen Einfluss der Betriebsspannung auf die Brenndauer konnte er nicht nachweisen. Ebenso gelang es ihm nicht, die Brenndauer der Erdschlusslichtbögen in Abhängigkeit der Verstimmung sinnvoll anzuordnen. Die von ihm ermittelte Löschgrenze legte er mit 30 bis 40 A, unabhängig von der Netzspannung, fest [43]. In der Abbildung 3.1 ist die von ihm ermittelte Brenndauer von Erdschlusslichtbögen in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms dargestellt [27].

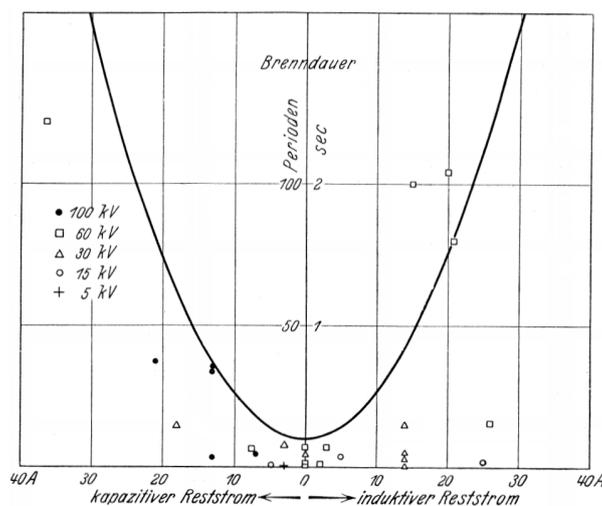


Abbildung 3.1: Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms von G. Meyer [27]

Die Brenndauer definierte Gerhart Meyer als jene Zeit, in der ein Strom über die Fehlerstelle fließt. Er kam auch

zu der Ansicht, dass das Löschverhalten unabhängig von der Art des Reststroms (induktiv oder kapazitiv) ist [27].

Beim erstmaligen Entwurf der heutig gültigen DIN VDE 0228 Teil 2 im Jahr 1987 wurde für 20-kV-Mittelspannungsnetze vom damaligen Gremium eine Löschgrenze von 35 A vorgeschlagen [30]. Dieser Wert basierte auf der Veröffentlichung von Hermann Roser aus dem Jahr 1948 [28], in welcher die Löschgrenze ausgehend von Hoch- und Höchststpannung für Mittel- und Niederspannung extrapoliert wurde [30] [43]. Die Abbildung 3.2 stellt die Löschgrenze von H. Roser dar (aus der Veröffentlichung von Walter v. Mangoldt [29]). Inwieweit H. Roser durch seine Grafik die Löschgrenze für Mittelspannungsnetze darzustellen versuchte, ist unklar, da er sich in seinem Artikel ausschließlich mit der Höchstspannung von 400-kV beschäftigt. Auch W. v. Mangoldt, der die Löschgrenze von H. Roser übernimmt, bezieht sich in seinem Artikel [29] nicht auf die Mittelspannungsebene.

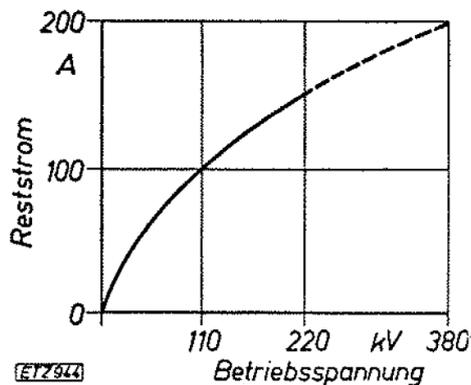


Abbildung 3.2: Löschgrenze nach H. Roser bzw. W. v. Mangoldt [29]

Im Jahr 1950 veröffentlichte O. Mayr seinen Aufsatz zu dem Thema „Die wiederkehrende Spannung nach einphasigen Erdschlüssen in Leitungsnetzen“, in dem er ausführt, dass für eine Löschung des Lichtbogens die Steilheit der wiederkehrenden Spannung ebenso entscheidend ist, wie die Größe des Erdschlussreststroms [34]. Er bestimmte die Hüllkurve bzw. die Steilheit der Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung mit folgenden Gleichungen (Gültigkeitsbereich nur für $v \ll 1$):

$$U_h = \frac{U_N \sqrt{2}}{\underbrace{\sqrt{3}}_{\hat{U}_{ph}}} \frac{\omega t}{2} \sqrt{v^2 + \delta^2} \tag{3.1}$$

$$\frac{dU_h}{dt} = \hat{U}_{ph} \frac{\omega}{2} \sqrt{v^2 + \delta^2} \tag{3.2}$$

Er konnte jedoch keinen Grenzwert für die maximal zulässige Steilheit der wiederkehrenden Spannung hinsichtlich der Wiederezündung eines Lichtbogens angeben. Überdies wurde der Einfluss der Steilheit der wiederkehrenden Spannung beim Entwurf der Normen DIN VDE 0228 Teil 2 bzw. ÖVE-B1/1976 nicht berücksichtigt.

3.1.2 Grundlagen der aktuellen Norm aus dem Jahr 1963

Max Erich und Hans Heinze veröffentlichten 1963 ihre Untersuchungen zur Löschfähigkeit von Mittelspannungsnetzen [30]. Sie führten an, dass aufgrund der Betriebserfahrung die Löschgrenze von H. Roser als zu gering anzusehen ist, und dass die Extrapolation der Löschgrenze von H. Roser auf die Mittelspannungsebene zu

falschen Schlussfolgerungen führte. Um konkrete Angaben machen zu können, führten sie 600 Erdschlussversuche in einem Freileitungsnetz mit etwa 20 % Kabelanteil durch. Des Weiteren betragen die Stromkreislänge etwa 600 km und der kapazitive Erdschlussstrom ca. 200 A. Sie führten auch aus, dass keiner der 600 gezündeten Erdschlüsse zu einem Doppelerdschluss führte [30].

Anmerkung: Damit widersprechen sie indirekt auch Friedrich Geise, da dieser in seiner Veröffentlichung [31] davon ausgeht, dass für ein zufriedenstellendes Betriebsverhalten der kapazitive Erdschlussstrom bei einem Mittelspannungsnetz mit 20 kV nicht über 100 – 150 A hinausgehen sollte. Zufriedenstellende, bzw. erträgliche Verhältnisse liegen laut F. Geise vor, wenn die Anzahl von Doppel- zu Einfacherdschlüssen bei einem Faktor von 1/10 liegt. Da M. Erich und H. Heinze jedoch einen kapazitiven Erdschlussstrom von 200 A hatten, hätte laut F. Geise, als logische Konsequenz seiner Veröffentlichung, der Betriebszustand nicht zufriedenstellend sein dürfen. Das Verhältnis von Doppel- zu Einfacherdschlüssen hätte größer 1/10 sein müssen. Entsprechend der Veröffentlichung von E. Erich und H. Heinze lag dieses Verhältnis aber bei unter 1/600.

Um die Abhängigkeit der Lichtbogenlöschzeit vom Erdschlussreststrom zu erhalten, wurde in den jeweiligen Netzen, in denen die Versuche durchgeführt wurden, entweder die Induktivität der Petersenspule geändert oder ein ohmscher Widerstand parallel zur Petersenspule geschaltet. Aufgrund dessen geben M. Erich und H. Heinze an, dass sich als Folge des ohmschen Widerstands das Dämpfungsverhältnis des betrachteten Netzes zu Ungunsten der Löschung ändert, da durch eine höhere Dämpfung ein schnellerer Aufbau der Spannung der fehlerbehafteten Phase erfolgt und somit die Gefahr von intermittierenden Erdschlüssen steigt [30]. Die Abbildung 3.3 stellt die Auswertung der Versuchsreihen von M. Erich und H. Heinze für verschiedene Isolatortypen und in Abhängigkeit des Erdschlussreststromes dar.

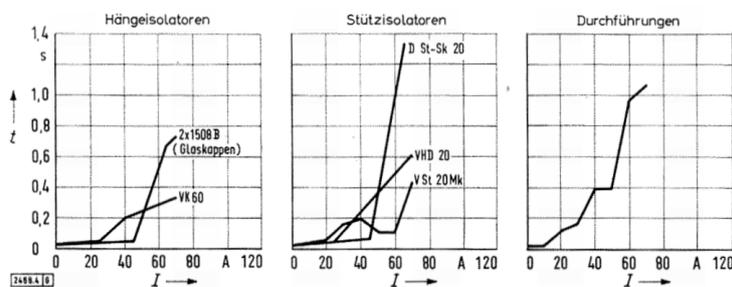


Bild 4 Mittlere Löszeit t verschiedener Isolatortypen für 20 kV in Abhängigkeit vom induktiven oder kapazitiven Lichtbogenstrom I .

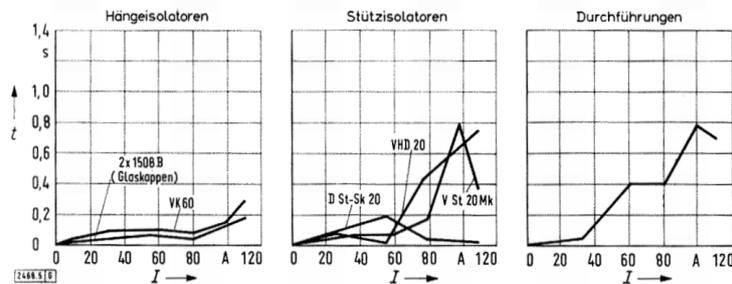


Bild 5. Mittlere Löszeit t verschiedener Isolatortypen für 20 kV in Abhängigkeit vom ohmschen Lichtbogenstrom I .

Abbildung 3.3: Mittlere Löszeit laut M. Erich und H. Heinze für unterschiedliche Isolatoren in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms [30]

M. Erich und H. Heinze kommen zu dem Schluss, dass als Grenzwert für eine einwandfreie Löschung 60 A bei induktiven oder kapazitiven Erdschlussrestströmen sowie 100 A bei ohmschen Erdschlussrestströmen angenommen werden kann. Entsprechend ihrem letzten Satz in dieser Veröffentlichung wird in der VDE 0228 eine Löschgrenze bei 20-kV-Mittelspannungsnetzen von 60 A festgelegt. Darüber hinaus führen sie aus, dass selbst für einen um 20 % höheren Strombereich die Wahrscheinlichkeit für eine Löschung innerhalb von 1 sec. bei 95 % liegt. Allerdings stellen M. Erich und H. Heinze keinen Bezug der Löschgrenze zu dem kapazitiven Erdschlussstrom eines Netzes her [43].

3.1.3 Weiterführende Untersuchungen von 1964 bis heute

Im Jahr 1981 wurde der Technische Bericht der FGH von K. H. Koch veröffentlicht, in dem der Einfluss von Oberschwingungen auf die Lichtbogenbrenndauer diskutiert wird. In Anlehnung an die Versuche von M. Erich und H. Heinze wählte K. H. Koch ebenfalls ein kompensiertes Netz mit einer Nennspannung von 20 kV aus. Jedoch betrug der kapazitive Erdschlussstrom 605 A bzw. 1152 A. K. H. Koch kommt zu dem Schluss, dass die Löschgrenze vom Kompensationsgrad abhängig ist und dass gerade in großen Netzen, in denen höhere Restströme auftreten können, günstige Bedingungen für das Erlöschen vorliegen. Außerdem führt er an, dass in gut kompensierten Netzen die Löschgrenze deutlich über 60 A liegt [32][43].

Josef Poll veröffentlichte 1984 in seinem Aufsatz „Löschung von Erdschlusslichtbögen“, basierend auf den Gleichungen von O. Mayr, folgende Ergänzung bzw. Korrektur dessen Gleichung für größere Verstimmungsgrade:

$$\frac{dU_h}{dt} = \hat{U}_{Ph} \frac{\omega}{2} \sqrt{(2\sqrt{1+\nu} - 2)^2 + \delta^2} \tag{3.3}$$

Außerdem kommt J. Poll zu dem Schluss, dass für viele vermascht betriebene Mittelspannungsnetze mit einem kapazitiven Erdschlussstrom größer als 200 A die in der VDE 0228-2:1987 festgelegte Grenze für den Erdschlussreststrom zu gering ist. Des Weiteren rechtfertigt er den Grenzwert der VDE 0228-2:1987 für 20-kV-Mittelspannungsnetze für Strahlennetze da in seiner Ausführung der Längsspannungsabfall eine Begrenzung des Erdschlussreststroms notwendig macht [35]. Ein möglicher Grenzwert für die Steilheit der wiederkehrenden Spannung in Abhängigkeit der Netzgröße wird in Abschnitt 3.4.2 hergeleitet.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass im Jahr 2010 der Entwurf der DIN VDE 0845-6-2 veröffentlicht wurde, in dem erwähnt wird, dass in vermaschten 110-kV-Netzen auch Erdschlussrestströme von 200 A zulässig sind [36]: „In vermaschten 110-kV-Netzen hat die Erfahrung gezeigt, dass auch Erdschlussrestströme bis 200 A zugelassen werden können“ [36].

In der Abbildung 3.4 ist die Chronologie der maßgeblichen Veröffentlichungen zum Thema Erdschlusslöschung dargestellt.

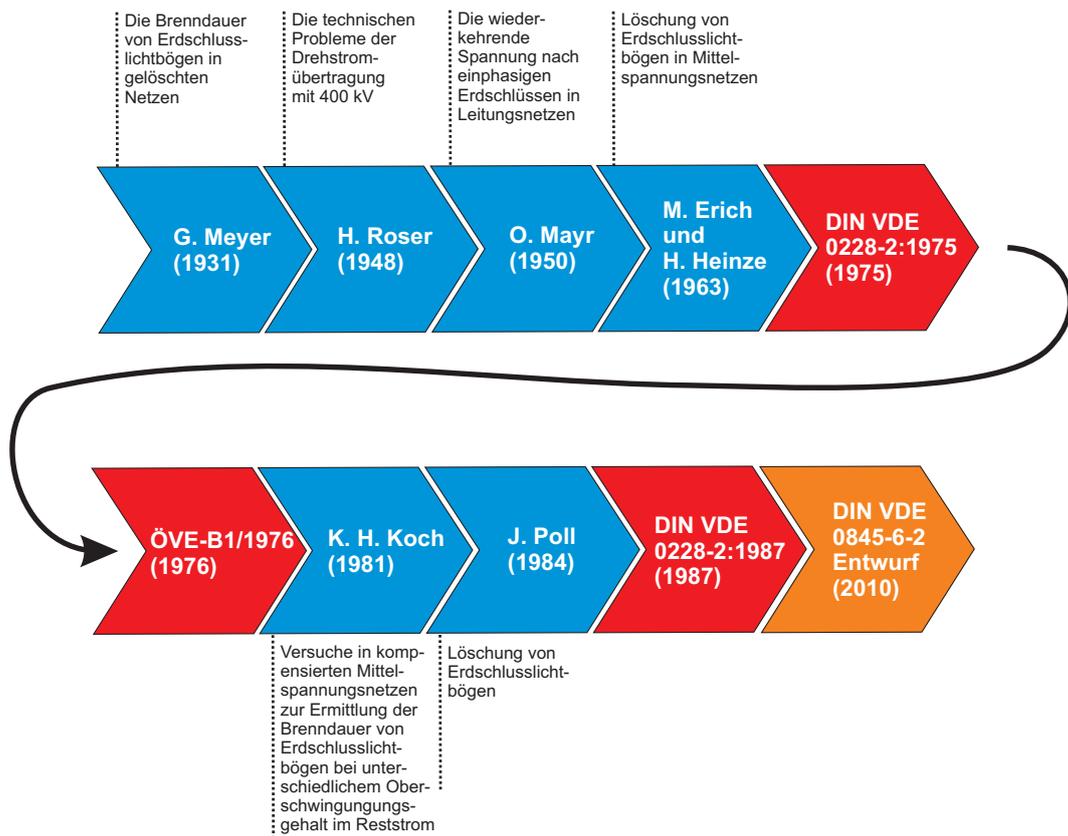


Abbildung 3.4: Chronologische Darstellung der wesentlichen Veröffentlichungen zu dem Thema Erdschlusslöschung in kompensierten Netzen [43]

3.2 Die aktuelle Normenlage

In dem folgendem Abschnitt wird die aktuelle Normenlage und deren Auswirkung auf das Abstimmungsverhalten von kompensierten Netzen beschrieben.

Die aktuelle Normenlage der ÖVE-B1/1976 schreibt folgende Grenzwerte für den Erdschlussreststrom bzw. für den kapazitiven Erdschlussstrom, in Abhängigkeit der Nennspannung, vor [7]:

Tabelle 3.1: Löschgrenze von Starkstromnetzen [7]

Nennspannung des Netzes [kV]		3...20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom in 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.

Anmerkung: Diese Festlegung schließt nicht aus, dass in Einzelfällen höhere Werte zugelassen werden können, wenn die Löschfähigkeit des Netzes nachgewiesen wird [7].

Da ausschließlich kompensierte Netze betrachtet werden, wird aus der Tabelle 3.1 nur die Tabelle a für die weitere Betrachtung herangezogen.

In der DIN VDE 0228-2:1987 finden sich die in der Abbildung 3.5 dargestellten Grenzwerte für den Erdschlussreststrom bzw. den Erdschlussstrom wieder. Wiederum kommen nur die Grenzwerte für kompensierte Netze in Frage. Die beiden hier angeführten Löschgrenzen sind unabhängig vom kapazitiven Erdschlussstrom, d.h. von der Größe des kompensierten Netzes.

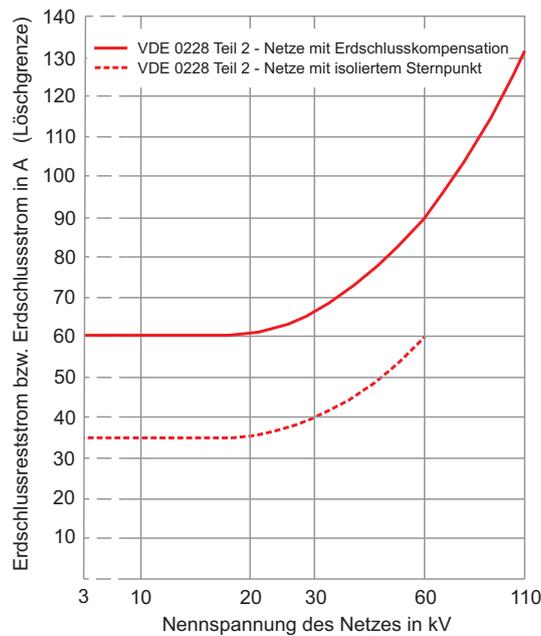


Abbildung 3.5: Löschgrenze nach DIN VDE 0228-2:1987 [11]

Die österreichische ÖVE-B1/1976 bezieht sich, im Gegensatz zur deutschen DIN VDE 0228-2:1987, ausschließlich auf die Grundwelle des Erdschlussreststroms. Diese Einschränkung der ÖVE-B1/1976 hat weitreichende folgen für die Dimensionierung von kompensierten Netzen.

3.2.1 Auswirkung der Löschgrenze für 20-kV-Mittelspannungsnetze

Basierend auf der Löschgrenze für eine Nennspannung von 20 kV ergeben sich die theoretischen Einstellmöglichkeiten einer Petersenspule nach Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7. In der Abbildung 3.6 ist der Zusammenhang zwischen Verstimmung v in % und der Dämpfung δ in % bei fortschreitender Netz- (I_{CE} -) Größe, bei einem maximal zulässigen Erdschlussreststrom von 60 A für eine Nennspannung von 20 kV, dargestellt. Die folgende Gleichung liegt den Grafiken zugrunde:

$$I_{Rest} = I_{CE} \cdot \sqrt{v^2 + \delta^2} \tag{3.4}$$

Man erkennt, dass mit zunehmender Netzgröße der erlaubte Bereich der Verstimmung, um die Löschgrenze noch einzuhalten, sehr gering wird. Es ist ersichtlich, dass z.B. bei einem I_{CE} von 200 A ein Verstimmungsgrad von $\pm 29.8\%$ (bei einer Dämpfung von 3%) zulässig wäre, um die Löschgrenze einzuhalten. Bei einem Netz mit einem kapazitiven Erdschlussstrom von 1200 A und einer Dämpfung von 3% darf die Verstimmung maximal $\pm 4\%$ betragen (siehe Gleichung 3.5), um die Löschgrenze einzuhalten (Pfeil). Oberschwingungen sind in der Dar-

stellung nicht berücksichtigt [43].

$$60 = 1200 \cdot \sqrt{0,04^2 + 0,03^2}$$

3.5

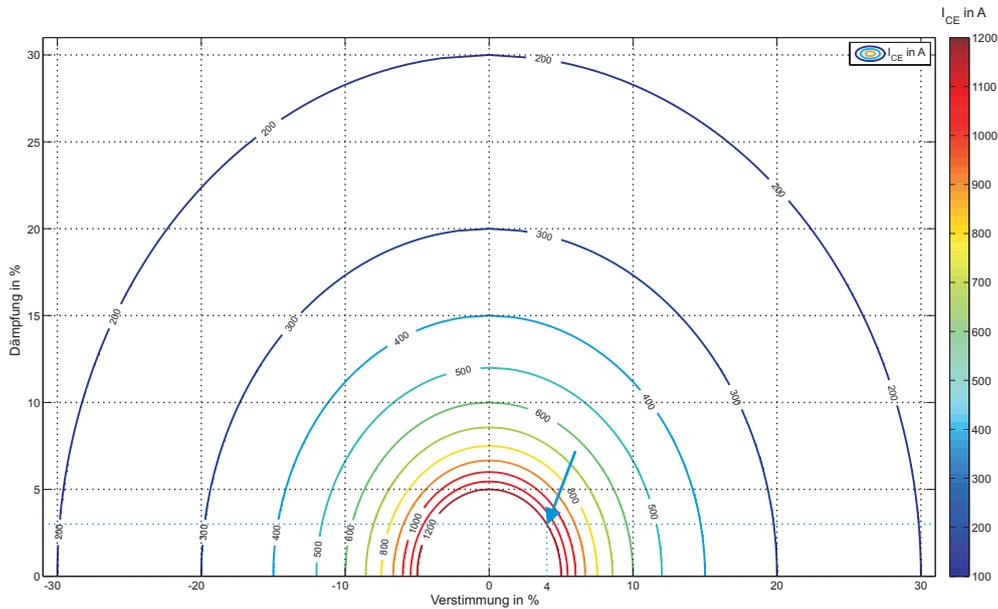


Abbildung 3.6: Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes [43]

Die Abbildung 3.7 stellt den 3-dimensionalen Zusammenhang zwischen der Verstimmung v in % und der Dämpfung δ in % sowie der Netz- (I_{CE} -) Größe, bei einem maximal zulässigen Erdschlussreststrom von 60 A für eine Nennspannung von 20 kV, dar (der Pfeil stellt denselben Punkt wie im vorhergehenden Diagramm dar) [43].

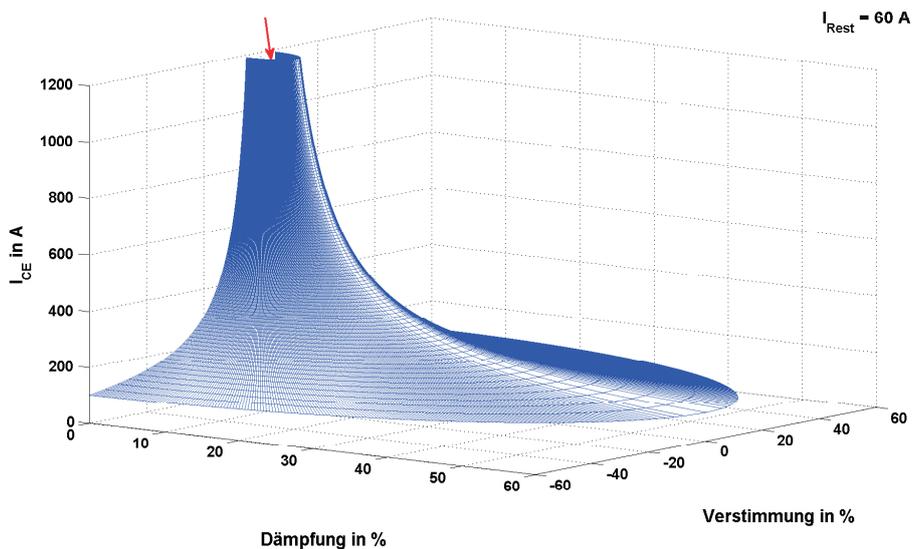


Abbildung 3.7: 3-dimensionale Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes [43]

Aufgrund der 3-dimensionalen Darstellung des Verstimmungsbereichs ist gut ersichtlich, dass speziell für größer werdende gelöschte Netze eine exakte Regelung (Nachstellung) der Löschspule notwendig ist, um innerhalb der

vorgeschriebenen Grenzen der aktuell gültigen Norm zu bleiben.

3.2.2 Auswirkung der Löschgrenze für 110-kV-Hochspannungsnetze

Der Vollständigkeit halber ist auch die Auswirkung der Löschgrenze für die kompensierten 110-kV-Netze angegeben. Man erkennt in der Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9, dass sich aufgrund des höheren maximalen Erdschlussreststroms eine größere maximal zulässige Verstimmung bei gleicher Netzgröße, verglichen mit der Netzgröße bei 20 kV, ergibt. So sind bei einem I_{CE} von 200 A und einer Dämpfung von 3 % eine maximale Verstimmung von ± 65.9 % erlaubt und bei einem I_{CE} von 1600 A ist eine maximale Verstimmung von ± 7.6 % gestattet. Oberschwingungen sind in der Darstellung wiederum nicht berücksichtigt.

In der Abbildung 3.8 ist der Zusammenhang zwischen Verstimmung v in % und der Dämpfung δ in % bei fortschreitender Netz- (I_{CE} -) Größe, bei einem maximal zulässigen Erdschlussreststrom von 132 A für eine Nennspannung von 110 kV, dargestellt.

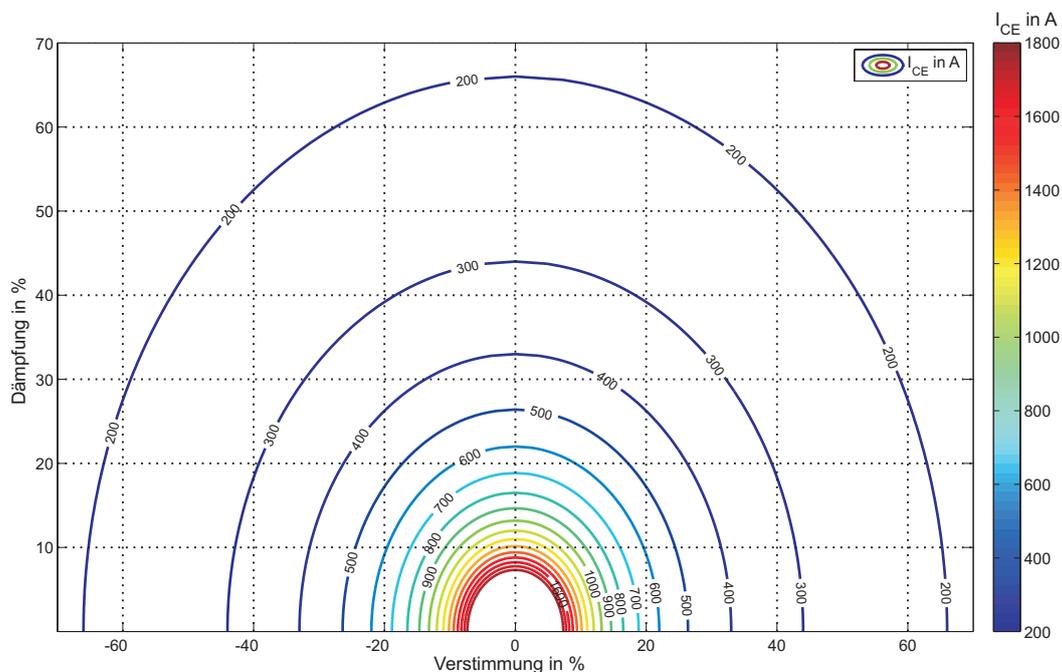


Abbildung 3.8: Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 110-kV-Netzes

Die Abbildung 3.9 stellt den 3-dimensionalen Zusammenhang zwischen der Verstimmung v in % und der Dämpfung δ in % sowie der Netz- (I_{CE} -) Größe, bei einem maximal zulässigen Erdschlussreststrom von 132 A für eine Nennspannung von 110 kV, dar.

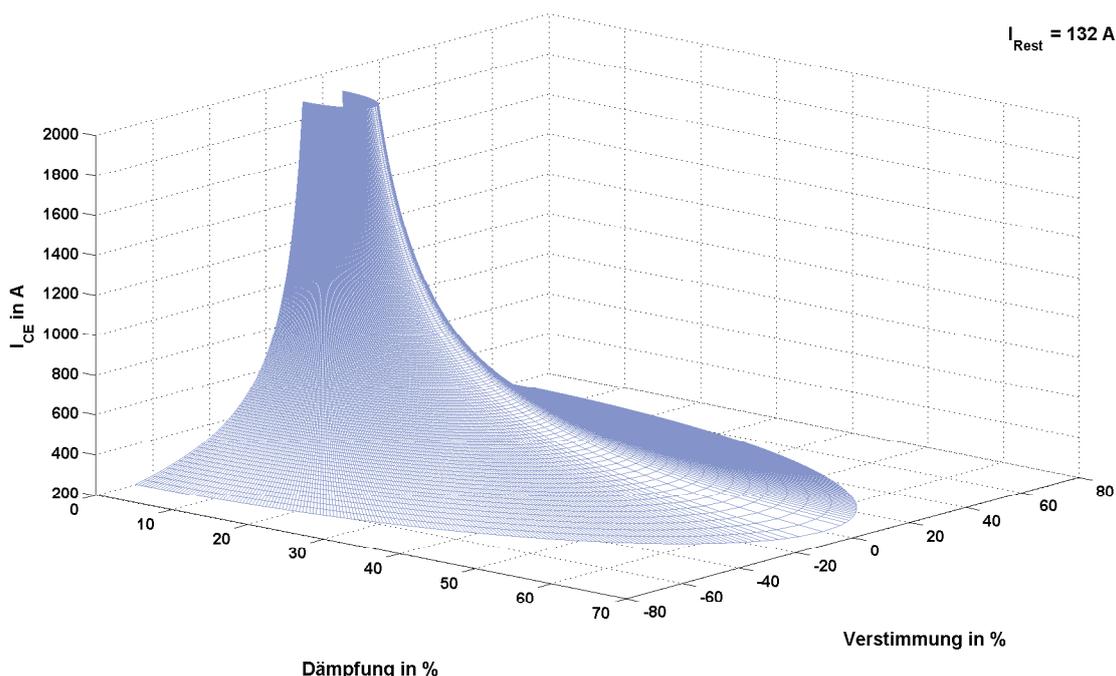


Abbildung 3.9: 3-dimensionale Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs einer Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 110-kV-Netzes

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich aufgrund des Grenzwertes des Erdschlussreststroms, welcher unabhängig von der Netzgröße ist, mit zunehmendem kapazitiven Erdschlussstrom eine Verkleinerung des „erlaubten“ Einstellbereichs für die Löschspule ergibt. Das hat zur Folge, dass mit steigender Netzgröße die Abstimmung immer exakter werden muss, um noch innerhalb der normativen Grenzen zu liegen. Eine Berücksichtigung des Oberschwingungsanteils führt zu einer weiteren Verkleinerung des „erlaubten“ Einstellbereichs der Verstimmung.

3.3 Der Einfluss von Oberschwingungen und Fehlerort auf den Erdschlussreststrom

Der Einfluss von Oberschwingungen wurde erstmals von K. H. Koch in [32] untersucht. Er führt aus, dass bei geringen Fehlkompensationen (bis $v = 5\%$) weder bei Erdschlussfehlern am Leitungsanfang noch bei Erdschlussfehlern am Leitungsende eine Änderung der Lichtbogenbrenndauer bei Änderung des Oberschwingungsgehalts festgestellt werden konnte. Des Weiteren gibt er an, dass bei einer Fehlkompensation von rd. 20% und einem Erdschlussfehler am Leitungsanfang die mittlere Lichtbogenbrenndauer sich nur unwesentlich bei einer Änderung des Oberschwingungsgehalts ändert. Hingegen konnte er bei Erdschlussfehlern am Leitungsende eine Veränderung der Lichtbogenbrenndauer bei sich ändernden Oberschwingungsverhältnissen feststellen. Ob zwischen der Lichtbogenbrenndauer und den Oberschwingungsverhältnissen allerdings wirklich ein kausaler Zusammenhang besteht, oder ob andere nicht erfasste Parameter einen Einfluss hatten, ließ er dezidiert offen [32]. Des Weiteren sei erwähnt, dass K. H. Koch zur Änderung der Oberschwingungsverhältnisse die Tatsache ausnutzte, dass zur Abendzeit ein 4 bis 5 mal so hoher Anteil der 5. Oberschwingung aufgrund der Fernsehgeräte in seinem Versuchsnetz auftrat [32].

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema hat S. Höpfner in [37][38] diskutiert. Er kommt in [37] zu dem Schluss, dass - solange der Effektivwert der Harmonischen unter einem bestimmten (noch nicht definierten) Pegel ist -, die Harmonischen zum schnelleren Verlöschen des Erdschlusses beitragen können. Allerdings führt er in [38] an, dass schnell der durch die Harmonischen erzeugte höhere Effektivwert des Fehlerstroms überwiegt, was eine Verlängerung der Brenndauer zufolge hat. Überdies kommt er in seinen Simulationen zu dem Schluss, dass die Entfernung des Fehlerorts von der Löschsule einen deutlichen Einfluss auf das Löschverhalten hat [38].

Auf den Ergebnissen von C. Obkircher in [3] baut der nachfolgende Absatz auf.

3.3.1 Ausführungen für den Einfluss der Oberschwingungen und des Fehlerorts auf den Erdschlussreststrom

Die Petersenspule im Sternpunkt des Transformators ist abgestimmt auf die 50-Hz Komponente des kapazitiven Erdschlussstroms. Höherfrequente Anteile des Erdschlussstroms werden nicht kompensiert. Das liegt an dem gegenteiligen Verhalten der Reaktanz der Petersenspule verglichen mit der Reaktanz der Leiter-Erde-Kapazität des Netzes. Die Abbildung 3.10 stellt vereinfacht das Mit-, Gegen- und Nullsystem im Erdschlussfall dar.

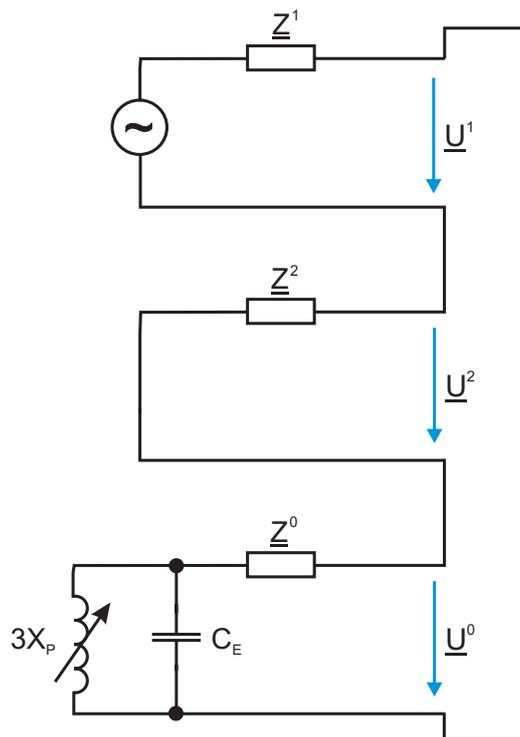


Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung von Mit-, Gegen- und Nullsystem

Die folgenden Gleichungen werden für die 50-Hz Betrachtung aufgestellt:

$$\underline{Z}^0 = (3 \cdot k_0 + 1) \cdot \underline{Z}^1 \tag{3.6}$$

$$k_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{Z}^0}{\underline{Z}^1} - 1 \right) \tag{3.7}$$

Entsprechend der Messergebnisse [46] wird $k_0 = 1$ angenommen. Damit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\underline{Z}^0 = 4 \cdot \underline{Z}^1 \quad 3.8$$

Basierend auf Abbildung 3.10 ergeben sich somit folgende weitere Gleichungen (wobei der ohmschen Anteil der Petersenspule vernachlässigt wird):

$$I_L = 3 \cdot \frac{U^0}{X_P} \quad 3.9$$

$$I_{CE} = 3 \cdot \frac{U^0}{X_{CE}} \quad 3.10$$

$$I_F = \frac{3 \cdot \underline{U}^0}{(\underline{Z}^1 + \underline{Z}^2 + \underline{Z}^0 + j \cdot X_P^0 // j \cdot X_{CE})} \quad 3.11$$

$$I_{F50Hz} = \frac{3 \cdot \underline{U}^0}{6 \cdot (R^1 + j \cdot \omega \cdot L^1) + \frac{j \cdot X_P}{1 - \frac{X_P}{X_{CE}}}} \quad 3.12$$

$$I_{F50Hz} = \frac{3 \cdot \underline{U}^0}{6 \cdot \ell \cdot (R' + j \cdot \omega \cdot L') + \frac{j \cdot \omega \cdot L_P}{1 - \underbrace{\omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}_{\substack{\text{für } \nu > 0 \text{ ist markierter} \\ \text{Ausdruck } < 1}}}} \quad 3.13$$

Die Gleichung 3.13 führt zu der Erkenntnis, dass die 50-Hz-Komponente des Fehlerstroms entlang einer Leitung unterschiedlich für den unter- bzw. überkompensierten Betriebsfall ist.

Die Abbildung 3.11 veranschaulicht die Änderung der 50-Hz Komponente des Fehlerstroms. Folgenden Parameter wurden dabei gewählt (die Leitungslänge ist dabei eine rein fiktive Größe um den Verlauf ersichtlich machen zu können):

$$\ell = 1000 \text{ km} \quad 3.14$$

$$I_{CE} = 300 \text{ A} \quad 3.15$$

$$U^0 = \frac{20}{\sqrt{3}} \text{ kV} \quad 3.16$$

$$Z^1 = 0.4 + j \cdot 0.3 \quad 3.17$$

$$\nu = \pm 5 \% \quad 3.18$$

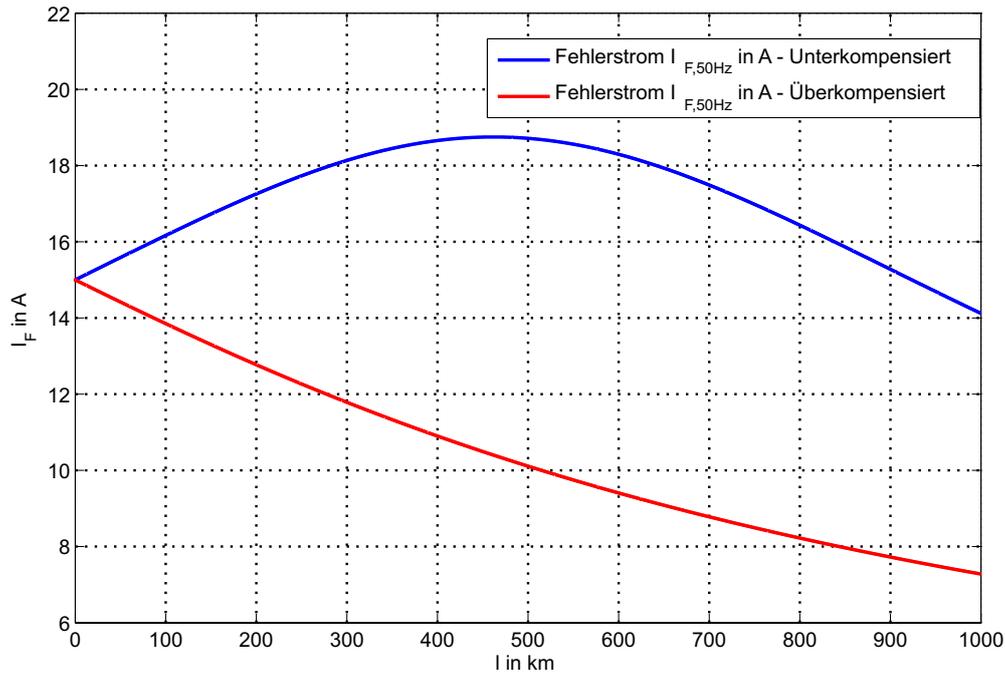


Abbildung 3.11: Darstellung der 50-Hz Komponente des Fehlerstroms entlang einer fiktiven Leitung

Für den überkompensierten Betriebsfall nimmt der Fehlerstrom ab, wenn sich der Fehler entlang der Leitung verschiebt und ist induktiv. Bei Unterkompensation nimmt die 50-Hz-Komponente zuerst zu und ist kapazitiv und nimmt danach erst ab und ist induktiv. In der Praxis ist dieser Effekt jedoch für 50 Hz zu vernachlässigen, da abhängig von den Leitungsparametern, die betragsmäßige Erhöhung des Fehlerstroms sehr gering ist und bei 20-kV-Netzen keine so große Leitungslänge erreicht wird, dass der Effekt eine Rolle spielt.

Es ist ersichtlich, dass für realistische Leitungslängen die Änderungen der 50-Hz Komponente des Fehlerstroms marginal sind. Das Maximum, das für den unterkompensierten Betriebsfall auftritt, kann anhand der folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$f(\ell) = \left| 6 \cdot \ell \cdot (R' + j \cdot \omega \cdot L') + \frac{j \cdot \omega \cdot L_P}{1 - \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E} \right| \quad 3.19$$

$$f(\ell) = \sqrt{(6 \cdot \ell \cdot R')^2 + \left(6 \cdot \ell \cdot \omega \cdot L' + \underbrace{\frac{\omega \cdot L_P}{1 - \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}}_A \right)^2} \quad 3.20$$

$$\frac{f(\ell)}{d\ell} = \frac{6 \cdot (\ell \cdot (R'^2 + \omega^2 \cdot L'^2) + 0.16 \cdot A \cdot \omega \cdot L')}{\sqrt{\ell^2 \cdot (R'^2 + \omega^2 \cdot L'^2) + 0.3 \cdot \ell \cdot \omega \cdot A \cdot L' + 0.027 \cdot A^2}} \quad 3.21$$

$$6 \cdot (\ell \cdot (R'^2 + \omega^2 \cdot L'^2) + 0.16 \cdot A \cdot \omega \cdot L') = 0 \quad 3.22$$

$$\ell = 461,87 \text{ km} \quad 3.23$$

Bis zur Entfernung von 461,9 km ist der Fehlerstrom kapazitiv. Danach wird er induktiv.

Basierend auf Gleichung 3.11 kann auch der Fehlerstrom für diverse Oberschwingungen ermittelt werden. Die Gleichungen 3.24 - 3.26 stellen den Fehlerstrom für verschiedene Oberschwingungen dar.

$$\underline{I}_{F150\text{Hz}} = \frac{p_{150} \cdot 3 \cdot \underline{U}^0}{6 \cdot \ell \cdot (R' + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot L') + \frac{j \cdot 3 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 9 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}} \quad 3.24$$

$$\underline{I}_{F250\text{Hz}} = \frac{p_{250} \cdot 3 \cdot \underline{U}^0}{6 \cdot \ell \cdot (R' + j \cdot 5 \cdot \omega \cdot L') + \frac{j \cdot 5 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 25 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}} \quad 3.25$$

$$\underline{I}_{F350\text{Hz}} = \frac{p_{350} \cdot 3 \cdot \underline{U}^0}{6 \cdot \ell \cdot (R' + j \cdot 7 \cdot \omega \cdot L') + \frac{j \cdot 7 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 49 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}} \quad 3.26$$

Für eine grafische Darstellung wurden für die p-Faktor folgende Werte gewählt:

$$\begin{aligned} p_{150} &= 0,18 \% \\ p_{250} &= 0,90 \% \\ p_{350} &= 0,53 \% \end{aligned} \quad 3.27$$

In der Abbildung 3.12 sind die Verläufe der Fehlerströme für diverse Oberschwingungen dargestellt. Es handelt sich dabei um den unterkompensierten Betriebsfall, da er einen betragsmäßig geringfügig höheren Fehlerstrom verursacht (für die weitere Betrachtung wird der Fehlerstrom für den unterkompensierten Fall betrachtet da dieser betragsmäßig minimal größer ist).

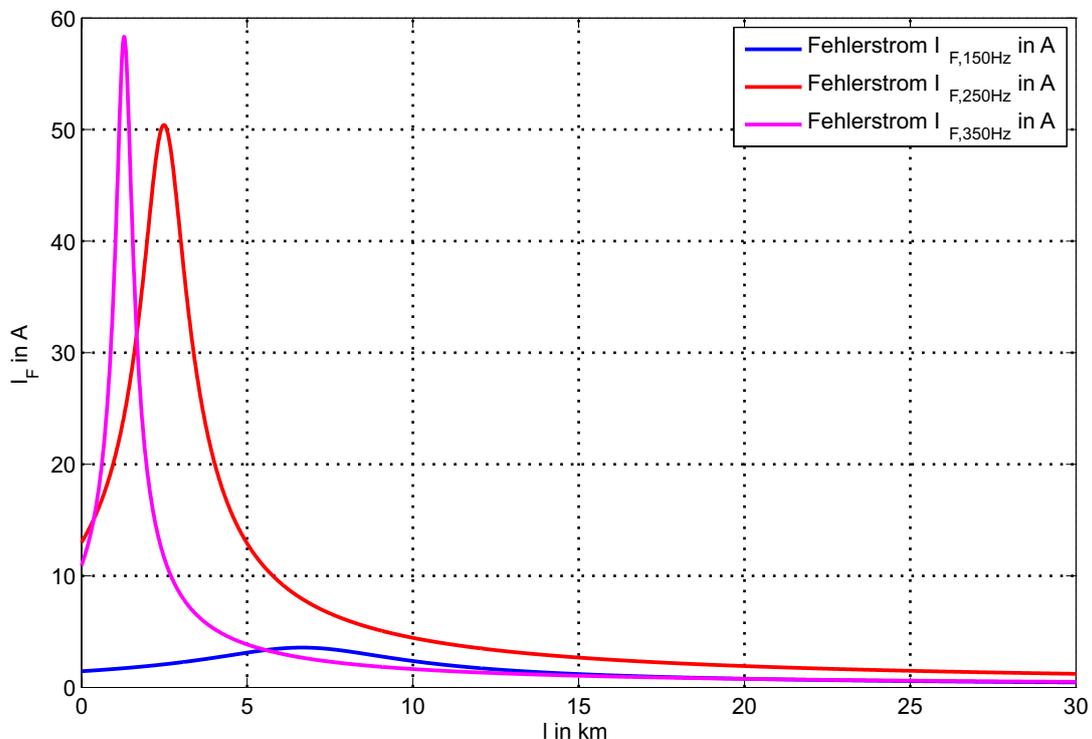


Abbildung 3.12: Darstellung der 150-, 250- und 350-Hz Komponente des Fehlerstroms entlang einer Leitung

In Anlehnung an Gleichung 3.20 ergeben sich die folgenden mathematischen Zusammenhänge für die Entfer-

nung des Fehlerorts beim Maximum des Fehlerstroms bei den jeweiligen Oberschwingungen:

$$f(\ell_{150}) = \sqrt{\left(6 \cdot \ell \cdot R'\right)^2 + \left(6 \cdot \ell \cdot 3 \cdot \omega \cdot L' + \underbrace{\frac{3 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 9 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}}_{A_{150}}\right)^2} \quad 3.28$$

$$18 \cdot \left(2 \cdot \ell \cdot (R'^2 + 9 \cdot \omega^2 \cdot L'^2) + A_{150} \cdot \omega \cdot L'\right) = 0 \quad 3.29$$

$$f(\ell_{250}) = \sqrt{\left(6 \cdot \ell \cdot R'\right)^2 + \left(6 \cdot \ell \cdot 5 \cdot \omega \cdot L' + \underbrace{\frac{5 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 25 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}}_{A_{250}}\right)^2} \quad 3.30$$

$$6 \cdot \left(\ell \cdot (R'^2 + 25 \cdot \omega^2 \cdot L'^2) + 0.8\dot{3} \cdot A_{250} \cdot \omega \cdot L'\right) = 0 \quad 3.31$$

$$f(\ell_{350}) = \sqrt{\left(6 \cdot \ell \cdot R'\right)^2 + \left(6 \cdot \ell \cdot 7 \cdot \omega \cdot L' + \underbrace{\frac{7 \cdot \omega \cdot L_P}{1 - 49 \cdot \omega^2 \cdot L_P \cdot C_E}}_{A_{350}}\right)^2} \quad 3.32$$

$$6 \cdot \left(\ell \cdot (R'^2 + 49 \cdot \omega^2 \cdot L'^2) + 1.1\dot{6} \cdot A_{350} \cdot \omega \cdot L'\right) = 0 \quad 3.33$$

Durch die Verwendung der zuvor angegebenen Werte ergeben sich damit folgende Entfernungen für den jeweils maximalen Fehlerstrom der Oberschwingungen:

$$\ell_{150} = 6,7 \text{ km} \quad 3.34$$

$$\ell_{250} = 2,5 \text{ km} \quad 3.35$$

$$\ell_{350} = 1,3 \text{ km} \quad 3.36$$

Bis zu den jeweiligen Maxima ist der Fehlerstrom kapazitiv. Danach wird er induktiv.

Die Superposition aller einzelnen Fehlerströme führt zu dem Gesamtfehlerstrom, der in Abbildung 3.13 dargestellt ist. Während eines Anstieges des Fehlerstroms ist dieser kapazitiv. Bei einem Abfall des Fehlerstroms ist dieser induktiv.

Es ist aus dem Verlauf des Fehlerstroms ersichtlich, dass am Anfang einer Leitung der Einfluss der Oberschwingungen sehr groß wird, während bei größeren Entfernungen der Einfluss schrumpft. Daraus ergibt sich für Erdschlussversuche die Möglichkeit, bei bekannten Netzdaten, den Fehlerort so zu wählen, dass der zu erwartende Fehlerstrom ein Maximum wird. Der exakte Verlauf des Fehlerstroms entlang einer Leitung ist dabei abhängig von den Parametern des Netzes.

Die Berechnungen von C. Obkircher in [3] ergeben, dass der Verlauf des Fehlerstroms auch abhängig von der

Leiter-Erde Kapazität des Netzes ist. Das ergeben auch die Formeln 3.13 und 3.24 - 3.26.

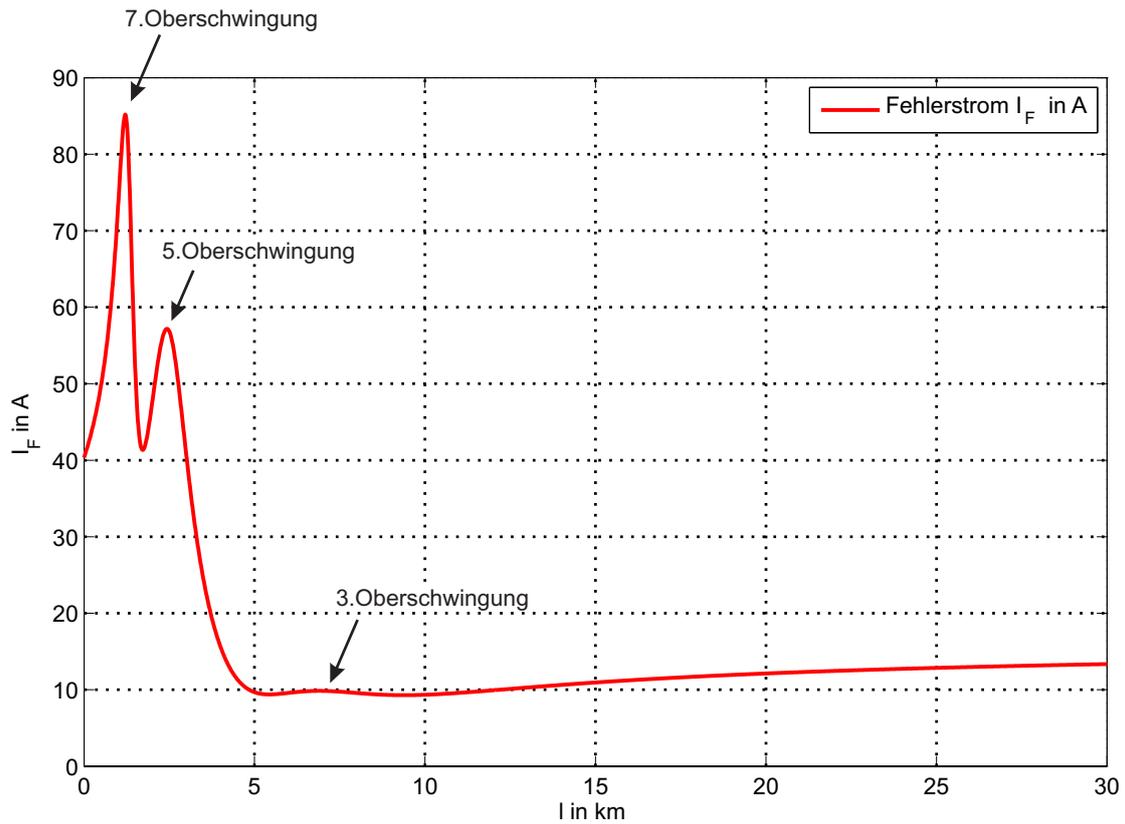


Abbildung 3.13: Gesamtfehlerstrom I_F entlang einer Leitung

In der Abbildung 3.14 ist der Fehlerstrom bei verschiedenen kapazitiven Erdschlussströmen dargestellt.

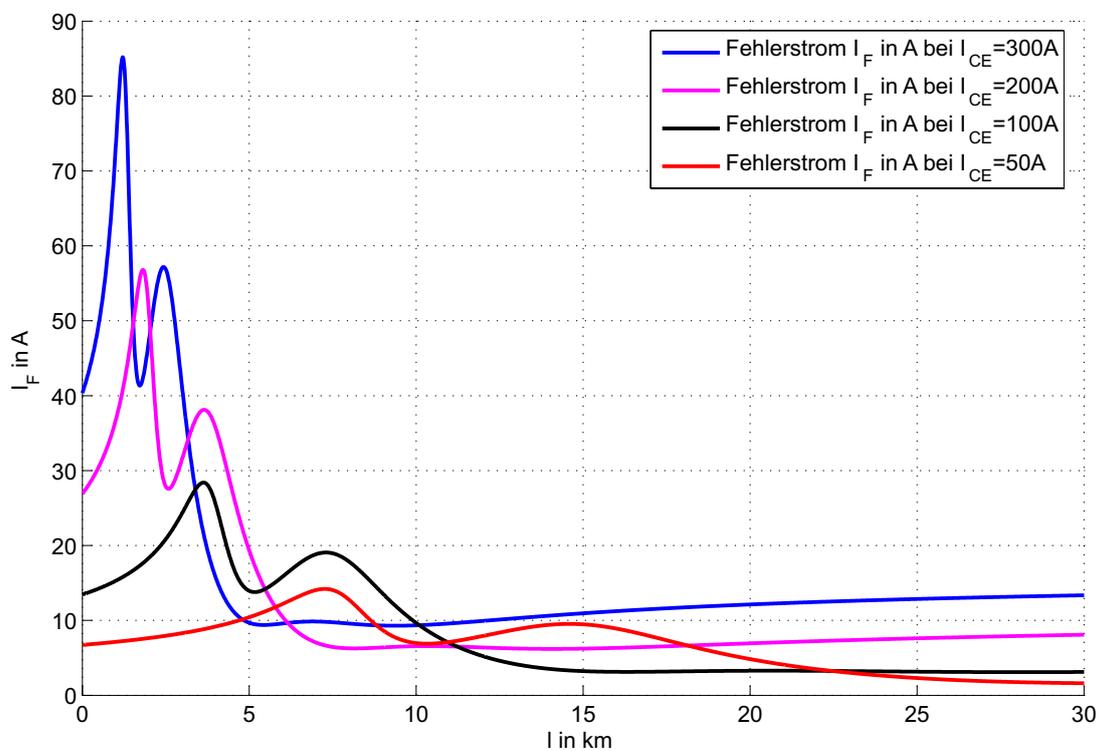


Abbildung 3.14: Gesamtfehlerstrom I_F entlang einer Leitung bei unterschiedlicher Netzgröße

3.4 Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 1: Die Löschgrenze für 20-kV-Netze

Um eine Abhängigkeit der Löschgrenze vom kapazitiven Erdschlussstrom zu erhalten, wurden die Veröffentlichungen von M. Erich und H. Heinze sowie von K. H. Koch erneut ausgewertet und, wo möglich, vereinheitlicht. Folgende Vereinheitlichungen wurden dabei vorgenommen [43]:

- Bei den Versuchen von M. Erich und H. Heinze handelte es sich um Versuche am Leitungsanfang (ersichtlich aus deren Darstellung in der Veröffentlichung sowie auch aus der Veröffentlichung von J. Poll [35]). Aus diesem Grund werden aus dem FGH-Bericht [32] ebenfalls nur Erdschlussfehler am Anfang der Leitung betrachtet.
- Es wurden aus dem FGH-Bericht jene Werte ausgewählt, bei denen laut Definition des FGH-Berichts der Oberschwingungsgehalt „normal“¹ ist.
- Aus den Daten von M. Erich und H. Heinze wurden nur Daten mit einem induktiven bzw. kapazitiven Erdschlussreststrom herangezogen.

Anmerkung: Es gibt Unterschiede in den Aufzeichnungen des FGH-Berichts zwischen der Löschfähigkeit bzw. der Brenndauer von Erdschlusslichtbögen am Anfang bzw. am Ende einer Leitung. Um jedoch den Vergleich mit den Ergebnissen von M. Erich und H. Heinze machen zu können, musste die o.a. Einschränkung auf den Leitungsanfang getroffen werden.

3.4.1 Die Löschgrenze in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom

Die aktuelle Norm gibt für 20-kV-Netze eine Löschgrenze von 60 A aus. Aufbauend auf den genannten Veröffentlichungen zum Thema Erdschlusslöschung, beeinflussen folgende Größen die Löschung [43]:

- Nennspannung des Netzes
- Erdschlussreststrom
- Steilheit der wiederkehrenden Spannung
- Größe des kapazitiven Erdschlussstroms
- Lage des Fehlers
- Oberschwingungen

Wenn man die Grenzwerte (jener Erdschlussreststrom, bei dem noch eine erfolgreiche Löschung erfolgte), entsprechend der zuvor genannten Vereinheitlichungen, von M. Erich und H. Heinze sowie des FGH-Berichts zusammenfasst, erhält man den maximalen löschfähigen Erdschlussreststrom in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom entsprechend Tabelle 3.2 und Abbildung 3.15 [43].

¹ Der tagsüber auftretende Oberschwingungsgehalt wurde als „normal“ und der abends auftretende als „hoch“ bezeichnet.

Tabelle 3.2: Kapazitiver Erdschlussstrom und Erdschlussreststrom aus den Veröffentlichungen von M. Erich und H. Heinze [30] und K. H. Koch [32]

Veröffentlichung	I_{CE} in A	I_{Rest} in A
M. Erich und H. Heinze	200	70
K. H. Koch	605	117
K. H. Koch	1152	210

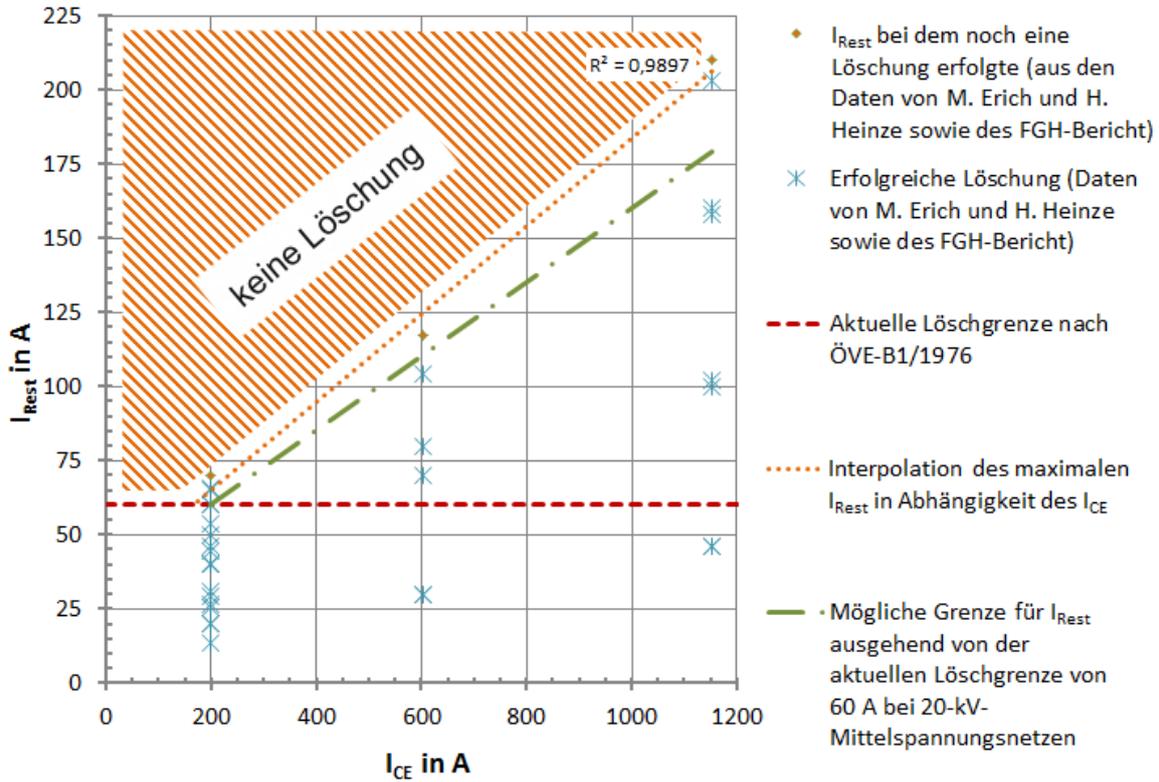


Abbildung 3.15: Entwurf einer vom kapazitiven Erdschlussstrom abhängigen Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze [43]

Man erkennt hier, dass jene Punkte in den Veröffentlichungen, bei denen noch eine Löschung erfolgte, annähernd auf einer Geraden liegen (Bestimmtheitsmaß R^2 von 98,97 %), wenn man den kapazitiven Erdschlussstrom über den Erdschlussreststrom aufträgt. Die geringen Abweichungen sind durchaus damit zu erklären, dass die schrittweise Änderung der Verstimmung diskret erfolgte [43].

In der Abbildung 3.15 wird – ausgehend von der auf den Versuchsergebnissen basierenden Grenzgeraden (orange-punktierte Linie) - eine weitere Grenzgerade (grün-strichpunktierte Linie) eingefügt. Dieser Linie liegt die aktuelle Löschgrenze von 60 A bei einem kapazitiven Erdschlussstrom von 200 A zugrunde und lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken [43]:

$$I_{Rest} \leq 35 + 25 \cdot \left(\frac{I_{CE}}{200} \right) \text{ in A} \tag{3.37}$$

Die Gleichung 3.37 berücksichtigt einen Sicherheitsabstand zu der auf den Versuchsergebnissen basierenden Grenzgeraden. Überdies liefert die Gleichung für kleine Erdschlussströme (kleiner 50 A) in etwa die von G. Mey-

er sowie H. Roser definierte Löschgrenze von ca. 40 A.

Wenn man die Gleichungen 3.37 und 3.38 kombiniert, erhält man Gleichung 3.39 [43]:

$$\frac{I_{REST}}{I_{CE}} = \sqrt{\delta^2 + \nu^2} \tag{3.38}$$

$$\sqrt{\delta^2 + \nu^2} < \frac{35}{I_{CE}} + \frac{25}{200} \tag{3.39}$$

In der Abbildung 3.16 ist die Gleichung 3.39 als Höhenliniendiagramm dargestellt. Man erkennt, dass die zulässige Verstimmung eines Netzes mit der Netzgröße sowie mit der Dämpfung zusammenhängt. Im Vergleich zu der aktuellen Normenlage und somit zu der Abbildung 3.6 erkennt man, dass sich für Netze mit einem kapazitiven Erdschlussstrom größer 200 A der mögliche Bereich der Verstimmung verbreitert hat (z.B. bei einem I_{CE} von 1200 A und einer Dämpfung von 3 % erhöht sich der Bereich der zulässigen Verstimmung von $\pm 4 \%$ auf $\pm 15.12 \%$) [43].

Die Abbildung 3.17 liefert die graphische 3-dimensionale Interpretation der Gleichung 3.39. Es ist der Löschtichter in Abhängigkeit von der Netzgröße, Verstimmung, Dämpfung sowie dem Erdschlussreststrom dargestellt. Im Unterschied zu Abbildung 3.7 sieht man, dass der Trichter eine kleiner gefasste Basis sowie eine größere Trichteröffnung aufweist [43].

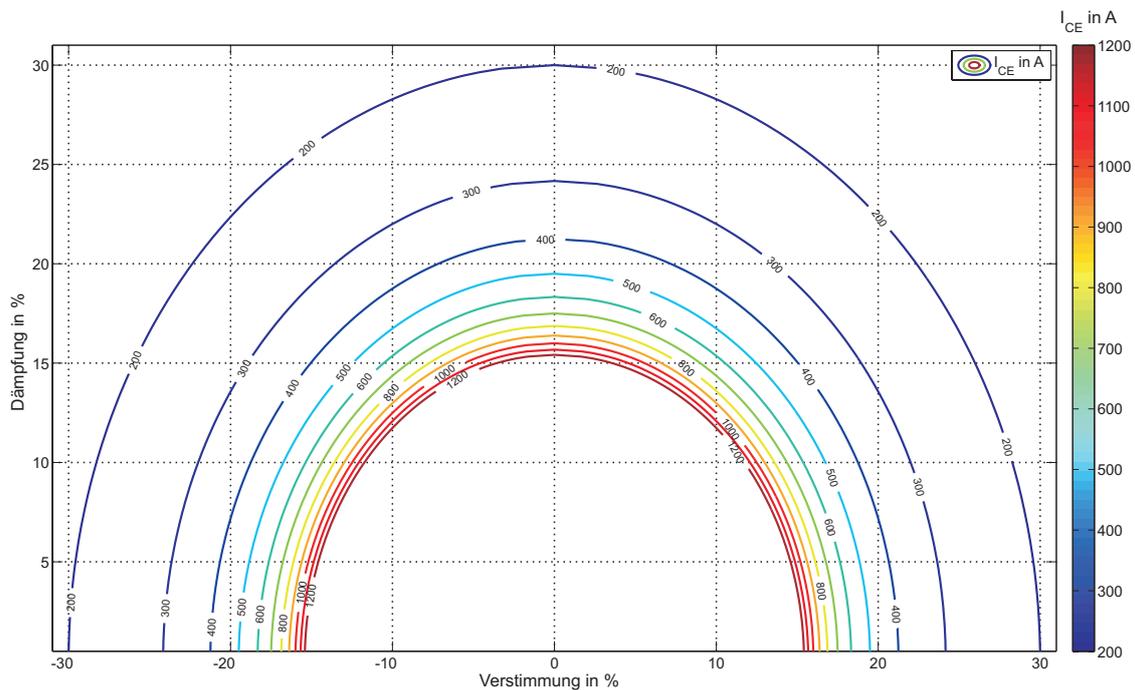


Abbildung 3.16: Darstellung des neuen möglichen Verstimmungsbereichs der Löschsule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes [43]

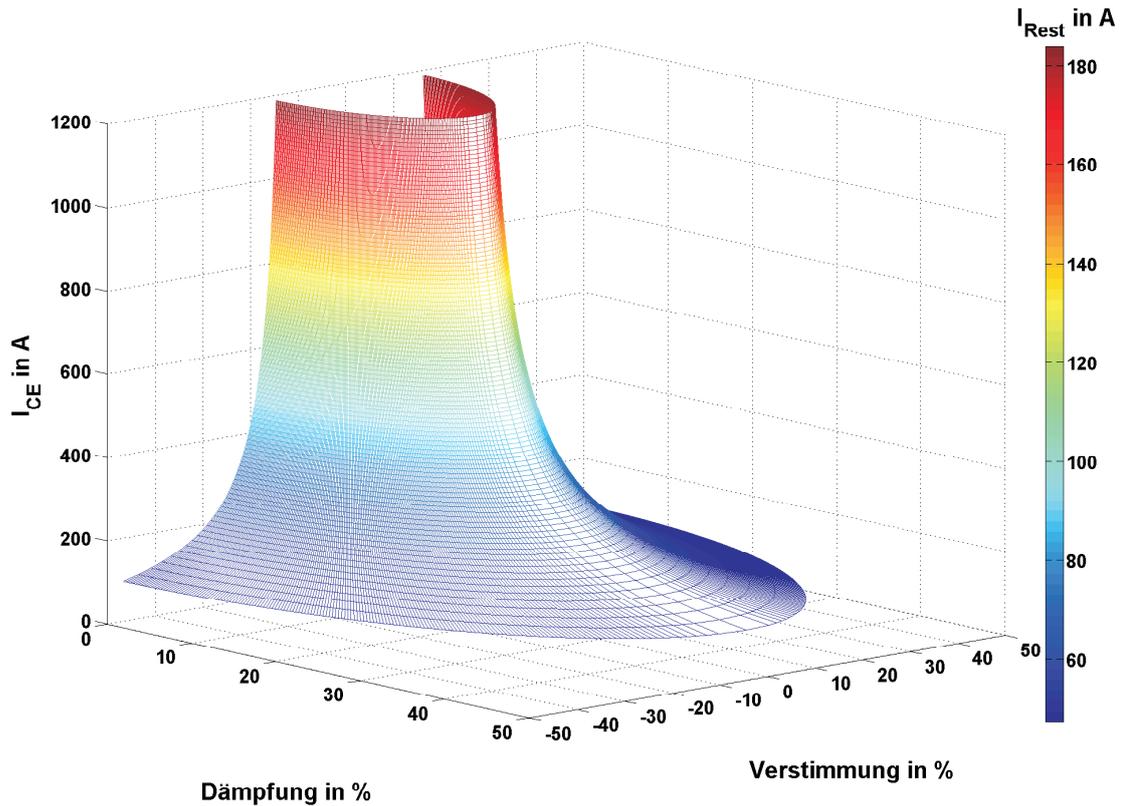


Abbildung 3.17: 3-dimensionale Darstellung des neuen möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes [43]

3.4.2 Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung

Um auch den Einfluss der Steilheit der wiederkehrenden Spannung zu berücksichtigen, wird, ausgehend von der Veröffentlichung von O. Mayr [34], die Gleichung 3.3 von J. Poll [35] verwendet, die die Steilheit der wiederkehrenden Spannung auch bei großer Verstimmung korrekt angibt. Ausgehend von der Abbildung 3.16 (bzw. Gleichung 3.39), in der die maximale Verstimmung in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und der Dämpfung in Halbkreisen dargestellt ist, kann für jeden Halbkreis der Betrag aus Dämpfung und Verstimmung ermittelt werden. Da es sich um Halbkreise handelt, ist der Betrag aus Verstimmung und Dämpfung entlang des Halbkreises konstant. Aufgrunddessen kann als Betrag die Dämpfung bei einer Verstimmung von 0 % angenommen werden. Daraus ergibt sich, basieren auf Gleichung 3.3, folgende Vereinfachung:

$$\frac{dU_h}{dt} = \hat{U}_{ph} \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \delta \quad 3.40$$

Da die maximale Dämpfung abhängig vom kapazitiven Erdschlussstrom ist, erhält man den berechneten Verlauf des Grenzwertes für die zulässige Steilheit der Hüllenspannung der wiederkehrenden Spannung in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom [43]. Folgende Gleichung stellt das dar:

$$\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} = \hat{U}_{ph} \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \delta_{\max}(I_{CE}) \quad 3.41$$

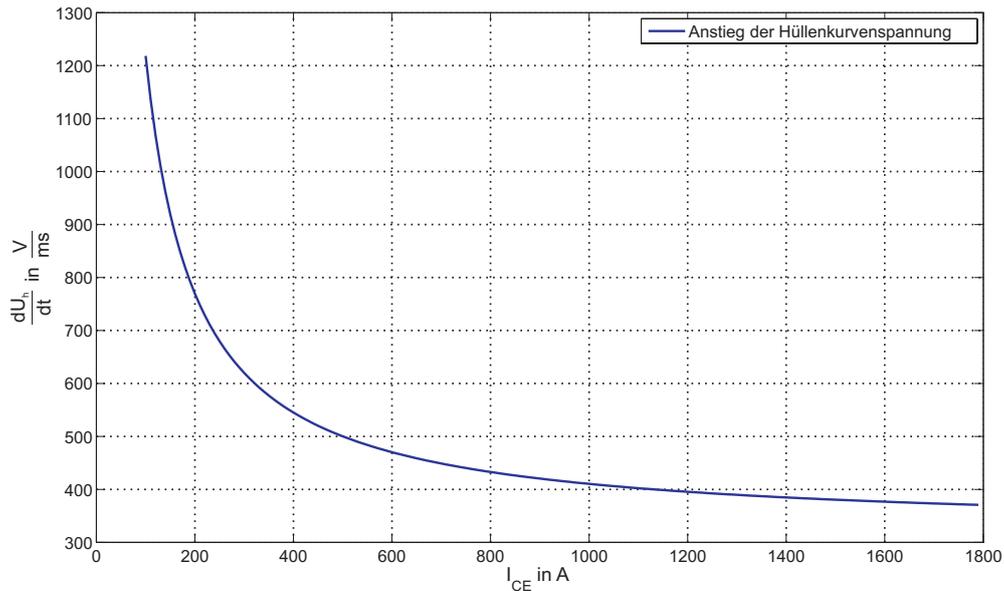


Abbildung 3.18: Grenzwert der zulässigen Anstiegsgeschwindigkeit der Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung bei einem gelöschten 20-kV-Netz [43]

In der Abbildung 3.18 ist der Grenzwert der zulässigen Anstiegsgeschwindigkeit der Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung dargestellt. Etwaige Beschränkungen der Löschgrenze die im weiteren Verlauf getätigt werden sind nicht berücksichtigt (Fallunterscheidung bei I_{Rest} entsprechend Gleichung 3.53). Auch der im weiteren Verlauf berücksichtigte Unterschied zwischen über- und unterkompensierten gelöschten Netzen ist hier nicht beachtet.

Anmerkung: Bei einem isolierten Netz ist der Anstieg der Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung gegeben durch ($v = -1$) [43]:

$$\frac{dU_h}{dt} = U_{ph} \frac{\omega}{2} \sqrt{-2^2 + \delta^2} \approx \underbrace{5130 \text{ V/ms}}_{\substack{\text{für 20-kV-Nennspannung} \\ \text{und bei Vernachlässigung} \\ \text{der Dämpfung}}} \tag{3.42}$$

Das entspricht ungefähr dem 4,2- bis zum 13,5-fachen der zulässigen maximalen Anstiegsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms (dargestellt in der Grafik).

Des Weiteren gibt die Gleichung 3.3 auch Aufschluss über das unterschiedliche Verhalten bei kapazitiven bzw. induktiven Erdschlussrestströmen. Die Steilheit der wiederkehrenden Spannung ist bei gleichem Kompensationsgrad im unterkompensierten Netz ($v < 0$) größer als im überkompensierten Netz [35][43].

Ausgehend von den Grenzwerten der Steilheit der Hüllenspannung der wiederkehrenden Spannung nach Abbildung 3.18 und der Gleichung 3.3 kann die maximale Verstimmung für den Fall der Unter- bzw. Überkompensation bei einer Dämpfung von 0 % auf folgende Art und Weise berechnet werden:

$$\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} = \hat{U}_{Ph} \frac{\omega}{2} \sqrt{(2\sqrt{1+v} - 2)^2 + \delta^2} \quad 3.43$$

$$\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} = \hat{U}_{Ph} \frac{\omega}{2} \sqrt{(2\sqrt{1+v_{\max}} - 2)^2} \quad 3.44$$

$$\left(\frac{2 \cdot \frac{dU_h(I_{CE})}{dt}}{\hat{U}_{Ph} \cdot \omega} \right)^2 = (2\sqrt{1+v_{\max}} - 2)^2 \quad 3.45$$

$$v_{\max}(I_{CE}) = \frac{\left(\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} \right)^2}{\hat{U}_{Ph}^2 \cdot \omega^2} \pm \frac{2 \cdot \frac{dU_h(I_{CE})}{dt}}{\hat{U}_{Ph} \cdot \omega} \quad 3.46$$

$$v_{\max, \text{überkompensiert}}(I_{CE}) = \frac{\left(\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} \right)^2}{\hat{U}_{Ph}^2 \cdot \omega^2} + \frac{2 \cdot \frac{dU_h(I_{CE})}{dt}}{\hat{U}_{Ph} \cdot \omega} \quad 3.47$$

$$v_{\max, \text{unterkompensiert}}(I_{CE}) = \frac{\left(\frac{dU_h(I_{CE})}{dt} \right)^2}{\hat{U}_{Ph}^2 \cdot \omega^2} - \frac{2 \cdot \frac{dU_h(I_{CE})}{dt}}{\hat{U}_{Ph} \cdot \omega} \quad 3.48$$

Anschließend kann die maximal zulässige Dämpfung innerhalb der Verstimmungsgrenzen bestimmt werden. Aufgrund dieser Zusammenhänge erhält man den in Abbildung 3.19 dargestellten Verstimmungsbereich.

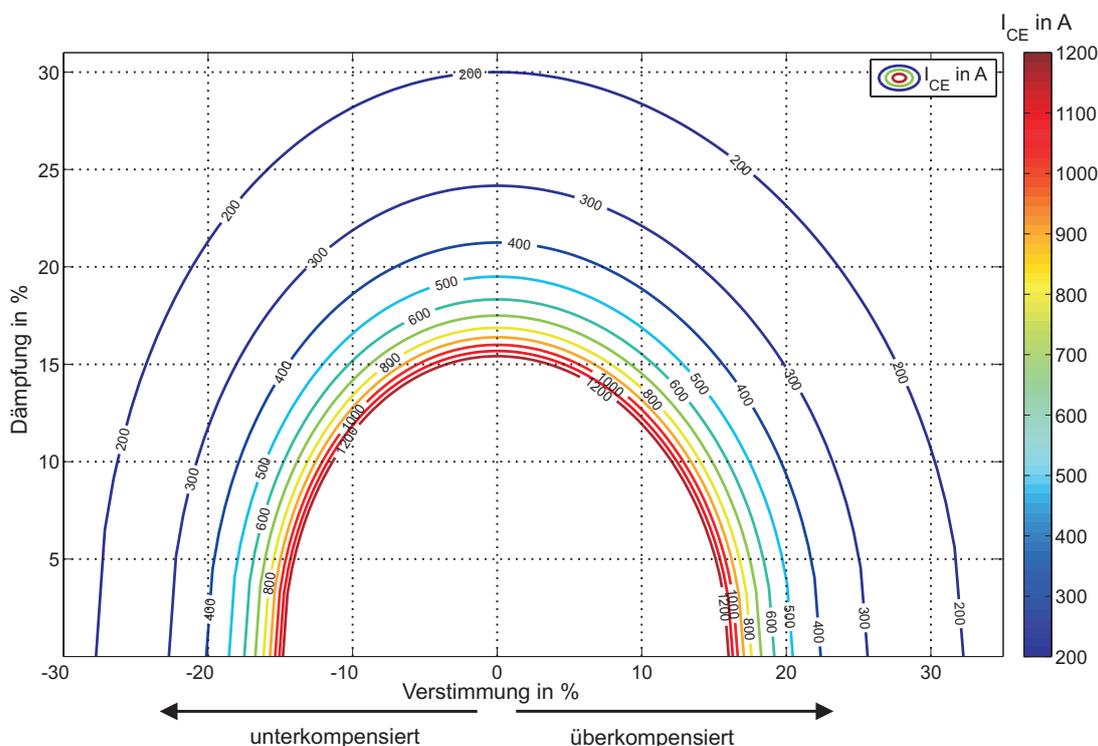


Abbildung 3.19: Darstellung des neuen Verstimmungsbereichs der Löschspule unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes [43]

Es ist hier ersichtlich, dass bei gleicher Dämpfung im unterkompensierten Betriebsfall ein geringerer maximaler Verstimmungsgrad erlaubt ist als im überkompensierten Betriebsfall [43].

Ausgehend von der Abbildung 3.19 kann basierend auf der Gleichung 3.4 die Löschgrenze wie folgt ermittelt werden:

$$I_G(I_{CE}) = I_{CE} \cdot v_{\max}(I_{CE}) \tag{3.49}$$

$$I_{G,\text{überkompensiert}}(I_{CE}) = I_{CE} \cdot v_{\max,\text{überkompensiert}}(I_{CE}) \tag{3.50}$$

$$I_{G,\text{unterkompensiert}}(I_{CE}) = I_{CE} \cdot v_{\max,\text{unterkompensiert}}(I_{CE}) \tag{3.51}$$

Daraus ergibt sich Abbildung 3.20. In dieser Abbildung sind zwei unterschiedliche Löschgrenzen dargestellt. Aufgrund dessen, dass die Abbildung 3.19 um den Nullpunkt der Verstimmung nicht symmetrisch ist, kommt es zu zwei unterschiedlichen Löschgrenzen, je nachdem ob das Netz überkompensiert oder unterkompensiert betrieben wird. Die Löschgrenze für den überkompensierten Bereich ist dabei größer als die Löschgrenze für den unterkompensierten Bereich.

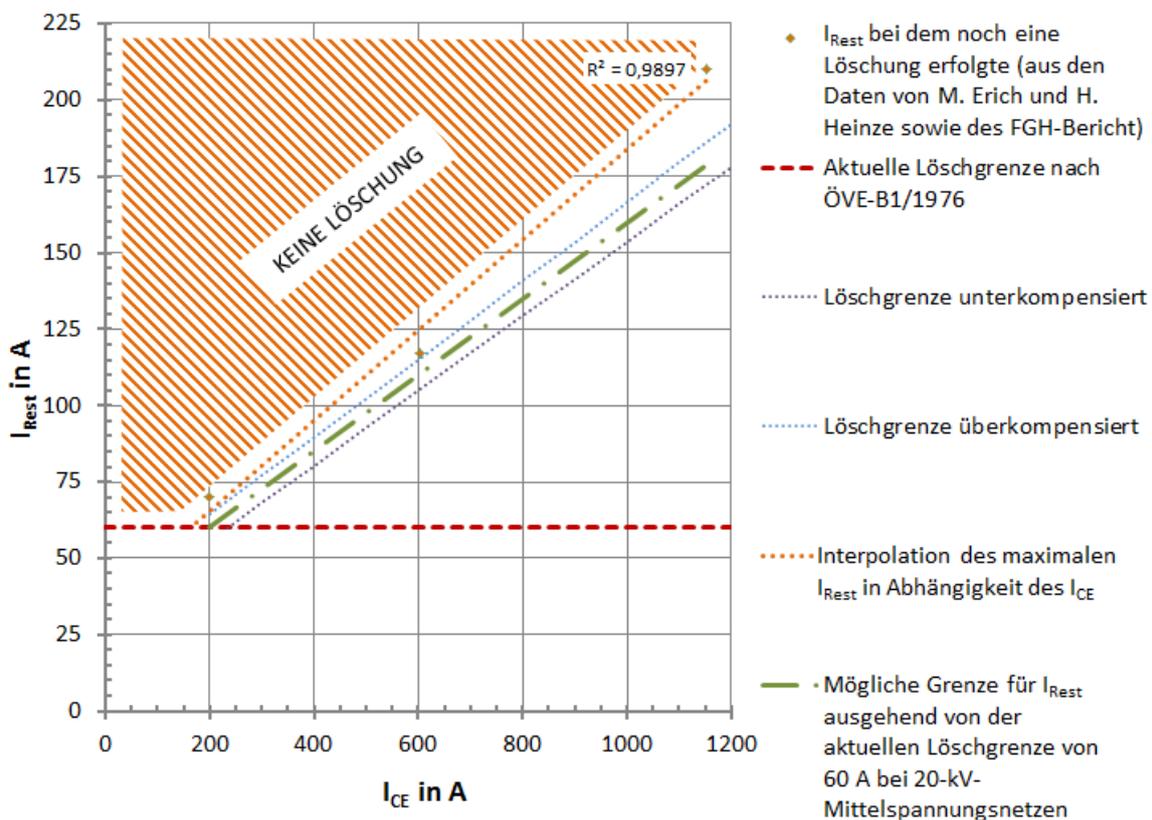


Abbildung 3.20: Löschgrenze für den unterkompensierten und den überkompensierten Betriebsfall unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung [43]

Es ist ersichtlich, dass die Abweichung der Löschgrenze im überkompensierten Fall eine leichte Vergrößerung des zulässigen Erdschlussreststroms zur Folge hat, während im unterkompensierten Fall es zu einer Verringerung des zulässigen Erdschlussreststroms kommt [43].

3.4.3 Eine mögliche Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze unter Berücksichtigung der Netzgröße

Unter Berücksichtigung dieser Daten kommt man zu der folgenden möglichen Löschgrenze für 20-kV-Mittelspannungsnetze:

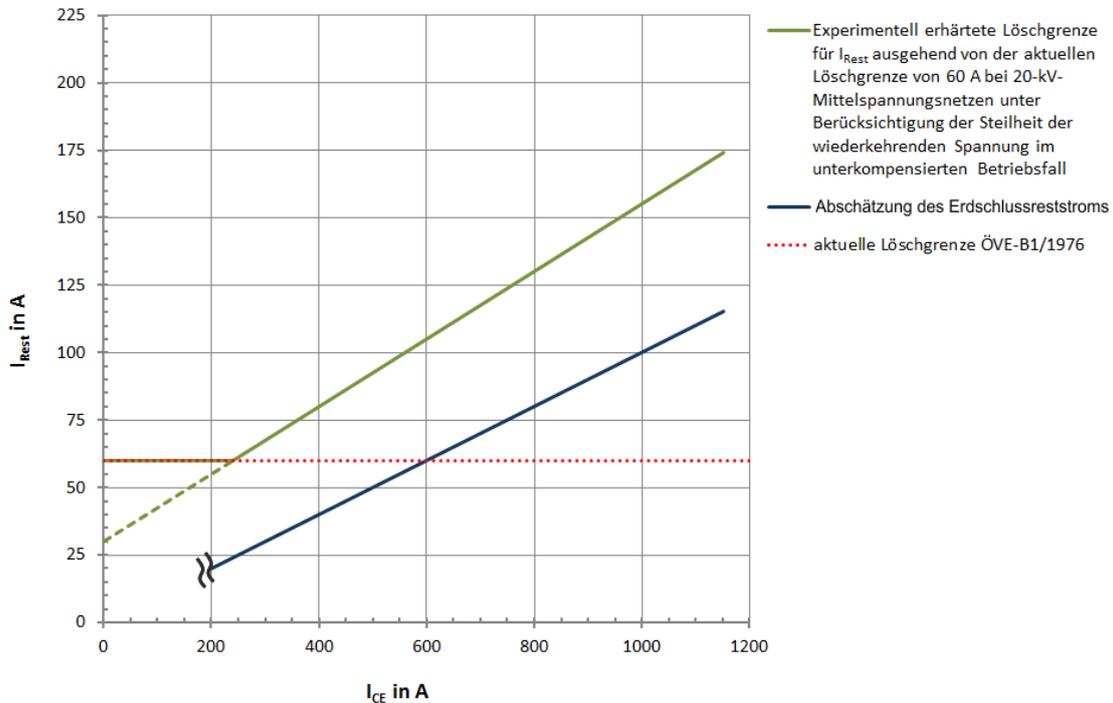


Abbildung 3.21: Mögliche neue Löschgrenze für 20-kV-Mittelspannungsnetze unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung im unterkompensierten Betriebsfall

Dabei wurde die Löschgrenze für den unterkompensierten Fall hergenommen, da diese in beiden Betriebsbereichen (unter- sowie überkompensiert) gültig ist. Beachtenswert ist auch, dass bei einer linearen Fortsetzung der Löschgrenze (grün strichliert) für Netzgrößen kleiner 240 A in etwa die Löschgrenze von G. Meyer aus dem Jahre 1931 erreicht wird (damals angegeben mit 30 - 40 A).

Die Löschgrenze lässt sich durch folgende mathematische Gleichung definieren [43]:

$$I_{Rest} < I_G(I_{CE}) \tag{3.52}$$

$$I_G(I_{CE}) = \begin{cases} 60\text{A} & \text{für } I_{CE} \leq 240 \text{ A} \\ 30\text{A} + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} & \text{für } I_{CE} > 240 \text{ A} \end{cases} \tag{3.53}$$

Bei der Abschätzung des Erdschluss-Reststromes mit 10 % vom kapazitiven ungelöschten Erdschlussstrom (entsprechend der ÖVE/ÖNORM E 8383 - Tabelle 5) würde die Löschgrenze grundsätzlich immer (bis zu einem experimentell nicht widersprochenen Wert von 1100 A) eingehalten werden (siehe Abbildung 3.21 bzw. Gleichung 3.54).

$$I_{Rest}(I_{CE}) \leq \frac{I_{CE}}{10} \tag{3.54}$$

3.5 Neu-Interpretation alter Versuche - Teil 2: Die Brenndauer in 20-kV-Netzen

Um eine Abhängigkeit der Brenndauer vom Erdschlussreststrom zu erhalten, wurden die veröffentlichten Daten von M. Erich und H. Heinze sowie von K. H. Koch erneut erfasst und wo möglich vereinheitlicht. Folgende Vereinheitlichungen wurden vorgenommen:

- Beim Bericht von M. Erich und H. Heinze [30] wurden die mittlere Brenndauer von induktiven und kapazitiven Erdschlüssen über die unterschiedlichen Isolatorentypen gemittelt.
- Die mittlere Brenndauer von rein ohmschen Lichtbögen wird zwar dargestellt, fließt aber in die spätere Betrachtung nicht mit ein, da es durch die Parallelschaltung eines Widerstands zur Petersenspule beim Versuchsaufbau von M. Erich und H. Heinze zu einer wesentlichen Änderung der Dämpfungsverhältnisse im untersuchten Netz kam.
- Es werden aus dem Bericht von M. Erich und H. Heinze sowie vom K. H. Koch nur die Daten für Erdschlüsse am Anfang einer Leitung verwendet.
- Beim FGH-Bericht [32] wurde die durchschnittliche Lichtbogenbrenndauer als Mittelwert der Brenndauer bei Zuschaltung im Spannungsmaximum bzw. im Spannungsnulldurchgang berechnet.
- Es wurden aus dem FGH-Bericht jene Werte ausgewählt, bei denen laut Definition des FGH-Berichts der Oberschwingungsgehalt „normal“ ist (siehe Abschnitt 3.4).

Anmerkung: Es gibt Unterschiede in den Aufzeichnungen des FGH-Berichts zwischen der Löschfähigkeit bzw. der Brenndauer von Erdschlusslichtbögen am Anfang bzw. am Ende einer Leitung. Um jedoch den Vergleich mit den Ergebnissen von M. Erich und H. Heinze machen zu können, musste die Einschränkung auf den Leitungsanfang getroffen werden.

3.5.1 Die unterschiedlichen Brenndauern in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und der Netzgröße

Die Dämpfung des Netzes im FGH-Bericht wurde mit Hilfe der folgenden Gleichungen rechnerisch ermittelt:

$$\delta = \sqrt{\left| \left(\frac{I_{REST}}{I_{CE}} \right)^2 - U^2 \right|} \quad \delta > 0 \tag{3.55}$$

In der Tabelle 3.3 sind die Daten des FGH-Berichts zusammengestellt. Es handelt sich bei den Zeiten um die oben definierte mittlere Brenndauer in den Versuchen. Die angeführten Kompensationsgrade sind die von K. H. Koch im FGH-Bericht [32] berechneten Werte.

Tabelle 3.3: Auswertung der Daten des FGH-Berichts

	Mittlere Lichtbogenbrenndauer in s (Zuschaltung im Spannungs- maximum)	Mittlere Lichtbogenbrenndauer in s (Zuschaltung im Spannungs- nullobergang)	Durchschnittliche mittlere Licht- bogenbrenndauer t_M in s	kapazitiver Erdschlussstrom I_{CE} in A	Erdschlussreststrom I_{Rest} in A	Verstimmung ν in %	Dämpfung δ in %
Bild 8a des FGH- Berichts (UA3)	0,014	0,064	0,039	605,0	30,0	5,0 %	0,64 %
	0,022	0,084	0,053	605,0	70,0	-12,0 %	3,18 %
	0,052	0,092	0,072	605,0	104,0	-17,0 %	2,55 %
Bild 9a des FGH- Berichts (UA2)	0,016	0,076	0,046	605,0	30,0	5,0 %	0,64 %
	0,017	0,092	0,054	605,0	80,0	-12,0 %	5,55 %
	0,024	0,132	0,078	605,0	117,0	-17,0 %	9,22 %
Bild 10a des FGH- Berichts (UA1)	0,033	0,061	0,047	1152,0	46,0	4,0 %	0,24 %
	0,031	0,061	0,046	1152,0	100,0	-9,0 %	2,38 %
	0,016	0,059	0,038	1152,0	160,0	-14,0 %	1,76 %
	0,011	0,431	0,221	1152,0	210,0	-19,0 %	5,36 %
Bild 11a des FGH- Berichts (UA1)	0,016	0,054	0,035	1152,0	46,0	4,0 %	0,24 %
	0,017	0,051	0,034	1152,0	102,0	-9,0 %	1,61 %
	0,017	0,096	0,056	1152,0	158,0	-14,0 %	2,81 %
	0,186	0,225	0,206	1152,0	203,0	-19,0 %	7,11 %
UA1-3...Umspannanlage 1-3							

Die Daten von

- G. Meyer
- M. Erich und H. Heinze
- K. H. Koch

werden in der Abbildung 3.22 dargestellt. Des Weiteren ist das Bestimmtheitsmaß des jeweiligen Trendverlaufs abgebildet. Die Gleichung des jeweiligen Trendverlaufs ist ebenfalls in der Abbildung angegeben. Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über den Zusammenhang der abgebildeten Daten und dem Trendverlauf der Interpolation (Maximum des Bestimmtheitsmasses ist 1).

Man erkennt, dass die Daten von G. Meyer mit $R^2 = 0,18$ nur ein sehr geringes Bestimmtheitsmaß aufweisen. Da alle Werte bis zu einer Nennspannung von 30 kV als eine Spannungsebene dargestellt wurden, ist aufgrund der daraus resultierende Streuung das geringe Bestimmtheitsmaß erklärbar.

Eine weitere Kurve, die ebenfalls ein geringes Bestimmtheitsmaß aufweist, stammt aus der Veröffentlichung von M. Erich und H. Heinze und betrifft die Daten des ohmschen Erdschlussreststroms. Wie bereits zuvor erwähnt, fließt dieser Trendverlauf nicht in die weiteren Betrachtungen ein, da das Bestimmtheitsmaß zu gering ist bzw. die Änderung der Dämpfungsverhältnisse durch den gewählten Versuchsaufbau zu groß sind.

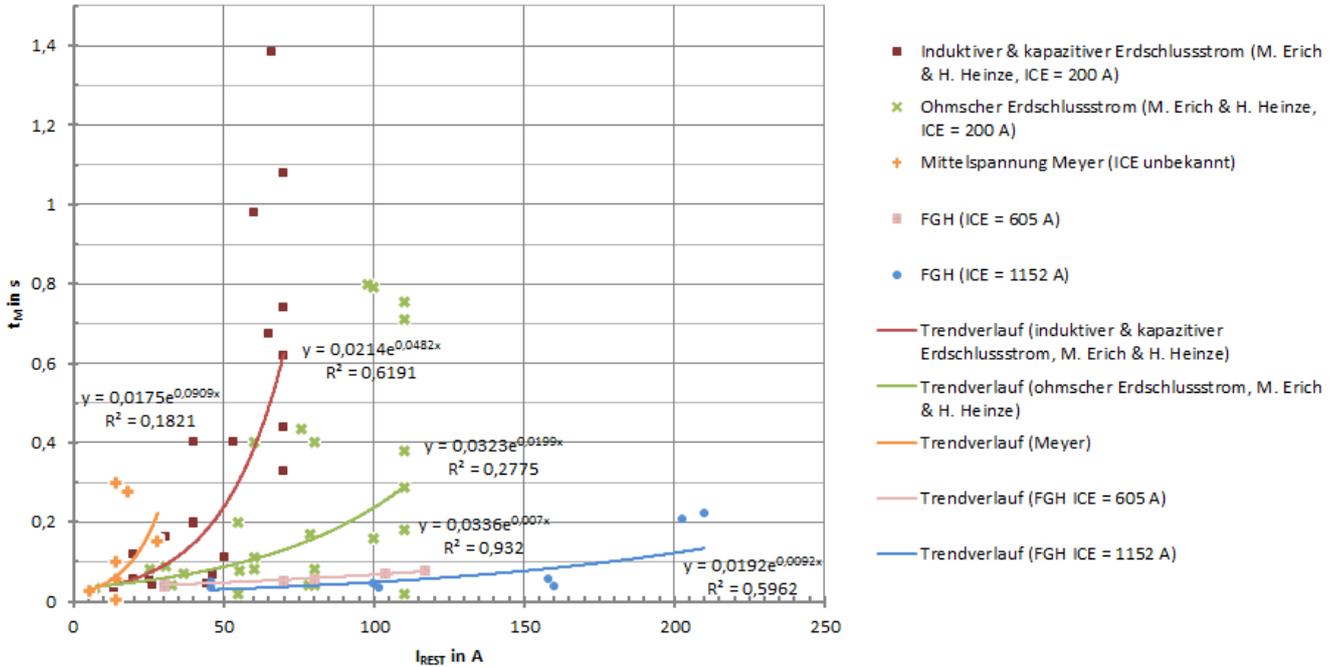


Abbildung 3.22: Darstellung der Daten und Trendverläufe von G. Meyer, M. Erich und H. Heinze sowie des FGH-Berichts [44]

3.5.2 Der Einfluss der Netzgröße auf die Brenndauer

Um eine einheitliche Näherungsformel für die Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms angeben zu können, werden die drei Trendverläufe mit einem Bestimmtheitsmaß über 0,5 für die weitere Berechnung verwendet. Zusätzlich wird, um eine Näherungsformel zu erhalten, die Mindestbrenndauer (der Koeffizient vor dem exponentiellen Faktor) auf einen Wert von 0,02 s vereinheitlicht (man erkennt in Abbildung 3.22 dass die durchschnittliche Mindestbrenndauer der Trendverläufe zwischen 0,017 und 0,033 sec liegt). Es ist in Abbildung 3.23 ersichtlich, dass sich die Kurvenverläufe, aufgrund der Vereinheitlichung der Mindestbrenndauer auf 0,02 s, nur geringfügig ändern.

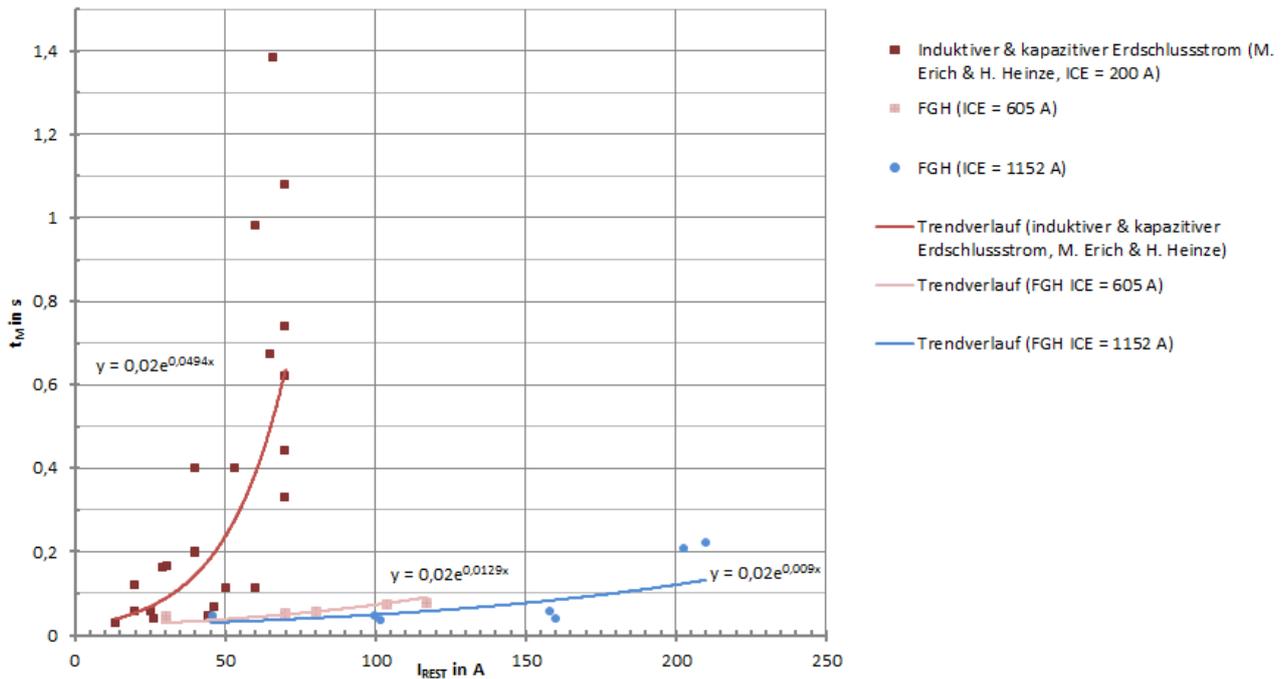


Abbildung 3.23: Darstellung der Daten und Trendverläufe für die weitere Betrachtung [44]

Die durchschnittliche mittlere Brenndauer t_M in Sekunden kann dabei allgemein für unterschiedliche Erdschlussströme (I_{CE} in A) wie folgt angegeben werden [44]:

$$t_M = 0,02e^{p \cdot I_{Rest}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \quad 3.56$$

Es handelt sich bei der Gleichung um die mittlere Brenndauer, womit bei einzelnen Versuchen auch eine mehr oder weniger starke Streuung möglich und auch wahrscheinlich ist. Es ist dabei zu beachten, dass die Näherungsgleichung 3.56 nur für einen Erdschlussreststrom, der kleiner als die tatsächliche Löschgrenze (I_G) ist, abgeleitet worden ist.

Um den Koeffizienten p in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms bestimmen zu können, wird von den folgenden drei Trendverläufen ausgegangen [44]:

$$t_M = 0,02e^{\overbrace{0,0494 \cdot I_{Rest}}^p} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \text{ und } I_{CE} = 200\text{A} \quad 3.57$$

$$t_M = 0,02e^{\overbrace{0,0129 \cdot I_{Rest}}^p} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \text{ und } I_{CE} = 605\text{A} \quad 3.58$$

$$t_M = 0,02e^{\overbrace{0,009 \cdot I_{Rest}}^p} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \text{ und } I_{CE} = 1152\text{A} \quad 3.59$$

Um einen Zusammenhang der Exponenten zum kapazitiven Erdschlussstrom herzustellen, wurde die Interpretation entsprechend Abbildung 3.24 gewählt. Man erkennt dort, dass ein starker Zusammenhang zwischen den einzelnen Exponenten mittels einer Potenzfunktion gefunden werden kann. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,97.

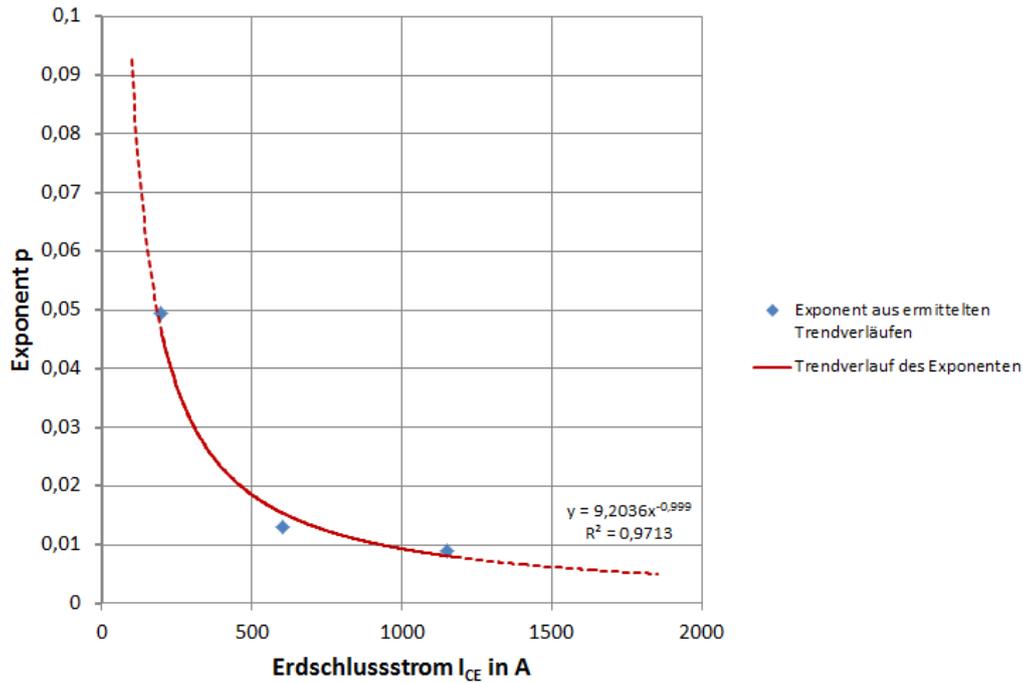


Abbildung 3.24: Darstellung der Größe des Exponenten in der mittleren Brenndauer in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom [44]

Es ergibt sich somit folgende Gleichung für den Exponenten p in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstrom [44]:

$$p_{(I_{CE})} = 9,2036 \cdot I_{CE}^{-0,999} \approx \frac{9,2}{I_{CE}} \quad 3.60$$

Somit lautet die Näherungsformel beim Einsetzen in Gleichung 3.56 für die Brenndauer in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms sowie des Erdschlussreststroms wie folgt [44]:

$$t_{M(I_{CE}, I_{Rest})} \approx 0,02 \cdot e^{\frac{9,2}{I_{CE}} \cdot I_{Rest}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \quad 3.61$$

Die Abbildung 3.25 stellt die Brenndauer, entsprechend Gleichung 3.61, in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und des kapazitiven Erdschlussstroms 3-dimensional dar. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Netzgröße und größerem Erdschlussreststrom, die Brenndauer sinkt. Dies ist mit dem günstigeren Löschverhalten von großen Netzen erklärbar.

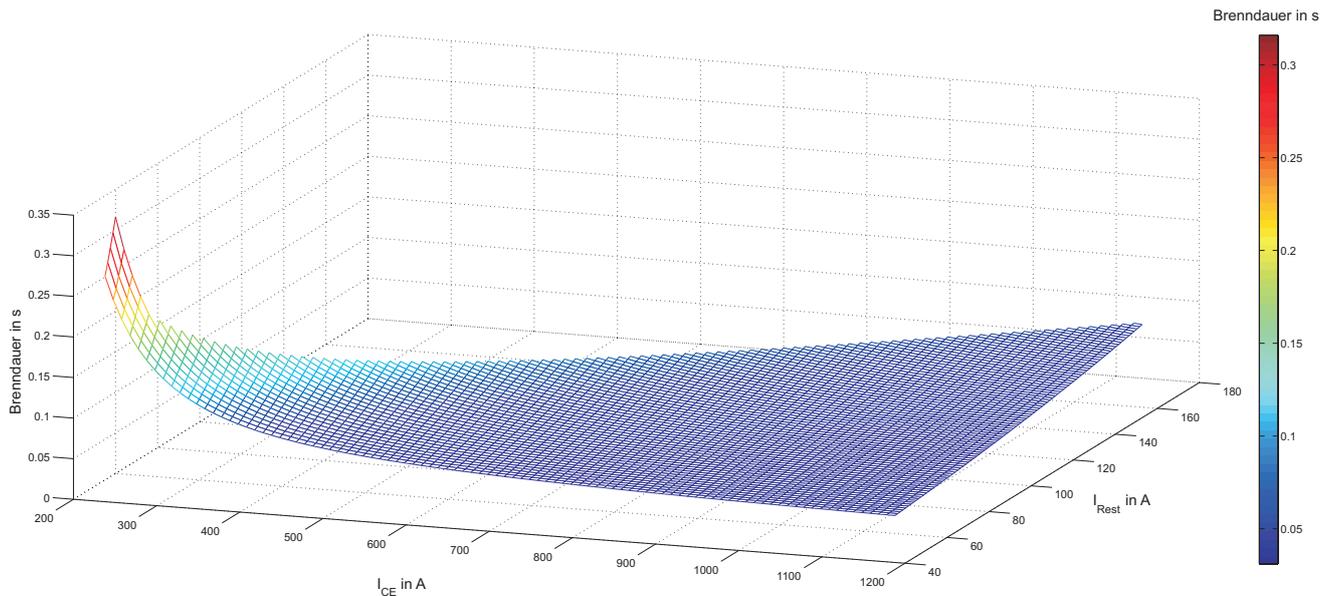


Abbildung 3.25: 3-dimensionale Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und des kapazitiven Erdschlussstroms

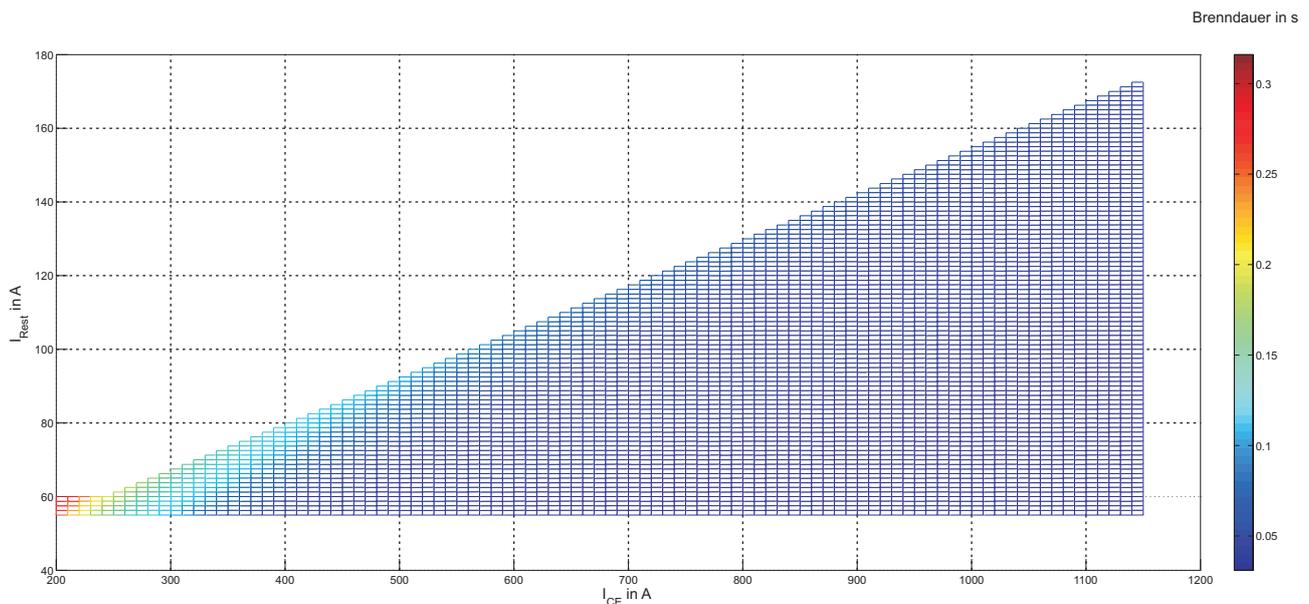


Abbildung 3.26: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und des kapazitiven Erdschlussstroms

In Verbindung mit der neuen Löschgrenze kann eine maximale mittlere Brenndauer ermittelt werden. Die Löschgrenze aus Gleichung 3.53 kann auch entsprechend Gleichung 3.62 dargestellt werden. Wenn man Gleichung 3.62 in Gleichung 3.61 einsetzt erhält man die maximale mittlere Brenndauer entsprechend Gleichung 3.63.

$$I_G(I_{CE}) = \left(30 A + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} \right) \cdot \sigma(I_{CE} - 240 A) + 60 A \cdot \sigma(239,9 A - I_{CE}) \quad 3.62$$

$$t_{Mmax(I_{CE})} \approx 0,02 \cdot e^{\frac{9,2}{I_{CE}} \cdot \left(\underbrace{\left(30 A + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} \right) \cdot \sigma(I_{CE} - 240 A) + 60 A \cdot \sigma(239,9 A - I_{CE})}_{i_G} \right)} \quad \text{in s} \quad 3.63$$

Daraus ergibt sich die in der Abbildung 3.27 dargestellte Funktion der maximalen mittleren Brenndauer. Es ist ersichtlich, dass für kleine Netze ($I_{CE} < 240 \text{ A}$) die maximale mittlere Brenndauer ansteigt. Wenn die Gleichung 3.53 auch für kleine Netze, entsprechend Gleichung 3.64, angewendet wird, so ergibt sich die blau-strichlierte Linie. Daraus ist ersichtlich, dass eine Löschgrenze entsprechend Gleichung 3.64 einen weniger starken Anstieg der maximalen mittleren Brenndauer zu Folge hat als Gleichung 3.53.

$$I_G(I_{CE}) = 30\text{A} + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} \tag{3.64}$$

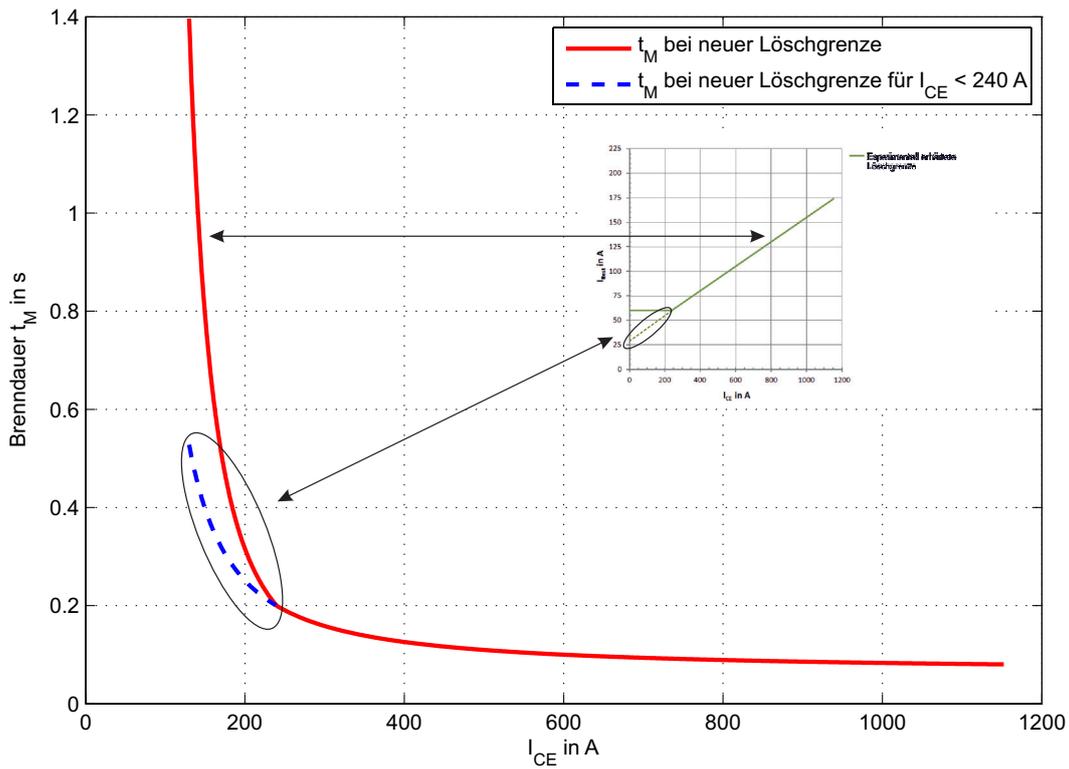


Abbildung 3.27: Darstellung der maximalen mittleren Brenndauer in Abhängigkeit des I_{CE}

3.5.3 Die Brenndauer von Erdschlusslichtbögen in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung

Durch die Kombination von Gleichung 3.61 mit der Gleichung 3.4 erhält man Gleichung 3.66. In dieser Gleichung ist die mittlere Brenndauer zurückgeführt auf den Grad der Verstimmung und der Dämpfung eines Netzes.

$$t_{M(v,\delta)} \approx 0,02 \cdot e^{\frac{9,2}{I_{CE}} \cdot I_{CE} \cdot \sqrt{v^2 + \delta^2}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \tag{3.65}$$

$$t_{M(v,\delta)} \approx 0,02 \cdot e^{9,2 \cdot \sqrt{v^2 + \delta^2}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \tag{3.66}$$

Die Abbildung 3.28 stellt die mittlere Brenndauer, entsprechend Gleichung 3.66, dar. Es ist ersichtlich, dass die Brenndauer sich im Bereich um die maximal zulässige Verstimmung erhöht, während sie bei gut abgestimmten Netzen geringer ist.

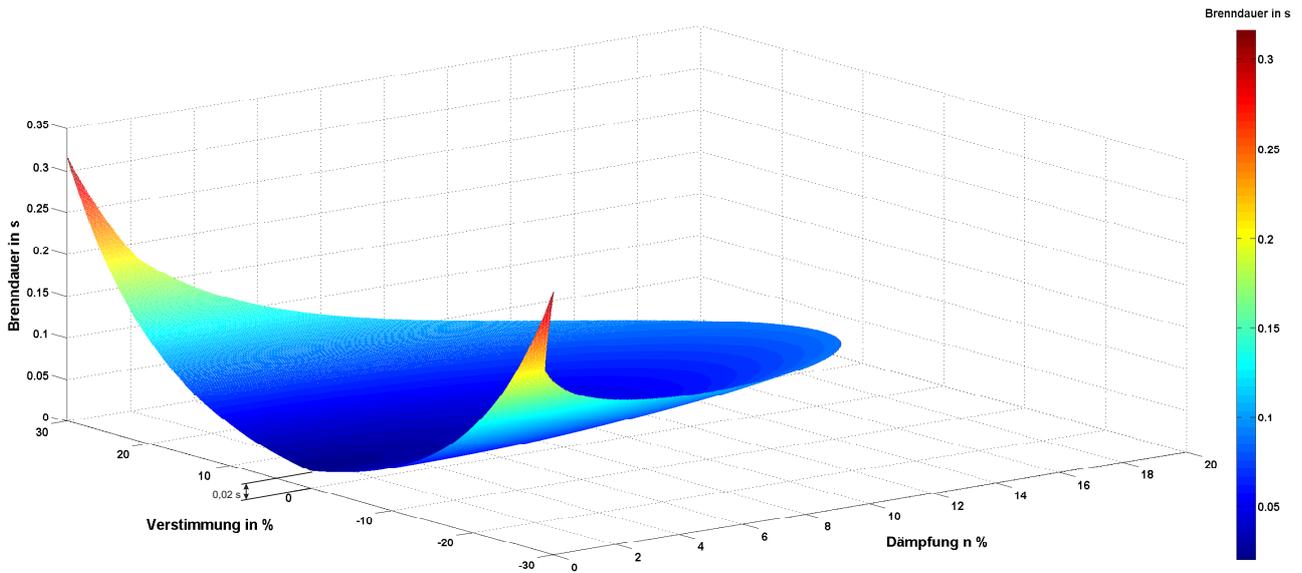


Abbildung 3.28: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung eines Netzes

Entsprechend Gleichung 3.66 lässt sich die maximale mittlere Brenndauer auch wie in Abbildung 3.29 darstellen [44].

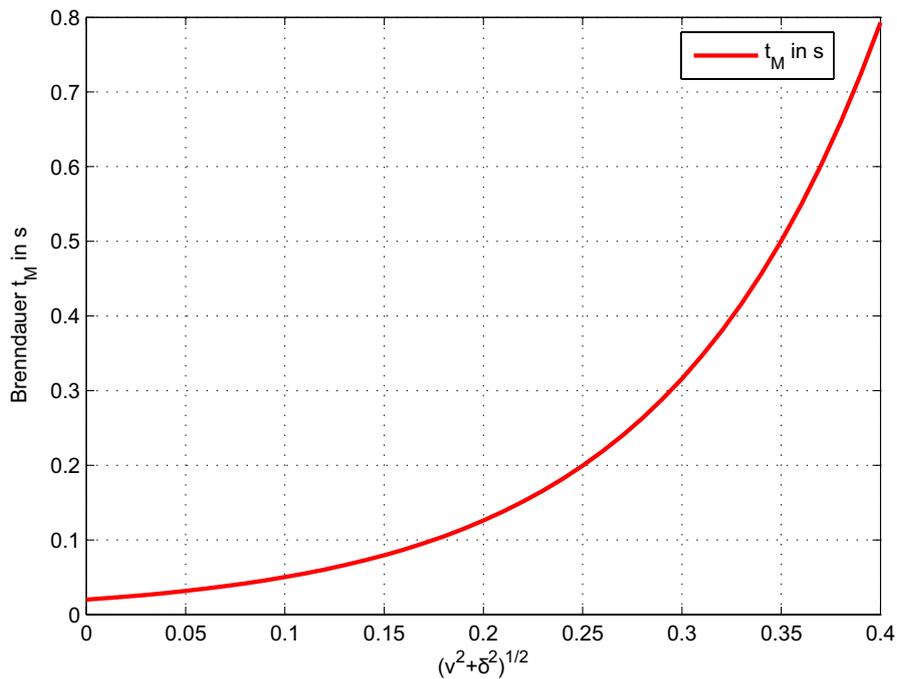


Abbildung 3.29: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung

Wenn nun der Erdschlussreststrom entsprechend Gleichung 3.67 und die Löschgrenze entsprechend Gleichung 3.68 dargestellt wird, so kann ein Schnittpunkt dieser Funktionen in Abhängigkeit von d bestimmt werden.

$$I_{Rest} = I_{CE} \cdot \sqrt{v^2 + \delta^2} = d \cdot I_{CE} \tag{3.67}$$

$$I_G(I_{CE}) = 30 + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} = a + b \cdot I_{CE} \quad \text{für } I_{CE} > 240 \text{ A} \quad 3.68$$

$$I_G = I_{Rest} \quad 3.69$$

$$I_{CE} \cdot d = a + b \cdot I_{CE} \quad \text{für } I_{CE} > 240 \text{ A} \quad 3.70$$

$$d = \frac{a}{I_{CE}} + b = \frac{30}{I_{CE}} + \frac{25}{200} \quad \text{für } I_{CE} > 240 \text{ A} \quad 3.71$$

Bei bekannter Netzgröße lässt sich aus dem Schnittpunkt das maximal zulässige d bestimmen. Anhand des maximal zulässigen d kann entsprechend der Abbildung 3.29 bzw. der Gleichung 3.66 die maximale mittlere Brenndauer ermittelt werden. Die Abbildung 3.30 stellt ein Beispiel für einen kapazitiven Erdschlussstrom von 700 A dar. Mit den zuvor angegebenen Gleichungen kann ein maximal zulässiges d von 0,1678 und eine maximale mittlere Brenndauer von 0,094 s bestimmt werden.

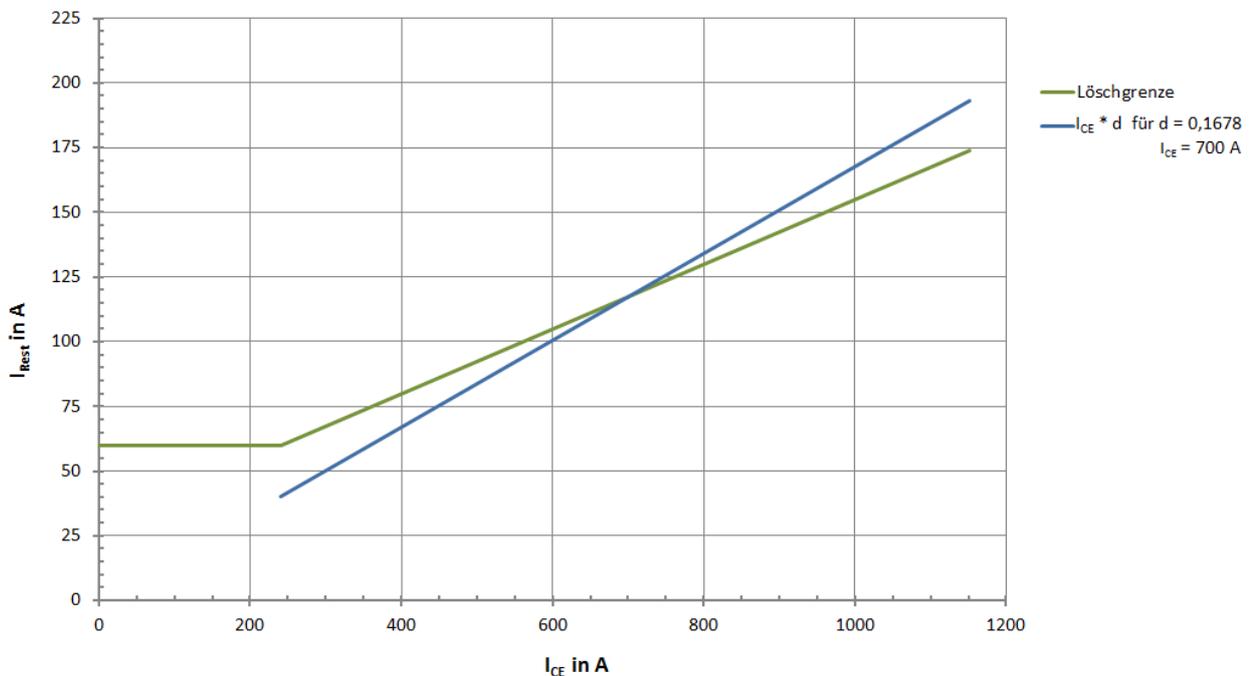


Abbildung 3.30: Darstellung des Schnittpunkts des Erdschlussreststroms mit der Löschgrenze

3.6 Aktuelle Auswertung von Erdschlüssen (Löschgrenze, Brenndauer) in der 20-kV-Spannungsebene

Der folgende Abschnitt behandelt die Auswertung von Erdschlüssen während des Betriebs von unterschiedlichen Energieverteilungsnetzen. Die ausgewerteten Daten stammen von 20- und 110-kV-Energieverteilungsnetzen. Folgende Daten lagen der Untersuchung zu Grunde [45]:

- Kapazitiver Erdschlussstrom des jeweiligen Netzes
- Spannungsverlauf der Phasen während des Fehlerfalls
- Datum und Uhrzeit des Erdschlusses

Entsprechend dem Spannungsverlauf wurde die Erdschlussdauer ermittelt. Der kapazitive Erdschlussstrom wurde rechnerisch, entsprechend folgender Gleichung, ermittelt [45]:

$$I_{REST} = I_{CE} \cdot \sqrt{\delta^2 + \nu^2} \tag{3.72}$$

Der THD wurde mit der Gleichung 3.73 ermittelt [45]:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{15}^2}}{U_1} \tag{3.73}$$

Aufgrund von nicht vorhandenen Netzdaten konnte jedoch nicht der Oberschwingungsgehalt des Erdschlussreststroms, entsprechend [3], rechnerisch bestimmt werden.

Folgende Sachverhalte wurden untersucht:

- Erdschlussreststrom in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms
- Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms
- Brenndauer in Abhängigkeit der Dämpfung des Netzes
- Brenndauer in Abhängigkeit des THD bzw. der einzelnen Oberschwingungen der betroffenen Phase vor dem Fehlereintritt
- Änderung der Dämpfung eines Netzes über ein Jahr
- Verteilung von Erdschlüssen, über das Jahr und die Uhrzeit gesehen

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Auswertung von Erdschlüssen der 20-kV-Spannungsebene. Es wurden 75 Erdschlüsse aus 5 unterschiedlichen UWs hinsichtlich der Brenndauer, der Dämpfung, der Verstimmung und des Oberschwingungsgehalts in der betroffenen Phase, ausgewertet.

In der Tabelle 3.4 sind die Mittelwerte für Verstimmung, Dämpfung bzw. Brenndauer der untersuchten 75 Erdschlüsse angegeben:

Tabelle 3.4: Mittelwerte der untersuchten Erdschlüsse der 20-kV-Spannungsebene

Verstimmung	Dämpfung	Brenndauer
6,87 %	2,78 %	0,55 s

3.6.1 Auswertung der Daten hinsichtlich des 50-Hz-Erdschlussreststroms in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms

In der Abbildung 3.31 ist der Erdschlussreststrom in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms der ausgewerteten Daten dargestellt. Zusätzlich sind die „Mögliche Löschgrenze“ (entsprechend Kapitel 6) und der Bereich, aus dem die Daten stammen, dargestellt [45].

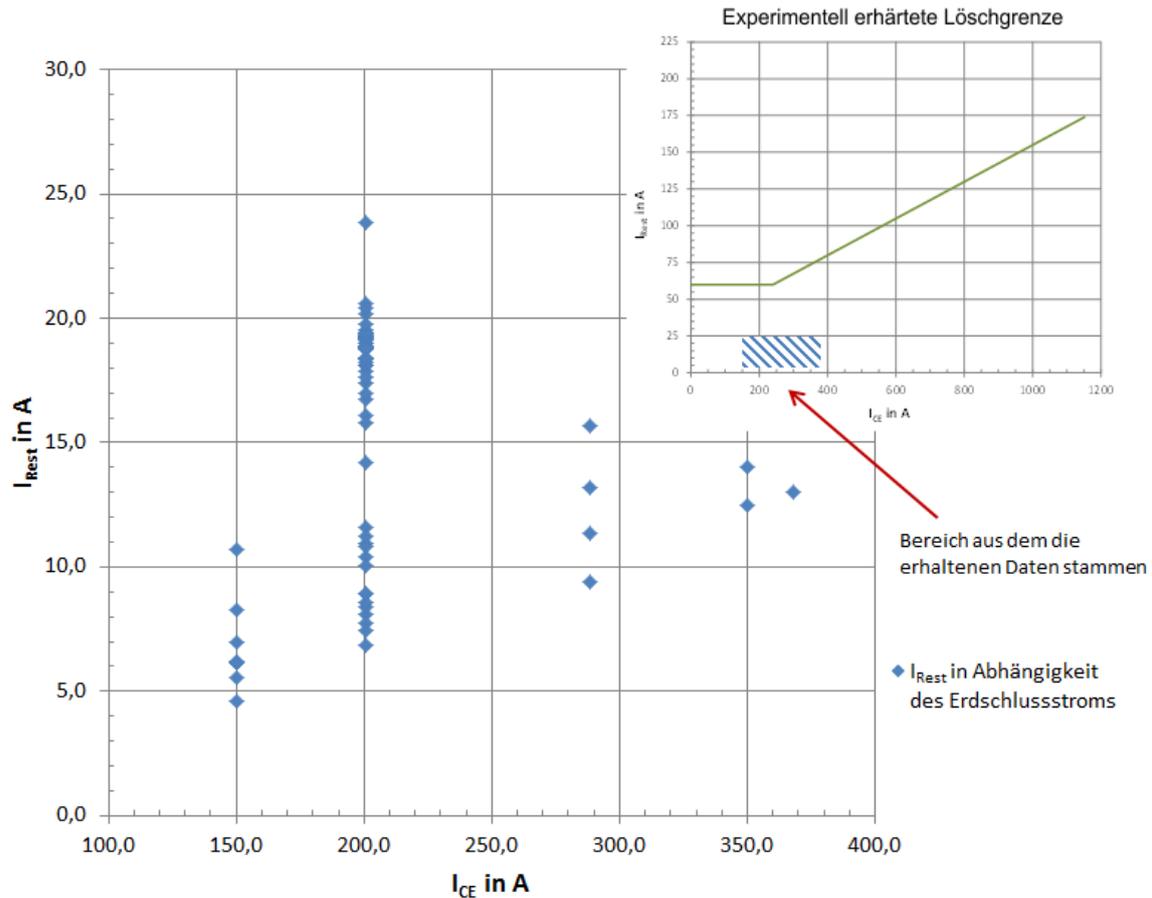


Abbildung 3.31: Darstellung des Erdschlussreststroms in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms der ausgewerteten Erdschlüsse [45]

Aufgrund dessen, dass die ausgewerteten Daten von den Erdschlüssen nur bei einem einzigen Netz mit einem kapazitiven Erdschlussstrom von 200 A in einer größeren Anzahl für die Auswertung vorhanden sind und auch diese nur einen sehr kleinen Bereich des möglichen Erdschlussreststroms abdecken, kann keine allgemeine qualitative Aussage über die Zusammenhänge getroffen werden [45].

3.6.2 Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms

Für die Auswertung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms werden aus der Abbildung 3.31 die Daten jenes Netzes verwendet, das einen Erdschlussstrom von 200 A aufweist. In der Abbildung 3.32 ist die Brenndauer in Abhängigkeit vom Erdschlussreststrom dargestellt. Man erkennt eine Steigerung der Brenndauer bei steigendem Erdschlussreststrom. Jedoch decken die Daten für eine aussagekräftige Interpolation bzw. Extrapolation der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms nicht das benötigte Gebiet (bis unter die aktuelle Löschgrenze von 60 A) ab. Wird das arithmetische Mittel für die Daten berechnet, bei denen Ungleichung 3.74 gilt, so ergibt sich ein Wert von $\bar{t}_m = 0,627$ s bei einem durchschnittlichen Erdschlussreststrom von 18,83 A.

$$15 \leq I_{Rest} \leq 25 \quad \text{in A} \tag{3.74}$$

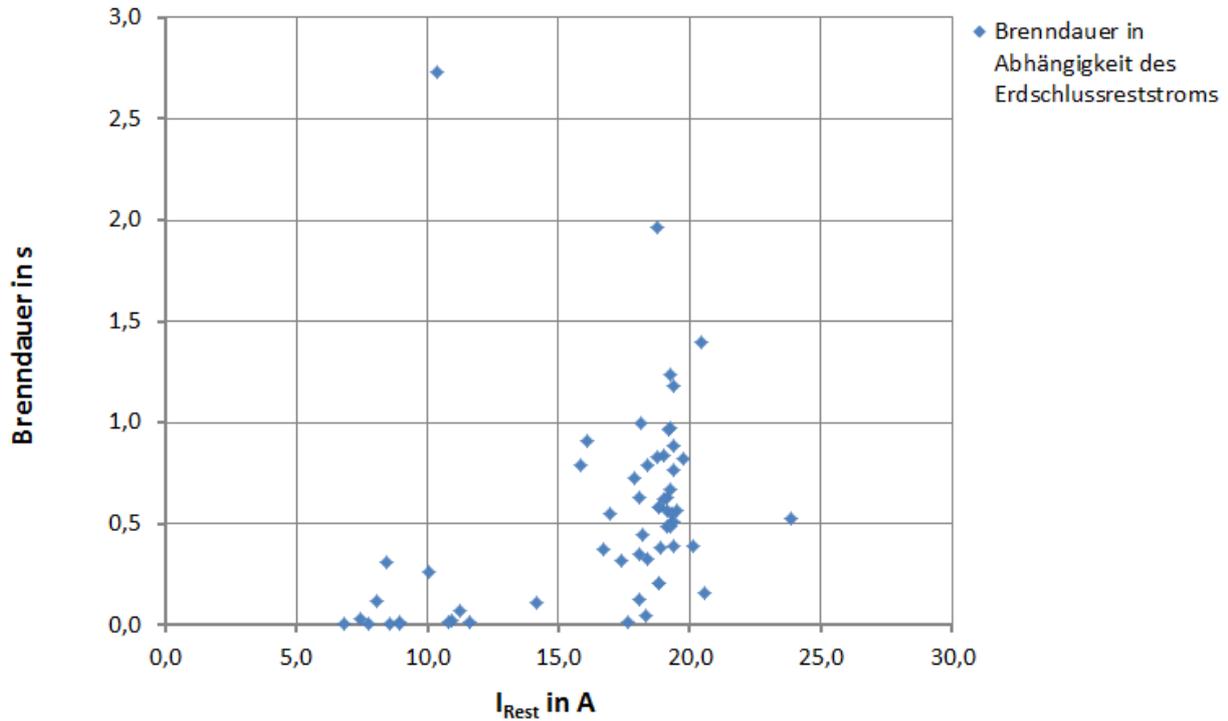


Abbildung 3.32: Auswertung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms (20 kV)

Bei der Anwendung der Gleichung 3.61 ergibt sich bei dem oben genannten durchschnittlichen Erdschlussreststrom eine mittlere Brenndauer von $\bar{t}_m = 0,048$ s. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichung (Faktor 13) ist, dass die in der „Natur“ vorkommenden Erdschlusslichtbögen sich nicht wie ein frei brennender (gezündeter) Lichtbogen verhalten. Das Physikalische Minimum der Brenndauer liegt bei ca. 1-2 Perioden (Einschwingvorgang ~ 10 ms). Eine mögliche Erweiterung der Gleichung 3.61 könnte ein Offsetwert sein. Um jedoch genaue Aussagen zu bekommen, ist in diesem Fall notwendig, von jedem auftretenden Erdschluss die Ursache und auch die Lage zu ermitteln.

3.6.3 Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit der Dämpfung

Die Abbildung 3.33 zeigt die Brenndauer als Funktion der Dämpfung. Die blau dargestellten Datensätze entstammen einem einzigen Netz mit einem kapazitiven Erdschlussstrom von ca. 200 A [45].

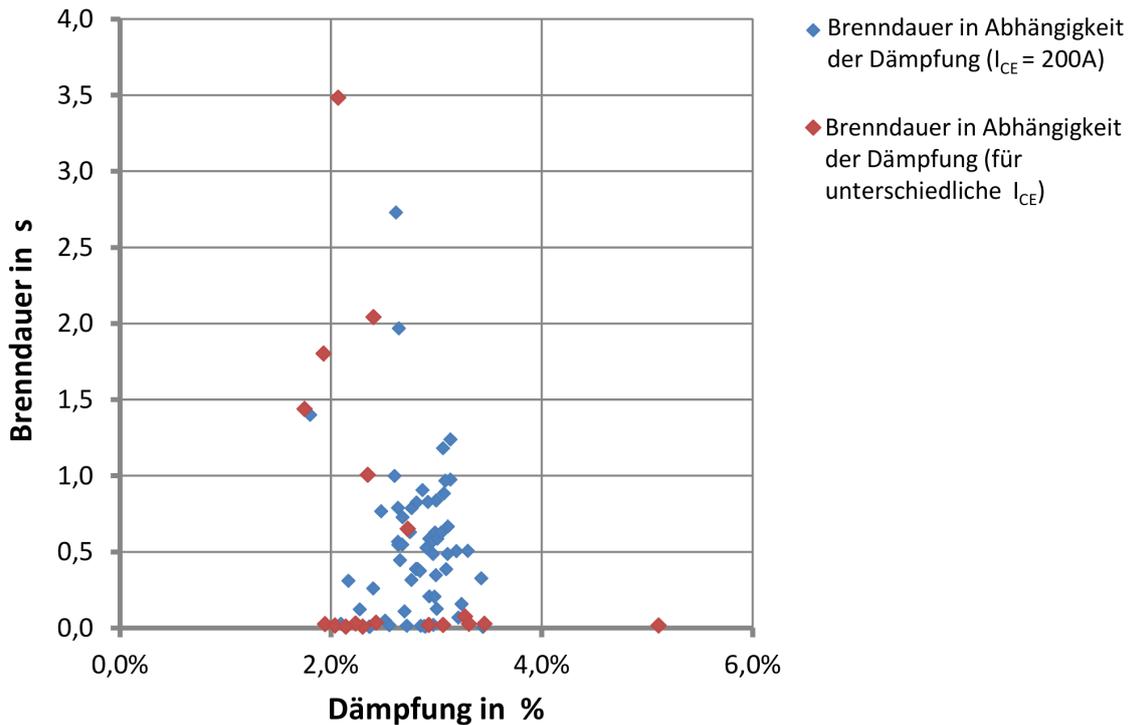


Abbildung 3.33: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Dämpfung [45]

Die rot dargestellten Datensätze entstammen unterschiedlichen Netzen mit verschiedenen Erdschlussströmen während die blauen Datensätze von ein und demselben gelöschten Netz stammen. Aufgrund der Verteilung bei den dargestellten Daten ist keine unmittelbare Korrelation zwischen der Brenndauer und der Dämpfung ersichtlich. Aus diesem Grund kann man von der Annahme ausgehen, dass die Änderung der Dämpfung innerhalb gewisser Werte keinerlei Einfluss auf die Brenndauer hat [45].

3.6.4 Auswertung der Daten hinsichtlich der Brenndauer in Abhängigkeit des THD bzw. der Oberschwingungen der betroffenen Phase vor dem Fehlereintritt

Um eine mögliche Verbindung der Brenndauer mit dem Oberschwingungsverhältnis zu ermitteln, wurden bei 75 Erdschlüssen, aus unterschiedlichen 20-kV-Netzen, die Oberschwingungsverhältnisse vor dem Erdschluss evaluiert. Zu diesem Zweck wurden der THD der Spannung sowie auch die einzelnen Oberschwingungen der Spannung ermittelt.

In der Tabelle 3.5 sind die Mittelwerte der harmonischen Oberschwingungen und des THDs der ausgewerteten 20-kV-Spannungsebene dargestellt.

Tabelle 3.5: Mittelwerte der Oberschwingungen und des THDs der ausgewerteten Erdschlüsse (20-kV)

U_3	U_5	U_7	U_9	U_{11}	THD
0,18 %	0,90 %	0,53 %	0,02 %	0,22 %	1,10 %
*Mittelwerte bezogen auf die Grundschwingung					

Die Abbildung 3.34 zeigt die Brenndauer in Abhängigkeit des THDs. Aufgrund der Verteilung der Messpunkte

konnte keine Korrelation zwischen der Brenndauer und dem THD eines Netzes gefunden werden.

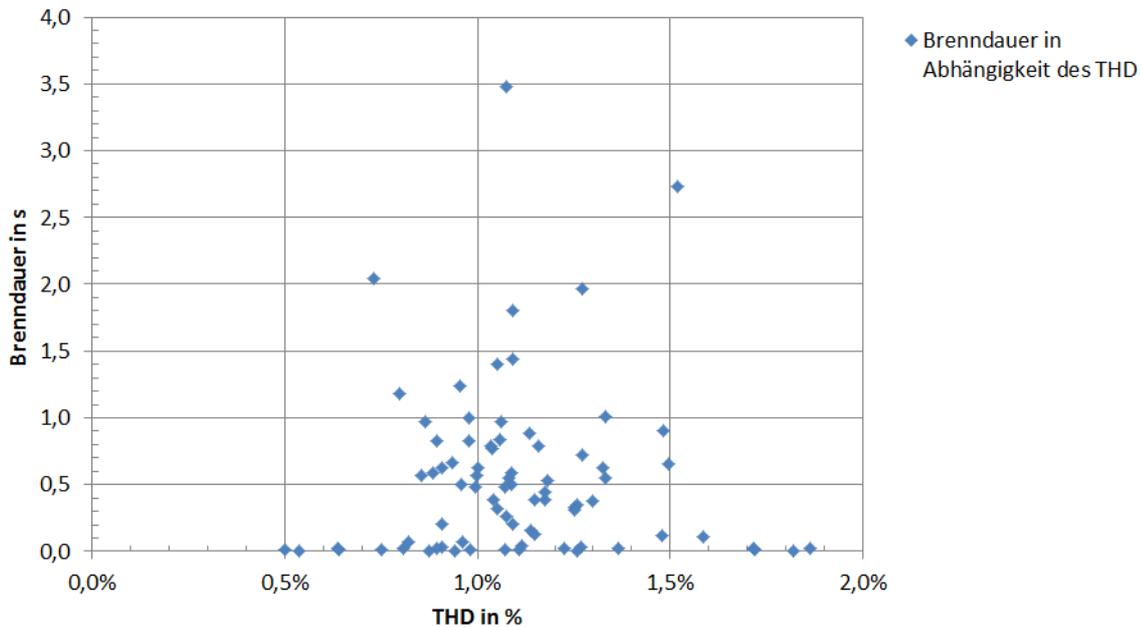


Abbildung 3.34: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des THDs

In der Abbildung 3.35 ist die Brenndauer in Abhängigkeit der einzelnen Oberschwingungen dargestellt. Es kann auch in diesem Fall keine Korrelation zwischen der Brenndauer und den einzelnen Oberschwingungen festgestellt werden. Um eine mögliche Korrelation erkennen zu können, müssten mehr Auswertungen mit unterschiedlichen Oberschwingungsanteilen desselben Netzes durchgeführt werden.

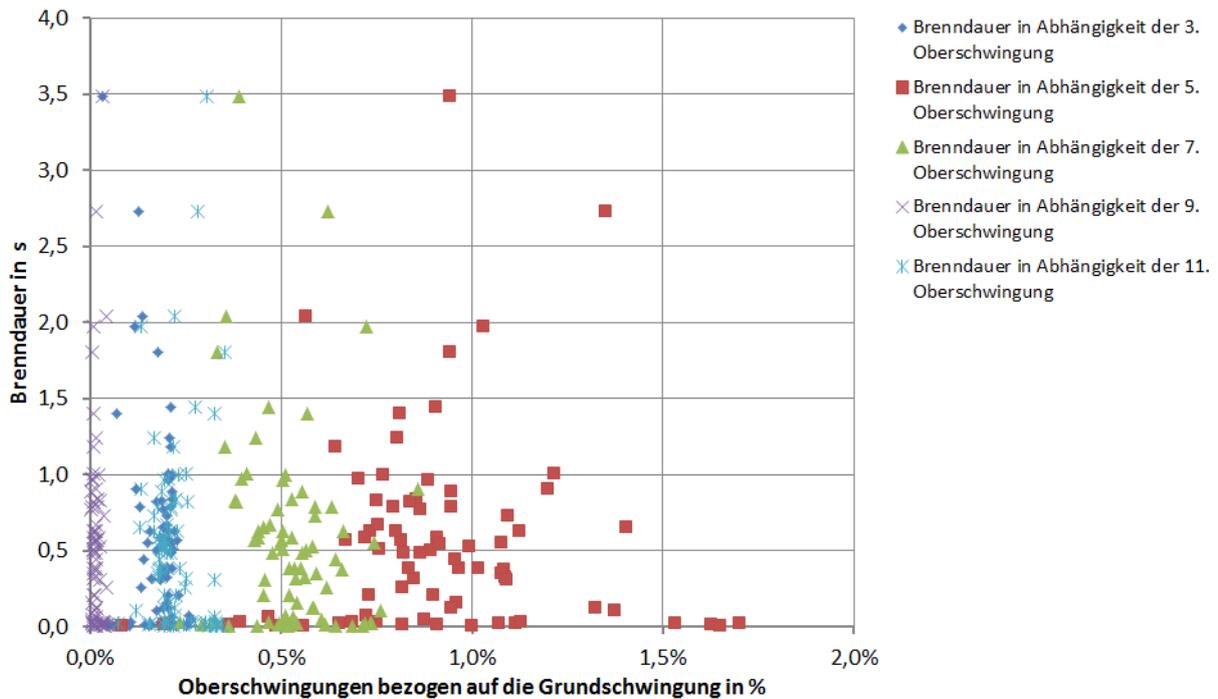


Abbildung 3.35: Brenndauer in Abhängigkeit der Oberschwingungen [45]

In der Abbildung 3.36 ist nur die 5. Oberschwungung aus Abbildung 3.35 dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist der Trend der Punktwolke. Man erkennt anhand des Bestimmtheitsmaßes R, dass die Korrelation zwischen der Brenndauer und dem Gehalt der 5. Oberschwungung sehr gering ist (0,49 %) und sich daraus keine direkte Beziehung ableiten lässt.

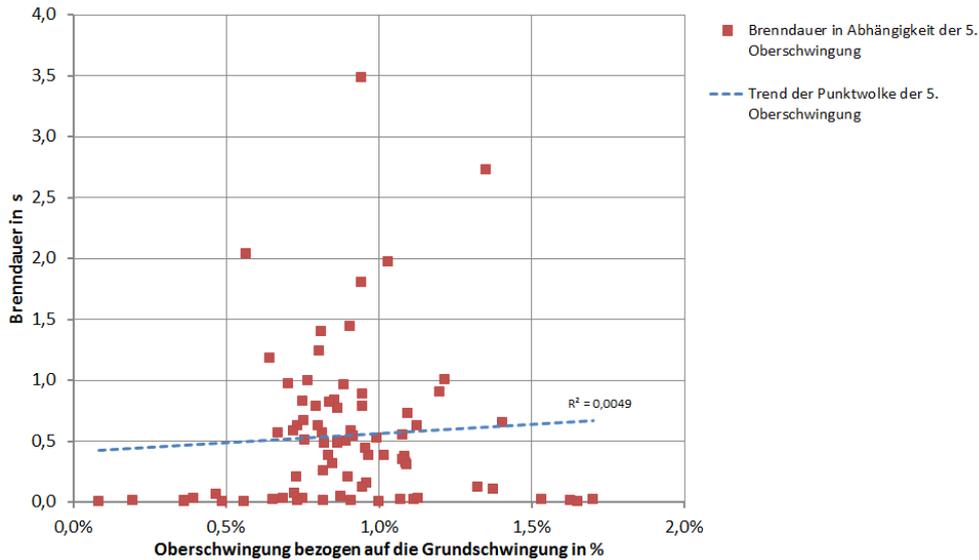


Abbildung 3.36: Brenndauer in Abhängigkeit der 5. Oberschwungung

3.6.5 Häufigkeitsverteilung der Brenndauer

In der Abbildung 3.37 ist die Häufigkeitsverteilung der ausgewerteten Erdschlüsse dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ca. 30 % der Erdschlüsse innerhalb von 0,1 s erlöschen. Des Weiteren kann der Abbildung entnommen werden, dass 90 % der Erdschlüsse innerhalb von 1,2 s verlöschen [45].

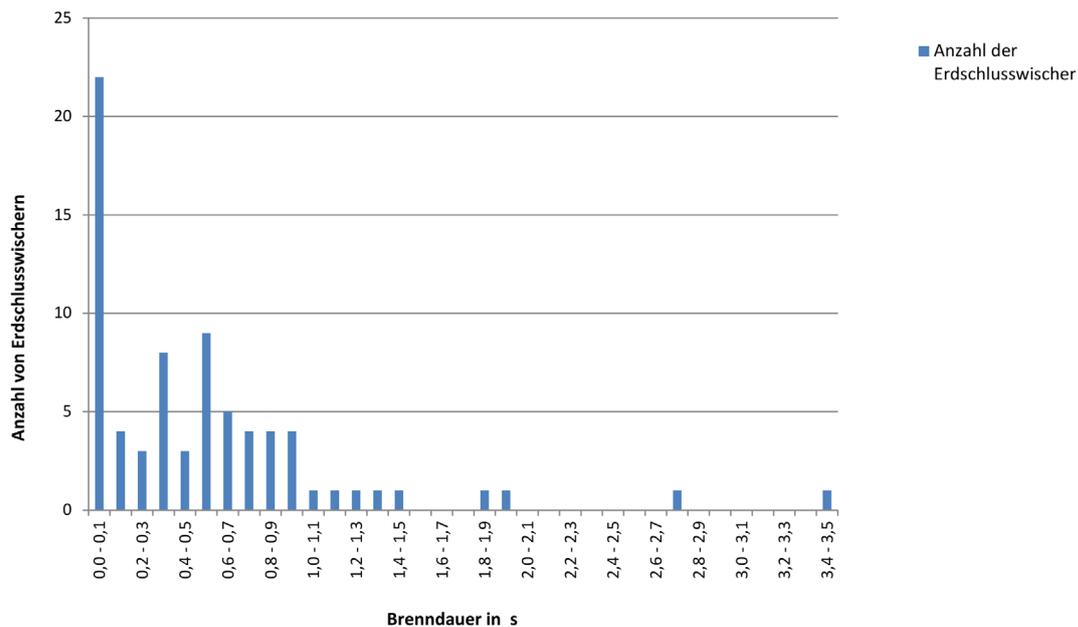


Abbildung 3.37: Häufigkeitsverteilung der Brenndauer [45]

3.7 Auswertung von Erdschlüssen in der 110-kV-Spannungsebene

Da lediglich die Daten der 110-kV-Ebene über einen Zeitraum von einem Jahr vorhanden waren, konnten die unten aufgeführten Auswertungen nur in dieser Spannungsebene ermittelt werden.

3.7.1 Häufigkeitsverteilung von Erdschlüssen über Jahr und Zeit

Um die Verteilung der Anzahl von Erdschlüssen über ein Jahr gesehen zu ermitteln, wurden alle Erdschlüsse eines Netzabschnittes ausgewertet. Zu diesem Zweck wurden ca. 150 Störschriebe eines 110-kV-Netzes über ein Jahr ausgewertet. In der Abbildung 3.38 ist die Anzahl von Erdschlüssen über ein Jahr dargestellt. Man erkennt, dass mit dem fortschreitenden Verlauf des Jahres sich die Häufigkeit von Erdschlüssen erhöht und ab Herbst wieder abnimmt.

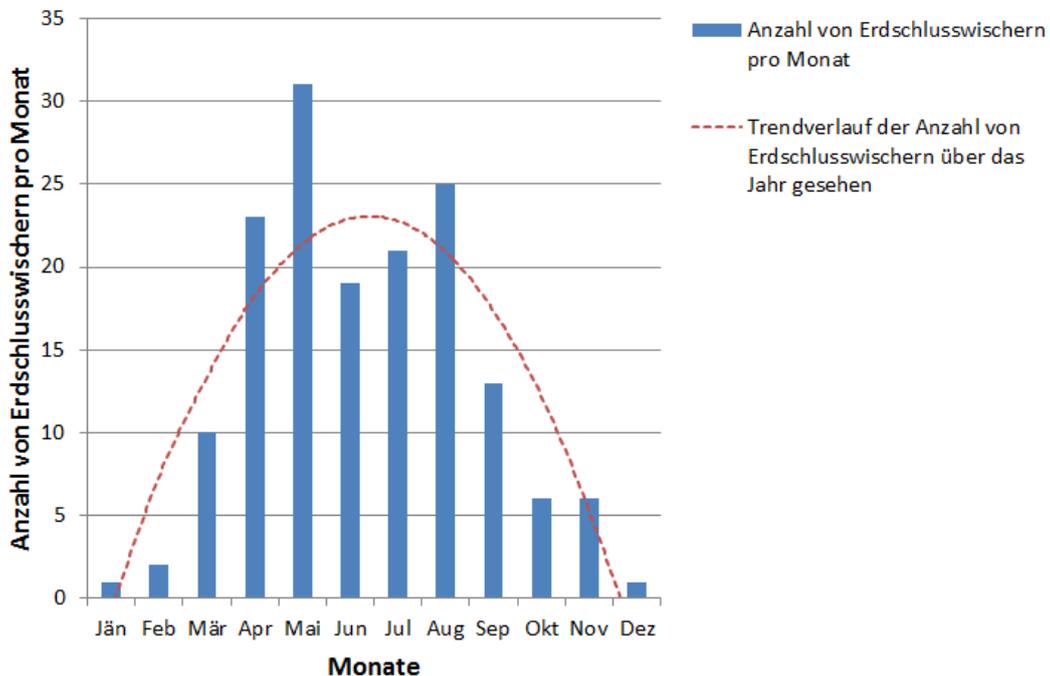


Abbildung 3.38: Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Netzes über ein Jahr

In der Abbildung 3.39 sieht man die Anzahl von Erdschlüssen eines Jahres über die Uhrzeit eines Tages dargestellt.

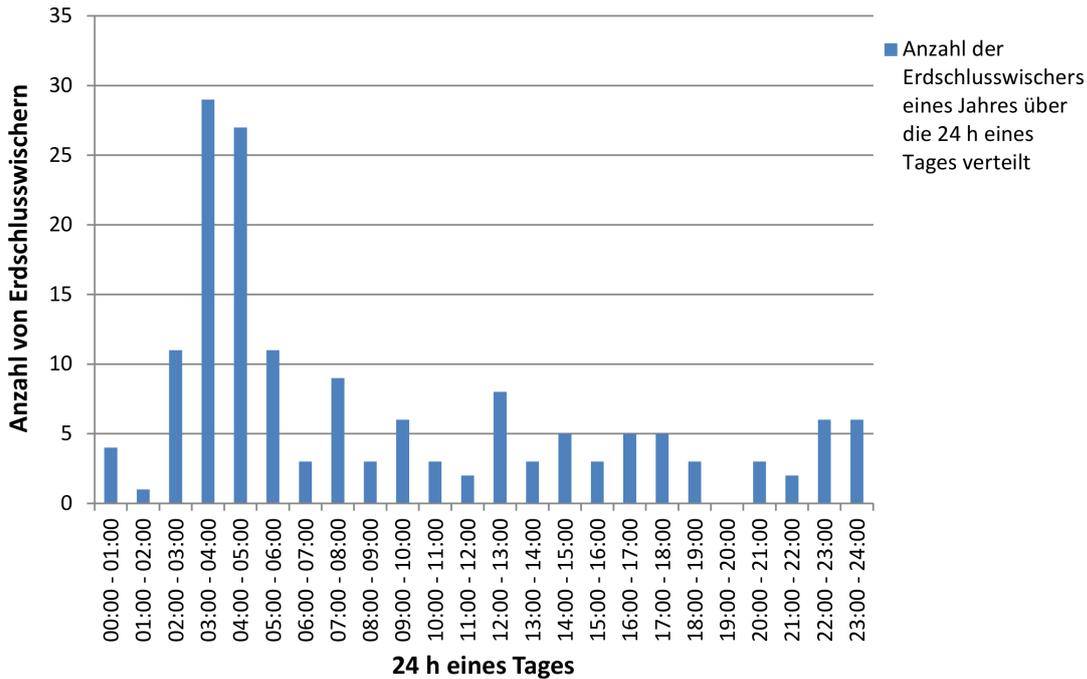


Abbildung 3.39: Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Jahres über die Uhrzeit eines Tages

Man erkennt, dass es eine erhöhte Häufigkeit von Erdschlüssen zwischen 02:00 und 06:00 Uhr gibt. Das könnte auf den Taupunkt zurückzuführen sein. In dieser Zeit finden knapp 50 % aller Erdschlüsse statt. Diese hohe Zahl von Erdschlüssen könnte auf eine Isolatorverschmutzung oder Mängel in der Isolator konstruktion zurückzuführen sein.

3.7.2 Der Verlauf der Dämpfung und der Verstimmung über das Jahr

Als letzter Punkt wurde die Änderung der Dämpfung und der Verstimmung über das Jahr untersucht. Der Netzzustand unterlag dabei Veränderungen, die nicht mehr genau eruiert werden konnten. Es wurde jeweils das Monatsmittel der Dämpfung bzw. der Verstimmung berechnet. Der so erhaltene Verlauf der Dämpfung ist ähnlich wie der Temperaturverlauf des Monatsmittels über ein Jahr. Aus diesem Grund wird der gemittelte Dämpfungsverlauf bzw. Verstimmungsverlauf über ein Jahr mit dem gemittelten Temperaturverlauf verglichen. Der mittlere Temperaturverlauf entspricht den gemittelten Temperaturen der jeweiligen Monate basierend auf den Jahren 2003 bis 2009 der Klimadaten des Landes Steiermark [33]. In der Abbildung 3.40 ist der Verlauf der mittleren Dämpfung dem Verlauf der mittleren Temperatur über ein Jahr (2010) gegenübergestellt. Die Monate Jänner und Dezember konnten aufgrund der geringen Anzahl von Störereignissen nicht für die Auswertung mit einbezogen werden. Man erkennt in der Abbildung, dass, mit gewissen Abweichungen, der Verlauf der mittleren Dämpfung über ein Jahr dem Verlauf der mittleren Temperatur über ein Jahr folgt. Die Korrelation der mittleren Dämpfung mit der mittleren Temperatur ist auf den temperaturabhängigen Erdwiderstand zurückzuführen. Die Schwankungsbreite der Dämpfung beträgt in etwa $\pm 0,25 \%$ (absoluter Wert) vom Jahresmittel.

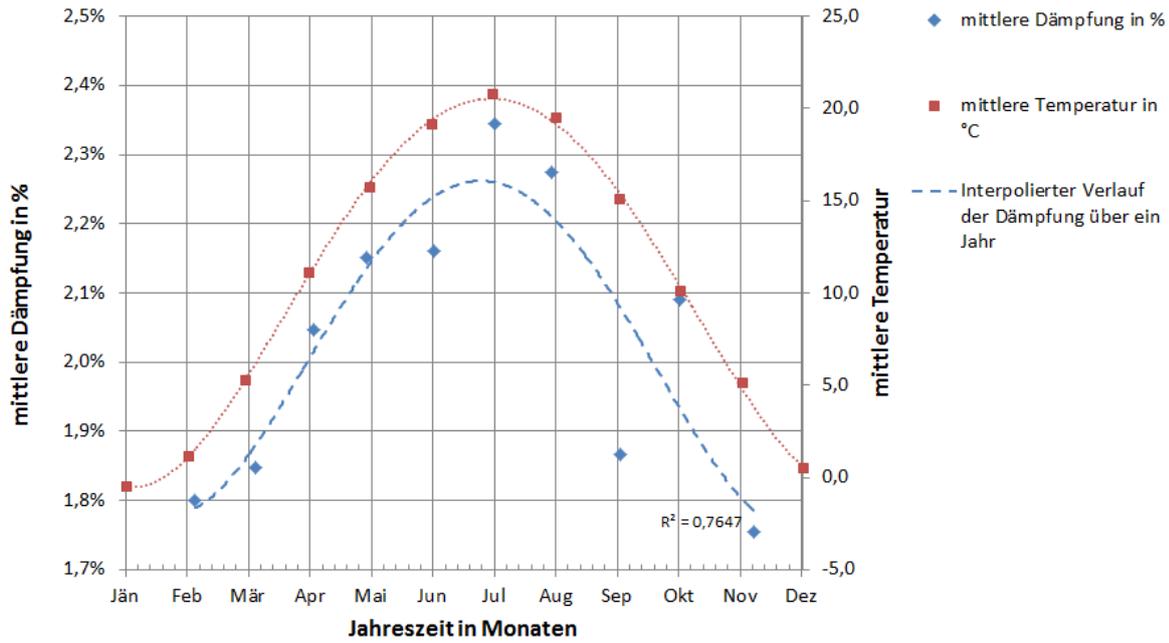


Abbildung 3.40: Darstellung des Dämpfungsverlaufes eines Netzes über ein Jahr [45]

In der Abbildung 3.41 ist die mittlere Verstimmung über ein Jahr dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich keine wesentliche Änderung der mittleren Verstimmung über ein Jahr in dem untersuchten Netz ergeben hat. Da allerdings die Schaltzustände nicht eindeutig bekannt sind, kann keine spezifische Aussage getätigt werden.

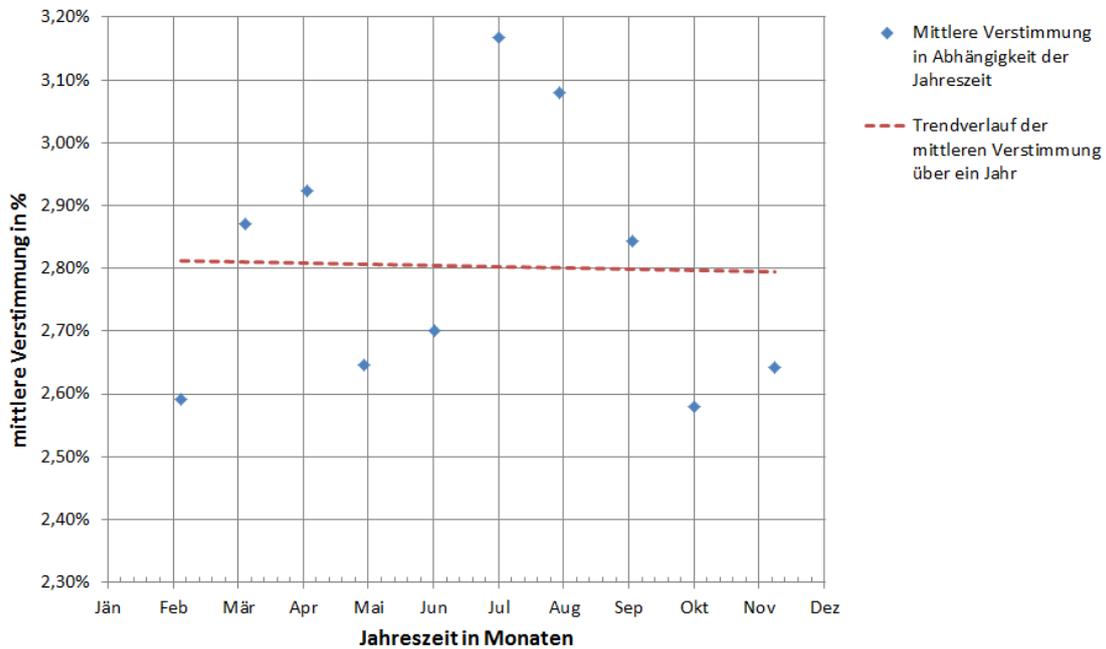


Abbildung 3.41: Darstellung des Verlaufes der Verstimmung über ein Jahr

4

DER AUSSCHWINGVORGANG

*Alles sollte so einfach wie möglich gemacht werden,
aber nicht einfacher!*

Albert Einstein (†1955)

Der Ausschwingvorgang eines Erdschlusses bietet die Möglichkeit, die folgenden netzcharakteristischen Größen, anhand des zeitlichen Verlaufs der Verlagerungsspannung $u_{NE}(t)$, zu bestimmen:

- Verstimmung der Petersenspule
- Dämpfung des Nullsystems

Zusätzlich zu diesen Größen ist es auch möglich, den tatsächlichen Augenblick des Verlöschens des Lichtbogens, anhand des zeitlichen Verlaufs der Verlagerungsspannung, zu bestimmen.

4.1 Grundlagen des Ausschwingvorgangs

Es ist aufgrund der Ergebnisse der Gleichungen 2.15 und 2.17 ersichtlich, dass die charakteristischen Größen der PI-Ersatzschaltung im Falle von Freileitungen oder Kabeln der Leitungswiderstand und die Leiter-Erde-Kapazität sind. Basierend auf Abbildung 2.7 ergibt sich für den Ausschwingvorgang ein Parallelschwingkreis entsprechend Abbildung 4.1 (die Mit- und Gegenimpedanz wird vernachlässigt) [13][14]. Der Parallelwiderstand und die Gesamtkapazität sind dabei entsprechend den Gleichungen 2.20 und 2.21 berechnet. Folgender Ansatz wird für die Differentialgleichung gewählt:

$$i_L + i_R + i_C = 0 \quad 4.1$$

$$u'' + \frac{1}{C_{ges} \cdot R_{Par}} \cdot u' + \frac{1}{3 \cdot L_P \cdot C_{ges}} \cdot u = 0 \quad 4.2$$

$$u'' + 2 \cdot \varepsilon \cdot u' + \omega_0^2 \cdot u = 0 \quad 4.3$$

Die Resonanzfrequenz und die Abklingkonstante sind dabei wie folgt definiert:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot L_P \cdot C_{ges}}} \quad 4.4$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2 \cdot C_{ges} \cdot R_{Par}} \quad 4.5$$

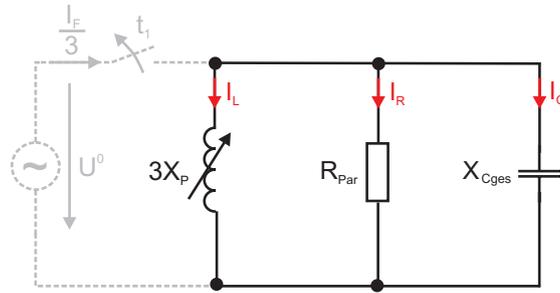


Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild des Nullsystems für den Ausschwingvorgang (Parallelschwingkreis)

Der Dämpfungsgrad und der Dämpfungsfaktor (Verlustfaktor) ergeben sich dabei wie folgt:

$$\mathcal{D} = \frac{\varepsilon}{\omega_0} = \frac{1}{2 \cdot C_{ges} \cdot R_{Par} \cdot \omega_0} = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot L_P}{C_{ges}}} \quad 4.6$$

$$\delta = 2 \cdot \mathcal{D} = X_{Cges} \cdot \frac{1}{R_{Par}} = \frac{1}{\omega_0 \sum_{i=1}^M C_{Ei}} \cdot \left(4 \cdot \sum_{i=1}^M \frac{R_{Li}}{X_{Ci}^2} + \frac{R_P}{X_P^2} \right) \quad 4.7$$

Die Eigenkreisfrequenz wird wie folgt ermittelt:

$$u(t) = C_1 \cdot e^{j\omega t} \quad 4.8$$

$$u'(t) = j \cdot \omega \cdot C_1 \cdot e^{j\omega t}$$

$$u''(t) = -\omega^2 \cdot C_1 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\omega^2 - j \cdot 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega - \omega_0^2 = 0 \quad 4.9$$

$$\omega_E = \sqrt{\omega_0^2 - \varepsilon^2} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot L_P \cdot C_{ges}} - \left(\frac{1}{2 \cdot C_{ges} \cdot R_{Par}} \right)^2} \quad 4.10$$

Da der Parallelwiderstand sehr groß ist, kann folgende Vereinfachung angenommen werden [8]:

$$\omega_E = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot L_P \cdot C_{ges}} - \underbrace{\left(\frac{1}{2 \cdot C_{ges} \cdot R_{Par}} \right)^2}_{\ll}} \approx \sqrt{\frac{1}{3 \cdot L_P \cdot C_{ges}}} \approx \omega_0 \quad 4.11$$

Die Lösung der charakteristische Gleichung der Differentialgleichung 4.3 ergibt sich wie folgt:

$$\lambda^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda + \omega_0^2 = 0 \quad 4.12$$

$$\lambda_{1/2} = -\varepsilon \pm \sqrt{\varepsilon^2 - \omega_0^2} \quad 4.13$$

$$\lambda_{1/2} = -\varepsilon \pm j \cdot \omega_E \quad 4.14$$

Daraus folgt, dass es sich bei der Lösung der charakteristischen Gleichung um ein konjugiert komplexes Eigenwertpaar handelt. Diese Lösung stimmt mit der typischen Dämpfung von 1-6% überein. In der Verbindung mit Gleichung 4.15 sieht die allgemeine Lösung der homogenen Differentialgleichung wie folgt aus:

$$\tau = \frac{1}{\omega_0 \cdot \mathcal{G}} \quad 4.15$$

$$u(t) = \left(C_1 \cdot e^{j\omega_E t} + C_2 \cdot e^{-j\omega_E t} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.16$$

Die Spannung und die Ströme werden im folgenden basierend auf der Differentialgleichung allgemein gelöst:

$$u(0) = C_1 + C_2 = 0 \rightarrow C_2 = -C_1 \quad 4.17$$

$$u(t) = \left(C_1 \cdot e^{j\omega_E t} - C_1 \cdot e^{-j\omega_E t} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.18$$

$$u(t) = j \cdot 2 \cdot C_1 \cdot \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.19$$

$$i_L = -i_R - i_C \quad 4.20$$

$$i_R(t) = \frac{u(t)}{R_{Par}} = \frac{j \cdot 2 \cdot C_1}{R_{Par}} \cdot \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.21$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} = -j \cdot \frac{2 \cdot C_{ges} \cdot C_1}{\tau} \cdot \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + j \cdot 2 \cdot C_{ges} \cdot C_1 \cdot \omega_E \cdot \cos(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.22$$

$$i_L(t) = j \cdot 2 \cdot C_1 \cdot \left(\frac{C_{ges}}{\tau} - \frac{1}{R_{Par}} \right) \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - j \cdot 2 \cdot C_{ges} \cdot C_1 \cdot \omega_E \cdot \cos(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.23$$

Die Konstante C_1 soll anhand der Anfangsbedingung ermittelt werden. Um die Anfangsbedingungen bestimmen zu können, muss definiert werden, zu welchem Zeitpunkt der Lichtbogen verlöscht, da ansonsten alle möglichen Anfangszustände zu berücksichtigen sind. Aufgrund der Tatsache, dass der Lichtbogen im Stromnulldurchgang verlöscht und dieser, bei einer Verstimmung von $v = 0$, zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs stattfindet, da es sich um einen rein ohmschen Strom handelt, kommt man auf folgende Anfangsbedingungen:

$$u^0(t) = \widehat{U}^0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \rightarrow \varphi = 0 \quad t \leq 0 \quad 4.24$$

$$u^0(0) = 0 \quad 4.25$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u^0(t) dt \Rightarrow i_L(t) = -\frac{\widehat{U}^0}{\omega L_p} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad t \leq 0 \quad 4.26$$

$$i_L(0) = -\frac{\widehat{U}^0}{\omega \cdot L_p} \quad t \leq 0 \quad 4.27$$

$$i_L(t) = -j \cdot 2 \cdot C_{ges} \cdot C_1 \cdot \omega_E \quad t = 0 \quad 4.28$$

$$j \cdot 2 \cdot C_{ges} \cdot C_1 \cdot \omega_E = \frac{\widehat{U}^0}{\omega \cdot L_p} \quad t = 0 \quad 4.29$$

$$C_1 = \frac{\hat{U}^0}{j \cdot 2 \cdot C_{ges} \cdot \omega \cdot \omega_E \cdot L_P} \quad 4.30$$

$$u^0(t) = \frac{\hat{U}^0}{\underbrace{\omega \cdot \omega_E \cdot L_P \cdot C_E}_A} \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0 \quad 4.31$$

In der Abbildung 4.2 ist als Lösung der Differentialgleichung der Ausschwingvorgang des Parallelschwingkreises, bzw. des Nullsystems schematisch dargestellt.

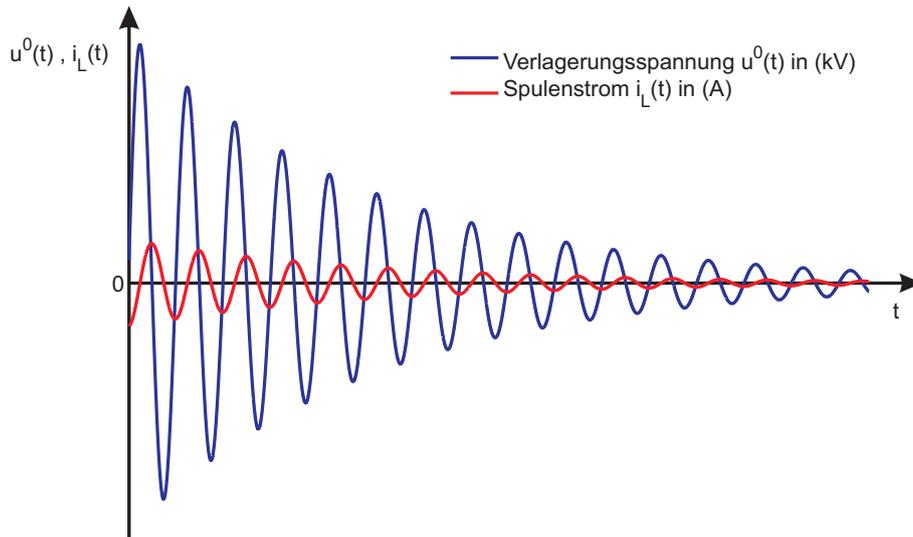


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Ausschwingvorgangs eines Parallelschwingkreises

Aus dem Ausschwingvorgang kann sowohl die Dämpfung δ als auch die Verstimmung ν bestimmt werden.

4.2 Ermitteln der Verstimmung und Dämpfung

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Verstimmung und der Dämpfung ausgeführt. Zuerst wird auf Verfahren im Zeitbereich eingegangen und anschließend auf ein Verfahren im Frequenzbereich.

4.2.1 Ermitteln der Verstimmung und der Dämpfung im Zeitbereich

Die Dämpfung des Nullsystems kann anhand der Gleichungen 4.32 - 4.34 aus dem Ausschwingvorgang ermittelt werden.

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(U_{NE}(t_1)) - \ln(U_{NE}(t_2))} \quad 4.32$$

$$\mathcal{G} = \frac{1}{\omega_0 \tau} \quad 4.33$$

$$\delta = 2 \cdot \vartheta \tag{4.34}$$

Anstelle des Effektivwertes der Verlagerungsspannung in Gleichung 4.32 kann auch jeweils der Spitzenwert einer Periode des zeitlichen Verlaufs der Verlagerungsspannung während des Ausschwingvorgangs gewählt werden. Die Verstimmung kann ermittelt werden, indem die Momentanfrequenz der ersten Perioden des Ausschwingvorgangs ermittelt wird [8][40]. Ergänzend zu diesem Verfahren kann die Momentanfrequenz auch mit Hilfe der DFT ermittelt werden und in weiterer Folge auf die Verstimmung zurückgerechnet werden.

4.2.2 Ermitteln der Verstimmung und der Dämpfung im Frequenzbereich

Anhand folgender Gleichungen der kontinuierlichen Fouriertransformation kann das Frequenzspektrum $F(j\omega)$ bzw. das Amplitudenspektrum $A(\omega)$ der gedämpften Sinusschwingung ermittelt werden [21]:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \tag{4.35}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \tag{4.36}$$

$$U_{pu} = \frac{U^0}{U_B} \tag{4.37}$$

$$f(t) = U_{pu} \cdot \sin(\omega_E \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sigma(t) \text{ p.u.} \quad U_{pu} = 1 \text{ p.u.} \tag{4.38}$$

$$F(j\omega) = F\{f(t)\} = U_{pu} \cdot \frac{\omega_0}{(\alpha + j \cdot \omega)^2 + \omega_0^2} \tag{4.39}$$

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \tag{4.40}$$

$$A(\omega) = |F(j\omega)| \tag{4.41}$$

Da $f(t)$ die Gleichung 4.36 erfüllt, existiert die Fouriertransformierte. Die Gleichung 4.39 stellt die Fouriertransformierte dar. Das Amplitudenspektrum dieser gedämpften Sinusschwingung ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

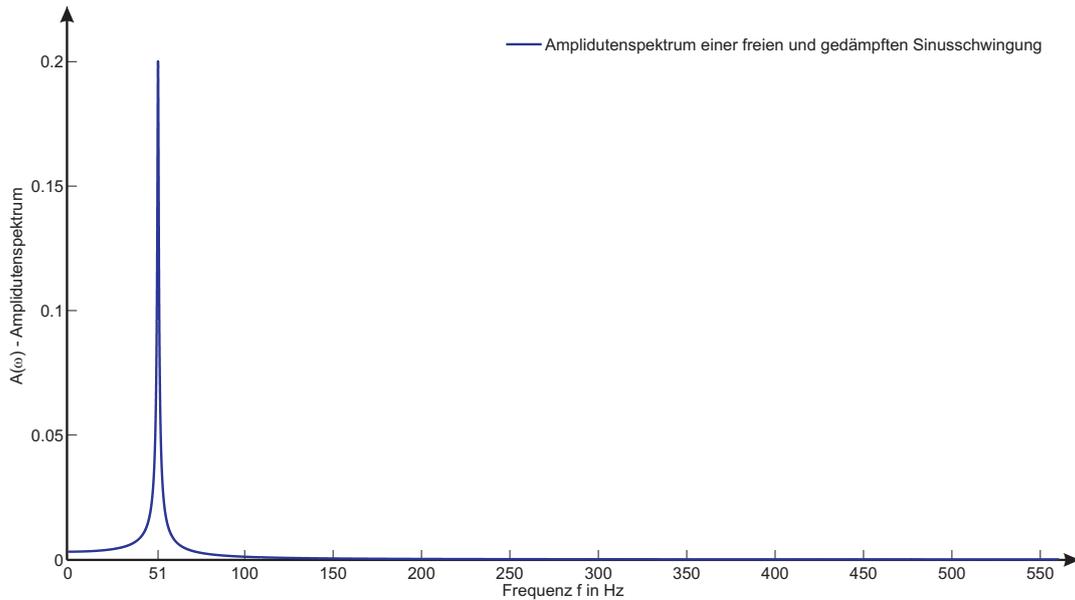


Abbildung 4.3: Amplitudenspektrum einer freien und gedämpften Sinusschwingung ($f_E=51$ Hz, $U_{pu}=1$)

Man erkennt einen Peak bei der Kreiseigenfrequenz ω_E bzw. Kreisresonanzfrequenz ω_0 . Es sind keine weiteren harmonischen Oberschwingungen vorhanden. Anhand der Fouriertransformierten $F(\omega)$ kann auch τ abgelesen werden. Für eine gedämpfte Sinusschwingung ergeben sich dabei folgende mathematische Überlegungen:

$$|F(j\omega)| = U_{pu} \cdot \frac{\omega_0}{\alpha \cdot |\alpha + 2 \cdot j \cdot \omega_0|} = U_{pu} \cdot \frac{\omega_0}{\alpha \cdot \sqrt{\alpha^2 + 4 \cdot j \cdot \omega_0^2}} \quad 4.42$$

$$|F(j\omega)|_{\omega=\omega_0} \stackrel{\alpha=\frac{1}{\tau}}{=} U_{pu} \cdot \frac{\omega_0 \tau^2}{\sqrt{1 + 4 \cdot \tau^2 \omega_0^2}} \rightarrow \approx U_{pu} \cdot \frac{\tau}{2} \quad 4.43$$

wenn $\gg 1$

$$|F(j\omega)|_{\omega=\omega_0} \approx U_{pu} \cdot \frac{\tau}{2} \quad 4.44$$

Mit Hilfe der Gleichungen 4.33 und 4.34 kann anhand der Gleichung 4.44 die Dämpfung δ aus der Fouriertransformation des Ausschwingvorgangs ermittelt werden.

4.2.3 Gegenüberstellung der Verfahren anhand eines Beispiels aus der Praxis

Aus den Aufzeichnungen von Erdschlüssen wurde ein Ausschwingvorgang exemplarische herausgenommen. Man erkennt in der Abbildung 4.4 den Ausschwingvorgang aus den Aufzeichnungen sowie den auf diesen Daten basierenden simulierten Ausschwingvorgang entsprechend der Gleichung 4.45

$$u^0(t) = A \cdot \sin(\omega_E t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0 \quad 4.45$$

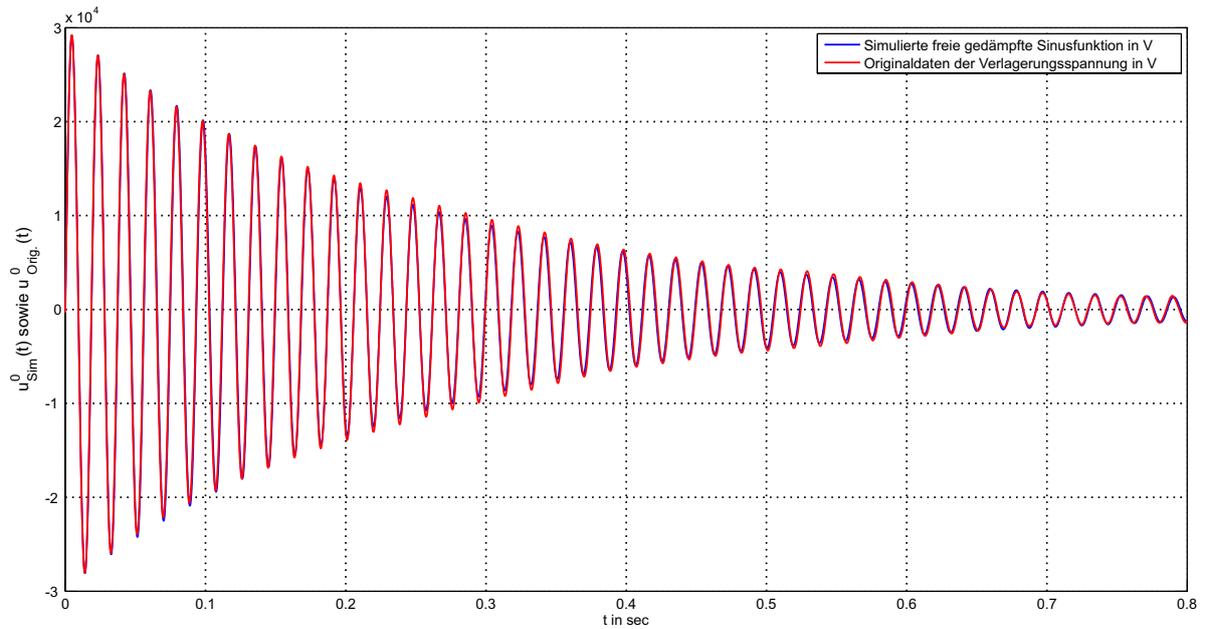


Abbildung 4.4: Darstellung von Originaldaten und simulierten Daten eines Ausschwingvorgangs

Es ist in der Abbildung ersichtlich, dass die gedämpfte Sinusfunktion mit den Originaldaten fast identisch ist, woraus hervorgeht, dass die Parameter für die Simulation hinreichend genau abgeschätzt wurden. Folgender Parametersatz wurde verwendet:

$$A = 29665 \text{ V} \tag{4.46}$$

$$\tau = 0,254 \text{ s} \tag{4.47}$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot 53.454 \frac{1}{\text{s}} \tag{4.48}$$

Um nun die Kreisfrequenz des Nullsystems zu bestimmen, wird eine DFT über den Ausschwingvorgang getätigt. Da es sich um einen zeitlich abklingenden Vorgang handelt, kommt das Rechteckfenster für die Fensterung zur Anwendung.

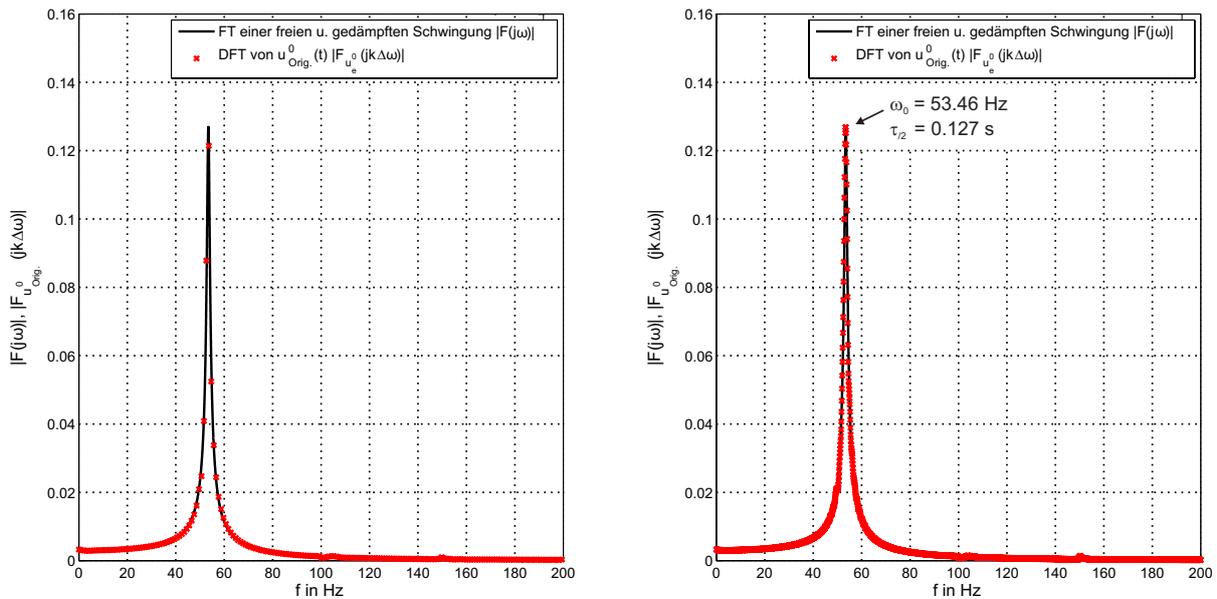


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der FT einer gedämpften und freien Schwingung mit der DFT der Originaldaten

In der Abbildung 4.5 ist die Fouriertransformierte einer freien und gedämpften Schwingung mit den zuvor bestimmten Parametern der diskreten Fourier Transformation von den Originaldaten gegenübergestellt. Die Darstellungen sind auf die Amplitude von 1 normiert. Das rechte Bild unterscheidet sich vom linken in der zusätzlichen Anwendung von Zeropadding bei den Originaldaten. Durch Zeropadding findet eine Interpolation der DFT statt. Es ist ersichtlich, dass aufgrund der geringen Auflösung der DFT (was hervorgerufen ist durch die beschränkte Signallänge des Ausschwingvorgangs) der Spitzenwert des Amplitudenspektrums der Originaldaten deutlich von dem der FT abweicht. Mit Hilfe von Zeropadding wird die Auflösung erhöht (durch Interpolation), und aufgrund dessen ergibt sich bei der DFT dasselbe Bild wie bei der FT (wenn auch diskret).

Anhand der Position und anhand der Höhe des Peaks kann die Kreiseigenfrequenz ω und die Zeitkonstante τ bestimmt werden. Die Dämpfung und die Verstimmung kann nun im Zeitbereich und im Frequenzbereich erfolgen.

Werte im Zeitbereich (16 Perioden zwischen den zwei Zeitpunkten):

Tabelle 4.1: Spitzenwerte einzelner Perioden abgelesen aus dem zeitlichen Verlauf der Originaldaten des Ausschwingvorgangs

t in s	$u_{Orig.}^0(t)$ in V
0,09788 s	20050 V
0,3981 s	6394 V

Damit ergeben sich folgende Werte für die Dämpfung und die Verstimmung:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 16}{0,3981 - 0,09788} = 2 \cdot \pi \cdot 53,294 \text{ s}^{-1} \tag{4.49}$$

$$\tau = \frac{0,3981 - 0,09788}{\ln(20050) - \ln(6394)} = 0,263 \tag{4.50}$$

$$\delta = \frac{2}{\omega_0 \cdot \tau} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 53,294 \cdot 0,263} = 0,02271 \rightarrow \delta = 2,27 \% \quad 4.51$$

$$\nu = \frac{\omega_0^2}{\omega_N^2} - 1 = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 53,294)^2}{(2 \cdot \pi \cdot 50)^2} - 1 = 0,1361 \rightarrow \nu = 13,61 \% \quad 4.52$$

Werte im Frequenzbereich:

Tabelle 4.2: Werte, abgelesen aus dem Frequenzbereich der Originaldaten (entsprechend der Abbildung 4.5) des Ausschwingvorgangs

τ in s	ω_0 in s^{-1}
0,254	$53,46 \cdot 2 \cdot \pi$

Damit ergeben sich folgende Werte für die Dämpfung und die Verstimmung:

$$\delta = \frac{2}{\omega_0 \cdot \tau} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 53,46 \cdot 0,254} = 0,023442 \rightarrow \delta = 2,34 \% \quad 4.53$$

$$\nu = \frac{\omega_0^2}{\omega_N^2} - 1 = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 53,46)^2}{(2 \cdot \pi \cdot 50)^2} - 1 = 0,1432 \rightarrow \nu = 14,32 \% \quad 4.54$$

Um zu beurteilen, ob die Bestimmung der Dämpfung und der Verstimmung im Zeitbereich oder im Frequenzbereich genauere Werte liefert werden die Werte für die Resonanzfrequenz und τ mit den abgeschätzten Werten (Gleichungen 4.46 - 4.48) verglichen. Wie aus der Abbildung 4.4 ersichtlich ist, stimmen die abgeschätzten Werte sehr gut mit den realen Werten des Ausschwingvorgangs des gewählten Erdschlusses überein. Ein direkter Vergleich der Resonanzfrequenz und τ ergibt, dass die Werte die im Frequenzbereich ermittelt wurden, die exakteren Ergebnisse liefert.

4.3 Exakte Bestimmung des Zeitpunkts der Verlöschung eines Erdschlusses

Damit die Brenndauer eines Erdschlusslichtbogens ermittelt werden kann, ist eine exakte Erfassung des Erdschlusses vonnöten. Im folgenden Absatz wird eine Möglichkeit vorgestellt, das Erdschlussende zu erfassen.

4.3.1 Stand der Technik

Der aktuelle Stand der Technik erfasst das Erdschlussende mit einer Grenzwertunterschreitung der Verlagerungsspannung, üblicherweise 10 - 30 % der Nennspannung. Daraus ergibt sich eine Zeitdifferenz zwischen dem tatsächlichen Moment des Verlöschens der Erdschlusslichtbogens und dem erfassten Zeitpunkt. Diese Differenz, welche von Erdschluss zu Erdschluss differiert, muss für eine Erfassung der Brenndauer vermieden werden. Die Abbildung 4.6 stellt den Stand der Technik dar. Die Zeitmarke t_A markiert den Beginn des Erdschlusses und die Zeitmarke t_E markiert den Zeitpunkt des Verlöschens des Erdschlusses.

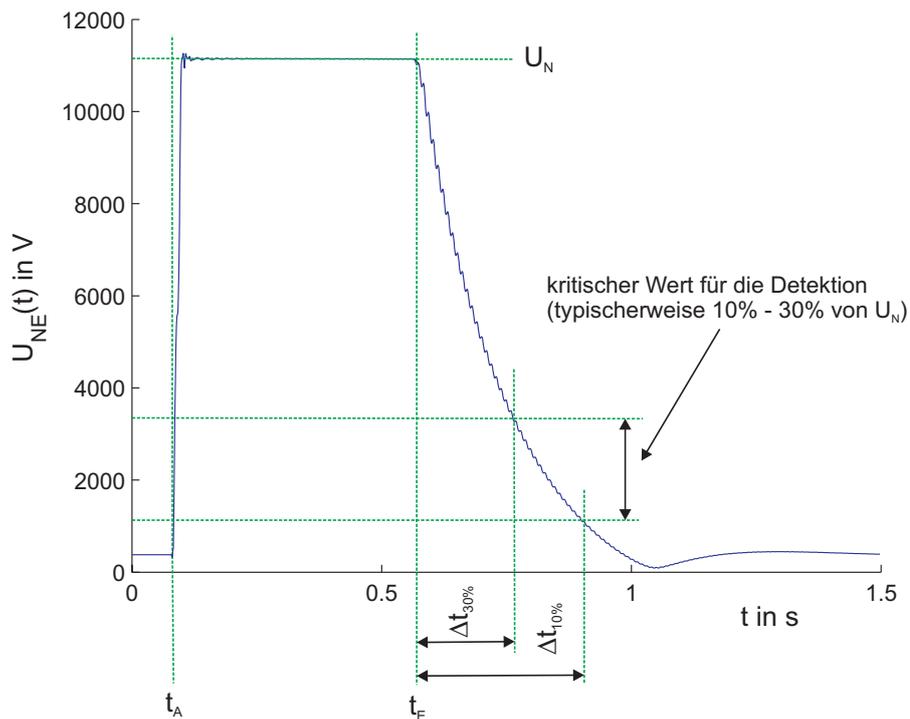


Abbildung 4.6: Stand der Technik in der Erdschlussende-Erfassung [10]

Die Differenzzeiten $\Delta t_{30\%}$ und $\Delta t_{10\%}$ geben die Zeitdifferenz zwischen dem tatsächlichen Moment des Verlöschens und dem Zeitpunkt der Grenzwert-Unterschreitung bei 30 % bzw. 10 % der Nennspannung an.

4.3.2 Detektion des Erdschlussendes - Theorie

Während eines Erdschlusses ist aufgrund der von außen aufgeprägten Spannung des Mitsystems die Frequenz der Schwingung gleich der Netzfrequenz. In dem Moment des Verlöschens verschwindet die von außen aufgeprägte Spannung bzw. Frequenz und das Nullsystem beginnt mit der Kreiseigenfrequenz (Parallelwiderstand berücksichtigt) bzw. vereinfacht mit der Kreisresonanzfrequenz (Parallelwiderstand nicht berücksichtigt) zu schwingen. Die Differenz zwischen Kreiseigen- und Kreisresonanzfrequenz ergibt sich aufgrund des Parallelwiderstands im Schwingkreis des Ausschwingvorgangs. Die Größe des Parallelwiderstands fließt in die Abklingkonstante ein. Da diese sehr klein wird, kann vereinfacht (entsprechend Gleichung 4.11) mit der Kreisresonanzfrequenz gerechnet werden. Weil nun das Nullsystem nicht vollständig frei von äußeren Einflüssen ist (Unsymmetrie, Beeinflussung durch parallel geführte Leiter), kommt es zu einer Überlagerung der Verlagerungsspannung mit anderen Spannungen. Dadurch kommt es zu einer Schwebung die am Ende des Ausschwingvorgangs sichtbar wird. Aufgrund der unterschiedlichen Amplitudengrößen dominiert zu Beginn des Ausschwingvorgangs die Kreisresonanzfrequenz das Schwingungsverhalten und zum Ende hin die Frequenz der äußeren Einflüsse. Die Abbildung 4.7 zeigt die Schwebung am Ende eines realen Ausschwingvorgangs. Es handelt sich dabei um denselben Ausschwingvorgang wie in Abbildung 4.4 (zeitliche Fortsetzung).

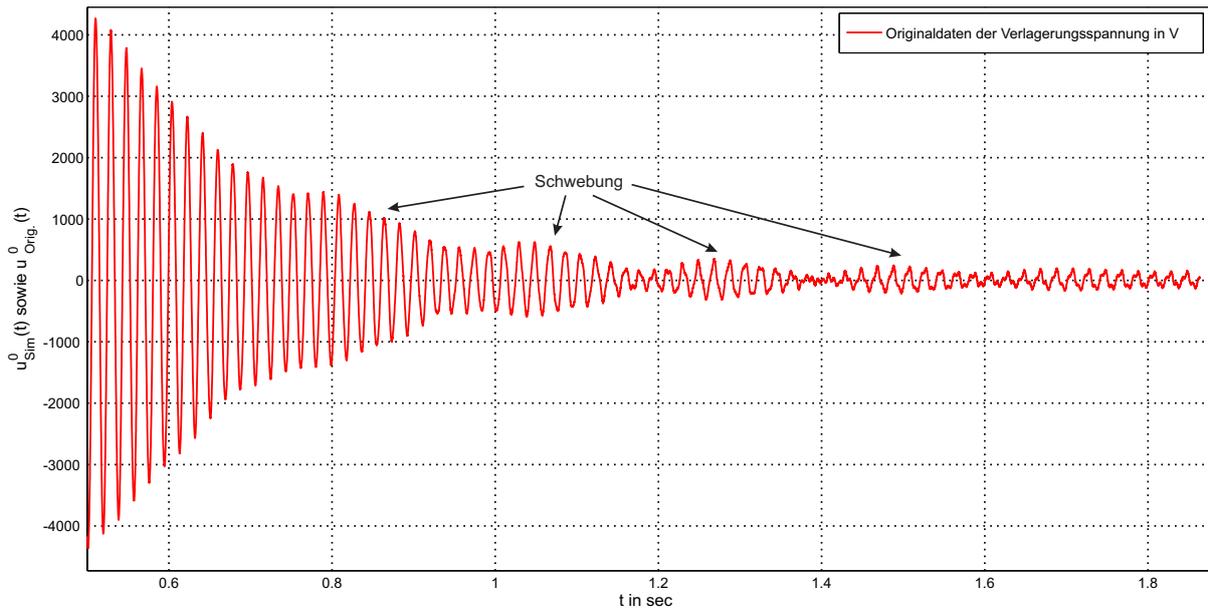


Abbildung 4.7: Darstellung der Schwebung eines Ausschwingvorgangs

Folgende Gleichungen beschreiben den Verlauf der Verlagerungsspannung mit einer Schwebung:

$$u^0(t) = \hat{U}^0 \cdot \sin((\omega_N + \Delta\omega) \cdot t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \hat{U}^0_{extern} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \quad 4.55$$

Die Abbildung 4.8 zeigt schematisch den Verlauf eines Ausschwingvorgangs (Verlagerungsspannung) mit den jeweiligen Abschnitten der Momentankreisfrequenz $\omega(t)$.

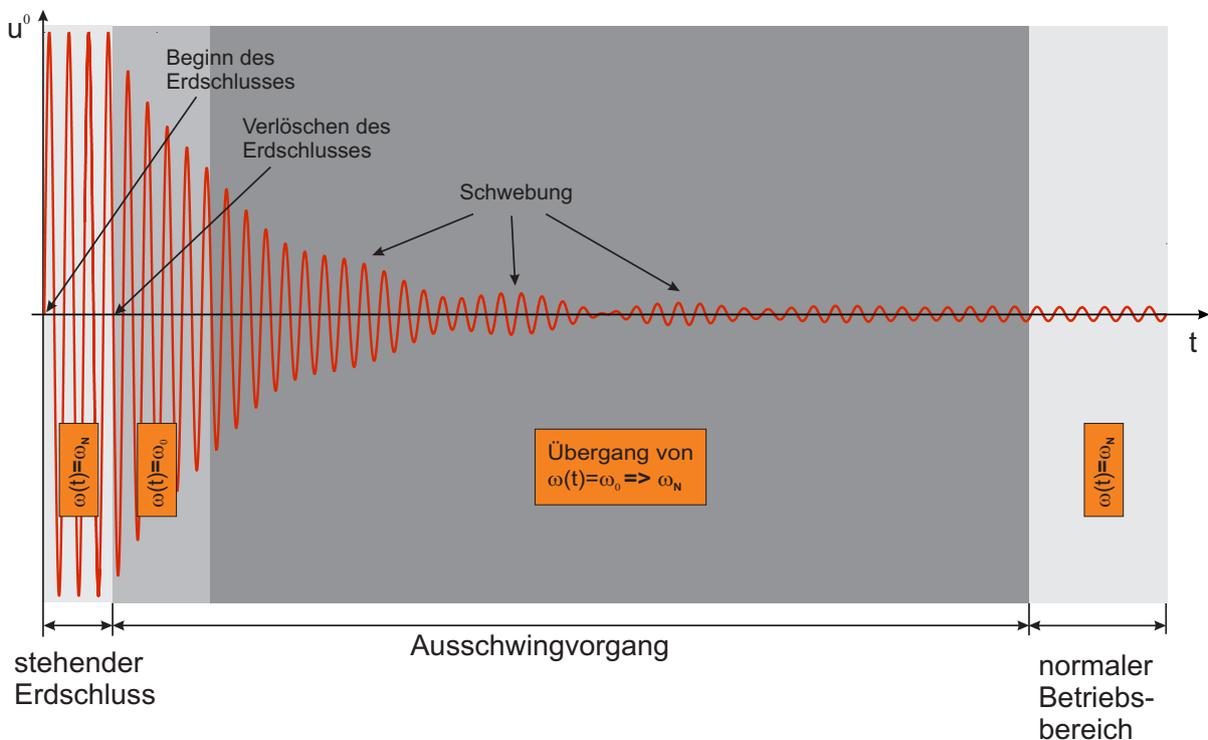
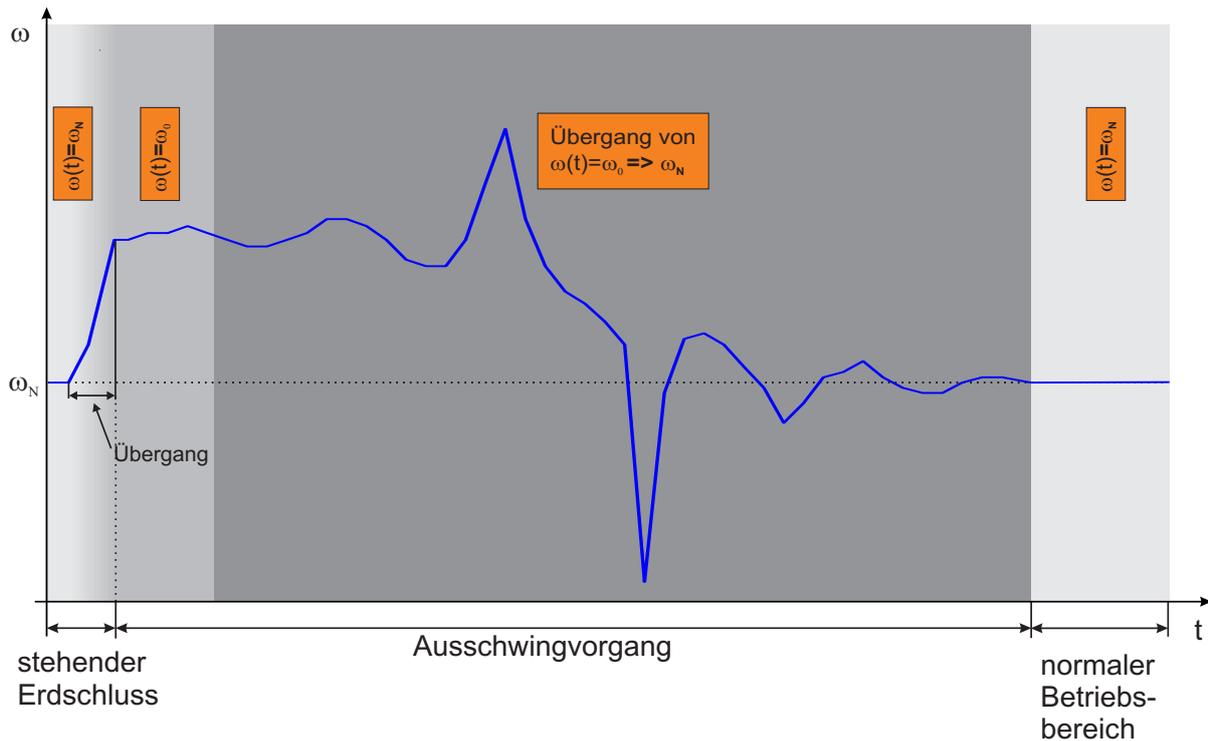


Abbildung 4.8: Schematischer Verlauf eines Ausschwingvorgangs mit den jeweiligen Abschnitten der Momentanfrequenz

Wird der Verlauf der Momentankreisfrequenz $\omega(t)$ dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:


 Abbildung 4.9: Schematischer Verlauf der Momentankreisfrequenz $\omega(t)$

Aus der Abbildung 4.9 ist ersichtlich, dass zum Zeitpunkte des Verlöschens des Erdschlusses ein Sprung in der Momentanfrequenz stattfindet. Je nachdem ob das Netz über- oder unterkompensiert ist, bewegt sich der Sprung nach oben oder unten. Um das Erdschlussende automatisch zu detektieren, kann nach diesem Sprung in der Momentanfrequenz gesucht werden. Einzige Schwachstelle des Verfahrens ist eine Verstimmung von 0 %, da in diesem Fall kein Sprung der Momentanfrequenz stattfindet. Da jedoch die gelöschten Netze üblicherweise überkompensiert betrieben werden, hat dieser Fall nur eine theoretische Bedeutung.

4.3.3 Detektion des Erdschlussendes - Ein praktisches Beispiel

Um das Erdschlussende zu detektieren, muss die Momentanfrequenz ermittelt werden. Zu diesem Zweck bestimmt man die Momentanfrequenz mittels eines Raumzeigers. Der Raumzeiger kann dabei über eine DFT ermittelt werden. Solange die Frequenz konstant ist, bleibt der Raumzeiger stehen. Bei einer Änderung der Frequenz des zu analysierenden Signals bewegt sich der Raumzeiger. Aufgrund des zurückgelegten Winkels des Raumzeigers kann die neue Momentanfrequenz ermittelt werden. Mit der Gleichung 4.56 [41] lässt sich die neue Momentanfrequenz berechnen.

$$\omega(t) = \omega_N - \Delta\varphi(t) \frac{\omega_N}{2 \cdot \pi} \quad 4.56$$

In der Abbildung 4.10 ist schematisch das Verhalten des Raumzeigers dargestellt.

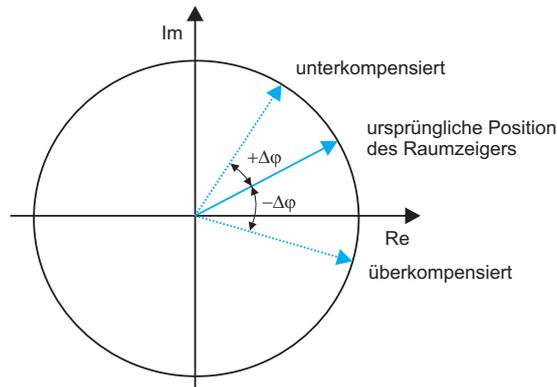


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung über das Verhalten des Raumzeigers

Das tatsächliche Erdschlussende kann dann anhand der sprunghaften Änderung der Momentanfrequenz detektiert werden [23]. In den Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 ist das Ergebnis so einer automatischen Auswertung dargestellt. Anhand der Änderung der Momentanfrequenz wurde das Erdschlussende ermittelt. Die ermittelte Erdschlussdauer beträgt ca. 1,9 s.

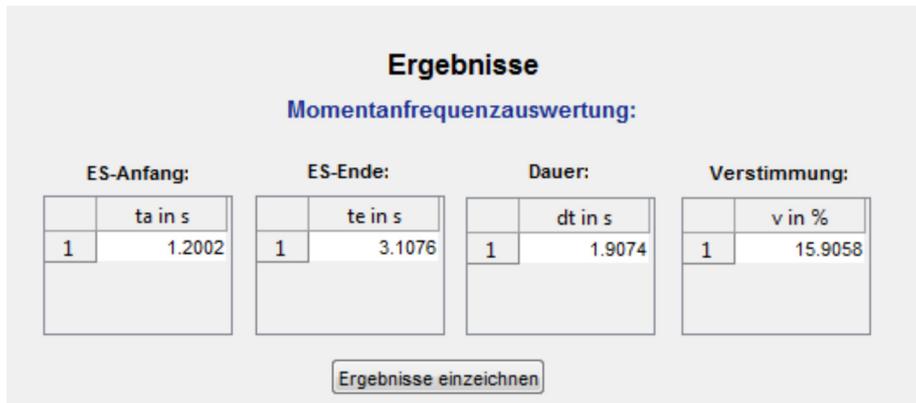


Abbildung 4.11: Darstellung des Ergebnisses einer automatischen Erdschluss-Auswertung

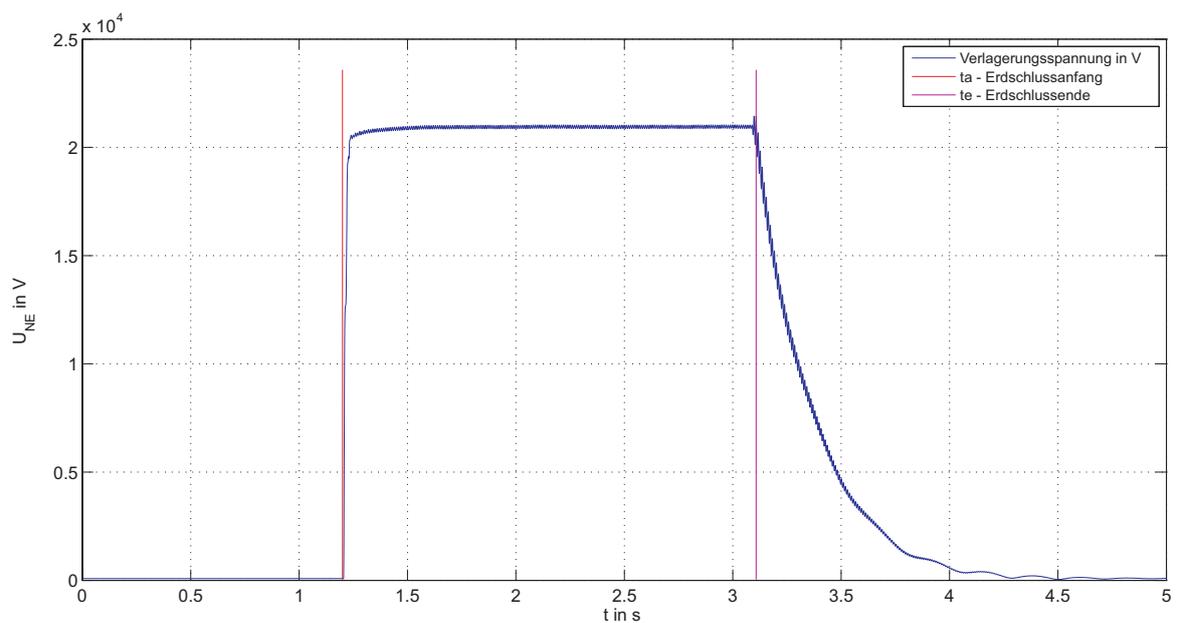


Abbildung 4.12: Darstellung der Verlagerungsspannung während eines Erdschluss-Vorgangs

Mathematik ist die exakteste Wissenschaft, und ihre Schlussfolgerungen sind absolut beweisbar. Das ist jedoch nur deshalb so, weil die Mathematik nicht versucht, absolute Schlussfolgerungen zu ziehen.

Charles Proteus Steinmetz (†1923)

Das Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf ausgewerteten historischen und selbst erhobenen Daten, einen mathematischen Zusammenhang sowohl zwischen den diversen Löschgrenzen verschiedener Autoren als auch zwischen den mittleren Brenndauern von Erdschlusslichtbögen zu finden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in dieser Arbeit historische Daten von 1931 bis heute aufbereitet und neu interpretiert. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse der maßgeblichen Veröffentlichungen erfasst und chronologisch dargestellt. Einen besonderen Bestandteil der historischen Veröffentlichungen bilden die Normen ÖVE-B1/1976 sowie DIN VDE 0228-2:1987, die den aktuellen normativen Grenzwert des Erdschlussreststroms für kompensierte 20-kV-Netze enthalten. Um den Einfluss dieser normativen Grenzwerte auf heutige kompensierte Netze zu erklären, wird deren Auswirkung auf die Abstimmungs-Erfordernisse dargelegt. Auch Überlegungen hinsichtlich Oberschwingungen und Fehlerort sind in der Arbeit enthalten, wobei hier noch einmal erwähnt sei, dass die ÖVE-B1/1976 für den normativen Grenzwert des Erdschlussreststroms nur die Grundwelle in Betracht zieht. Für die Neu-Interpretation der historischen Daten bezüglich der Löschgrenze von kompensierten 20-kV-Netzen werden die damaligen Ergebnisse in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom dargestellt, der Einfluss der wiederkehrenden Spannung berücksichtigt und in die Überlegungen für eine neue, vom Erdschlussstrom abhängige, Löschgrenze einbezogen. Die Gleichung 5.1 bzw. Abbildung 5.1 stellen das Ergebnis der Überlegungen für die experimentell erhärtete Löschgrenze dar.

$$I_G(I_{CE}) = \begin{cases} 60\text{A} & \text{für } I_{CE} \leq 240\text{ A} \\ 30\text{A} + 25 \cdot \frac{I_{CE}}{200} & \text{für } I_{CE} > 240\text{ A} \end{cases} \quad 5.1$$

Bei der Abschätzung des Erdschluss-Reststromes mit 10 % vom kapazitiven ungelöschten Erdschlussstrom würde die Löschgrenze grundsätzlich immer eingehalten werden (siehe Gleichung 5.2).

$$I_{Rest}(I_{CE}) \leq \frac{I_{CE}}{10} \quad 5.2$$

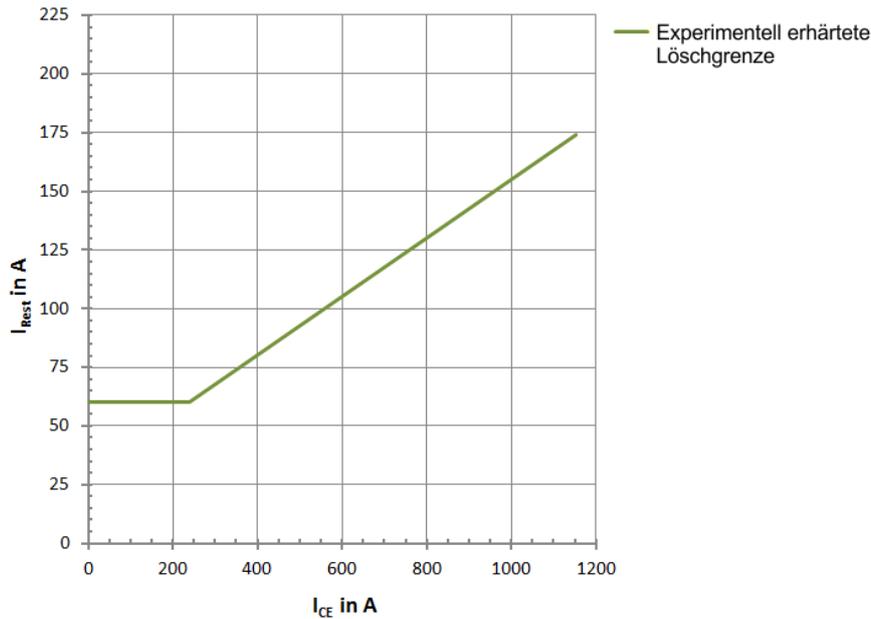


Abbildung 5.1: Experimentell erhärtete Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze

Für die Neu-Interpretation der historischen Daten bezüglich der Brenndauer von Erdschlüssen in kompensierten 20-kV-Netzen werden die Abhängigkeiten derselben hinsichtlich Erdschlussreststrom und Netzgröße untersucht. Es können die experimentell erhobenen Abhängigkeiten der Brenndauer von frei brennenden Erdschlusslichtbögen bezüglich Erdschlussreststrom und Netzgröße entsprechend Gleichung 5.3 angegeben werden.

$$t_{M(I_{CE}, I_{Rest})} \approx 0,02 \cdot e^{\frac{9,2 \cdot I_{Rest}}{I_{CE}}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \quad 5.3$$

Durch das Umformen der zuvor angeführten Gleichung können die experimentell erhobenen Abhängigkeiten der Brenndauer auch unabhängig vom Erdschlussreststrom und vom kapazitiven Erdschlussstrom durch die Verstimmung und Dämpfung () ausgedrückt werden (Gleichungen und 5.4 sowie Abbildung 5.2):

$$t_{M(v, \delta)} \approx 0,02 \cdot e^{9,2 \cdot \sqrt{v^2 + \delta^2}} \text{ in s für } I_{Rest} < I_G \quad 5.4$$

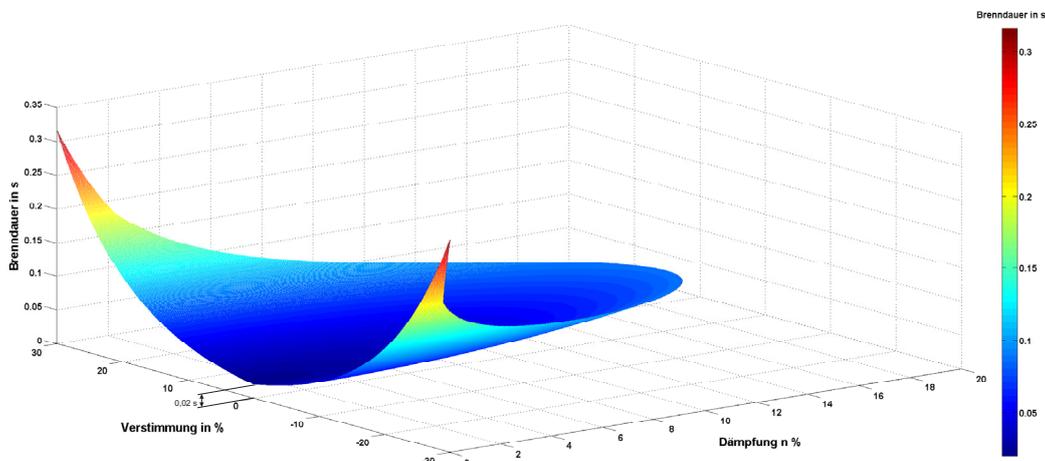


Abbildung 5.2: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung eines Netzes

Die Auswertung aktueller Erdschlüsse hinsichtlich der Abhängigkeit der Löschgrenze vom Erdschlussreststrom ergibt aufgrund der geringen Datenbasis keine qualitative Aussage. Dasselbe gilt für die Auswertung hinsichtlich des Einflusses von Oberwellen. Hinsichtlich der Häufigkeit von Erdschlüssen kann aufgrund der Daten des 110-kV-Netzes gezeigt werden, dass die meisten Erdschlüsse zwischen 2:00 und 6:00 auftreten, was vermutlich auf den Taupunkt zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.3).

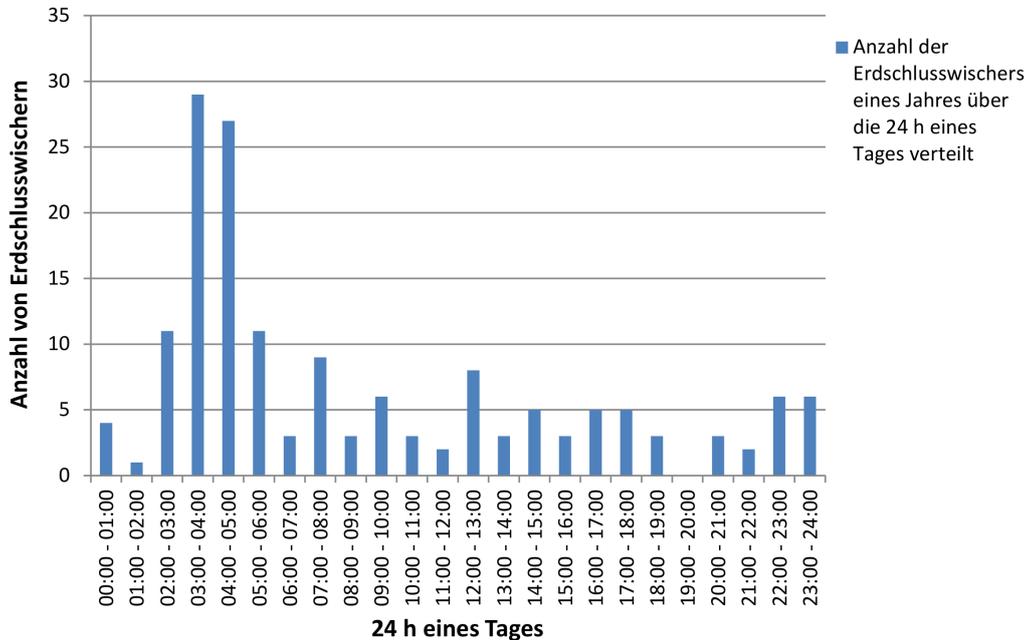


Abbildung 5.3: Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Jahres über die Uhrzeit eines Tages

Des Weiteren kann bei der Auswertung der Daten auch eine Veränderung der Dämpfung über das Jahr, aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Erdwiderstandes, dargestellt werden (siehe Abbildung 5.4).

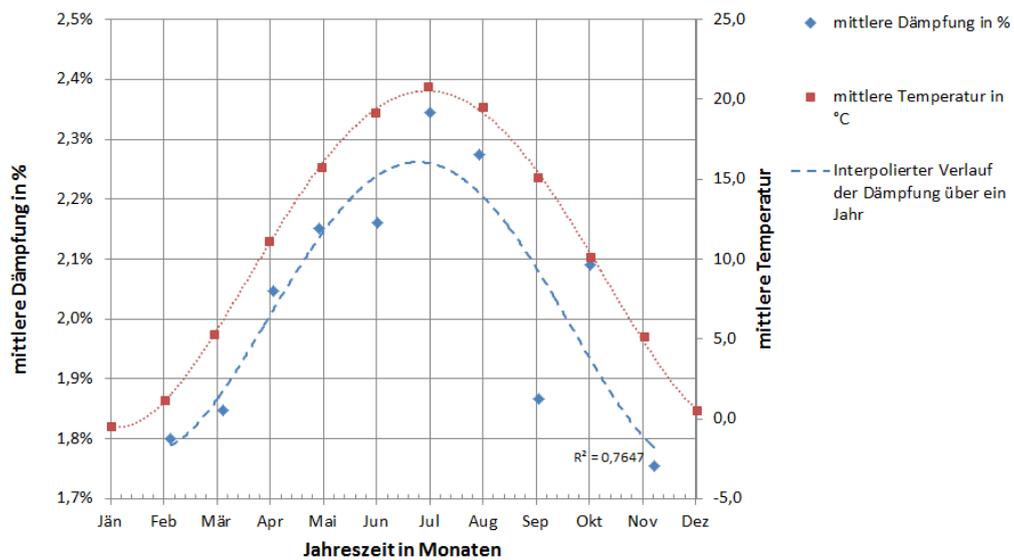


Abbildung 5.4: Darstellung des Dämpfungsverlaufes eines Netzes über ein Jahr

Des Weiteren wird ein neues Verfahren zur automatisierten Auswertung von Erdschlüssen vorgestellt, das die Verstimmung und Dämpfung anhand des Ausschwingverhaltens im Frequenzbereich ermittelt. Für die automatisierte Auswertung von Erdschlüssen ist des Weiteren die exakte Erfassung des Verlöschzeitpunktes notwendig. Für diese exakte Erfassung wird ein neues Verfahren in dieser Arbeit vorgestellt, das, basierend auf der Momentanfrequenz der Verlagerungsspannung, den exakten Zeitpunkt des Verlöschens ermittelt.

Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.

Albert Einstein (†1955)

Um die gefundenen Zusammenhänge mit weiteren Daten zu untermauern ist es notwendig, gezielt Versuche oder alternativ dazu eine großflächige Erhebung von Erdschlussdaten mit exakt definierten Randbedingungen durchzuführen. Sowohl eine Versuchsreihe oder auch eine großflächige Erhebung sollten die gefundenen Zusammenhänge aus der Praxis zwischen der Löschgrenze bzw. der Brenndauer und dem kapazitiven Erdschlussstrom sowie des Erdschlussreststroms bestätigen. Da Versuchsreihen aufwändig sind, soll hier an dieser Stelle auf ein Konzept für eine großflächige Erhebung von Erdschlussdaten eingegangen werden.

Um einen möglichst präzisen Einblick in den Zusammenhang zwischen Löschgrenze bzw. der Brenndauer und dem kapazitiven Erdschlussstrom sowie dem Erdschlussreststrom zu erhalten, müssen folgende Daten erfasst werden:

- Kapazitiver Erdschlussstrom
- Fehlerverlauf zur Ermittlung von Dämpfung, Verstimmung und Dauer
- Ursache des Fehlers (wenn möglich)
- Lage der Fehlerstelle
- Nullimpedanzen
- Oberschwingungssituation
- Nennspannung

Um nun qualitative Aussagen aus der großflächigen Erhebung zu erhalten, ist es notwendig die Netze nicht nur optimal abgestimmt zu betreiben, sondern mit einer Verstimmung, die einen Erdschlussreststrom bis zur neuen Löschgrenze ermöglicht. Die so über einen großen Zeitraum gewonnen Daten sollten die Bestätigung für die in dieser Arbeit beschriebenen Zusammenhänge liefern.

Bei einer Versuchsreihe kann zusätzlich zu den beschriebenen Parametern der Oberschwingungsgehalt im Erdschlussreststrom ermittelt werden.



LITERATURVERZEICHNIS

- [1] W. Petersen, *Protection of alternating-electric-current systems*, United States Patent Office, Patent Nr. 1.537.371, 12. Mai 1925
- [2] ÖVE/ÖNORM E 8383, *Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV*, Ausgabe 2000-03-01
- [3] C. Obkircher, *Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze*, Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen, 2008
- [4] G. Achleitner, *Earth Fault Distance Protection, Dissertation*, Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen, 2008
- [5] L. Fickert et al., *110-kV-Kabel / -Freileitung, Eine technische Gegenüberstellung*, Verlag der Technischen Universität Graz, 2. überarbeitete Auflage, 2005
- [6] G. Herold, *Elektrische Energieversorgung III*, J. Schlembach Fachverlag, 2002
- [7] ÖVE-B1/1976, *Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV*, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 1976
- [8] E. Fuchs, L. Fickert und C. Obkircher, *Auswertung von Erdschlusswischern in gelöschten Netzen*, E&I 10.2009, Springer Verlag
- [9] L. Fickert und C. Obkircher, *Verfahren zum Nachstellen einer Löschspule*, Patent, AT504506 - 2008-06-15
- [10] E. Fuchs et al., *Detektion des Erdschlussendes*, Fachtagungsbeitrag, FNN/ETG Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 - Ulm
- [11] DIN VDE 0228 Teil 2, *Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen*, vde-verlag gmbh, Dezember 1987
- [12] H. Happoldt und D. Oeding, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 5. völlig neubearbeitete Auflage, 1978
- [13] J. Schlabbach, *Sternpunktbehandlung - Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze Band 15*, VDE VERLAG GMBH Berlin-Offenbach und VWEW Energieverlag GmbH, 2002
- [14] J. Schlabbach, *Elektroenergieversorgung*, VDE VERLAG GMBH Berlin-Offenbach, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2003
- [15] L. Fickert, *Elektrische Energiesysteme 1*, Technische Universität Graz, Vorlesungsskriptum, 2008
- [16] MathWorks™, *Matlab/Simulink™ Hilfe*, Version: R2009, August 2009
- [17] V. Crasten, *Elektrische Energieversorgung I*, Springer Verlag, 2. überarbeitete Auflage, 2007
- [18] P. Schwetz, „*Ausgleichsströme beim Erdschluß im gelöschten Netz*“, Elektrizitätswirtschaft Jg. 79 (1980), Heft 22
- [19] J. Böcker, *Grundlagen der Elektrotechnik Teil B*, Universität Paderborn, Beiblätter zur Vorlesung, 2006
- [20] A. von Weiss, *Allgemeine Elektrotechnik Band II*, Friedr. Vieweg + Sohn Braunschweig, 5. vollständig neubearbeitete Auflage, 1972
- [21] L. Papula, *Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2*, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 10. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2009

- [22] A. V. Oppenheimer u. R. W. Schäfer, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 3. Auflage, 1999
- [23] E. Fuchs et al., *New ways in determining the earth fault duration*, PQ2010, Estland, 2010
- [24] E. Schrüfer, *Elektrische Messtechnik - Messung elektrischer und nicht elektrischer Größen*, Carl Hanser Verlag München, 9. aktualisierte Auflage, 2007
- [25] T. Butz, *Fouriertransformation für Fußgänger*, B. G. Teubner Verlag, 5. durchgesehene Auflage, 2007
- [26] P. Schwarz, *Ausgleichsströme beim Erdschluss im gelöschten Netz*, Springer-Verlag, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 79 (1980)
- [27] G. Meyer, *Die Brenndauer von Erdschluß-Lichtbögen in gelöschten Netzen*, ETZ Bd. 52 (1931)
- [28] H. Roser, *Die technischen Probleme der Drehstrom-Fernübertragung mit 400 kV*, ETZ Bd. 69 (1948)
- [29] W. V. Mangoldt, *Gedanken zur Sternpunktbehandlung bei 380 kV-Drehstromübertragung*, ETZ Bd. 71 (1950)
- [30] M. Erich und H. Heinze, *Löschung von Erdschlußlichtbögen in Mittelspannungsnetzen*, ETZ-A Bd. 84 (1963)
- [31] F. Geise, *Erdkurzschluss, Einfach- und Doppelerdschluss in Mittelspannungsnetzen*, ETZ-A, Bd. 75 (1954)
- [32] K. H. Koch, *Versuche in kompensierten Mittelspannungsnetzen zur Ermittlung der Brenndauer von Erdschlußlichtbögen bei unterschiedlichen Oberschwingungsgehalt im Reststrom*, FGH, 1981
- [33] http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10232095_7954241/ac36ab64/Graz-Universitaet.pdf (21.02.2011), Quelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Graz
- [34] O. Mayer, *Die wiederkehrende Spannung nach einphasigen Erdschlüssen in Leitungsnetzen*, Elektrotechnik Band 4, 1950
- [35] J. Poll, *Löschung von Erdschlußlichtbögen*, Elektrizitätswirtschaft Jg. 83, Heft 7, 1984
- [36] DIN VDE 0845-6-2 Entwurf, *Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen - Teil 2: Beeinflussung durch Drehstromanlagen*, Entwurf Februar 2010
- [37] S. Höpfer und P. Schegner, *Beitrag zur Beurteilung der Löschung von Erdschlusslichtbögen unter besonderer Berücksichtigung der Harmonischen*, ETG Kongress 2007
- [38] S. Höpfer, *Untersuchung von Einflüssen auf den Erdschlusslichtbogen*, STE 2009
- [39] L. Papula, *Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3*, Vieweg+Teubner, 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2011
- [40] E. Fuchs, *Auswertung von Erdschlusswischern*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2008
- [41] H. Renner, *Netztechnische Analyse zur Beurteilung der Spannungsqualität*, Technische Universität Graz, Habil.-Sch., 2002
- [42] Österreichs E-Energie, *Power Quality*, Fachtagung, Österreichs E-Energie, Graz, 2011
- [43] E. Fuchs et. al., *Die Löschgrenze - Eine Neuinterpretation*, Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen - Konferenz, STE 2011, Erfurt, 2011
- [44] E. Fuchs, L. Fickert, *The self-extinguishing current Limit and the arc-burning time of compensated 20-kV-power grids*, PQ2012, Tartu - Estland, 2012
- [45] E. Fuchs, S. Gebhard, L. Fickert, *Löschverhalten von Erdschlusslichtbögen in erdschlusskompensierten Netzen*, Österreichs Energie, Oktober 2012

- [46] L. Fickert, „*Ausgewählte Kapitel Elektroenergiesysteme*“, Vorlesung TU-Graz, 2008-2012

II

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1:	Originale Darstellung aus dem Patent von Waldemar Petersen	18
Abbildung 2.2:	Vereinfachtes Prinzipschaltbild eines gelöschten Netzes	19
Abbildung 2.3:	Spannungsdreieck vor und während eines Erdschlusses (stationär)	20
Abbildung 2.4:	Verlauf eines Erdschlusses	22
Abbildung 2.5:	Ansatz für die Ermittlung der Dämpfung in einem gelöschten Netz im Nullsystem	24
Abbildung 2.6:	Vereinfachter Ansatz für die Ermittlung der Dämpfung und Resonanzfrequenz im Nullsystem eines gelöschten Netzes	25
Abbildung 2.7:	Ersatzschaltbild Parallelschwingkreis	26
Abbildung 2.8:	Schematische Darstellung des Betriebsbereichs eines gelöschten Netzes	28
Abbildung 2.9:	Differenzielles Teilstück einer homogenen Drehstromleitung in RST-Drehstromsystem	30
Abbildung 2.10:	Null-, Mit- und Gegensystem eines einfachen Drehstromnetzes im Betriebs- und Fehlerfall	31
Abbildung 3.1:	Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms von G. Meyer	35
Abbildung 3.2:	Löschgrenze nach H. Roser bzw. W. v. Mangoldt	36
Abbildung 3.3:	Mittlere Löszeit laut M. Erich und H. Heinze für unterschiedliche Isolatoren in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms	37
Abbildung 3.4:	Chronologische Darstellung der wesentlichen Veröffentlichungen zu dem Thema Erdschlusslöschung in kompensierten Netzen	39
Abbildung 3.5:	Löschgrenze nach DIN VDE 0228-2:1987	40
Abbildung 3.6:	Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löserspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes	41
Abbildung 3.7:	3-dimensionale Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löserspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes	41
Abbildung 3.8:	Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löserspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 110-kV-Netzes	42
Abbildung 3.9:	3-dimensionale Darstellung des möglichen Verstimmungsbereichs der Löserspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 110-kV-Netzes	43
Abbildung 3.10:	Vereinfachte Darstellung von Mit-, Gegen- und Nullsystem	44

Abbildung 3.11:	Darstellung der 50-Hz Komponente des Fehlerstroms entlang einer fiktiven Leitung	46
Abbildung 3.12:	Darstellung der 150-, 250- und 350-Hz Komponente des Fehlerstroms entlang einer Leitung	47
Abbildung 3.13:	Gesamtfehlerstrom I_F entlang einer Leitung	49
Abbildung 3.14:	Gesamtfehlerstrom I_F entlang einer Leitung bei unterschiedlicher Netzgröße	49
Abbildung 3.15:	Entwurf einer vom kapazitiven Erdschlussstrom abhängigen Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze	51
Abbildung 3.16:	Darstellung des neuen möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes	52
Abbildung 3.17:	3-dimensionale Darstellung des neuen möglichen Verstimmungsbereichs der Löschspule in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes	53
Abbildung 3.18:	Grenzwert der zulässigen Anstiegsgeschwindigkeit der Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung bei einem gelöschten 20-kV-Netz	54
Abbildung 3.19:	Darstellung des neuen Verstimmungsbereichs der Löschspule unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms und der Dämpfung eines kompensierten 20-kV-Netzes	55
Abbildung 3.20:	Löschgrenze für den unterkompensierten und den überkompensierten Betriebsfall unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung	56
Abbildung 3.21:	Mögliche neue Löschgrenze für 20-kV-Mittelspannungsnetze unter Berücksichtigung der Steilheit der wiederkehrenden Spannung im unterkompensierten Betriebsfall	57
Abbildung 3.22:	Darstellung der Daten und Trendverläufe von G. Meyer, M. Erich und H. Heinze sowie des FGH-Berichts	60
Abbildung 3.23:	Darstellung der Daten und Trendverläufe für die weitere Betrachtung	61
Abbildung 3.24:	Darstellung der Größe des Exponenten in der mittleren Brenndauer in Abhängigkeit vom kapazitiven Erdschlussstrom	62
Abbildung 3.25:	3-dimensionale Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und des kapazitiven Erdschlussstroms	63
Abbildung 3.26:	Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms und des kapazitiven Erdschlussstroms	63
Abbildung 3.27:	Darstellung der maximalen mittleren Brenndauer in Abhängigkeit des I_{CE}	64
Abbildung 3.28:	Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung eines Netzes	65

Abbildung 3.29: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung	65
Abbildung 3.30: Darstellung des Schnittpunkts des Erdschlussreststroms mit der Löschgrenze	66
Abbildung 3.31: Darstellung des Erdschlussreststroms in Abhängigkeit des kapazitiven Erdschlussstroms der ausgewerteten Erdschlüsse	68
Abbildung 3.32: Auswertung der Brenndauer in Abhängigkeit des Erdschlussreststroms (20 kV)	69
Abbildung 3.33: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Dämpfung	70
Abbildung 3.34: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit des THDs	71
Abbildung 3.35: Brenndauer in Abhängigkeit der Oberschwingungen	71
Abbildung 3.36: Brenndauer in Abhängigkeit der 5. Oberschwingung	72
Abbildung 3.37: Häufigkeitsverteilung der Brenndauer	72
Abbildung 3.38: Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Netzes über ein Jahr	73
Abbildung 3.39: Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Jahres über die Uhrzeit eines Tages	74
Abbildung 3.40: Darstellung des Dämpfungsverlaufes eines Netzes über ein Jahr	75
Abbildung 3.41: Darstellung des Verlaufs der Verstimmung über ein Jahr	75
Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild des Nullsystems für den Ausschwingvorgang (Parallelschwingkreis)	77
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Ausschwingvorgangs eines Parallelschwingkreises	79
Abbildung 4.3: Amplitudenspektrum einer freien und gedämpften Sinusschwingung ($f_E=51$ Hz, $U_{pu}=1$)	81
Abbildung 4.4: Darstellung von Originaldaten und simulierten Daten eines Ausschwingvorgangs	82
Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der FT einer gedämpften und freien Schwingung mit der DFT der Originaldaten	83
Abbildung 4.6: Stand der Technik in der Erdschlussende-Erfassung	85
Abbildung 4.7: Darstellung der Schwebung eines Ausschwingvorgangs	86
Abbildung 4.8: Schematischer Verlauf eines Ausschwingvorgangs mit den jeweiligen Abschnitten der Momentanfrequenz	86
Abbildung 4.9: Schematischer Verlauf der Momentankreisfrequenz $\omega(t)$	87
Abbildung 4.10: Schematische Darstellung über das Verhalten des Raumzeigers	88
Abbildung 4.11: Darstellung des Ergebnisses einer automatischen Erdschluss-Auswertung	88
Abbildung 4.12: Darstellung der Verlagerungsspannung während eines Erdschluss-Vorgangs	88
Abbildung 5.1: Experimentell erhaltene Löschgrenze für kompensierte 20-kV-Netze	90
Abbildung 5.2: Darstellung der Brenndauer in Abhängigkeit der Verstimmung und der Dämpfung eines Netzes	90

Abbildung 5.3:	Darstellung der Häufigkeit von Erdschlüssen eines Jahres über die Uhrzeit eines Tages	91
Abbildung 5.4:	Darstellung des Dämpfungsverlaufes eines Netzes über ein Jahr	91

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)