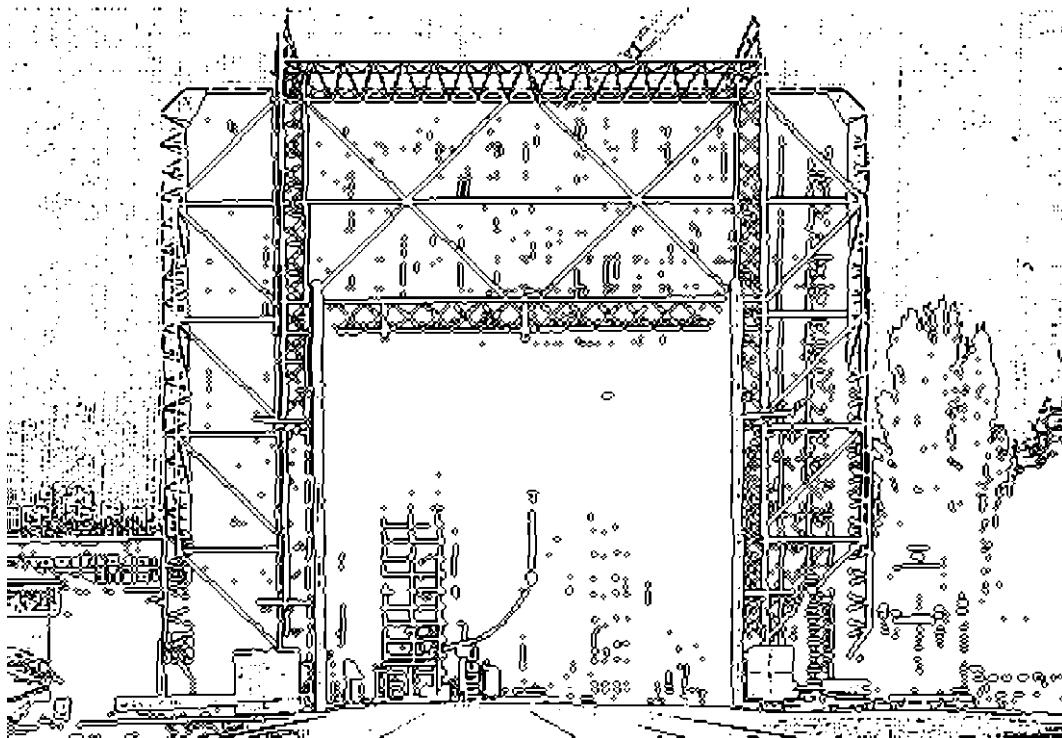


Technische Universität Graz

MASTERARBEIT



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK
UND SYSTEMMANAGEMENT

NEUE INTERPRETATIONSANSÄTZE FÜR TEILENTLADUNGSMESSUNGEN BEI HOHER GLEICHSPANNUNGSBEANSPRUCHUNG

Masterarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian



Doble Lemke GmbH

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Kornhuber

Vorgelegt von Martin Bauer, BSc

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7401
Telefax: (+43 316) 873 – 7408
<http://www.ihs.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Februar 2013



Danksagung

Mein Dank gilt meinem Betreuer Dr.techn. Jürgen Fabian, der mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Besonders erwähnen möchte ich, dass er einen großen Teil seiner Freizeit geopfert hat, um diese Arbeit zu betreuen, weil die Arbeit fertiggestellt wurde, als er nicht mehr Angestellter der Technischen Universität Graz war. Dafür lieber Jürgen herzlichen Dank. In gleichem Maße möchte ich aber auch meinem Betreuer von der Firma Doble Lemke Herrn Dr.techn. Stefan Kornhuber für das Ermöglichen dieser Kooperation danken. Außerdem möchte ich ihm persönlich danken für seine fachlichen Anregungen im Laufe unseres Treffens in Graz aber auch in den darauf folgenden Telefonkonferenzen. Ganz besonders möchte ich auch dem ehemaligen Institutsleiter am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement Herrn Em.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn.Dr.h.c. Michael Muhr danken. Dieser hat sich nach seiner Emeritierung intensiv an der Fertigstellung dieser Arbeit mitgewirkt.

Abschließend möchte ich meinen aufrichtigsten Dank an meine Familie aussprechen. Ich möchte mich hiermit für die sagenhafte Unterstützung während der ganzen Studiendauer aber im speziellen in den schwierigen Phasen, als ich Unterstützung brauchte, ganz besonders bedanken. Beenden möchte ich meine Danksagung mit den Worten die auch schon mein Betreuer Herr Dr.techn. Jürgen Fabian in seiner Dissertation verwendete:

Familie ist nicht alles, aber ohne Familie ist alles nichts.

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)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

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

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Die Übertragung von elektrischer Energie mittels hoher Gleichspannung gewinnt zunehmend aufgrund der Vorteile gegenüber Wechselspannungsübertragung an Bedeutung. Aufgrund verschiedener Faktoren und Einflüsse lassen sich die Erkenntnisse, Erfahrungen und das Wissen der TE Messung und Analyse nicht auf TE Ereignisse unter DC Beanspruchung vollständig übertragen. Bei Gleichspannung sind die zwei Grundgrößen die Höhe der Spannung und der Abstand zwischen dem Auftreten der einzelnen Teilentladungen. Daraus ergibt sich eine Vielzahl von Kenngrößen, welche es gilt zu interpretieren und auf ihre Aussagekraft zu untersuchen gilt. Dafür ist die Klassifikation von entscheidender Bedeutung. Algorithmen wie die 3CFRD oder die LS-SVM Methode stehen beispielsweise zur Verfügung und unterteilen die Teilentladungsmuster in Cluster. Vergleicht man diese mit einer Datenbank, so kann man feststellen, um welche Art von Teilentladung es sich handelt. Außerdem ist der Teilentladungsvorgang ein statistisch behafteter Vorgang, deshalb können verschiedene statistische Parameter ermittelt werden, wovon nur einige zur Identifikation der jeweiligen Fehlerart verwendbar sind. Der Weibullverteilung mit ihren Parametern kommt hierbei besondere Bedeutung zu.

Schlüsselwörter

Teilentladung, Interpretation von Teilentladungen, Gleichspannung

Abstract

The transmission of electrical energy by means of a high DC voltage is becoming increasingly important because there are some advantages compared to AC transfer. This raises the question whether the findings on partial discharges of AC voltage can be applied to DC, which is not fully possible. With DC voltage, the two basic variables are the magnitude of the voltage and the distance between the occurrence of the individual partial discharges. This results in a variety of parameters, which need to be tested. Algorithms like the 3CFRD or the LS-SVM method can be used to cluster the partial discharge patterns. Comparing these clusters with a database the type of partial discharge can be determined. In addition, the discharge process is a statistically-prone process, therefore, various statistical parameters can be evaluated, but only a few parameters for identification of the particular failure type are used. The Weibull distribution with its parameters is of particular importance here.

Keywords

High Voltage Direct Current (HVDC), partial discharge, DC

Inhalt

1.	Einleitung	1
1.1.	Aufgabenstellung der Arbeit.....	1
1.2.	Ziel der Arbeit.....	1
2.	Theoretische Grundlagen zu Teilentladungen	2
2.1.	Ursachen für Teilentladungen.....	2
2.2.	Teilentladungsquellen	2
2.2.1.	TE-Quellen in Gasen.....	2
2.2.2.	TE-Quellen in Flüssigkeiten	2
2.2.3.	TE-Quellen in festen Stoffen.....	3
2.3.	Entladungsformen in gasförmigen Medien	5
2.4.	Entladungsformen in flüssigen Medien	8
2.5.	Entladungsformen in festen Medien	10
3.	Teilentladungen bei hoher Gleichspannung.....	11
3.1.	Die elektrische Feldverteilung von DC im Vergleich zu AC	13
3.2.	Wiederauftreten der Teilentladung.....	16
3.3.	Polarisationseinschwingvorgänge.....	19
3.4.	Der Polaritätseffekt.....	19
3.5.	Statistik von Teilentladungen.....	21
3.6.	Wahrscheinlichkeiten des Auftretens	21
3.7.	Das elektrische Feld bei Gleichspannung	24
3.8.	Mechanismus der Ladungsansammlung	26
3.9.	Problemstellung bei hoher Gleichspannung.....	27
3.9.1.	Phasenbezug.....	27
3.9.2.	Teilentladungsverhalten.....	27
3.9.3.	Ersatzschaltbild	28
3.9.4.	Transiente Vorgänge.....	28
3.9.5.	Teilentladungsdiagnose.....	28
4.	Teilentladungsmesstechnik.....	29
4.1.	Definition Teilentladung und ihre Bedeutung	29
4.2.	Teilentladungsdiagnose.....	30
4.3.	Stand der Normung	30
4.3.1.	Begriffe und Kenngrößen	30

4.4.	Teilentladungsmesskreis	33
4.5.	Signalbetrachtung im Frequenzbereich	34
4.6.	3 Center Frequency Relation Diagram (3CFRD)	34
4.7.	Empfindlichkeit und Kalibrierung	35
4.8.	Signalverarbeitung und –bewertung	36
4.8.1.	Breitbandige Teilentladungsmessgeräte	36
4.8.2.	Schmalbandige Teilentladungsmessgeräte	37
4.8.3.	Synchrone Mehrstellenteilentladungsmessung	38
4.8.4.	Nachbearbeitung von Teilentladungsdaten	43
5.	Teilentladungsmessungen bei hoher Gleichspannung	45
5.1.	Derzeitiger Stand der Messtechnik	45
5.1.1.	Stand der Normung	45
5.1.2.	Klassifikation anhand charakteristischer Verteilungen	47
5.1.3.	Analyse der Wiederholungsrate	48
5.1.4.	Teilentladungsamplitude als Funktion der Zeit	49
5.1.5.	Dichtefunktion	50
5.1.6.	Entladungsamplitude und Wiederholungsrate als Funktion der Prüfspannung	51
5.1.7.	Zeitabhängigkeit	52
5.1.8.	Häufigkeitsverteilung	53
5.2.	Problemstellung bei Teilentladungsmessungen	54
5.2.1.	Teilentladungseinsetzspannungen und Teilentladungsaussetzspannungen	54
5.2.2.	Teilentladungsprüfspannung	54
5.2.3.	Prüfkreise und Messsysteme	55
5.2.4.	Wahl der Prüfverfahren	55
5.2.5.	Störungen	55
5.2.6.	Konklusion	55
5.3.	Methoden zur Störunterdrückung bei TE Messungen für DC	56
5.4.	Methoden zur besseren Trennung für Spezialfälle	60
5.4.1.	Grenzwertmethode	60
5.4.2.	Manuelle Grenzwertmethode	60
5.4.3.	Wavelet Denoising	61
6.	Neue Analyseverfahren bei Teilentladungsmessungen bei hohen Gleichspannungen ..	63
6.1.	Multivariate Statistik	63
6.2.	Die Weibull Verteilung	65

6.2.1.	Feuchtigkeitsanalyse bei Oberflächenentladungen:	68
6.3.	Neuronale Netze	69
6.4.	Fuzzy Logik.....	70
6.5.	Analyse der Impulsform	71
6.6.	Pulsfolgenanalyse.....	73
6.7.	Klassifikation mittels LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine).....	74
6.8.	Klassifikation mittels CAPD (Chaotic Analysis of Partial Discharge).....	79
6.9.	Strategie zur Identifikation von Teilentladungsquellen	83
7.	Resumee.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.	Zusammenfassung.....	88
9.	Abkürzungsverzeichnis.....	90
10.	Symbolverzeichnis.....	92
11.	Literaturverzeichnis	94

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung der Arbeit

Das Wissen um den momentanen Isolationszustand eines Isoliersystems zu jedem beliebigen Zeitpunkt ist eine unverzichtbare Information, um urteilen zu können, ob das Betriebsmittel erneuert werden muss oder in Betrieb bleiben kann. Dazu gibt es verschiedene Parameter und Methoden, um auf den Zustand schließen zu können. Durch den steigenden elektrischen Energiebedarf wird zur Energieübertragung von hohen elektrischen Leistungen über weite Strecken die HGÜ immer bedeutender. Für die Betriebsmittel einer HGÜ-Anlage ergibt sich eine Gleich- bzw. Mischspannungsbeanspruchung. Dadurch gewinnt auch die Teilentladungsdiagnose bei DC zunehmend an Bedeutung und soll in dieser Arbeit ausführlich behandelt werden. Zunächst wird der aktuelle Stand der Wissenschaft bezüglich aller Entladungsarten dargestellt. Des Weiteren sollen verschiedene Messverfahren zur Messung von Teilentladungen erklärt und auf dessen Vorteile und Nachteile hin untersucht werden. Die moderne Messtechnik setzt zur Ortung von Teilentladungen oft unkonventionelle Sensoren ein. Bei diesen besteht zwar nicht die Möglichkeit einer Kalibration, dafür sind sie zur Ortung geeignet. Selbst in Großtransformatoren ist eine Ortung in beschränktem Umfang möglich. [SCH81].

1.2. Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Beschreibung von Analyseverfahren bei Teilentladungsmessungen bei hohen Gleichspannungen. Dazu werden Messverfahren und spezielle Methoden zur Teilentladungsinterpretation erläutert, welche zur Diagnose von Betriebsmitteln bei hoher DC-Beanspruchung genutzt werden können. Das große Problem bei der Teilentladungsdiagnose unter Gleichspannung ist das Fehlen eines Phasenbezugs, um erstens zwischen Rauschen und echter Teilentladung unterscheiden zu können und zweitens die Art des Defekts festzustellen, welcher zur Teilentladung führt bzw. um welche Art Teilentladung es sich handelt. Diese zwei Problemstellungen und ihre möglichen Lösungen sind Ziel dieser Arbeit.

2. Theoretische Grundlagen zu Teilentladungen

2.1. Ursachen für Teilentladungen

Teilentladungen sind immer auf örtlich begrenzte Feldstärkeüberhöhungen oder lokale Schwächen der elektrischen Festigkeit zurückzuführen. Die Feldstärkeüberhöhung kann auch durch Erhöhung der äußeren Spannung (stationär oder transient) erfolgen. Lokale Schwächen der Festigkeit können z.B. mit gasgefüllten Hohlräumen verursacht werden. In Abhängigkeit von der angelegten Spannung ergeben sich große Unterschiede. Man unterscheidet zwischen Gleich-, Wechsel- und Stoßspannung, wobei der Fokus dieser Arbeit auf Gleichspannung liegt [KÜC09].

2.2. Teilentladungsquellen

In den folgenden drei Unterpunkten sollen typische Quellen für Teilentladungen in gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen erläutert werden.

2.2.1. TE-Quellen in Gasen

Eng verrundete Spitzen und Kanten, sowie Leiter mit zu geringem Drahtquerschnitt und scharfkantige Partikel, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind, sind die typischen Verursacher von Koronaentladungen in Gasen.

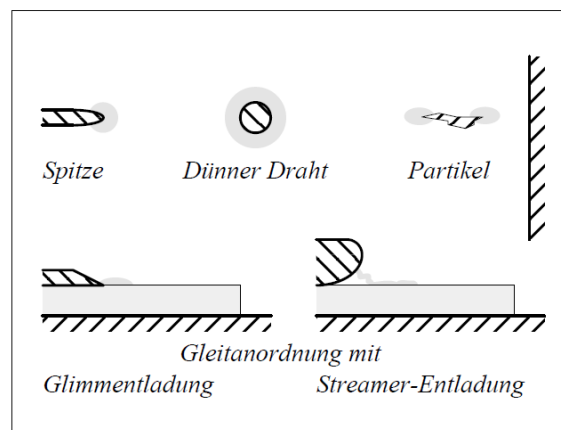


Abbildung 1 TE-Quellen in Gasen [KÜC09]

2.2.2. TE-Quellen in Flüssigkeiten

Neben Problemen mit Partikeln und Spitzen ergeben sich neue Probleme, nämlich dass sich das Auftreten von Gas in der Flüssigkeit hinsichtlich dem Entstehen von Teilentladungen als äußerst problematisch gestaltet. Das Gas tritt in Form von Bläschen oder Gasschichten auf (Abbildung 2) und verursacht oft Teilentladungen, weil die ohnehin elektrisch schwache

Gasblase durch die Feldverdrängung noch zusätzlich belastet wird. Dadurch setzen Teilentladungen oft schon bei sehr niedrigen Feldstärken in der Gasblase ein. Ein weiteres Problem stellt die Feuchtigkeit dar, weil es zu einer starken Absenkung der elektrischen Festigkeit kommt. Insbesondere wenn tröpfchenförmiges Wasser abgeschieden wird. Daher ist es bei ölisierten Geräten wichtig, diese unter Vakuum mit entgastem und getrocknetem Öl zu füllen. Arbeitet man mit Kondensator dielektrika oder Pressspannbarrieresystemen, um die elektrische Festigkeit weiter zu erhöhen, kann es auch zu Oberflächenentladungen durch tangential Überbeanspruchung von Isolierstoffoberflächen kommen, siehe Abbildung 2 (mittig und unten). [KÜC09].

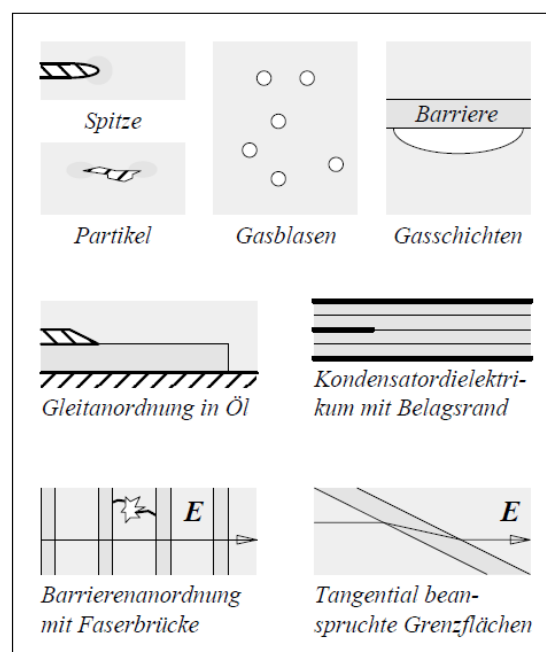


Abbildung 2 TE-Quellen in Flüssigkeiten [KÜC09]

2.2.3. TE-Quellen in festen Stoffen

Feste Isolierstoffe weisen eine sehr hohe Festigkeit auf. Dennoch kann es aufgrund von Fehlstellen zu Teilentladungen kommen. Durch Diffusionsvorgänge werden Hohlräume mit niedermolekularen Bestandteilen aus den umgebenden Medien gefüllt, welche in späterer Folge für die Teilentladungen verantwortlich sind. Durch Feldverdrängung wird die Beanspruchung in den oft luftgefüllten Hohlräumen mit geringer Festigkeit oft stark erhöht und es kommt zur Teilentladung wie in Abbildung 3 dargestellt. Unvollständig entgaste Gießharze oder chemische Nebenreaktionen (z.B. bei feuchtigkeitshaltigen Polyurethanharzen) sind oft die Auslöser von allseitig geschlossenen Hohlräumen (siehe Abbildung 3 (oben links)). Außerdem führt fortschreitende Erosion zur Bildung von Hohlräumen, wie dies in Abbildung 3 (unten rechts) dargestellt ist. Soche Erosionen können

z.B. von so genannten „water trees“ in Polyäthylen-Kabelisolierungen verursacht werden. Außerdem können Risse und Spalte (Abbildung 3 oben rechts) sowie Ablösungen zwischen Elektrode und Dielektrikum entstehen (Abbildung 3 oben links). Verursacht werden sie durch Reaktionsschwund, durch mechanische Spannungen, Versprödungen oder durch ungenügende Haftung. Ein weiterer Aspekt ist, dass sich bei unvollständig imprägnierten Schichten z.B. zwischen glatten Kunststoff-Folien in Kondensatordielektrika Hohlräume bilden können. Delaminationen in faserverstärkten Materialien sind extrem gefährlich. Es können möglicherweise große Isolationsstrecken durch Gas oder vielleicht sogar durch eingedrungenes Wasser überbrückt werden (Abbildung 3 unten links). Außerdem ist beim Aufschieben von Kabelendverschlüssen auf das Kabeldielektrikum zu achten, weil sich dort kritische Grenzflächen parallel zum elektrischen Feld ergeben (Abbildung 3 unten rechts). Ein wesentlicher Nachteil ist, dass sie nicht regenerativ sind. Das bedeutet, dass Teilentladungen nachhaltige Schäden hinterlassen, die nicht kleiner werden, sondern sich aufgrund der Erosion weiter ausbreiten werden. Deshalb müssen hier Teilentladungen unbedingt vermieden werden und es sind sehr hohe Qualitätsanforderungen an die Fertigungsqualität zu stellen [KÜC09].

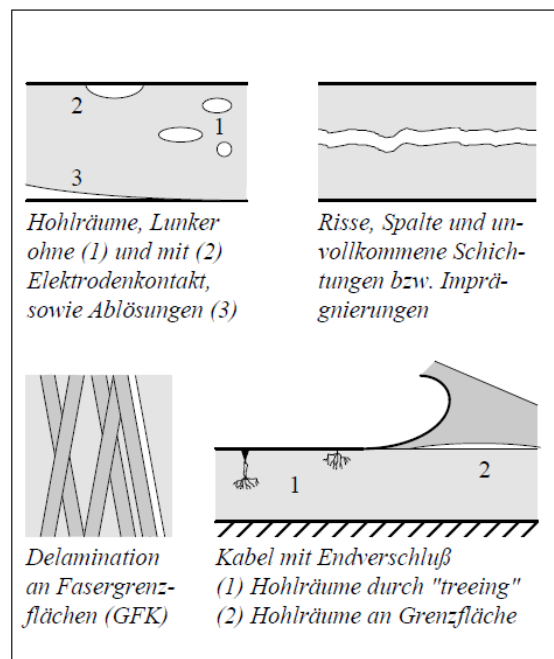


Abbildung 3 TE-Quellen in festen Stoffen [KÜC09]

2.3. Entladungsformen in gasförmigen Medien

Koronaentladungen

Die Koronaentladung tritt im stark inhomogenen Feld bei gasförmigen Isolierstoffen auf. Abhängig vom Homogenitätsgrad der Elektrodenanordnung ergibt sich die elektrische Feldverteilung, wobei es bei einer homogenen Platte-Platte-Anordnung sofort zum Durchschlag kommt, während es bei Kugel-Platte- und Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen zunächst zum Teilentladungseinsatz führt, dargestellt in Abbildung 4 [KÜC09].

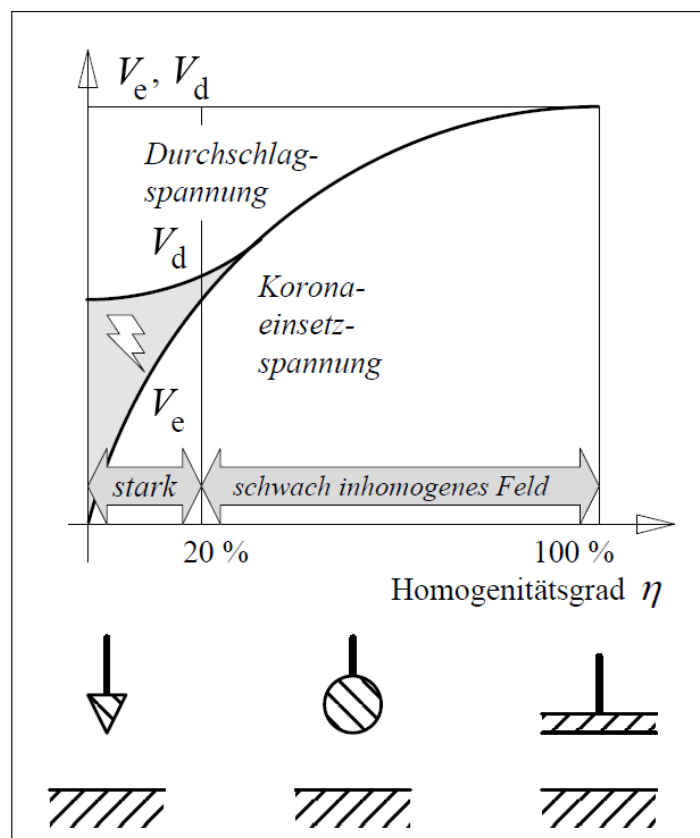


Abbildung 4 Vergleich zwischen Korona-Einsatzspannung und Durchschlagsspannung im stark inhomogenen Feld [KÜC09]

Der Grund, dass diese Koronaentladungen nur im stark inhomogenen Feld auftreten, liegt darin, dass nur vor der stark gekrümmten Elektrode hohe Feldstärken und günstige Ionisierungsbedingungen auftreten ($\alpha_e > 0$). Die Elektronen lagern sich im feldschwachen Bereich unter der Bedingung an, dass es sich um elektronegative Gase handelt. Dies ist bei gasförmigen Isolatoren der Fall wie z.B. SF_6 und Luft. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5 gut dargestellt [KÜC09].

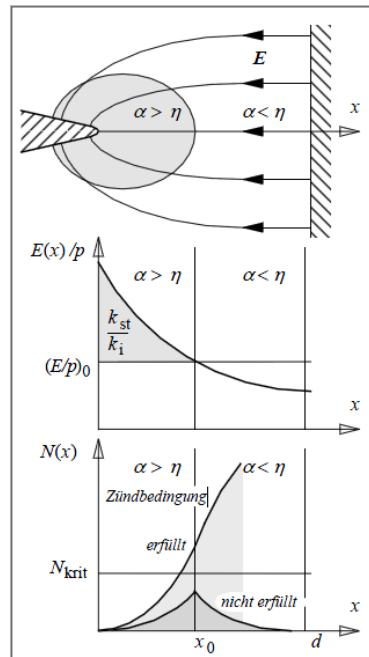


Abbildung 5 Entwicklung von Elektronenlawinen Oben: Gebiete mit positivem und negativem effektiven Ionisationskoeffizienten Mitte: Feldstärkeverlauf entlang der x-Achse Unten: Lawinenentwicklung mit überkritischer und mit unterkritischer Elektronenzahl [KÜC09]

Wird die Koronaeinsetzspannung überschritten ist die Zündbedingung erfüllt und es entstehen Koronaentladungen (auch als Vorentladungen bezeichnet). Es kommt jedoch noch zu keinem Durchschlag. Zunächst erscheinen Glimmentladungen, welche sich bei höheren Spannungen als diskrete raumladungsbeschwerte Streamerentladungen bis in den feldschwachen Bereich fortsetzen. Hierbei muss eine gewisse Mindeststärke des unverzerrten Grundfeldes gegeben sein. Ist diese Mindeststärke des Grundfeldes zu schwach, kann sich der Streamer nicht weiter ausbreiten und er erlischt. Ein sehr wichtiger Zusammenhang in Bezug auf Teilentladungen ist, dass umso höher die Inhomogenität des elektrischen Feldes ist, umso niedriger ist die Einsetzspannung U_e ab der die Koronaentladungen einsetzen (siehe Abbildung 4). Die Polarität der Spitze bestimmt im Wesentlichen den Entladungsvorgang. In diesem Zusammenhang spricht man vom Polaritätseffekt, welche im nächsten Unterpunkt erläutert wird. Erst wenn der Streamer die Gegenelektrode erreicht, spricht man von einem Durchschlag. [KÜC09].

Einflüsse auf Koronaeinsatz und Vorentladungen

Die verschiedenen Entladungsformen die bis zum Durchschlag hin durchlaufen werden, sind in Abbildung 6 dargestellt [KÜC09].

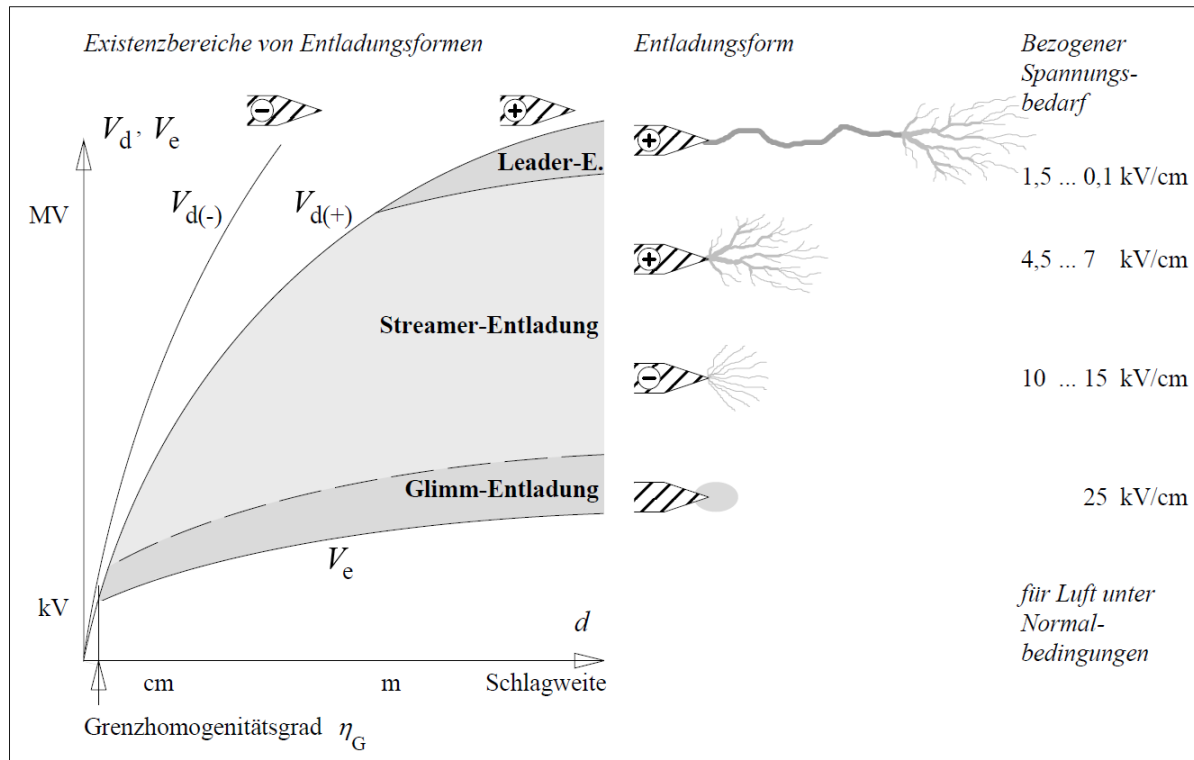


Abbildung 6 Existenzbereich für Entladungsformen [KÜC09]

Sobald die Zündbedingung erfüllt ist, setzen die Koronaentladungen ein, wobei der Feldverlauf noch nicht von Raumladungen verändert wurde. Für die erste Näherung kann die Bedeutung der Polarität vernachlässigt werden, weil die Richtung der Integration nicht von Bedeutung ist. In diesem Schlagweitenbereich ist das Einsetzverhalten vom Elektrodenmaterial und von der statistischen Streuzeit abhängig. Diese beeinflusst die Bereitstellung von Startelektronen.

Die statistisch schwankende Bereitstellung von Startelektronen bewirkt nach Erreichen der Koronaeinsatzspannung eine intermittierende Korona. Erhöht man die Spannung weiter, so ändern sich die Feldverhältnisse vor der Spitze aufgrund von Raumladungsbildung. Dadurch kann eine Glimmentladung entstehen. Diese ist eine stabile und kontinuierlich brennende Entladung. Man kann sie in dunkler Umgebung als gleichmäßiges bläuliches Glimmen bzw. als Dauerkorona optisch wahrnehmen. Für den Fall einer negativen Spitze, treten zuvor noch Trichel-Impulse auf. Als nächstes bilden sich Entladungskanäle, sogenannte Streamer, ausgehend von der Glimmentladung und breiten sich in den feldschwachen Bereich aus. Werden viele solcher Streamer überlagert, erscheint ein büschelförmiges Bild der Entladungen (Büschelentladung) (siehe Abbildung 6 (rechts Mitte)).

Wie in Abbildung 18 (rechts unten) zu erkennen ist, muss sich der negative Streamer bei negativer Spitze in einem durch Raumladungen verminderten Feld ausbreiten. Daher ergibt

sich ein verhältnismäßig großer Spannungsbedarf bezogen auf das Grundfeld unter Normalbedingungen in Luft.

Beim positiven Streamer also bei positiver Spitze ist es genau umgekehrt. In Abbildung 18 (links unten) sieht man, dass sich der positive Streamer in einem durch Raumladungen verstärkten Feld ausbreitet. Daher ergibt sich ein geringer Spannungsbedarf bezogen auf das Grundfeld unter Normalbedingungen in Luft. Für Längen ab ca. 20cm gilt dieser kleine Wert. Daraus folgt, dass der positive Streamer eine erheblich größere Reichweite als der negative Streamer hat. Letztlich ergibt sich daraus die niedrigere Durchschlagsspannung. Die positiven Streamer wachsen zur Spitze hin und entstehen statistisch. Sie verteilen sich über das kritisch beanspruchte Volumen. Die Längen sind daher nicht in etwa einheitlich, wie beim negativen Streamer, sondern variieren stark. Positive Streamer können auch stromstarke Kanäle vor der Spitze bilden, aufgrund von Vereinigungen wie dies in Abbildung 6 (Mitte) zu erkennen ist. In Summe ergibt sich also für die positiven Streamer verglichen zu den negativen ein unregelmäßigeres und unruhigeres Bild.

Ein intensiv leuchtender Kanal kann erst bei erhöhter Stromdichte entstehen. Dieser wird als Leader bezeichnet und aufgrund von Thermoionisation ergibt sich ein wesentlich geringerer Spannungsbedarf und eine erhöhte Leitfähigkeit unter Normalbedingungen in Luft. Die notwendige Stromzufuhr um die Stromdichte zu erhalten, wird durch die ausgedehnte Leaderkorona am Kopf des Leaders gewährleistet. Sieh Abbildung 6 (rechts oben). Man spricht in diesem Zusammenhang von Stielbüschelentladung.

Voraussetzungen für die Entstehung dieses Kanals:

- Genügend Ladungsträger durch Korona
- Ausreichende Schlagweite (über 1m)
- Ausreichend lange Beanspruchungszeit
- Ausreichend rasche Spannungsänderungsgeschwindigkeit

Entscheidend ist, dass der letzte Punkt nur bei Schaltstoßspannung und Wechselspannung erfüllt wird, nicht jedoch für Gleichspannung [KÜC09].

2.4. Entladungsformen in flüssigen Medien

Zunächst soll festgehalten werden, dass die wichtigsten flüssigen Isolierstoffe Isolieröle sind, welche auf der Basis Mineralöl bestehen. Das sogenannte Trafoöl ist allgemein bekannt und wird als Isolier- und Kühlmittel in sehr vielen Transformatoren eingesetzt. Außerdem werden Mineralöle auch in ölgefüllten Geräten eingesetzt (z.B. Durchführungen, Wandler und

Kondensatoren). Lediglich für Sonderanwendungen werden andere Flüssigkeiten verwendet, daher liegt das Augenmerk in dieser Arbeit auf Öl [KÜC09].

Teilentladungen in Mineralöl

Es können auch im Öl, ohne dass es zu einem Durchschlag kommt, stationäre Teilentladungen auftreten, wenn das elektrische Feld sehr inhomogen ist. Diese Tatsache kann aber auch genutzt werden, weil die Einsetzfeldstärke von Spitze-Platte-Anordnungen Auskunft über den Isolationszustand gibt. Es kann auf den Gasgehalt, Wassergehalt und die Verschmutzung des Öles rückgeschlossen werden. Bemerkenswert ist, dass die Ergebnisse besser sind, als wenn man die Durchschlagsspannung im näherungsweise homogenen Feld als Indikator nimmt. Um die Zündbedingung zu erfüllen, muss die Feldstärke in einem Gebiet sehr stark sein. Dies passiert häufig bei vergleichsweise hohen Randfeldstärken [KÜC09].

Außerdem ist belegt, dass leitfähige Partikel mit abnehmender Größe an Gefährlichkeit verlieren [KÜC09]. Gasblasen bzw. Gasschichten sind die häufigsten Verursacher von Teilentladungen in Flüssigkeiten, weil im Gas die Feldstärke wegen der Feldverdrängung erhöht wird. Dadurch wird schon bei relativ niedrigen Spannungen im Gas die Townsendsche Zündbedingung erfüllt und es kommt zu Teilentladungen. Somit bedeutet freies Gas in Analogie zu freiem Wasser einen extremen Festigkeitsverlust. Die Werte fallen weit unter Durchschlagsfestigkeit des Öls und unter typische Prüffeldstärken, womit sie bei Überprüfung erkannt werden und das Öl getauscht werden muss. Um dies zu vermeiden, muss freies Gas in ölprägnierten Geräten vermieden werden. Damit man beim Teilentladungseinsatz in Gas die Feldstärke im Öl abschätzen kann, muss zuerst die Teilentladungseinsatzstärke im Gas ermittelt werden. Diese wird mittels des Paschengesetzes berechnet. Ursachen für freies Gas:

- Unzureichendes Vakuum beim Füllen
- Unzureichende Entgasung des Füllöls
- Bildung von Gasbläschen durch Strömungen und Verwirbelungen

Es kommt aber auch vor, dass sich Gasbläschen mit der Zeit wieder im Öl auflösen, wenn die Gasaufnahme-fähigkeit des Öles ausreicht. Dieser Vorgang kann mehrere Tage dauern, wenn nur geringe Kontaktflächen zum Öl bestehen. Auch bei imprägnierten Papier- oder Pressspanbarrieren kann dieser Vorgang sehr lange dauern, weil diese oft die Gasdiffusion behindern. Auch Teilentladungen selbst können Gasbildungen verursachen, wenn diese an bereits vorhandenen Fehlern wie z.B. Spitzen oder Gasblasen auftreten. Durch die Entladungen können Spaltvorgänge des Isolieröls zur Entstehung von unterschiedlichen Gasen führen, wobei es hauptsächlich zur Bildung von Wasserstoff kommt. Bei der so

genannten „Gas-in-Öl-Analyse“ können Teilentladungen integrativ erkannt werden. Es handelt sich dabei um eine Analyse der im Öl gelösten Gase [KÜC09].

Auswirkungen einer Gasblase: Teilentladungen im Öl führen dazu, dass sich die Gasblase lösen kann. Nun hängt es von der Gasaufnahme-fähigkeit des Öles ab, was weiter passiert. Im günstigeren Fall ist die Gasaufnahme-fähigkeit groß genug und die Gasblase löst sich im Öl wieder auf. Ist dies allerdings nicht möglich, entsteht freies Wasserstoffgas, welches eine geringe elektrische Festigkeit als Luft hat. Dadurch sinkt die Teilentladungseinsetzspannung, wodurch wiederum die Teilentladungsintensität steigt. Infolgedessen kann es bis zum Durchschlag kommen [KÜC09].

2.5. Entladungsformen in festen Medien

Bei festen Isolierstoffen wird zwischen zwei Klassen unterschieden. Eine Klasse bilden Materialien, welche keine nennenswerte Beeinträchtigung durch Teilentladungen haben (Glimmer, Porzellan und mit Einschränkungen Glas) und die andere Materialien bei denen dauernde Teilentladungen unweigerlich zum vollkommenen Durchschlag führen (Polyethylen, vernetzte Polyethylen und Gießharze) [SCH12].

Teilentladungsmechanismus im Festkörper

Fehlstellen bilden fast immer einen Ausgangspunkt von sogenannten „electrical trees“. Dabei kommt es zu einem Aufbruch des noch intakten Materials. Durch die begünstigte Erosion und wiederzündende Teilentladungen kommt es zu einem Vorwachsen des Aufbruchs. Ein Erosionskanal kann den Elektrodenzwischenraum überbrücken und den endgültigen Durchschlag verursachen. Die Wachstumsgeschwindigkeit des Erosionskanals ist im Falle von Gleichspannungsbeanspruchung abhängig von Gasdruck im Hohlraum, lokaler Feldstärke, Temperatur, Leitfähigkeit der Hohlraumwände [SCH12].

3. Teilentladungen bei hoher Gleichspannung

Damit es zu einer Teilentladung kommt, müssen 2 Bedingungen erfüllt sein [MOR05]:

1. Die Stärke und Verteilung des elektrischen Feldes muss so gegeben sein, dass eine selbstständige Teilentladung stattfinden kann. Das bedeutet, dass eine minimale Spannung V_{\min} anliegen muss.
2. Ein freies Startelektron muss an einer passenden Stelle vorhanden sein, damit der Ionisierungsprozess starten kann. Dieses Startelektron kann unter Umständen auch von außen durch Strahlung ersetzt werden. Das Vorhandensein dieses geeigneten Startelektrons ist ein stochastischer Prozess. Es ergibt sich eine Verzögerungszeit t_L . Wird die Spannung V_{\min} während dieser Verzögerungszeit überschritten, kann es zu einer Teilentladung kommen oder auch nicht.

Erst bei einer Spannung von $V = V_{\min} + \Delta V$ kommt es dann zu einer Teilentladung wie in Abbildung 7 ersichtlich. Nach der Teilentladung fällt die Spannung auf V_r . Häufig wird angenommen, dass die Spannung nach der Teilentladung null beträgt, was aber nur für AC gilt und nicht für DC. Die Spannung kann auch nach der Teilentladung noch sehr nahe der Spannung V_i sein. Damit es zu einem weiteren Durchschlag kommen kann muss neuerlich die Spannung V_{\min} überschritten werden. Die Zeit die bis dahin vergeht ist mit t_r bezeichnet.

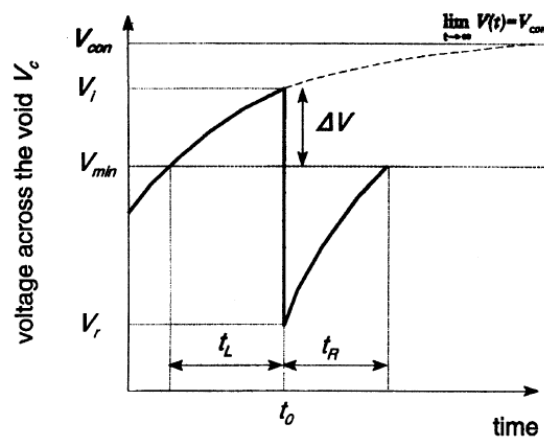


Abbildung 7 Spannungserhöhung bis zur Teilentladung [MOR05]

Die Überspannung ΔV bestimmt den Entladungsprozess wesentlich. Dabei ist festzustellen, dass ΔV bei Gleichspannung erheblich kleiner ist als bei Wechselspannung. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei repräsentieren C_a und R_a die Eigenschaften des gesamten Dielektrikums. C_b und R_b repräsentieren jenen Teil des

Dielektrikums, welcher in Serie mit dem Lunker liegt. C_c ist die Kapazität des Lunkers selbst und R_c ist der Widerstand des Lunkers.

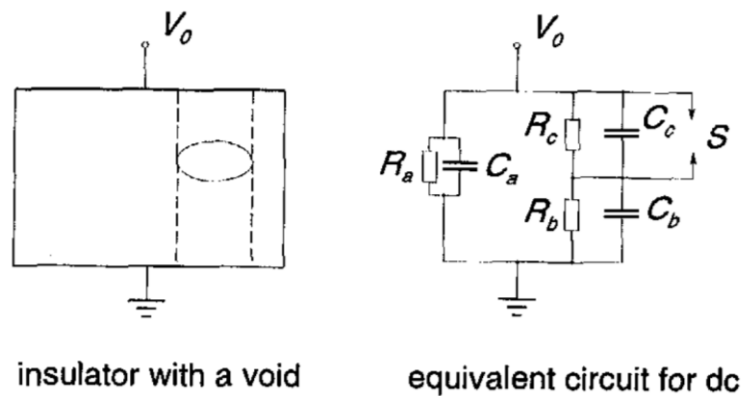


Abbildung 8 Ersatzschaltbild TE für Gleichspannungsbeanspruchung [MOR05]

Wenn man den Teilentladungsprozess vereinfacht und als Funkenstrecke betrachtet, erhält man die Ladezeit des Lunkers:

$$\tau = \frac{R_b R_c (C_b + C_c)}{R_b + R_c}$$

Gleichung 1

Die Spannung, welche am Lunker anliegt, ist gegeben als $V_c(t)$:

$$V_c(t) = V_{c,\infty} - (V_{c,\infty} - V_r) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Gleichung 2

Dabei kann $V_{c,\infty}$ als der maximale Wert der Spannung am Lunker, wenn keine Teilentladung auftritt, ausgedrückt werden als:

$$V_{c,\infty} = V \frac{R_c}{R_b + R_c}$$

Gleichung 3

Devins [DEV84] untersuchte die Effekte der Entladungsmechanismen und führte zwei Teilentladungsmechanismen ein, welche er analog zur Entladung beim Durchschlag Townsend-ähnlich und Streamer-ähnlich bezeichnete. In Abbildung 9 ist ein typischer Stromimpuls einer Teilentladung in einer 0,3 mm starken Polyethylenprobe bei einer TE-Strecke von 0,1 mm zu sehen. Diese Townsend-ähnliche Entladung ist charakterisiert durch eine vergleichsweise kleine Amplitude und eine vergleichsweise große Impulsbreite. Mit der

Größe der TE-Strecke nimmt auch die Breite des Impulses weiter zu. Diese Art der Entladung tritt bei kleinen Überspannungen auf [MOR05].

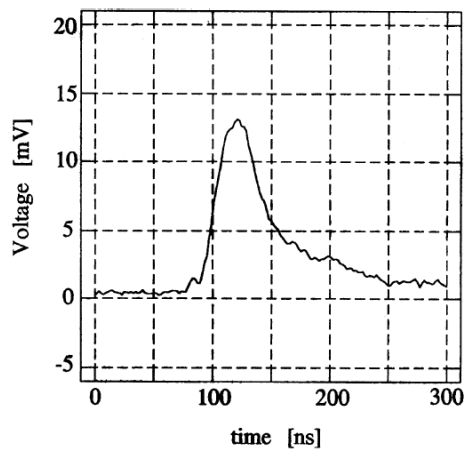


Abbildung 9 Townsend ähnliche Entladungsimpuls in einer 0,1mm Lücke [MOR05]

Bei höheren Überspannungen kommt es zu einem anderen Entladungsimpuls, wie er in Abbildung 10 dargestellt ist. Dieser wird als Streamer-ähnlich bezeichnet und ist charakterisiert durch einen schnellen Impulsanstieg und eine geringe Impulsbreite [MOR05].

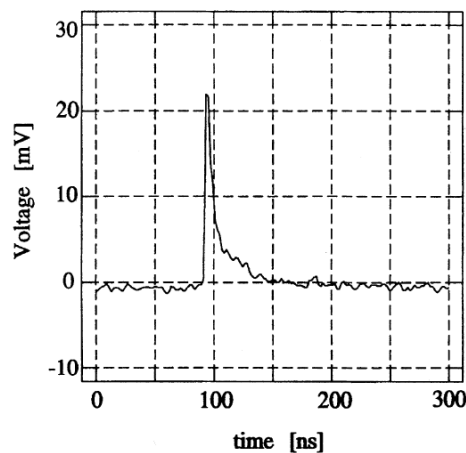


Abbildung 10 Streamer ähnliche Entladungsimpuls in einer 0,1mm Lücke [MOR05]

3.1. Die elektrische Feldverteilung von DC im Vergleich zu AC

1. **Quer geschichtetes Dielektrikum:** In diesem Fall ist das elektrische Feld senkrecht zur Oberfläche gerichtet. Es gilt die Stetigkeit der normal zur Trennfläche gerichteten Stromdichte $J_1=J_2=J$. Daraus folgt:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1}$$

Gleichung 4

Man sieht, dass die Feldstärkebeträge im umgekehrten Verhältnis zu den Leitfähigkeiten stehen. Das Medium mit der niedrigeren Leitfähigkeit wird mit einer höheren Feldstärke beansprucht als das Medium mit der höheren Leitfähigkeit. Es gilt eine Analogie zur dielektrischen Feldverdrängung. Die Unterschiede zwischen Leitfähigkeiten betragen oft mehrere Größenordnungen. Daher liegt die gesamte Spannung häufig am Isolierstoff mit der niedrigeren Leitfähigkeit an. Es herrscht dann eine fast vollständige Feldverdrängung. In Abbildung 11 sieht man die Feld- und Potentialverteilung für ein Leitfähigkeitsverhältnis von $\kappa_1:\kappa_2=1:10$ [KÜC09].

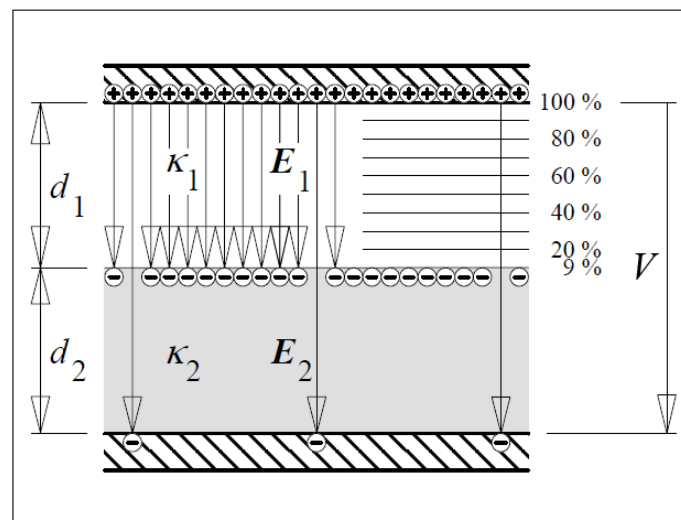


Abbildung 11 Feld- und Potentialverteilung in zwei quer geschichteten mit DC beanspruchten Dielektrika (Leitfähigkeitsverhältnis 1:10) [KÜC09]

2. **Längs geschichtetes Dielektrikum:** Rein theoretisch betrachtet wird das tangentielle elektrische Feld E bei längs geschichteten Dielektrika nicht von den benachbarten Materialien beeinflusst. Es gilt $E_1=E_2=E$. Aufgrund der unterschiedlichen Leitfähigkeiten unterscheiden sich die Stromdichten auf beiden Seiten, wie folgt: $J_1=\kappa_1E$ und $J_2=\kappa_2E$. Dadurch ergeben sich unterschiedliche flächenbezogene Leitwerte bzw. Widerstände auf beiden Seiten der Grenzfläche. Die parallel zum Feld verlaufende Trennfläche ist bei Gleichspannungsbeanspruchung besonders kritisch, weil es bei nicht vollständig gleichmäßig ausgebildeten Fremdschichten zur Verzerrung des Feldes und zu extremen Feldüberhöhungen bei gut leitfähigen Fremdschichten kommen kann (Abbildung 12) [KÜC09].

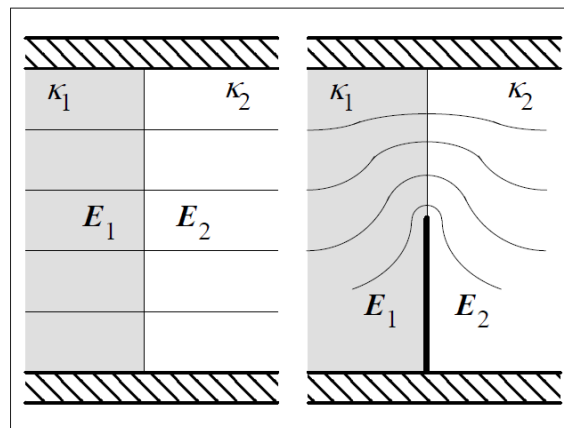


Abbildung 12 Längs geschichtete, mit Gleichspannung beanspruchte Dielektrika. Links: Ideale Potentialverteilung. Rechts: Potentialverteilung mit einer leitfähigen Fremdschicht. [KÜC09]

3. **Gleitanordnung:** Bei der so genannten Gleitanordnung wird das Isoliermedium über den Rand der Elektrode hinaus verlängert, wie in Abbildung 13 ersichtlich ist.

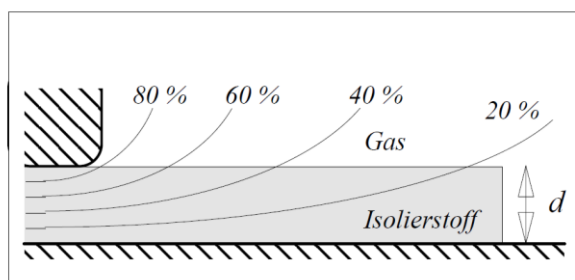


Abbildung 13 Gleitanordnung [KÜC09]

Ohne diese Verlängerung wäre die Spannung auf sehr kleine Werte begrenzt, wegen einer geringen Festigkeit der Oberfläche bei Isolationen aus festen und flüssigen Isolierstoffen. Dadurch würde die Festigkeit der verwendeten Medien nur minimal ausgenutzt werden. Um dies zu verbessern, wird das Isolationsmedium weit in den feldschwachen Bereich hinein verlängert. Der Nachteil ist, dass keine gleichmäßige tangentielle Feldstärke entlang der Oberfläche möglich ist. Stattdessen tritt eine Feldkonzentration im Tripel-Punkt an der Elektroden-Kante auf. Es kommt infolgedessen schon bei sehr niedrigen Spannungen zum Einsatz von Vorentladungen, allerdings noch zu keinem Durchschlag. Steigert man die Spannung, entsteht eine Gasentladung, die von der Oberfläche geführt ist. Man spricht dann von einer Oberflächen- oder Gleitentladung. Diese kann schließlich die Gegenelektrode erreichen [KÜC09].

Zündung von Gleitentladungen

Bei Gleichspannung bestimmen die Leitfähigkeiten des Isolierstoffes und der Fremdschicht die Feldverteilung. Das Gas ist im Vergleich dazu hochohmig. Das Ersatznetzwerk ist in Abbildung 14 dargestellt. Es besteht aus einem rein ohmschen Kettenleiter aus Längs- und Querwiderständen [KÜC09].

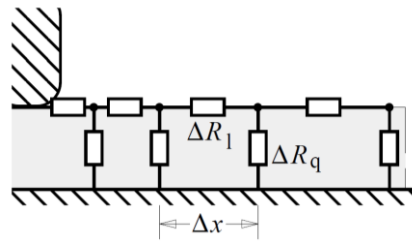


Abbildung 14 Ersatznetzwerk für eine Gleitanordnung [KÜC09]

3.2. Wiederauftreten der Teilentladung

Bei Wechselspannungsbeanspruchung kommt es alle 20ms (50 Hertz) bei einem Polaritätswechsel zu einer erneuten Teilentladung (siehe Abbildung 15). Bei Gleichspannungsbeanspruchung hingegen kann es zu einer erneuten Teilentladung infolge des begrenzten Widerstandes des Dielektrikums kommen. Die Zeit Δt , die zwischen den einzelnen TE vergeht, setzt sich zusammen aus Erholungszeit (recovery time) und der Verzögerungszeit (time lag). Die Teilentladungswiederholungsraten, ist der Kehrwert von Δt :

$$n = \frac{1}{\Delta t}.$$

Gleichung 5

Im Falle der maximalen Wiederholungsrate ist die Verzögerungszeit null. Dadurch ergibt sich:

$$\Delta t = t_R = -\tau \ln \left(\frac{V_{c,\infty} - V_{min}}{V_{c,\infty} - V_r} \right).$$

Gleichung 6

Das kann auch angeschrieben werden als:

$$\Delta t = -\tau \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{V_{c,\infty} - V_r}{V_{min} - V_r}} \right).$$

Gleichung 7

Im Allgemeinen gilt $V_{c,\infty} \gg V_r$, wodurch sich folgende Vereinfachung ergibt:

$$\Delta t \approx -\tau \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{V_{c,\infty}}{V_{min}-V_r}} \right).$$

Gleichung 8

Unter Anwendung einer Linearisierung nach der Taylorentwicklung 1. Ordnung zeigt sich folgende Näherungslösung:

$$\Delta t \approx \tau \left(\frac{V_{min} - V_r}{V_{c,\infty}} \right)$$

Gleichung 9

Das bedeutet für die Teilentladungsrate ergibt sich:

$$n = \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{c,\infty}}{V_{min}-V_r} \right).$$

Gleichung 10

Man sieht, dass die Wiederholungsrate sich linear proportional zu $V_{c,\infty}$ verhält, was proportional zur angelegten Spannung ist. Diese Abhängigkeit kann auch in der Praxis gemessen werden. Die Teilentladungseinsetzspannung ist abhängig von minimalen Wert der Wiederholungsrate, der gemessen werden kann. [MOR05].

Abschließend soll noch die Teilentladungsrate bei Gleichspannung mit jener bei Wechselspannung verglichen werden:

Für Wechselspannung gilt:

$$n_{ac} = \frac{b}{c} \frac{dV}{dt} \frac{1}{V_{min} - V_r}$$

Gleichung 11

Für Gleichspannung gilt:

$$n_{dc} = \frac{1}{\tau} \frac{b}{c} \frac{V}{V_{min} - V_r}$$

Gleichung 12

Das bedeutet die Wiederholungsrate sind gleich, wenn:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{\tau}$$

Gleichung 13

Vergleicht man die Frequenz von 50 Hertz mit Gleichspannung so würde dies ein τ von ungefähr 3ms bedeuten. In der Praxis ist τ jedoch viele Größenordnungen größer, was bedeutet, dass die Teilentladungsrate bei Wechselspannung viele Größenordnungen höher ist als bei Gleichspannung bei derselben Spannungsamplitude [MOR05].

Es gibt jedoch eine Ausnahme, wobei auch bei Gleichspannung sehr hohe TE-Raten erreicht werden können, nämlich beim Auftreten des Polarisierungseffektes [MOR05].

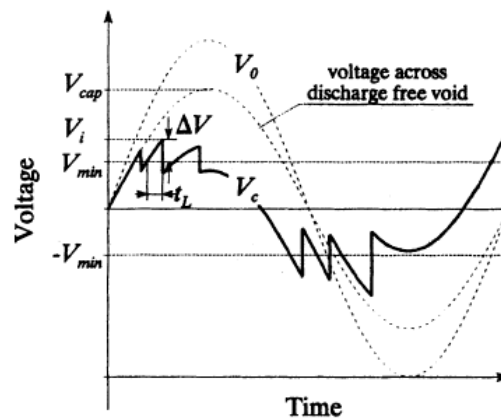


Abbildung 15 Wiederauftreten von Entladungen bei Wechselspannung [MOR05]

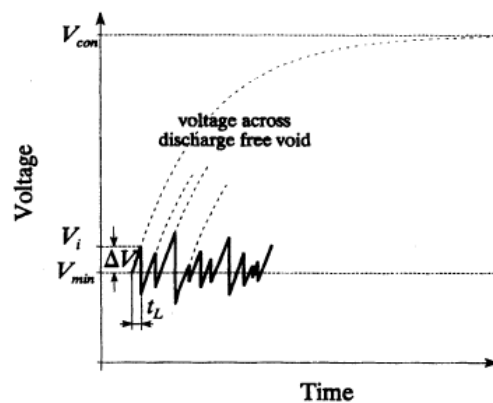


Abbildung 16 Wiederauftreten von Entladungen bei Gleichspannung [MOR05]

3.3. Polarisierungseinschwingvorgänge

Wenn die Spannung angelegt wird, kommt es zum Polarisationsvorgang im Isolationsmedium. Dabei kommt es zu erhöhter Leitfähigkeit aufgrund des Polarisationsstromes. Dabei ist auch die Teilentladungsrate sehr hoch, wie in Abbildung 17 ersichtlich ist [MOR05].

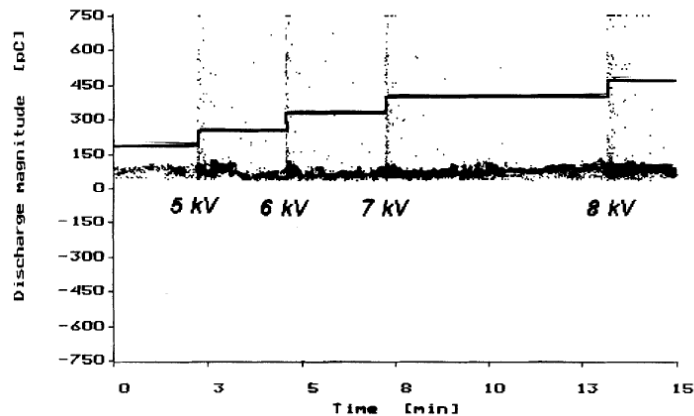


Abbildung 17 Teilentladungen bei schrittweiser Erhöhung der Spannung [MOR05]

3.4. Der Polaritätseffekt

Für die Erklärung dieses Effektes eignet sich eine Spitze-Platte Anordnung ausgezeichnet. Bei dieser Anordnung ergibt sich ein sehr inhomogenes Feld, welches in Abbildung 18 dargestellt ist [KÜC09].

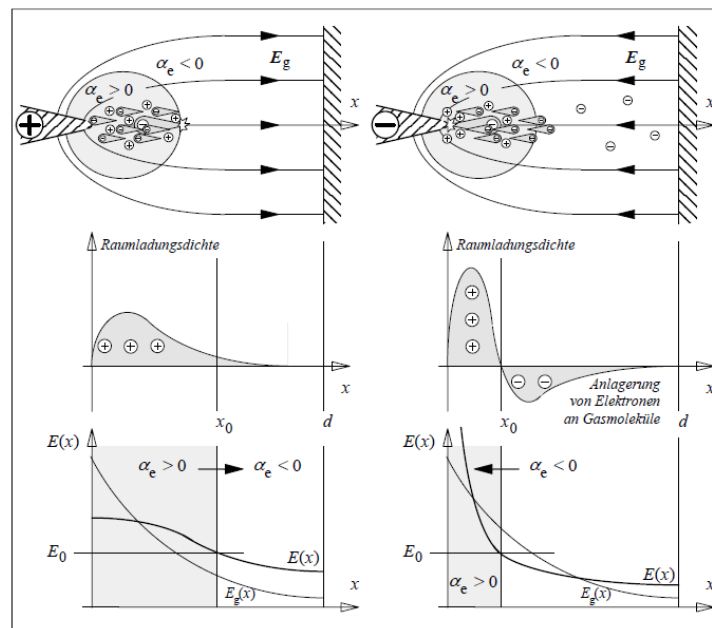


Abbildung 18 Polaritätseffekt [KÜC09]

Die Lawinen starten bei positiver Spitze, weil vor der Kathode die Feldstärke viel zu niedrig ist (siehe Abbildung 18 links). Die erste Lawine kann starten, sobald ein Startelektron innerhalb des Nahbereiches mit positiven Ionisierungskoeffizienten entsteht. Diese breitet sich im umliegenden Gebiet aus. Durch intensive Photoionisation entstehen immer neue Folgelawinen, sofern die kritische Elektronenzahl hoch genug ist und der Streamermechanismus zum Tragen kommt. Wenn dieser zum Tragen kommt, kommt es zu einem sprunghaftigen Anstieg des Stromes ausgelöst durch die erste Lawine. Es existiert eine stabil glimmende Vorentladung. Die schlecht beweglichen Ionen bleiben vor der Spitze zurück und bilden eine positive Raumladungswolke (Abbildung 18 (links Mitte)). Diese reduziert die elektrische Feldstärke vor der positiven Spitze. Gleichzeitig kommt es zu einer Erhöhung im feldschwachen Bereich. In Abbildung 18 (links unten) erkennt man, dass sich die Isoliergrenze verschiebt. Durch diese neue Situation gibt es bei erhöhter Spannung günstige Bedingungen für Streamerbildungen in den feldschwachen Bereichen. Wodurch die Möglichkeit zum Durchschlag erleichtert wird [KÜC09].

Das Startelektron muss bei negativer Spitze direkt an der Spitze in einem sehr kleinen Bereich verfügbar sein. Bis ein Startelektron entsteht, kann es darum zu einer erheblichen Verzögerung der Zündung kommen, bedingt durch die statistischen Streuzeiten. Selbst wenn die Koronaeinsatzspannung bereits erreicht ist, treten nur unregelmäßige Koronaimpulse auf. Diese Folge ist stark von der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials abhängig. Wie die Streamer in feldschwaches Gebiet vordringen, ist in Abbildung 18 (oben rechts) dargestellt. Wird die Ionisationsgrenze $\alpha_e=0$ überschritten, sinkt die Elektronenanzahl in den Lawinen. Der Grund ist die Anlagerung der Elektronen an elektronegative Gasmoleküle. Eine negative Raumladung entsteht. Vor der Spitze jedoch hinterlassen die Lawinen eine positive Raumladungswolke. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 18 (rechts Mitte) dargestellt. Die Feldstärke vor der Spitze wird deshalb markant erhöht und es kommt zu einer Art Vergleichmäßigung der Feldverteilung bis zur Gegenelektrode, Abbildung 18 (rechts unten). Die Ionisationsgrenze wird zeitgleich zu niedrigeren Werten verschoben. Der Durchschlag wird in diesem Fall hinausgezögert, weil eine Vergleichmäßigung des Feldstärkeverlaufs auftritt. Ausschlaggebend hierfür ist, dass das Wachsen der Streamer in den feldschwachen Bereichen schwieriger ist [KÜC09].

Für Wechselspannung lässt sich daraus schließen, dass der Durchschlag im Scheitel der positiven Halbwelle erfolgt. Für Gleichspannung kann abschließend festgehalten werden, dass die Durchschlagsspannung bei negativer Spitze größer ist als bei positiver Spitze [KÜC09].

3.5. Statistik von Teilentladungen

Bei der konventionellen elektrisch erfassten Teilentladungsmessung wird die scheinbare Ladung in pC gemessen. In letzter Zeit gab es auch Versuche mittels Feldtheorien das Teilentladungsverhalten zu verstehen und vorherzusagen. Obwohl eine Vielzahl neuer Erkenntnisse hervorkamen, bleibt die Tatsache, dass das Phänomen der TE nach wie vor ein statistischer Prozess ist und es eine erhebliche Streuung in Bezug auf Größen wie Amplitude, Pulsform und Auftrittshäufigkeit gibt. Jedoch lassen sich gewisse Prozesse charakteristisch beschreiben und analysieren. So haben z.B. nicht alle Pulsformen die gleiche Wahrscheinlichkeit bei bestimmten Ursachen aufzutreten. Daher macht es Sinn, die Variablen wie Amplitude und Auftrittshäufigkeit in Wahrscheinlichkeitsverteilungen einzutragen [VAN91].

3.6. Wahrscheinlichkeiten des Auftretens

Es wurde gezeigt, dass die Zeit, die vergeht vom Erreichen der notwendigen Feldstärke bis zur TE, einer Poisson Verteilung folgt:

$$\frac{n(t)}{n(\infty)} = \exp(-R_e(\Delta V)P(\Delta V)t)$$

Gleichung 14

$(n(t))/(n(\infty))$ Verhältnis der Entladungen welche eine Verzögerungszeit größer als t haben

$R_e(\Delta V)$ Rate bei der frei Elektronen entstehen

$P(\Delta V)$ Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron einen Durchschlag oder eine TE verursacht

Sowohl R_e als auch P sind Funktionen der angelegten Spannung [VAN91].

Gleichung 14 gilt nur für den Beginn von negativen Koronaentladungsimpulsen in Gasverbindungen. Dies wurde von Van Brunt und Kulkarni [VAN90] bewiesen. Die Gleichung gilt jedoch nicht im Allgemeinen für Teilentladungen. Dort sind nämlich Erinnerungseffekte von großer Bedeutung. In diesem Fall werden nämlich die Feldstärke und das Loslösen des Startelektrons von zeitabhängigen Arten und Ionendichten oder Oberflächenladungen aus früheren Teilentladungen bestimmt.

Die Feldstärke des lokalen elektrischen Feldes ist abhängig von zwei Parametern. Diese sind einerseits die extern angelegte Spannung und andererseits die verbliebene Spannung aufgrund früherer Entladungsereignisse. Die statistische Streuung der Amplitude und der Auftrittszeit von früheren TE haben einen erheblichen Einfluss auf die lokale Feldstärke.

Prozesse die ein Startelektron ausbilden können und in weiterer Folge zur TE führen [VAN91]:

1. Photoionisation der Gasmoleküle
2. Photon, Ion oder Elektron das aus der Oberfläche gelöst wird
3. Photonen-Elektronen Ausstoß aufgrund der Feldstärke
4. Auslösung durch metastabile Arten in der Oberfläche
5. Photonenlösung von negativen Ionen
6. Feldinduzierte Loslösung von negativen Ionen
7. Feldinduzierte Ionisation von Molekülen
8. Elektronenfeldemissionen von der Oberfläche
9. Thermische Emission von Elektronen

Je nachdem welche Bedingungen vorherrschen wirkt einer dieser neun Vorgänge. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron aufgrund von Photoionisation gelöst wird, ist im Allgemeinen relativ klein, außer man setzt das Isolationssystem bewusst hoher Strahlung aus. Wenn der Prüfling mit elektromagnetischer oder auch radioaktiver Strahlung belastet wird, ist es wahrscheinlicher, dass es zur Loslösung eines Elektrons aus der Oberfläche kommt. Außerdem kann die Anwesenheit eines starken elektrischen Feldes das Loslösen von Elektronen sowohl beschleunigen als auch verlangsamen. Eine Verstärkung des elektrischen Feldes verursacht von Ladungen an der dielektrischen Oberfläche, kann außerdem die Wahrscheinlichkeit des Austretens eines Elektrons erhöhen. Für eine Ionisation von Gasmolekülen verursacht vom Feld sind sehr hohe Feldstärken erforderlich, die aufgrund von Ungleichmäßigkeiten im Isolationssystem auftreten können. Daher kann diese Ionisation im Allgemeinen vernachlässigt werden. Auch für das Loslösen von negativen Ionen durch das elektrische Feld sind Feldstärken von $>1\text{MV/cm}$ erforderlich. Auch die Photonlösung von negativen Ionen kann vernachlässigt werden, weil eine extrem hohe Intensität der Strahlung in der Entladungslücke gegeben sein müsste. Setzt man nun voraus, dass keine heißen Metaloberflächen in Kontakt mit dem Isolationssystem kommen, findet auch die thermische Emission nicht statt. Ein Aufwärmen der Metalle findet zwar statt während des TE Prozesses, allerdings ist es unwahrscheinlich, dass die Hitze groß genug wird um thermische Emissionen zu ermöglichen [VAN91].

Somit bleiben 3 Prozesse übrig, die das Loslösen von Startelektronen ermöglichen:

1. Feldemission
2. Loslösung von negativen Ionen durch Kollisionen
3. Loslösen von metastabilen Arten an Oberflächen

Diese 3 Prozesse sind wesentlich. Die Prozesse können außerdem von früheren TE beeinflusst sein (z.B. negative Ionen oder metastabile Arten aufgrund früherer TE). Es ist wissenschaftlich bestätigt [VAN91], dass metastabile Atome oder Moleküle, die bei TE entstehen, in Gas für einen längeren Zeitraum bestehen können. Die Anwesenheit eines starken elektrischen Feldes erhöht außerdem bewiesenermaßen die Anzahl metastabiler Arten [VAN91]. Obwohl Elektronen oder positive Ionen zum Teil Elektronen aus Oberflächen lösen könnten, ist dies zu vernachlässigen, weil die Zeit in der sie vom elektrischen Feld weiterbewegt werden, viel kürzer als die Zeit des TE Impulses ist. Diese Überlegung gilt natürlich auch für negative Ionen. In Gasen unter hohem Druck haben die Ionen nicht genug kinetische Energie um Elektronen aus der Oberfläche zu lösen.

Ionen, welche bei vorangegangenen TE entstanden sind können darauffolgende TE auf zwei Arten beeinflussen:

1. Durch Formen einer Raumladungswolke, welche die Feldstärke beeinflusst
2. Durch direktes Loslösen von Elektronen aus der Oberfläche

Die Wahrscheinlichkeit selbst, dass ein Elektron aus der Metalloberfläche gelöst wird, ist abhängig von der lokalen Feldstärke. Die Beschaffenheit der Oberfläche, ob sie rau oder verschmutzt ist von Bedeutung, weil dadurch die Feldstärke beeinflusst wird.

Die dargestellten Messdaten in Abbildung 19 zeigen, dass Wasserdunst die Entwicklung von Lawinen in SF_6 erheblich beeinflusst. Dieser Effekt wurde erstmals von Van Brunt festgestellt. Er ist eine Folge der erhöhten Loslösungsrate von Elektronen in Kombination mit H_2O . In diesem Fall wird die Elektronenlawine ausgelöst von Kollisionen, welche im Gas passieren. Die leicht gebundenen Ionen wie OH^- lösen sich leichter bei gegebenen E/N als die stark gebundenen negativen Ionen bei SF_6 . Daher treten freie Elektronen mit höherer Wahrscheinlichkeit bei größerer Entfernung zum positiven Punkt der Elektrode auf. In weiterer Folge führt dies natürlich zur Bildung größerer Lawinen, wenn es dort eine größere Entfernung gibt, was das Lawinenwachstum ermöglicht [VAN91].

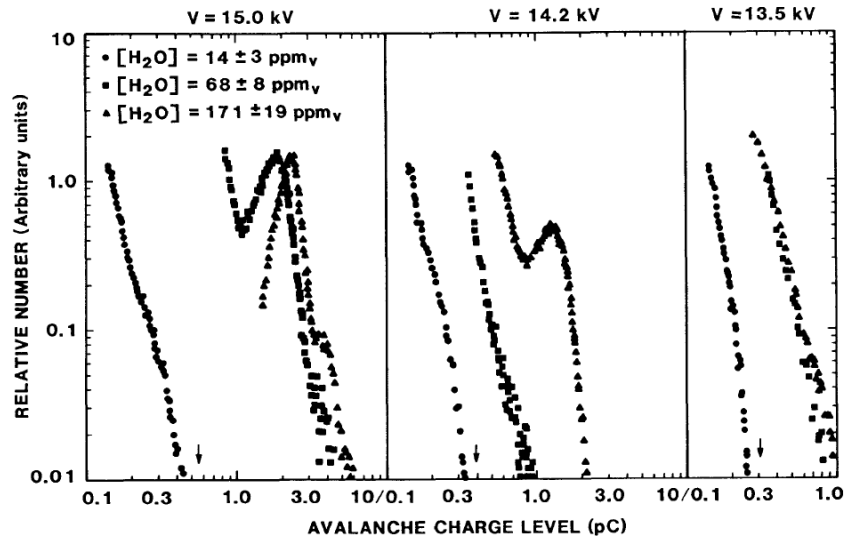


Abbildung 19 Gemessene Größenverteilung von Elektronenlawinen in SF_6 [VAN91]

Das Problem ist, dass diese Wahrscheinlichkeitsmodelle für ideale Anordnungen gelten und sehr kompliziert sind. In der Praxis müsste man jedoch noch andere Faktoren berücksichtigen, weshalb die Modelle hierfür versagen [VAN91].

3.7. Das elektrische Feld bei Gleichspannung

Das Feld setzt sich unter Gleichspannung wie folgt zusammen [FRO95]:

$$E_{DC} = E_{\epsilon} + E_{\rho}$$

Gleichung 15

In Analogie zum elektrischen Feld unter Wechselspannung wird das E_{ϵ} Feld von ϵ bestimmt. Das Feld E_{ρ} ist allerdings bestimmt von der angesammelten Ladung, was bei Wechselspannung nicht vorkommt. Das aus den beiden Komponenten zusammengesetzte Feld zeigt folgenden Verlauf dargestellt in Abbildung 20 beim Anlegen einer Spannung:

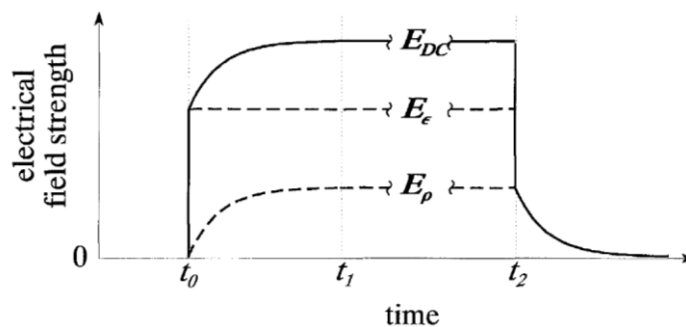


Abbildung 20 Verlauf des elektrischen Feldes [FRO95]

Anlegen der Spannung

Wenn zum Zeitpunkt t_0 eine Spannung V_0 an den Isolator angelegt wird, ist die Zeit, die benötigt wird, bis sich V_0 einstellt, verhältnismäßig klein zur Zeit, die benötigt wird, damit sich Raumladung ansammeln kann. Zum Zeitpunkt t_0 ist die Komponente E_ρ vernachlässigbar, was in Abbildung 20 zu sehen ist, wodurch folgende Gleichung für E gilt:

$$E_{DC}(t_0) = E_\epsilon$$

Gleichung 16

Das Ansammeln der Raumladung passiert zwischen dem Zeitpunkt t_0 und t_1 (Abbildung 20). Dadurch ändert sich das elektrische Feld ständig. Innerhalb dieses Zeitraums in Abhängigkeit vom verwendeten Material kann dieser Vorgang Minuten aber auch Tage dauern.

Konstantes Gleichspannungsfeld

Nach dem Ansammeln der Ladungen erreicht die Feldstärke E_{DC} seinen endgültigen Wert. Dies ist in Abbildung 20 zwischen dem Zeitpunkt t_1 und t_2 der Fall.

$$E_{DC}(t > t_1) = E_\epsilon$$

Gleichung 17

Abschalten der Spannung

Nach dem Abschalten der Spannung, also für $t > t_2$ in Abbildung 20 dargestellt, bleibt das ladungsinduzierte Feld E_ρ bestehen und nimmt innerhalb von Minuten bis zu Wochen ab.

Um lokale Felderhöhungen zu erkennen und infolge die kritischen Stellen in der Konstruktion zu finden, werden heute im Allgemeinen Kalkulationsprogramme verwendet. Die elektrische Feldstärke kann zwar jederzeit berechnet werden, allerdings kann die Übergangszeit bis zum stationären Feld nicht beschrieben werden. Das ladungsinduzierte Feld wird als Zeitfunktion betrachtet. Ein entsprechendes Programm wurde von K.C. Wen und Y.B. Zhou entwickelt. Der Feldübergang soll nun an folgendem Beispiel beschrieben werden:

Zum Zeitpunkt $t=0$ wird eine Gleichspannung an einen Prüfling bestehend aus 3 verschiedenen Materialien angelegt. Der Übergang wird an einem RC Netzwerk simuliert (siehe Abbildung 21). Am Anfang ist die Feldverteilung kapazitiv ($E_\rho = 0$) und dann sammeln sich die Ladungen an den Grenzflächen. Wenn wir nur die Felder E_ϵ und E_σ betrachten, wären die Schichten 1 und 3 am meisten belastet. Betrachtet man aber auch die

zeitabhängige Spannungsverteilung, zeigt sich, dass die größte Belastung in der zweiten Schicht auftritt (siehe Abbildung 21).

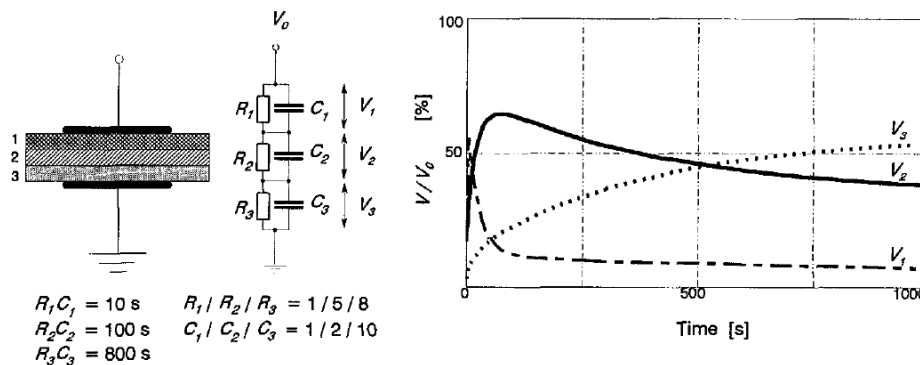


Abbildung 21 Transiente Spannung [FRO95]

Daraus lassen sich zwei Folgerungen schließen:

1. Der Zeitraum zwischen Anlegen der Spannung und einem konstanten Feld muss als kritisch betrachtet werden. Deshalb müssen Kalkulations- oder Approximationsmethoden gefunden werden, um den Übergang zu simulieren.
2. Wenn man unter Gleichspannung testen will, muss die der Prüfling länger als die Übergangszeit belastet werden.

3.8. Mechanismus der Ladungsansammlung

Gemäß $\rho = \sigma E_\sigma \nabla \frac{\epsilon}{\sigma}$ müssen externe Einflüsse berücksichtigt werden, wenn sie einen Gradient $\frac{\epsilon}{\sigma}$ verursachen. So verursachen z.B. Verluste in Kabeln einen Temperaturkoeffizient, welcher zu einem Gradient $\frac{\epsilon}{\sigma}$ führen. Auch externe Bestrahlung kann zur lokalen Erhöhung der Leitfähigkeit führen und damit einen Gradienten verursachen. Auch bei nur einem verwendeten Material kann es zu Ladungsansammlung kommen. Ob es zur Ladungsansammlung kommt und welche Polarität diese hat, ist abhängig vom Leitungsmechanismus an der Kontaktstelle Elektrode/Isolator und vom Hauptteil des Dielektrikums. Bezüglich der Polarität der Raumladung kann zwischen zwei Arten unterschieden werden (siehe Abbildung 22):

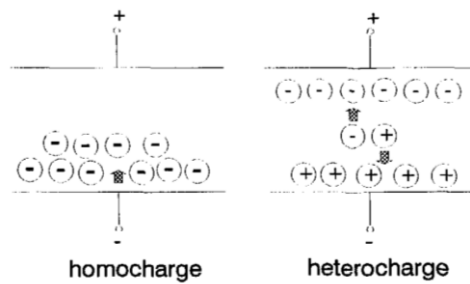


Abbildung 22 Arten der Ladungsansammlung [FRO95]

Homoladung

Die Polarität der Raumladung ist dieselbe wie jene an der nächsten Elektrode. Dieser Fall tritt auf, wenn der Ladungstransport durch den Elektroden/Isolator Kontakt gegenüber dem Ladungstransport im Inneren überwiegt. Damit ist der Strom durch das gesamte System vom Hauptteil abhängig. Diese Ladungen reduzieren die dielektrische Stärke, was in weiterer Folge auch zum Durchschlag führen kann [FRO95].

Heteroladung

In diesem Fall ist die Polarität der Raumladung genau Gegenteilig zur nächsten Elektrode. Dieser Fall tritt auf, wenn der Elektrode/Isolator Kontakt den Abbau von mobilen Ladungen blockiert. Also ist der Transport im Hauptteil größer als der limitierte Strom durch den Elektrode/Isolator Kontakt. Die Ansammlung heterogener Ladung in der Nähe der Elektrode verursacht eine Feldverstärkung und kann somit zu TE führen [FRO95].

3.9. Problemstellung bei hoher Gleichspannung

3.9.1. Phasenbezug

Durch das Fehlen des Phasenbezugs ist eine Unterscheidung in „innere“ und „äußere“ Teilentladungen schwieriger. Es gibt keinen Bezugspunkt, an dem die Teilentladungen auftreten, wie dies bei Wechselspannung der Fall ist. Bei Gleichspannung treten Teilentladungen scheinbar willkürlich auf und man kann sie nur über eine bestimmte Zeitspanne messen und die einzelnen Teilentladungen über die Zeit auftragen [FAB12], [FRO95].

3.9.2. Teilentladungsverhalten

Für das Eintreten von Teilentladungen bei Gleichspannung müssen 2 Bedingungen erfüllt sein. Die Spannung muss entsprechend hoch sein also einen Minimalwert überschreiten und es muss ein Startelektron vorhanden sein. Daraus ergibt sich dass es sich um einen

statistischen Prozess handelt. Udo Fromm hat in seiner Doktorarbeit 1995 ein Modell entwickelt, welches das statistische Verhalten für innere Teilentladungen und für Korona beschreibt. Dabei verwendet er die Zeitspanne vom Anlegen der Spannung bis zur ersten Teilentladung, die Entladungsamplitude und die Erholungszeit als entscheidende Parameter [FRO95].

3.9.3. Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild für Teilentladung bei Gleichspannung ist bereits in Abbildung 8 dargestellt. Allerdings gilt dieses Ersatzschaltbild nur in dieser Form, wenn tatsächlich eine Teilentladung auftritt. Wenn keine Teilentladungen auftreten, besteht das Ersatzschaltbild aus einem ohmschen Widerstand und deren Leitfähigkeit ist entscheidend [FAB12].

3.9.4. Transiente Vorgänge

Transiente Felder treten ebenso bei Gleichspannung auf und bedürfen einer besonderen Aufmerksamkeit. Es kommt sowohl beim Ein- bzw. Ausschalten der Spannung, sowie auch beim sogenannten „polarity reversal“ zu transienten Feldern [FRO95].

3.9.5. Teilentladungsdiagnose

Das Verhalten der Isolationsmaterialien bei Gleichspannung unter konstanter Belastung ist vergleichbar mit jenem bei Wechselspannung. Das Alterungsverhalten entspricht der „Badewannenfunktion“, wie es bei vielen technischen Anwendungen üblich ist. Als Teilentladungstest wird ein einfacher Stop oder Go Test vorgeschlagen. Die Herausforderung ist, dass es für die Teilentladungsdiagnose bei Gleichspannung im Vergleich zu Wechselspannung noch wenige Erfahrungen aus der Praxis gibt [FRO95], [KRE95].

4. Teilentladungsmesstechnik

4.1. Definition Teilentladung und ihre Bedeutung

In der Hochspannungstechnik umfasst der Begriff Teilentladungen jene Erscheinungsformen elektrischer Entladungen, welche die Distanz zwischen den Elektroden nur teilweise überbrücken. Diese werden unterschieden in innere und äußere Teilentladungen. [SCH81].

Das große Problem der Isolationstechnik ist, dass in Hohlräumen schon bei sehr kleinen Spannungen innere Entladungen stattfinden. Diese verringern den Oberflächenwiderstand des Hohlraumes abhängig vom Isolierstoff. Schließlich sinkt die Lebensdauer des Gerätes, weil der Hohlraum leitend und die Isolationsdistanz somit verkürzt wird. Wie sich der Alterungsmechanismus vollzieht, ist sehr komplex und noch nicht vollständig erforscht. Trotzdem lassen sich mit Hilfe von Teilentladungsmessungen im Inneren hochspannungstechnischer Apparate wertvolle Hinweise auf besonders gefährdete Stellen finden. Eine lokal verstärkte Isolation z.B. verringert die Beanspruchung und erhöht damit die Lebensdauer der Geräte beträchtlich.

Ein weiteres Problem der Verlustfaktormessung ist, dass wenige starke Entladungen auf gleiche Weise bewertet werden, wie eine große Anzahl schwacher Entladungen. Um zu einem Ergebnis zu kommen, bedient man sich daher verschiedener Verfahren der Teilentladungsmesstechnik zusätzlich zur Verlustfaktormessung. Man versucht unter den erfassbaren Größen der Teilentladungsmesstechnik jene Größen zu finden, welche ein tatsächliches Maß für die Gefährdung des Prüflings sind. Die Ortung und messtechnische Erfassung von Teilentladungen in Hohlräumen ist möglich, weil diese mit anderen elektrischen und physikalischen Erscheinungen verbunden sind. So können z.B. visuelle und akustische Erscheinungen gemessen werden. Aber auch Teilentladungsströme im äußeren Stromkreis und die damit verbundenen elektromagnetischen Felder können erfasst werden und zum Nachweis innerer Teilentladungen dienen. Aufgrund der besonderen Schwierigkeiten müssen individuelle Überlegungen bei der Durchführung und Deutung der Teilentladungsmessungen angestellt werden, welche folgende Aspekte berücksichtigt:

- Unterschiede im elektrischen und konstruktiven Aufbau der Prüflinge (z.B. Hochspannungskabel und -kondensatoren, Spannungswandler und Großtransformatoren) (Geometrie)
- Parameter der Ankopplung der Messeinrichtung an den Prüfling (Schleifenbildung)
- Reflexion und Dämpfung von TE-Impulsen (Wellenausbreitung)

4.2. Teilentladungsdiagnose

Wegen der Komplexität des Entladungsgeschehens vieler Teilentladungsereignisse gibt es nach wie vor keine unmittelbare physikalische Interpretation für alle Entladungsprozesse. Durch Verfahren wie Signalanalyse, statistische Verfahren und durch Verfahren der Mustererkennung ist man heute zwar sehr weit fortgeschritten, aber es sind noch nicht alle Details bekannt und klar. Nach wie vor gilt es folgende essentielle Fragen zu beantworten [KÜC09]:

- Ort der Fehlerstelle?
- Vorliegende Fehlerart?
- Wie stark wirkt sich eine Schädigung aus?
- Unterscheidung bei mehreren Fehlern?
- Welche Auswirkungen auf die Lebensdauer?[KÜC09].

4.3. Stand der Normung

Die zurzeit gültige Norm für Teilentladungen ist die IEC 60270. Die Kenngrößen sind im Allgemeinen, sowohl für Wechselspannung als auch für Gleichspannung anwendbar [IEC 60270].

4.3.1. Begriffe und Kenngrößen

Gemäß der internationalen Norm IEC 60270 gelten folgende Begriffe und Kenngrößen, welche für Wechselspannung definiert sind [IEC 60270]:

Teilentladung (TE)

„Örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einem Leiter auftreten kann, aber nicht muss“

Teilentladungsimpuls (TE-Impuls)

„Strom- oder Spannungsimpuls, der von einer Teilentladung des Prüflings herrührt. Der Impuls wird mittels eines geeigneten Detektorkreises gemessen, der in den Prüfkreis zum Prüfzweck eingebracht wird“

Scheinbare Ladung q

„Die scheinbare Ladung q eines Teilentladungsimpulses ist die Ladung, die, wenn sie innerhalb einer sehr kurzen Zeit zwischen den Anschlüssen des Prüfobjektes in einen festgelegten Prüfkreis eingespeist wird, dieselbe Anzeige auf dem Messgerät geben würde

wie der TE-Impuls selbst. Die scheinbare Ladung wird gewöhnlich in Picocoulomb (pC) ausgedrückt“

Impulswiederholrate n

„Verhältnis zwischen allen aufgezeichneten TE-Impulsen in einem gewähltem Zeitintervall und der Dauer dieses Zeitintervalls“

Impulswiederholfrequenz N

„Anzahl von Teilentladungsimpulsen je Sekunde, im Falle von äquidistanten Impulsen“

Mittlerer Entladungsstrom I

„Abgeleitete Größe, die die Summe der Absolutwerte von einzelnen scheinbaren Ladungswerten q_i während eines gewählten Referenzzeitabschnitts T_{ref} dividiert durch diesen Zeitabschnitt ist:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|)$$

Gleichung 18

Der mittlere Entladungsstrom wird im Allgemeinen in Coulomb je Sekunde (C/s) oder in Ampere (A) ausgedrückt“

Entladungsleistung P

„Abgeleitete Größe, die die mittlere Impulsleistung ist, die als Folge der einzelnen scheinbaren Ladungswerte q_i während eines gewählten Referenzzeitabschnitts T_{ref} in die Anschlussklemmen des Prüfobjekts eingespeist wird:

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i)$$

Gleichung 19

Wobei $u_1, u_2 \dots u_i$ die Momentanwerte der Prüfspannung zum Zeitpunkt des Auftretens t_i der einzelnen scheinbaren Ladungen q_i sind. Die Vorzeichen der einzelnen Werte müssen beachtet werden. Die Entladungsleistung wird im Allgemeinen in Watt (W) ausgedrückt“

Quadratische Ladungsgröße D

„Abgeleitete Größe, die die Summe der Quadrate der scheinbaren Ladungswerte q_i während eines gewählten Referenzzeitabschnitts T_{ref} dividiert durch diesen Zeitabschnitt ist:

$$D = \frac{1}{T_{ref}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2)$$

Gleichung 20

Die quadratische Ladungsgröße wird im Allgemeinen in Coulomb² je Sekunde (C²/s) ausgedrückt“

Funktstörspannung U_{RDV}

„Abgeleitete Größe, die die Anzeige eines Funkstörmessgeräts ist, wenn es zur Anzeige der scheinbaren Ladung q einer Teilentladung benutzt wird. Die Funkstörspannung U_{RDV} wird im Allgemeinen in μV ausgedrückt“

Größte wiederholt auftretende Teilentladungsstärke

„Größte Stärke, die von einem Messsystem aufgezeichnet wird, das eine Impulsfolgeantwort wie in IEC 60270 4.3.3 festgelegt hat. Der Begriff der größten wiederholt auftretenden TE-Stärke ist nicht auf Prüfungen mit Gleichspannung anwendbar“

Festgelegte Teilentladungsstärke

„Größter Wert einer jeden zu TE-Impulsen in Beziehung stehenden Größe, die in einem Prüfling bei einer festgelegten Spannung nach festgelegter Vorbehandlung und Prüfverfahren, zulässig ist. Bei Wechselfeldprüfungen ist der festgelegte Wert der scheinbaren Ladung q die größte wiederholt auftretende TE-Stärke“

Grundstörungen

„Signale, die während einer TE-Prüfung erfasst werden und nicht vom Prüfling herrühren“

Teilentladungseinsetzspannung U_i

„Angelegte Spannung, bei der wiederholt auftretende Teilentladungen zum ersten Mal am Prüfobjekt beobachtet werden, wenn die an den Prüfling angelegte Spannung allmählich von einem geringeren Wert, bei dem noch keine Teilentladungen beobachtet werden, gesteigert wird. In der Praxis ist die Einsetzspannung U_i die niedrigste Spannung, bei der die Amplitude einer gewählten TE-Impulsgröße gleich oder größer einem festgelegten niedrigen Wert wird“

Teilentladungsaussetzspannung U_e

„Angelegte Spannung, bei der wiederholt auftretende Teilentladungen im Prüfobjekt aufhören aufzutreten, wenn die an den Prüfling angelegte Spannung allmählich von einem höheren Wert, bei dem TE-Impulsgrößen beobachtet werden abgesenkt wird. In der Praxis ist die Aussetzspannung U_e die niedrigste Spannung, bei der die Amplitude einer gewählten TE-Impulsgröße gleich oder kleiner einem festgelegten niedrigen Wert wird“

Teilentladungsprüfspannung

„Festgelegte Spannung, die nach einem Teilentladungsprüfverfahren angelegt wird, bei dem am Prüfling keine TE-Impulse auftreten sollen, die über eine festgelegte Teilentladungsstärke hinausgehen“

4.4. Teilentladungsmesskreis

Die verwendete Messtechnik, die zur Erfassung von Teilentladungsimpulsen notwendig ist, ist in Abbildung 23 dargestellt [KÜC09].

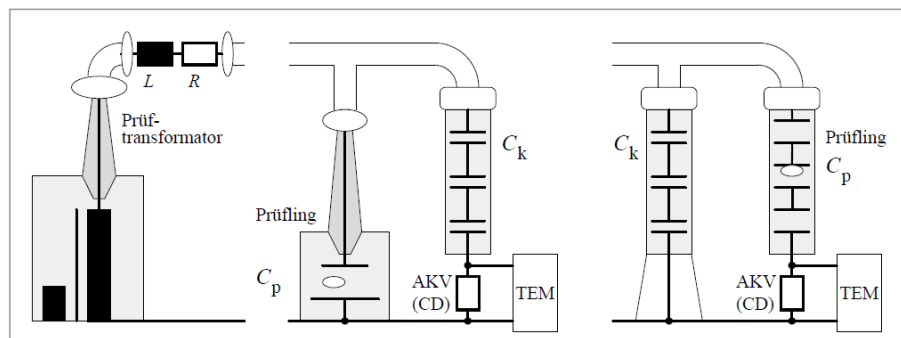


Abbildung 23 Teilentladungsprüfung [KÜC09]

Der Messkreis besteht aus einem Koppelkondensator¹ mit der Kapazität C_k , welcher parallel zur Kapazität C_p des angeschlossenen Prüflings am Prüftransformator geschaltet werden muss. Der Teilentladungsstromimpuls wird als Spannungsimpuls über einen Ankopplungsvierpol², welcher sich entweder im Zweig des Prüflings oder im Zweig des Koppelkondensators befindet, erfasst. Äußere Störquellen stellen eine Herausforderung bei der Messung von Teilentladungen dar und müssen durch entsprechende Schirmung oder eine Brückenschaltung unterdrückt werden³ [KÜC09].

¹ Es kann zur Auskopplung der Teilentladungssignale manchmal auch ein anderes Verfahren verwendet werden anstatt dem Koppelkondensator. Mögliche Alternativen: kapazitive Sensoren, Durchführungskapazitäten, magnetische Sensoren, Rogowski-Spulen oder Antennen zur Erfassung des elektromagnetischen Feldes [KÜC09].

² Das sind Netzwerke, die Band- oder Hochpassverhalten haben. Sie bestehen z.B. aus einer Induktivität und einem Widerstand, die parallel verschaltet sind. Das dient dazu, dass vermieden wird, dass das empfindliche Teilentladungsmessgerät durch die netzfrequenten Spannungen übersteuert wird [KÜC09].

³ Man kann eine so genannte Brückenschaltung bei der sich Ankopplungsvierpole sowohl im Zweig des Prüflings als auch im Zweig des Koppelkondensators befinden verwenden. Dadurch wird ein gleichgerichtetes Signal an beiden Ankopplungsvierpolen hervorgerufen. Kommt es zu einer Teilentladung im Prüfling oder im Koppelkondensator bewirken diese entgegengerichtete Signale [KÜC09].

Es muss der gesamte Messaufbau frei von Teilentladungen sein. Dazu müssen folgende Punkte erfüllt werden [KÜC09]:

- Verwendung entsprechender Geräte (Trafo, Koppelkondensator)
- Ausreichend verrundete Zuleitungen und Armaturen
- Alle metallischen Teile durch Kontaktierung auf definiertem Potenzial.

4.5. Signalbetrachtung im Frequenzbereich

Zur weiteren Analyse im Frequenzbereich kann das Pulsspektrum verwendet werden. Mit Hilfe dieses Spektrums kann zwischen verschiedenen Impulstypen unterschieden werden (Teilentladungsquellen und auch Störer). Es können nicht nur einzelne FFT-Kurven in Echtzeit betrachtet werden (Abbildung 24, rote Kurve), sondern auch mehrere Kurven durch statistische Verfahren abgebildet werden. Es können so die Häufigkeiten verschiedener Spektren ähnlich wie beim farbcodierten Fingerprint dargestellt werden [RET09].

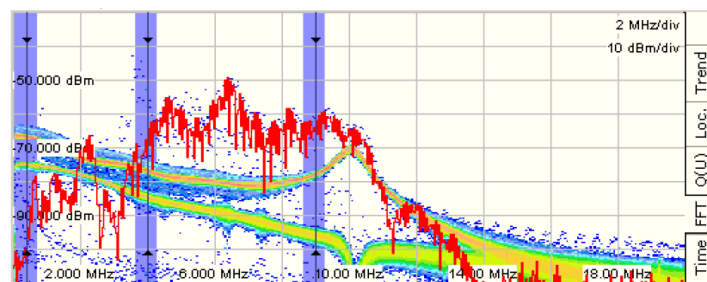


Abbildung 24 Statistische FFT-Darstellung: 0MHz bis 20MHz, 2MHz/DIV bzw. -30dBm bis -110dBm, 10dBm/DIV [RET09]

4.6. 3 Center Frequency Relation Diagram (3CFRD)

Mittels dieser Methode kann sowohl bei AC als auch bei DC Prüfspannung zwischen verschiedenen Pulstypen unterschieden werden. In diesem Beispiel werden drei synchrone Filter mit den Frequenzen $400\text{kHz} \pm 325\text{kHz}$, $4\text{MHz} \pm 325\text{kHz}$ und $9\text{MHz} \pm 325\text{kHz}$ verwendet. Die Messergebnisse von jedem Filter werden auf die zugeordnete Diagrammchse des zweidimensionalen Diagramms aufzeichnet. Die jeweiligen Cluster stehen für einzelne Teilentladungstypen bzw. Pulsquellen mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften. Diese werden in Echtzeit bereits während der laufenden Messung genauer untersucht.

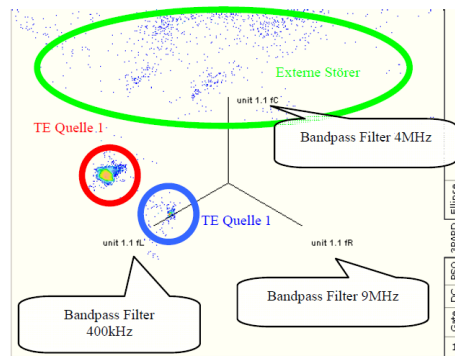


Abbildung 25 Multiple Teilentladungsquellen, dargestellt und separiert durch 3CFRD [RET09]

In Abbildung 25 wird die Teilentladungsaktivität durch die Cluster im blauen und roten Kreis markiert. Das Pulscluster innerhalb der grünen Ellipse hingegen stellt die externen Störer dar, welche in der weiteren Auswertung nicht weiter berücksichtigt werden [RET09].

4.7. Empfindlichkeit und Kalibrierung

Für die Quantifizierung der Teilentladungen wird die scheinbare Ladung Q_S als Messgröße definiert. Ein Ziel bei TE-Messungen ist, dass der tatsächliche Ladungsumsatz ΔQ in der Fehlerstelle bestimmt werden kann. In der Praxis kann nicht unmittelbar von der scheinbaren Ladung Q_S darauf geschlossen werden, weil die Größen- und Kapazitätsverhältnisse einer unbekanntem Fehlerstelle nicht angegeben werden können. Es gibt nur einen grundsätzlichen, praktisch aber nicht auswertbaren Zusammenhang. Meistens gilt $C_S \ll C_p$, womit man davon ausgehen kann, dass $\Delta Q \gg Q_S$ [KÜC09].

Die Messkreise aus Abbildung 23 zur Teilentladungsbestimmung⁴ sind sowohl bei Wechsel- als auch bei Gleichspannung geeignet. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass Teilentladungsimpulse bei Gleichspannung erheblich seltener und unregelmäßiger auftreten als bei Wechselspannung. Das liegt daran, weil die Nachladung der entladenen Fehlerstellen durch Leitungsströme erfolgt, welche sehr viel kleiner sind als die Verschiebungsströme, welche die Nachladung bei Wechselspannung bewirken. Daher kann bei Gleichspannung keine kontinuierliche Ladungsanzeige des Teilentladungsmessgerätes erreicht werden, weil die Teilentladungen nicht kontinuierlich auftreten. Stattdessen muss die Ladung einzelner Impulse über die Zeit registriert werden. Ladung und Anzahl einzelner Impulse sind daher die

⁴ Der Messaufbau ist extrem anfällig gegen äußere Störungen und Störungen im Messaufbau selbst. Einzelne Störimpulse im Bild der regelmäßigen und wiederholenden Teilentladungsimpulse fallen bei Wechselspannung auf oder werden sogar herausgefiltert. Diese Differenzierungsmöglichkeiten gibt es bei Gleichspannungen nicht, weswegen ein hoher Entstör- und Abschirmaufwand betrieben werden muss [KÜC09].

Kriterien für das Bestehen einer Gleichspannungsprüfung über einen längeren Beobachtungszeitraum [KÜC09].

4.8. Signalverarbeitung und –bewertung

Aufgrund der komplexen Systemeigenschaften des Messkreises sind die mit dem Ankopplungsvierpol gemessenen Stromimpulse meist wenig aussagend in der klassischen Teilentladungsdiagnostik. Die Stromimpulse müssen integriert werden, um die Kenngröße Ladung zu bilden. Diese Integration kann durch breitbandige und schmalbandige Teilentladungsmessgeräte realisiert werden. Auch Störspannungsmessgeräte aus der Nachrichtentechnik können dazu verwendet werden, allerdings sind diese laut IEC 60270 nicht mehr akzeptiert [KÜC09].

4.8.1. Breitbandige Teilentladungsmessgeräte

Anhand einer einfachen RC-Integration in Abbildung 26 sei das Verhalten von breitbandigen Teilentladungsmessgeräten erklärt und in Abbildung 27 ist die Systemantwort exemplarisch dargestellt [KÜC09], [SCH12].

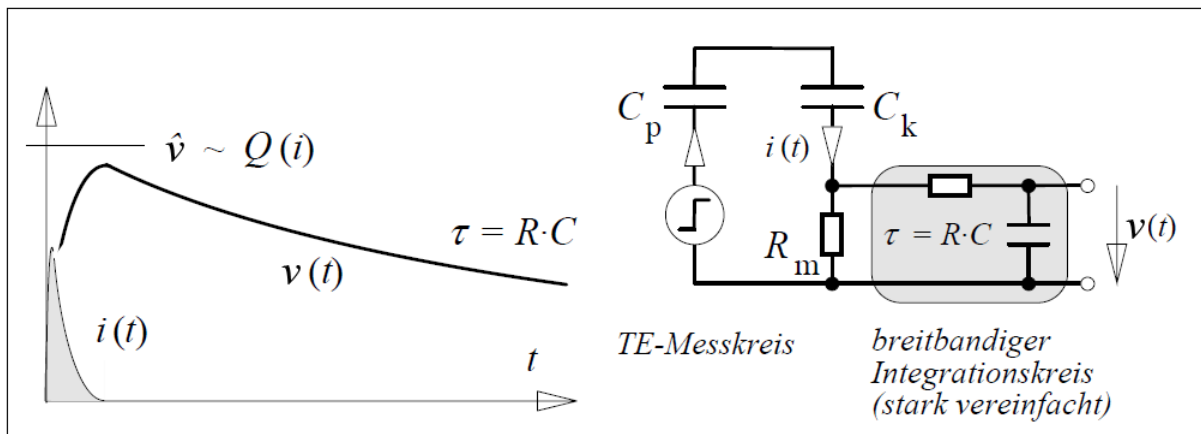


Abbildung 26 Breitbandige Integration des Ausgleichsstromes in einem TE Messkreis durch einen RC-Tiefpass [KÜC09]

Damit aufeinanderfolgende Impulse aufgelöst werden können, darf die Zeitkonstante τ nicht zu groß sein. Die typischen Größen bewegen sich im Bereich der μs . Das Glied aus R und C , welches zur Integration dient, ist im Prinzip ein Tiefpass. Um die Bedingung einer großen Zeitkonstante zu erfüllen, braucht es eine niedrige obere Grenzfrequenz des Tiefpasses. Übliche begrenztbreitbandige Messgeräte liegen bei einem Tiefpass von 500 kHz. TE Impulse können in der Praxis zu wesentlich höheren Frequenzen reichen. Würde man

Systeme mit höheren Grenzfrequenzen verwenden, würden diese den Stromimpuls praktisch unverändert übertragen und nicht mehr integrierend⁵ wirken [KÜC09].

Die Teilentladungsmessgeräte, welche in der Praxis eingesetzt werden, haben keine Tiefpass- sondern Bandpasscharakteristik, damit sie niederfrequente Signalanteile (z.B. aus dem Netz) unterhalb von ca. 10 kHz ausblenden können. Zu beachten ist des Weiteren, dass der Frequenzgang des gesamten Messkreises beachtet werden muss (also Ankopplungsvierpol mit Beschaltung, Verbindungsleitung und Teilentladungsmessgerät). Schwierigkeiten bereiten auch sogenannte schwingende Impulsantworten, in denen die Information über die Polarität des Teilentladungsimpulses verloren gehen kann. In der Praxis werden aktive Integrationsverstärker benötigt, um eine höhere Empfindlichkeit zu erreichen [KÜC09].

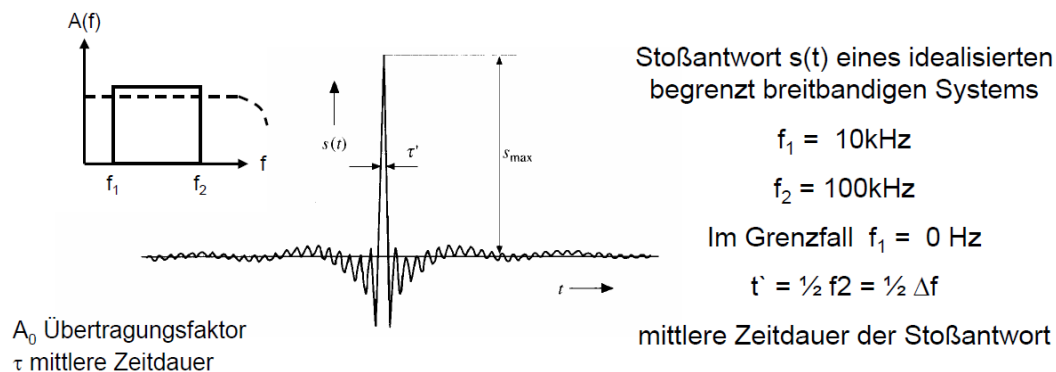
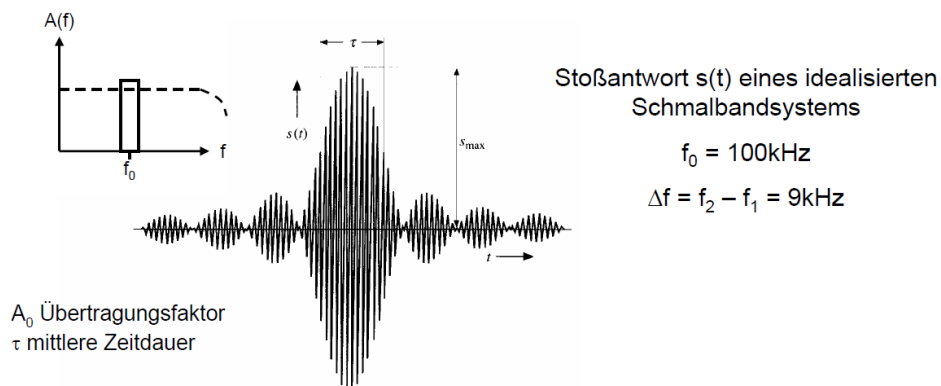


Abbildung 27 Systemantwort eines breitbandigen Messsystems [SCH12]

4.8.2. Schmalbandige Teilentladungsmessgeräte

Diese Art von Teilentladungsmessgeräten haben sehr stark schwingende Impulsantworten, wobei die Frequenz der Schwingung der Mittenfrequenz f_m des Filters entspricht. Die Polarität des Impulses kann mit einem schmalbandigen Teilentladungsmessgerät nicht festgestellt werden. Die Amplitude der Schwingung ist proportional zur Ladung des erregenden Impulses. Der für Störspannungsempfänger typische Wert beträgt $\Delta f = 9\text{kHz}$. Bei dieser Bandbreite ergibt sich eine Impulsauflösungszeit von ca. $220\mu\text{s}$. Der Vorteil von schmalbandigen Teilentladungsmessgeräten liegt darin, dass durchstimmbare Filter den Vorteil besitzen, in elektromagnetisch gestörter Umgebung (z.B. industrielle Produktionsstätten) auf ein weniger gestörtes Frequenzband ausweichen zu können. Dafür werden rasch aufeinanderfolgende Impulse schlecht aufgelöst [KÜC09].

⁵ Die Bedingung aus Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist unter Umständen auch für länger andauernde Stromimpulse nicht mehr erfüllt und es können Integrationsfehler auftreten [KÜC09].



Abnehmende Bandbreite des Meßsystems verbreitert sich die Stoßantwort bei gleichzeitig abnehmender Amplitude

Abbildung 28 Systemantwort eines schmalbandigen Messsystems [SCH12]

4.8.3. Synchroner Mehrstellenteilentladungsmessung

Synchrone Vergleichsmessungen können dann angewendet werden, wenn es sich um dreiphasige Systeme wie Generatoren, Transformatoren⁶ oder Kabelanlagen handelt. Dabei können sie zur Identifizierung betroffener Phasen oder unterschiedlicher Fehler dienen. Die Teilentladungsimpulse werden synchron an den 3 Phasen aufgezeichnet [KÜC09].

Auch die Herkunft der Teilentladungen lässt sich mit Hilfe zeitlich zusammengehörender (synchroner) „Impuls-Tripel“ bewerten. Aufgrund unterschiedlicher Übertragungs- und Kopplungswege erzeugt jede Fehlerstelle charakteristische Intensitätsverhältnisse zwischen den drei Phasen. Um diese Verhältnisse darstellen zu können, wird die größte Ladung z.B. q_{L1} zu den beiden kleineren Ladungen in die Verhältnisse $q_{L1}/q_{L2}-1$ und $q_{L1}/q_{L3}-1$ gesetzt. In einem dreiphasigen Sterndiagramm kann der Fehler dann klassifiziert werden, wenn die Verhältnisse der drei Ladungen als Koordinaten benutzt werden. Dabei wird sozusagen ein physikalischer Fehlerort im Gerät in einen Punkt des Sterndiagramms transformiert (siehe Abbildung 29). Der tatsächliche Fehler im Gerät und der virtuelle Fehlerort im Diagramm stehen in Zusammenhang. Kommt es zu einem Fehler zwischen L1 und Erde, so hat dieser den gleichen Abstand zu L2 und L3, wodurch er in der Nähe der Linie L1 liegen sollte. Falls zwischen L1 und L3 ein Fehler wäre, würde dieser zwischen L1 und L3 liegen. Die Koordinate $q_{L1}/q_{L3}-1$ würde den Wert null annehmen, weil $q_{L1}=q_{L3}$. Werden Impulse in allen 3 Phasen gleich stark als Gleichtaktsignale gemessen, so handelt es sich um externe

⁶ Es muss aufgepasst werden, dass die Mittenfrequenz außerhalb der Resonanzbereiche des Transformators ist, damit die Signalamplituden nicht verfälscht werden [KÜC09].

Störungen. Diese ergeben den Wert null bei der Koordinatenbildung, wodurch alle Störimpulse in den Nullpunkt verschoben werden [KÜC09].

Jede Fehlerart hat ein charakteristisches Cluster. Damit ist eine Zuordnung zu einer Fehlerquelle von jedem Impuls-Tripel möglich. Durch Sortieren der Impulse nach Fehlerquellen ist es möglich individuelle phasenaufgelöste Diagramme, Pulsfrequenzanalysen oder anderen Auswertungen durchzuführen. Die Trennung verschiedener Fehlerquellen der Teilentladungsmesstechnik ist damit zumindest teilweise möglich [KÜC09].

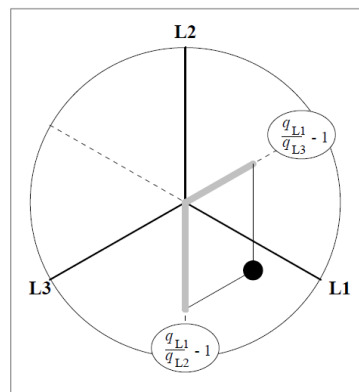


Abbildung 29 Lokalisierung eines Fehlerortes im Sterndiagramm [KÜC09]

Des Weiteren kann das Prüfen von drei oder mehreren Prüflingen parallel die vorgeschriebene Qualitätssicherung beschleunigen kann. Werden keine Teilentladungen gemessen, so haben alle Prüflinge den Teilentladungstest bestanden. Erst bei Auffälligkeiten muss weiter untersucht werden, welcher Prüfling betroffen ist. Durch eine hochfrequente Entkoppelung der Prüflinge kann der Fehler mittels des synchronen Mehrkanalsystems detektiert werden. Dazu müssen die parallelen Teilentladungsmesskreise durch drei Sperrimpedanzen voneinander entkoppelt werden. In Abbildung 30 ist ein solcher Aufbau für die zeitgleiche Messung an drei Prüflingen bei DC zu erkennen [RET09].

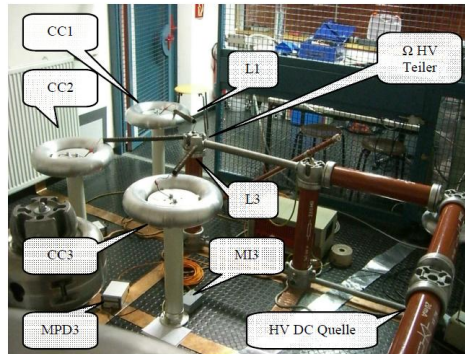


Abbildung 30 Aufbau zur zeitgleichen Messung an drei Prüflingen (CC: Koppelkondensator; L: Sperrimpedanz; MI: Messimpedanz; MPD: Teilentladungsmesskanal) [RET09]

In Abbildung 31 ist die Sperrimpedanzen, die für diesen Aufbau mittels einfachen Luftspulen realisiert worden sind zu erkennen. Es werden Teilentladungen, die von einem Prüfling verursacht wurden, direkt und fast ungedämpft am jeweils angeschlossenen Messkanal gemessen. Eine Unterscheidung zwischen überkoppelten Signalen und tatsächlichen Teilentladungen ist wegen des parallelen Aufbaus schwierig. Durch die gemeinsame Nutzung der Hochspannungsgleichspannungsquelle ist die Teilentladungsaktivität auch bei den Nachbarempfängern zu messen. Für einen bestimmten Frequenzbereich kann dieser Nachteil aber auch zu einem Vorteil werden. Teilentladungssignale von fremden Prüflingen werden durch das Tiefpassverhalten der Sperrimpedanzen nämlich detektiert.

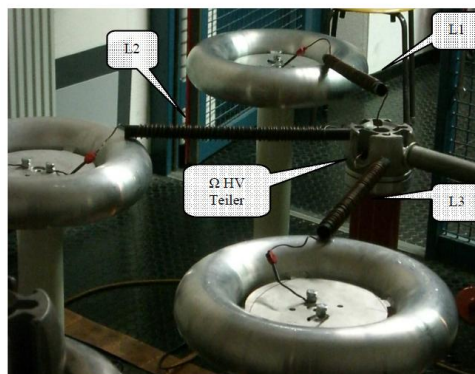


Abbildung 31 Luftspulen zur hochfrequenten Entkopplung [RET09]

In Abbildung 32 ist das Frequenzspektrum eines 10pC Kalibratorimpulses zu erkennen, welches an allen drei Messkanälen detektiert wurde. Das Spektrum des Kalibrationspulses ist durch die obere blaue FFT-Kurve dargestellt. Die grüne und die rote Kurve stellen die überkoppelnden Signale dar und liegen im Frequenzbereich bis ca. 2 MHz. Diese Signale sind gedämpft und stehen für die übrigen Messkanäle zur Verfügung. Durch Verwendung eines Teilentladungsmessfilters von $3\text{MHz} \mp 150\text{kHz}$ können mittels dieser Unterschiede

Teilentladungsquellen bestimmt werden. Dies wird durch die numerischen Werte in der dreikanaligen Übersicht in Abbildung 32 gezeigt. Weil die Kanäle 1 und 3 einen reduzierten Wert ausgeben, zeigt Kanal 2 den Ladungswert korrekt an.

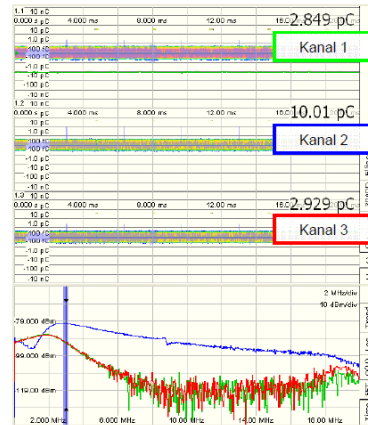


Abbildung 32 FFT des Kalibratorpulses und seines Übersprechens [RET09]

Die Sterndiagrammmethode erlaubt eine Zuordnung der jeweiligen Teilentladungsaktivität zu den drei Prüflingen. Die Teilentladungsamplituden jedes einzelnen Teilentladungsimpulses der drei einzelnen Messkanäle (also Originalimpuls und seine zwei Überkopplungen) werden bei dieser Methode in ein farbcodiertes zweidimensionales Diagramm eingetragen. Dabei stellt eine Achse einen der Prüflinge dar. Es werden der teilentladungsbehaftete Prüfling sowie auch mehrfache Teilentladungsquellen und Störer erkannt. Um die Wirkungsweise dieser Methode zu demonstrieren, werden zwei Impulsquellen in den Aufbau eingebracht. An den Klemmen von Prüfling 1 simulierte ein Kalibrator Teilentladungen und injizierte Impulse mit einem Ladungsinhalt von 50pC. Der zweite Kalibrator simulierte externe Störungen mit einer Ladung von 100pC. Am ohmschen Teiler des Aufbaus wurden diese Impulse eingespeist. In der dreikanaligen Übersicht sind genau zwei Linien für jeden Messkanal zu erkennen. Diese kommen durch die zwei Pulsquellen (Teilentladung und Störer) zustande. Die Impulse laufen durch das Bild und bilden Linien, weil keine Phaseninformation zur Verfügung steht.

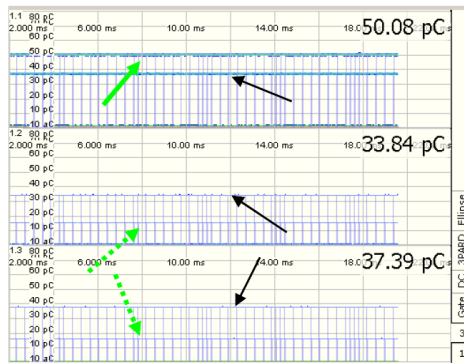


Abbildung 33 Zwei Pulsquellen (grüne Pfeile und schwarze Pfeile) und die Durchkopplungen der Teilentladungen (gestrichelte grüne Pfeile) überlagern sich [RET09]

Die Teilentladungsauswertung würde von der Überkopplung signifikant beeinflusst werden. Damit würde man bei Zählerdiagrammen falsche Ergebnisse erhalten, weil nicht nur die Teilentladungsimpulse, sondern auch die Überkopplung berücksichtigt werden würde. In Abbildung 34 sieht man die 3PARD Methode, welche eine Lösung für genau dieses Problem liefert. Die zwei voneinander unabhängigen Pulsquellen werden bei der 3PARD Methode von den zwei resultierenden Clustern symbolisiert. Dabei werden Teilentladungen aus einem speziellen Prüfling auf der zugehörigen Achse wegen der Konstruktionsvorschrift dargestellt. Der Abstand vom Ursprung des Diagramms ist eine wichtige Kenngröße. So können Cluster ignoriert werden, welche zwischen den Achsen auftreten oder nahe am Diagrammursprung entstehen, weil sie externe Störungen symbolisieren [RET09].

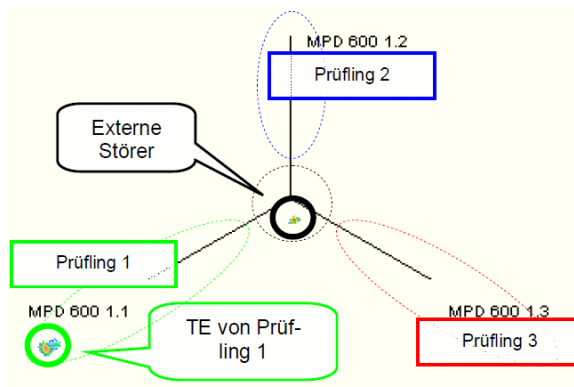


Abbildung 34 3PARD: Teilentladung aus Prüfling 1 und externe Störungen [RET09]

Ein einzelnes Cluster im Sterndiagramm kann ausgewählt werden, um eine gezielte Auswertung von echten Teilentladungen zu erreichen. Dabei fließen nur die relevanten Impulse in Echtzeit in die Auswertung ein. In Abbildung 35 sieht man die bereinigte dreikanalige Darstellung mit Impulsen ausschließlich von Prüfling 1.



Abbildung 35 Bereinigte Übersicht [RET09]

Somit können Störer wirkungsvoll unterdrückt werden bzw. teilentladungsbehaftete Prüflinge auch in der Parallelschaltung sicher identifiziert werden, wenn man den angeführten Aufbau mit der Sterndiagrammmethode kombiniert [RET09].

4.8.4. Nachbearbeitung von Teilentladungsdaten

Bei den Möglichkeiten, die ein modernes digitales Messsystem zur Verfügung stellt, müssen aber auch einfache Dinge wie der Datenexport beachtet werden. Damit wird eine benutzerspezifische Datenaufbereitung und Visualisierung ermöglicht. Mittels eines Text-Exporters können beliebige Diagramme aus den Rohdaten generiert werden (z.B: Ladung q , Absolutzeit t oder Prüfspannungshöhe U). Dennoch ist das Verwenden von Störunterdrückungsmöglichkeiten bereits vor dem Datenexport sinnvoll, weil nur die Teilentladungen dargestellt werden sollen. In den 3 folgenden Abbildungen sieht man einige Diagramme, die aus denselben Rohdaten erzeugt werden können.

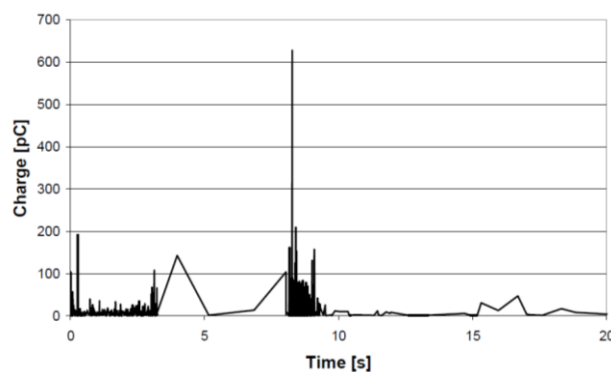


Abbildung 36 Ladungstrend [RET09]

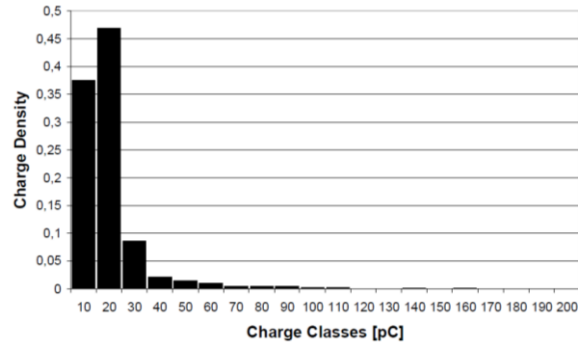


Abbildung 37 Ladungsdichte [RET09]

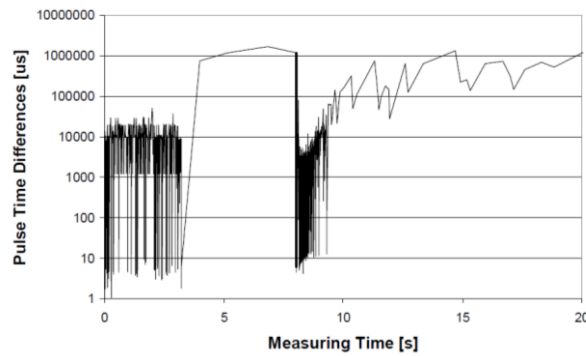


Abbildung 38 Zeitlicher Abstand von direkt aufeinanderfolgenden Teilentladungsimpulsen [RET09]

Abbildung 39 ist ein nachträglich erzeugtes Diagramm, in welchem Teilentladungsmesswerte und Depolarisationsstrom-Messwerte in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt sind. In diesem Beispiel wurde das Teilentladungsverhalten des Prüflings nach der Umpolung ermittelt. Dazu wurde er zunächst 90 Minuten mit einer unipolaren Gleichspannung belastet und dann innerhalb weniger Sekunde die Polarität umgekehrt [RET09].

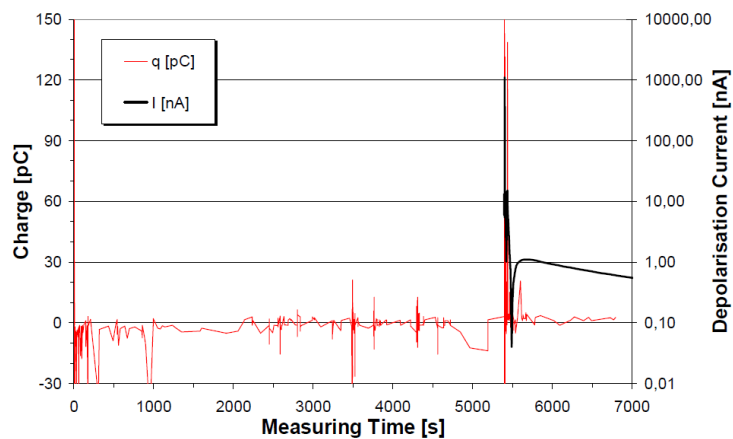


Abbildung 39 Integration von Langzeiteilentladungsmessdaten [RET09]

5. Teilentladungsmessungen bei hoher Gleichspannung

5.1. Derzeitiger Stand der Messtechnik

Die große Herausforderung für die Analyse der Teilentladungen bei Gleichspannung besteht darin, dass es keinen Phasenbezug gibt. Bei Wechselspannung können Defekte charakteristischen Mustern in Bezug auf die Phase zugeordnet werden. Bei Gleichspannung ist die Zuordnung von Defekten schwieriger. Prinzipiell gibt es zwei wesentliche Parameter bei der Teilentladung unter Gleichspannung. Zum einen die Entladungsamplitude q_i und zum anderen die Zeit des Auftretens t_i (oder die Zeit zwischen den Entladungen Δt_i). In Abbildung 40 sind die beiden wichtigsten Parameter für Teilentladungen bei Wechsel- und Gleichspannung gegenübergestellt. Misst man mehrere Teilentladungen und nimmt die zwei Werte q_i und Δt_i auf, so kann man die Ergebnisse graphisch verschieden darstellen [MOR05].

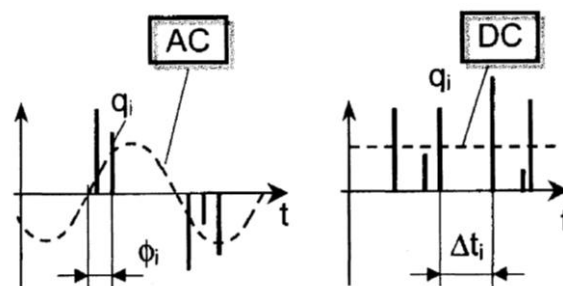


Abbildung 40 Teilentladungsparameter bei Wechselspannung (links) und Gleichspannung (rechts)

[MOR05]

5.1.1. Stand der Normung

Die gültige Norm IEC 60270 behandelt die Teilentladungen bei hoher Gleichspannung nur im Abschnitt elf. In diesem Unterpunkt wird im Wesentlichen festgehalten, dass die Betrachtungen für Wechselspannung nur teilweise, wenn überhaupt, für Gleichspannung übernommen werden dürfen. Des Weiteren werden bisherige Erkenntnisse und Problem angeführt, welche unter 5.5. näher erläutert werden [IEC 60270].

In der neuen Version der IEC 60270 wird ein Annex H hinzugefügt werden. Dieser behandelt die Auswertung der Messergebnisse bei Teilentladungsmessungen unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung.

Die Auswertung der scheinbaren Ladungen der einzelnen Teilentladungsimpulse über eine längere Zeitdauer bei konstanter Spannung ist in Abbildung 41 zu erkennen [Annex H].

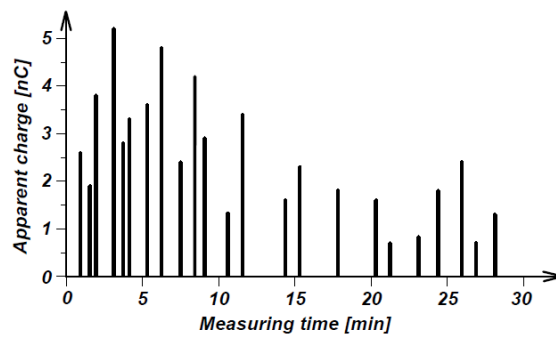


Abbildung 41 Scheinbare Ladung der einzelnen Teilentladungsimpulse [Annex H]

Mit Hilfe der Daten aus Abbildung 41 können die scheinbaren Ladungen aufsummiert werden und es ergibt sich Abbildung 42 [Annex H].

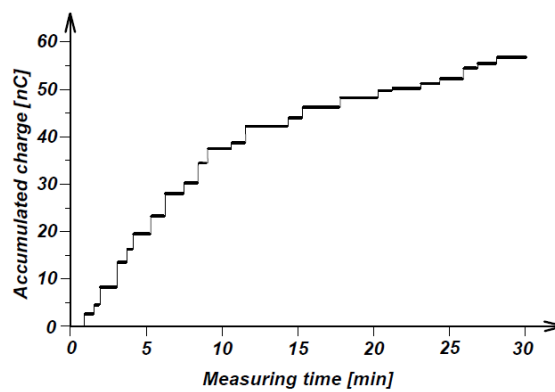


Abbildung 42 Aufsummierte scheinbare Ladung [Annex H]

Zusätzliche Information kann erhalten werden, wenn man die Teilentladungsimpulse innerhalb bestimmter Schwellwerte zählt und diese, wie in Abbildung 43, graphisch darstellt [Annex H].

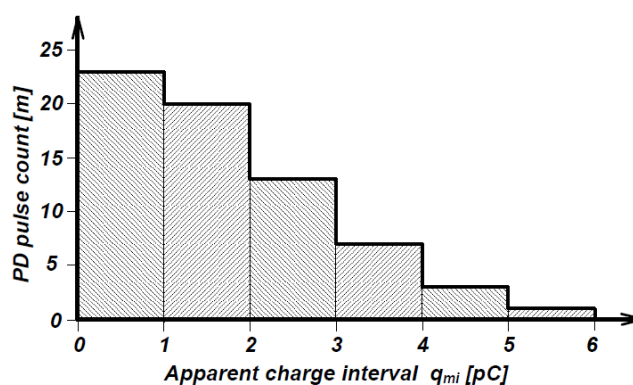


Abbildung 43 Anzahl der Teilentladungsimpulse mit bestimmten scheinbaren Ladungsgrößen [Annex H]

5.1.2. Klassifikation anhand charakteristischer Verteilungen

Wie bereits erwähnt, werden bei Gleichspannung die zwei Parameter q und Δt verwendet um Verteilungs- und Dichtefunktionen zu erstellen. In Abbildung 44 sind folgende Verteilungen zu sehen:

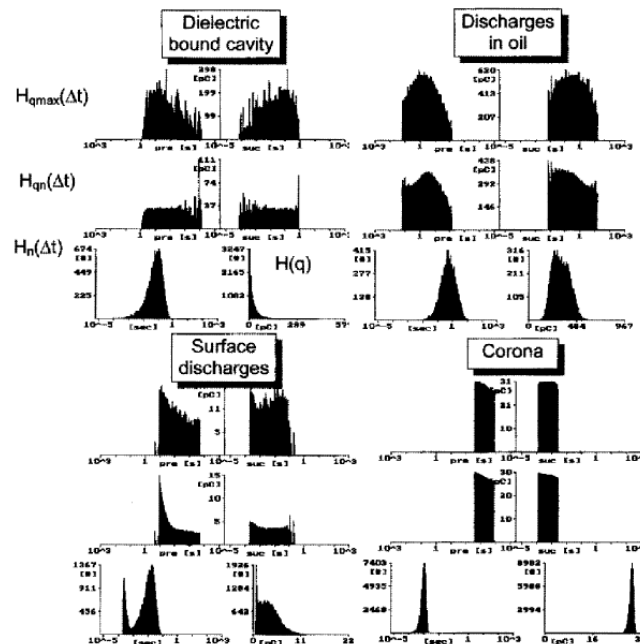


Abbildung 44 Beispiele einer statistischen Verteilung um eine Datenbank zur Klassifikation zu erstellen
[MOR05]

Jede dieser Verteilungen hat eine charakteristische Form, die abhängig von der Art des Defektes ist. Diese Formen können von einer Anzahl von Parametern beschrieben werden. Insgesamt können 18 Parameter von den Grundgrößen abgeleitet werden und anhand dieser kann ein Fingerabdruck erstellt werden (siehe Abbildung 45).

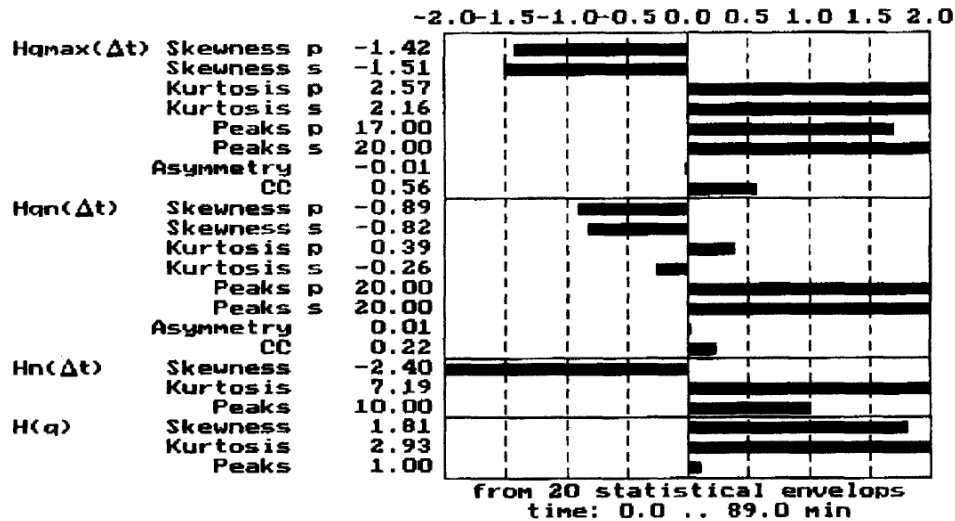


Abbildung 45 Fingerabdruck einer TE [MOR05]

Eine Datenbank ist notwendig um einen Fehler klassifizieren zu können. Diese beinhaltet verschiedene Defekte, bei denen die Ursache bekannt ist. Um nun eine unbekannte TE zu klassifizieren, wird ihr Fingerabdruck mit jenen aus der Datenbank verglichen. Diese Methode funktioniert, wenn man Musterversuche im Labor anstellt und diese dann mit Vorfällen aus der Praxis vergleicht. Es konnte erfolgreich unterschieden werden, ob es sich um Hohlraumentladungen, Corona, Oberflächenentladung oder Entladungen im Öl handelt. Peter Morshuis meint, dass die Unterscheidung mittels der verschiedenen Darstellungsarten, wie sie zuvor erläutert wurde, besser geeignet ist, als die automatisierte Variante mittels Fingerabdrücken [MOR05].

5.1.3. Analyse der Wiederholungsrate

Die Wiederholungsrate ist in großem Maße abhängig von der Art der Teilentladung und der angelegten Spannung. In Abbildung 46 ist die Relation zwischen Wiederholungsrate und angelegter Spannung für die verschiedenen Teilentladungsarten dargestellt. Man sieht, dass die Wiederholungsrate für negative Corona viel größer ist und jene von negativer Oberflächenentladung kleiner ist. Anhand dieser Abbildung liegt es nahe, zu meinen, eine Trennung wäre relativ leicht möglich. Allerdings ist das nicht richtig, weil die Wiederholungsrate in großem Maße von der Feuchtigkeit abhängig ist. Daher muss die Umgebung berücksichtigt werden. Außerdem beeinflusst die Wahl des Triggerlevels die Wiederholungsrate. Deshalb muss ein konstanter Triggerlevel gewählt werden, wenn man die Wiederholungsrate zur Identifikation verwenden will [NIU08].

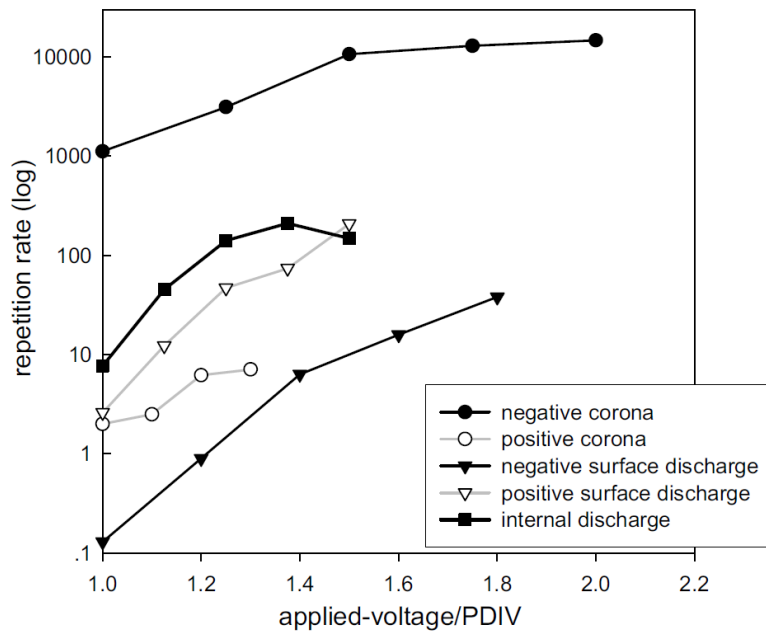


Abbildung 46 Wiederholungsrate vs. angelegter Spannung/PDIV [NIU08]

5.1.4. Teilentladungsamplitude als Funktion der Zeit

Dies ist die einfachste Form der Darstellung und wird auch meistens während der Teilentladungstests angezeigt. In Abbildung 47 sieht man $q(t)$ für vier verschiedene Teilentladungstypen [MOR05].

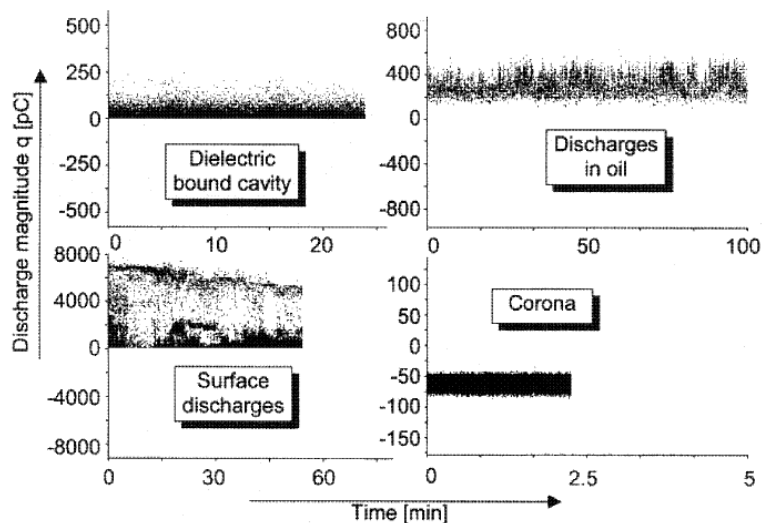


Abbildung 47 Darstellung der Entladungsamplituden für 4 verschiedene Teilentladungstypen [MOR05]

Mittels eines Oszilloskops kann auch das Zeitsignal eines einzelnen Impulses dargestellt werden:

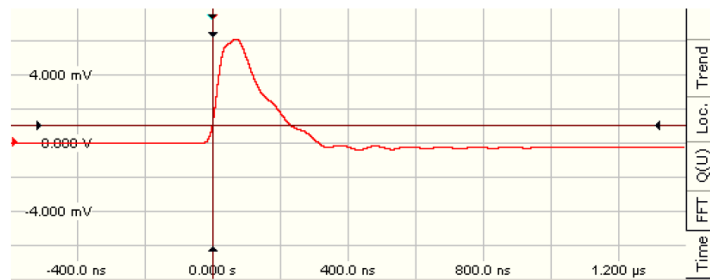


Abbildung 48 Korona Teilentladungsimpuls, 200ns/DIV, 2mV/DIV [RET09]

In Abbildung 49 sieht man einen einzelnen Koronaimpuls vor der Filterung durch das digitale Messsystem. Um das Zeitsignal zu beschreiben, kann die Polarität, die Amplitude, die Anstiegszeit oder auch die Pulsbreite herangezogen werden. Je nach Position der Messimpedanz entweder im Erdzweig des Prüflings oder im Erdzweig des Koppelkondensators kann somit zwischen Teilentladungsimpulsen und Störereen unterschieden werden (Abbildung 49).



Abbildung 49 Unterscheidung zwischen Teilentladung und Störer aufgrund der Polarität [RET09]

5.1.5. Dichtefunktion

Auch ein Dichtehistogramm kann zur Darstellung von Teilentladungen verwendet werden. In Abbildung 50 sind vier Dichtehistogramme von unterschiedlichen Teilentladungstypen dargestellt. Bei Teilentladungen in Hohlräumen nimmt die Auftretswahrscheinlichkeit exponentiell mit der Teilentladungsamplitude ab. Oberflächenentladungen sind gekennzeichnet von einer großen Streuung der Amplitude und Koronaentladungen zeigen wenig Streuung [MOR05].

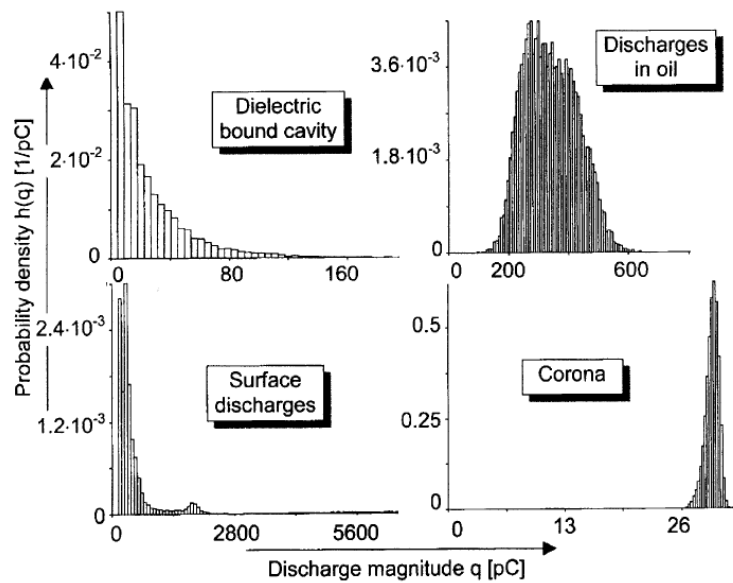


Abbildung 50 Dichtehistogramm [MOR05]

5.1.6. Entladungsamplitude und Wiederholungsrate als Funktion der Prüfspannung

Dabei werden die Teilentladungsamplitude und die Teilentladungswiederholungsrate über der Prüfspannung aufgetragen. In Abbildung 51 sind solche Darstellungen für Oberflächenentladung und für innere Entladungen dargestellt. Das Volumen bei der inneren Entladung ist begrenzt, weshalb die Teilentladungsamplitude kaum von der angelegten Spannung beeinflusst wurde. Wohingegen bei der Oberflächenentladung ein signifikanter Zusammenhang zu erkennen ist, weil das Volumen nicht begrenzt ist und damit das Entladungsgebiet bei höherer Spannung vergrößert wird [MOR05].

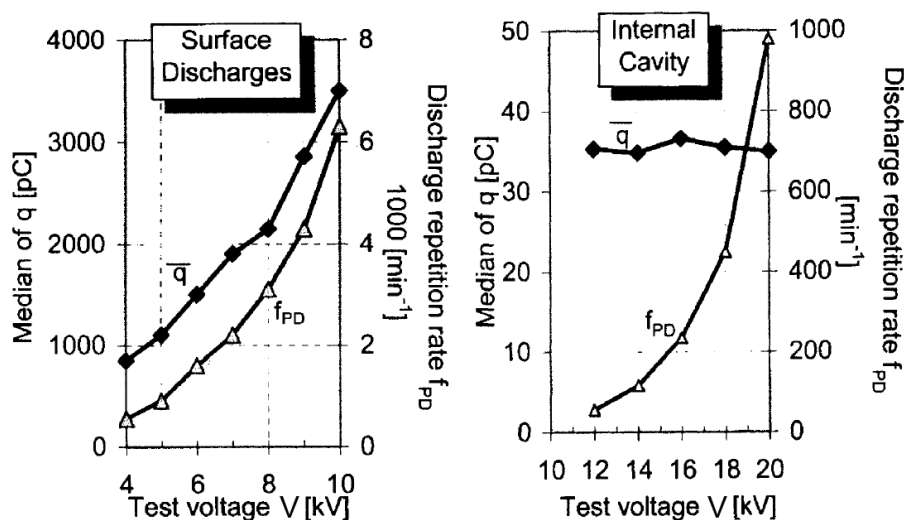


Abbildung 51 Entladungsamplitude und Wiederholungsrate als Funktion der Prüfspannung [MOR05]

5.1.7. Zeitabhängigkeit

Die Ladung q aufgetragen über die Zeit (Impulsladung) und die Anzahl der Teilentladungsimpulse innerhalb eines festgelegten Zeitfensters (Pulszähler-Diagramme) sind bei Gleichspannung wichtige Kenngrößen. Es können sowohl die gesamte Messdauer als auch kleinere Ausschnitte mittels Zoom dargestellt werden. In Abbildung 52 sieht man ein typisches Beispiel. Im obigen Diagramm (Abbildung 52) sieht man abgesehen von dem stabilen Teilentladungspegel (ca. 30pC), dass einzelne Teilentladungsimpulse mit bis zu 60pC auftreten. Die zwei Messkurven im unteren Diagramm zeigen die Anzahl aller erfassten Impulse oberhalb eines definierten Schwellwertes und innerhalb eines bestimmten gleitenden Zeitfensters. Es ist möglich, zwei dieser Zählerdiagramme mit voneinander unabhängigen Einstellungen zu nutzen. Die rote Messkurve in Abbildung 52, unteres Diagramm zeigt die Anzahl aller Teilentladungen der letzten Minute oberhalb von 1pC. Die etwas dunklere zeigt die Anzahl der in den letzten fünf Minuten aufgetretenen Teilentladungen oberhalb von 50pC [RET09].

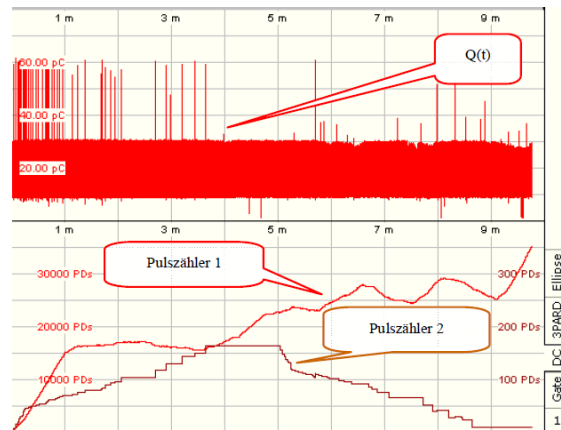


Abbildung 52 Zeitabhängigkeit von Teilentladungsgrößen bei Gleichspannung [RET09]

5.1.8. Häufigkeitsverteilung

Die Ladungsdichte ist sowohl für AC aber auch für DC eine wichtige Kenngröße. In Abbildung 53 sieht man die Anzahl der Teilentladungsimpulse über den so genannten Ladungsklassen. In den Ladungsklassen sind mehrere Ladungswerte zusammengefasst. Die Anzahl kann auf die maximal auftretende Ladung oder auf die Summe aller Ladungen normiert werden.

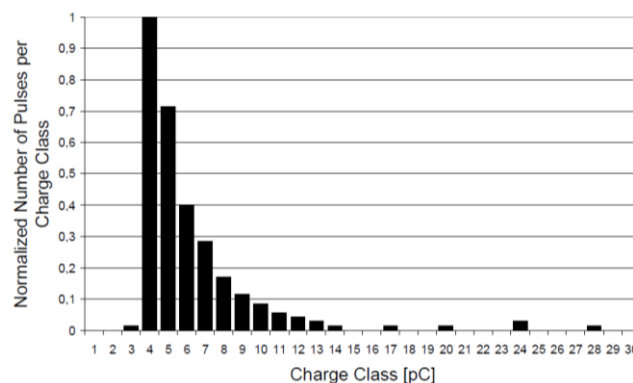


Abbildung 53 Verteilung von Ladungswerten [RET09]

Mit Hilfe dieser Darstellung kann erkannt werden, ob es sich um eine innere oder äußere Teilentladung handelt. Innere Teilentladungen erkennt man an einer Verteilung über mehrere Ladungsklassen mit einem Maximum bei kleineren Ladungswerten. Koronaentladungen hingegen zeigen ein enger begrenztes zu beiden Seiten stark abfallendes Maximum auf [RET09].

5.2. Problemstellung bei Teilentladungsmessungen

Das Teilentladungsverhalten von flüssigen und festen Isolierstoffen unterscheidet sich entscheidend, abhängig davon, ob es sich um Wechsel- oder Gleichspannung handelt. Für gasförmige Isolierungen können die Unterschiede kleiner sein [IEC 60270].

Laut IEC 60270 sind vier wesentliche Unterschiede vorhanden:

1. „Die Impulswiederholrate bei Gleichspannungsbeanspruchung von Feststoffisolationen kann sehr klein sein, da der Zeitabstand zwischen Entladungen an jeder Entladungsstelle von den Erholungszeitkonstanten der Isolierung bestimmt wird.“
2. „Bei Änderung der angelegten Spannung können eine Vielzahl von Entladungen auftreten. Im Besonderen können Polaritätswechsel während der Prüfung eine Vielzahl von Entladungen bei niedriger Spannung verursachen, die Impulswiederholrate wird aber allmählich wieder auf den Ausgangswert zurückgehen.“
3. „Bei flüssigen Isolierungen kann eine Bewegung der Flüssigkeit dazu beitragen, die Zeitkonstanten zu verringern, so dass die Entladungen häufiger auftreten.“
4. „Die Teilentladungseigenschaften des Prüflings können durch Überlagerungen der Prüfspannung beeinflusst werden.“

5.2.1. Teilentladungseinsetzspannungen und Teilentladungsaussetzspannungen

„Bei Prüfungen mit Gleichspannung kann es schwierig sein, die Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen zu bestimmen, da sie von Faktoren wie Spannungsverteilung bei variablen Spannungen, Temperatur und Druck abhängig sind. Teilentladungen treten bevorzugt während des ersten Anlegens der Spannung oder während Spannungsänderungen auf und treten dann intermittierend auf, da die Spannungsverteilung entsprechend den Widerständen wird. Unter bestimmten Umständen können Teilentladungen selbst dann noch auftreten, wenn die Prüfspannung bereits fehlt. Dies gilt besonders für Kombinationen von fester, flüssiger und gasförmiger Isolierung.“ [IEC 60270]

5.2.2. Teilentladungsprüfspannung

„Während des Anliegens der Teilentladungsprüfspannung sollte der Prüfling keine Teilentladungsimpulsgrößen aufweisen, die eine festgelegte Stärke überschreiten. Während bei Wechselspannungen nur die Stärken der scheinbaren Ladung betrachtet werden, sollte bei Gleichspannungsprüfungen auch die Anzahl der Teilentladungsimpulse, die eine festgelegte Stärke überschreiten, eine festgelegte Gesamtzahl während einer festgelegten

Zeit bei Prüfspannung nicht überschreiten. Es sollte beachtet werden, dass während der Prüfung einzelne Teilentladungsimpulse großer Stärke auftreten können.“ [IEC 60270]

5.2.3. Prüfkreise und Messsysteme

„Im Allgemeinen können Prüfkreise und Messgeräte, die bei Prüfungen mit Wechselspannung verwendet werden, auch mit Gleichspannungen verwendet werden. Da das Auftreten von Teilentladungsimpulsen intermittierend ist, sollten Impulzzähler oder digitale Teilentladungsmessgeräte verwendet werden.“ [IEC 60270]

5.2.4. Wahl der Prüfverfahren

„Die Verfahren, die für Wechselspannung beschrieben sind, um die Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen zu bestimmen, sind im Allgemeinen für Prüfungen mit Gleichspannung nicht anwendbar, da die Beanspruchung des Dielektrikums während des Spannungsanstiegs- und Spannungsabfalls unterschiedlich zu der ist, wenn die Spannung konstant bleibt. Es gibt kein allgemein anerkanntes Verfahren, die Teilentladungsgrößen bei Prüfungen mit Gleichspannung zu bestimmen. Welches Verfahren auch immer verwendet wird, es ist wichtig zu wissen, dass sich bei konstanter Prüfspannung die Stärken in Bezug zu Teilentladungen zu Beginn der Spannungsbeanspruchung von den Stärken nach einer beträchtlichen Zeitspanne unterscheiden können.“ [IEC 60270]

5.2.5. Störungen

„Die in Abschnitt 10 (siehe Norm IEC 60270) angegebenen Informationen sind auch für Prüfungen mit Gleichspannung anwendbar. Jedoch kann in diesem Fall eine besondere Art von sich regelmäßig wiederholenden Störungen auftreten, die in Zusammenhang mit dem Kommutierungsstrom in den Gleichrichterelementen der Gleichspannungsquelle steht.“ [IEC 60270]

5.2.6. Konklusion

Die Tatsache, dass es eine Norm für Teilentladungen gibt, welche die Teilentladungen bei Gleichspannung, nur in einem Kapitel behandelt, zeigt den heutigen Stand der Erfahrungen in Bezug auf den Umgang mit Teilentladungen bei hoher Gleichspannung. Es wird lediglich bemerkt, dass die Prüfverfahren um die Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannung zu bestimmen, nicht von jenen für Wechselspannung übernommen werden dürfen. Es gibt nach wie vor kein anerkanntes Verfahren.

Meiner Meinung nach ist der gesamte Aufbau des Messkreises in Frage zu stellen. Bis jetzt wurde der von Wechselspannungsmessungen bekannte Messkreis auch für Teilentladungsmessungen bei Gleichspannung verwendet. Mittels umgekehrter Polarität

können Störer erkannt und entfernt werden, allerdings kommt es dadurch natürlich zu einem Datenverlust, weil eine „echte“ Teilentladung zum selben Zeitpunkt nicht erkannt wird. Es kann auch die Netzspannung überprüft werden und wenn Teilentladungen an den Scheitelwerten der Netzspannung auftreten, können diese entfernt werden, aber auch dadurch werden „echte“ Teilentladungen zum Teil nicht erkannt. Auch das in der Norm IEC 60270 erwähnte Problem, dass hohe Gleichspannung oft durch Gleichrichten von hoher Wechselspannung erzeugt wird, führt zu Störungen. Die Frage ist also, wie der Messkreis für die Teilentladungsmessungen bei Gleichspannung aussehen sollte und welche Art von Filtern und ähnlichen Störunterdrückungsequipment dieser besitzen sollte.

5.3. Methoden zur Störunterdrückung bei TE Messungen für DC

Ein großes Problem bei der Messung von Teilentladungen unter Gleichspannung im Vergleich zu Wechselspannung ist, dass es kaum Möglichkeit gibt externe Störer von Teilentladungen zu unterscheiden außer in Bezug auf die Polarität. Deshalb wurden eigene Strategien entwickelt um Koronaentladungen, Oberflächenentladungen und innere Entladungen von externen Störern zu unterscheiden [NIU09].

Das Messsystem für diese Untersuchungen besteht aus einem HVDC Generator mit einer maximalen Spannung von 35 kV, einem Koppelkondensator mit einer Kapazität von 1 nF und einer hochfrequenten Stromzange (HFCT=High Frequency Current Transformer) zur Detektion der Teilentladungssignale. Das digitale Messgerät hat eine maximale Bandweite von 40 MHz und eine Sampling Rate von 100 MS/s. Es wurde Korona, innere Teilentladung und Oberflächenentladung unter Rauschbelastung untersucht. Das Modell zur Simulation von Korona war eine Spitze-Platte Anordnung mit einem Abstand von 80mm. Für die Oberflächenentladung wurde ebenfalls eine Spitz-Platte Anordnung verwendet, wobei die Spitze direkten Kontakt zu einem Dielektrikum hat, welches auf der Platte liegt. Für die innere Teilentladung wurde eine Lücke in einem Epoxidharz verwendet [NIU09].

Rauschunterdrückung für Korona:

In Abbildung 54 sind die Signale einer Koronaentladung für eine negative Spannung dargestellt. Im oberen Bild von Abbildung 54 ist zu erkennen, dass sowohl negative als auch positive Impulse auftreten. Die negativen Impulse bestehen aus Teilentladungen und Rauschen, wohingegen die positiven nur Rauschen darstellen können [NIU09].

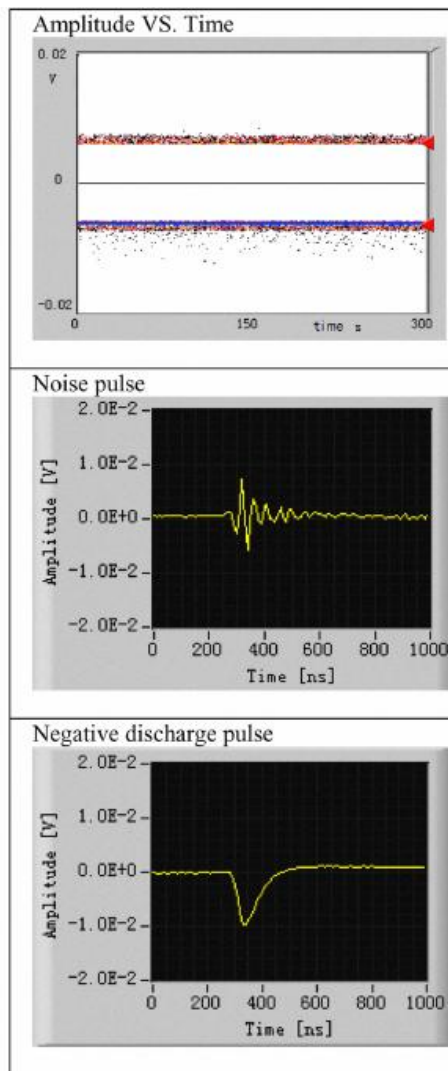


Abbildung 54 Signale des neg. Korona Modells mit Rauschen bei -30kV [NIU09]

Zuerst werden die positiven Impulse in C Klassen klassifiziert, wobei jede Klasse durch einen repräsentativen Teilentladungsimpuls charakterisiert ist. C ist die Anzahl der Klassen und entspricht der Anzahl der Teilentladungsimpulse. Beginnend mit Klasse 1 wird die Kreuzkorrelation zwischen repräsentativen Impulsen der Klasse 1, x und jedem negativen Impuls y durchgeführt. Sofern der maximale Korrelationskoeffizient (MCC=Maximum Correlation Coefficient) bezüglich x kleiner als ein vorher definierter Wert ist, wird der negative Impuls y als Teilentladung gewertet. Dieser Vorgang wird C-Mal wiederholt um die Korrelation zwischen positiven und negativen Signalen zu ermitteln. Durch diese neue Strategie wurden bei diesem Beispiel 434 negative Koronaentladungen aus 3000 Impulsen gefiltert (siehe Abbildung 55) [NIU09].

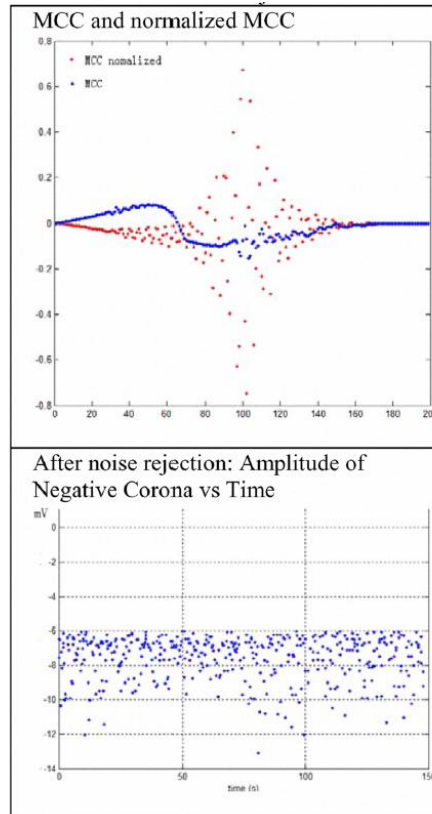


Abbildung 55 MCC und die gefilterte negative Corona [NIU09]

Rauschunterdrückung für innere Teilentladungen:

Innere Teilentladungen haben oft kleine Wiederholungsraten und Amplituden im Vergleich zu Korona oder Oberflächenentladungen, weshalb die Rauschunterdrückung bzw. Rauscherkennung umso wichtiger ist. Als Beispiel ist in Abbildung 56 das Signal für eine künstliche Lücke eingebaut in Epoxid für eine Spannung von -35 kV ersichtlich. Mit demselben Verfahren wie für Korona wurden in diesem Beispiel 114 Teilentladungen aus insgesamt 3000 Impulsen erkannt [NIU09].

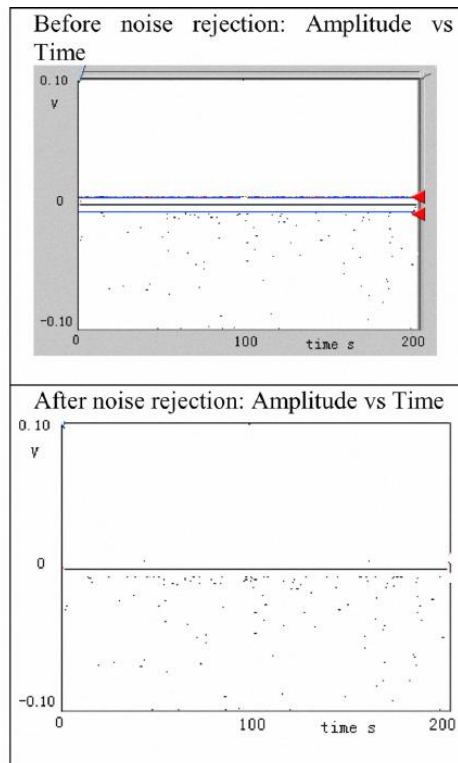


Abbildung 56 Signal einer inneren Teilentladung bei -35 kV [NIU09]

Rauschunterdrückung für Oberflächenentladungen:

Abbildung 57 stellt die Ergebnisse eines Aufbaus Spitze/Barriere/Platte dar (künstliches Oberflächenentladungsmodell). Die angelegte Spannung beträgt +18 kV. Es wurden 60000 Impulse aufgezeichnet, wobei nur 485 tatsächlich Oberflächenentladungen darstellten.

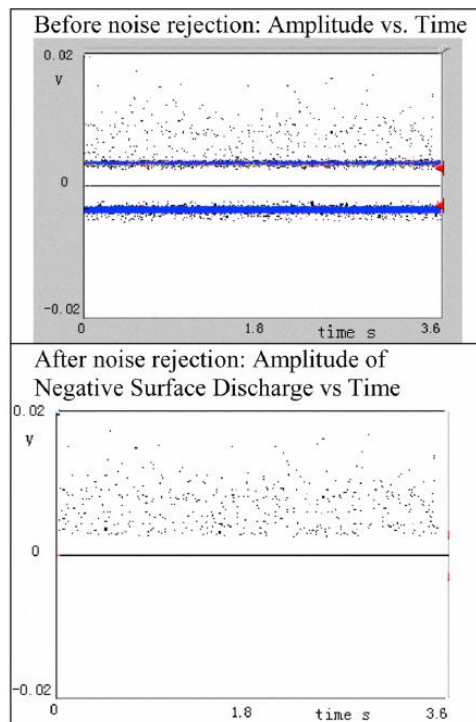


Abbildung 57 Signal einer Oberflächenentladung bei +18 kV [NIU09]

5.4. Methoden zur besseren Trennung für Spezialfälle

5.4.1. Grenzwertmethode

In Abbildung 58 ist eine Teilentladung mit Rauschen dargestellt, wobei das Rauschsignal eine höhere Amplitude aufweist. Eine Trennung mittels Festlegen eines Grenzwertes, welcher das Rauschsignal mit der höherer Amplituden abtrennt, ist ausreichend.

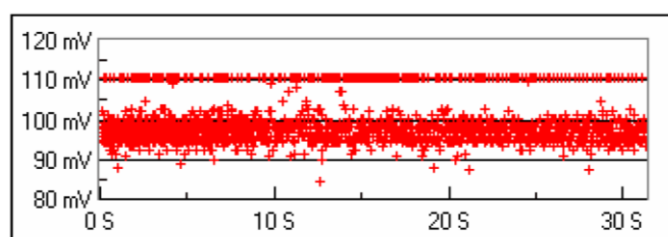


Abbildung 58 Teilentladung mit Rauschen [WEN08]

5.4.2. Manuelle Grenzwertmethode

Eine weitere Möglichkeit ohne selbstablaufenden Methoden auszukommen, ist das Setzen von Koordinaten, die als Grenzen im 2D Raum dienen. In Abbildung 59 ist ein Beispiel für das Setzen dieser Grenzen dargestellt. Diese Methode bringt natürlich den Vorteil mit sich, dass wenig Zeit zur Datenverarbeitung benötigt wird und sie sehr einfach ist.

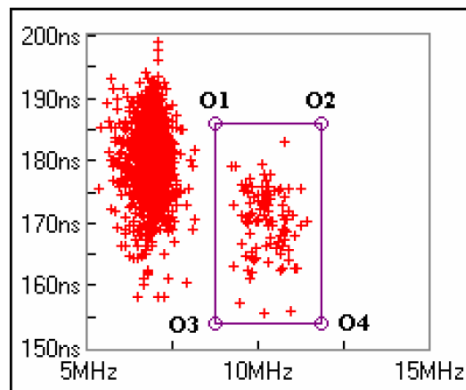


Abbildung 59 Setzen der Grenzkordinaten nach Anwenden der ETFM Methode auf die TE Impulse [WEN08]

5.4.3. Wavelet Denoising

Die Wavelet Denosing Methode bietet den Vorteil, dass mit deren Hilfe auch Teilentladungsimpulse richtig gruppiert werden können, bei denen die normale Untersuchung im Zeit- und Frequenzbereich versagt hätte. Ein Beispiel ist in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt, wobei in Abbildung 60 die wavelet denosing Methode nicht verwendet wurde [MA02], [SAT03], [ZHO05].

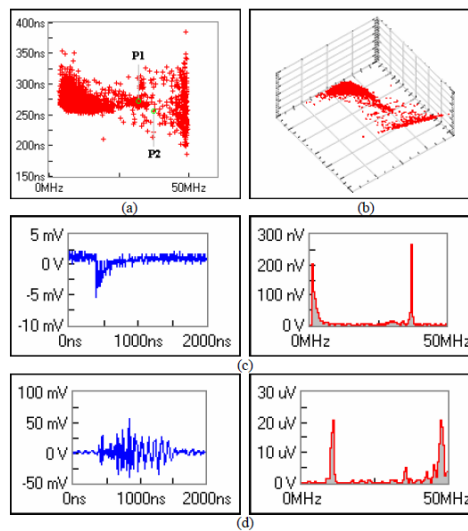


Abbildung 60 Pulssequenzanalyse im Zeit- und Frequenzbereich [WEN08]

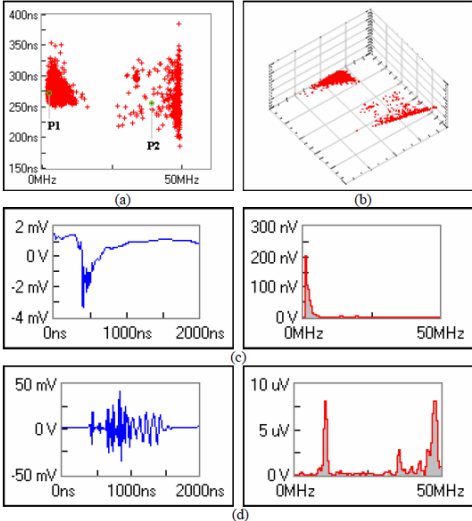


Abbildung 61 Pulssequenzanalyse mittels wavelet denosing [WEN08]

6. Neue Analyseverfahren bei Teilentladungsmessungen bei hohen Gleichspannungen

Bei Teilentladungen unter Gleichspannungsbeanspruchung ist es sehr schwierig den Prüfling mittels eines einzigen Parameters zu beurteilen. Vielmehr scheint es sinnvoller mehrere Parameter in die Beurteilung einfließen zu lassen und diese zum Teil zu gewichten, wie sehr sie das Teilentladungsverhalten beeinflussen. Dazu eignen sich Methoden der multivarianten Statistik.

6.1. Multivariate Statistik

Bei der multivarianten Statistik werden im Wesentlichen mehrere statistische Variablen oder Zufallsvariablen zeitgleich untersucht und mit multivarianten Verfahren ausgewertet. Die Zusammenhänge- bzw. Abhängigkeitsstrukturen, welche bei Teilentladungen auftreten, bieten sich an um es mittels multivarianter Statistik zu untersuchen.

Bei multivarianten Verfahren untersucht man die Struktur des Zusammenhangs von Daten aus einem Datensatz und versucht Variablen zu reduzieren ohne wesentlichen Informationsverlust. Man unterscheidet zwischen strukturprüfenden Verfahren und strukturentdeckenden Verfahren.

Strukturentdeckende Verfahren:

- Um mehrere Variablen auf wenige zu reduzieren: Faktorenanalyse, Hauptkomponentenanalyse und Korrespondenzanalyse
- Um viele Beobachtungen auf wenige Gruppen von Beobachtungen zu reduzieren: Clusteranalyse
- Um aus Distanzen oder (Un-)Ähnlichkeiten zwischen Beobachtungen etwas schließen zu können: Multidimensionale Skalierung

Strukturprüfende Verfahren:

- Varianzanalyse
- Konfirmatorische Faktorenanalyse
- Strukturgleichungsmodelle
- Neuronale Netze
- Diskriminanzanalyse

[AHR81]; [BAC06]; [TAB06]

Anwendung Teilentladung [WEN08]:

Nach dem Aufnehmen des Teilentladungsimpulses erhält man eine Vielzahl an Kenngrößen und somit Informationen über den Teilentladungsimpuls. Durch Zusammenfassen der Kenngrößen auf zwei oder drei neue Kenngrößen, welche danach im 2D oder 3D Diagramm dargestellt werden, können die Impulse schnell untersucht werden und in ein Cluster eingeteilt werden (siehe z.B. Abbildung 59).

Durch diese Vorgehensweise erhält man eine kompakte und aussagekräftige Darstellung der gemessenen Teilentladungen beschränkt auf zwei bis drei Parameter, wobei jeder Parameter wesentliche Informationen enthält. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellt.

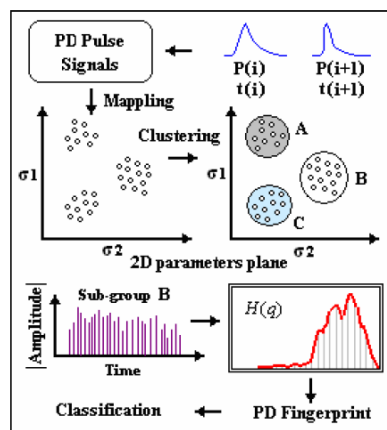


Abbildung 62 Datenverarbeitung eines Teilentladungsimpulses [WEN08]

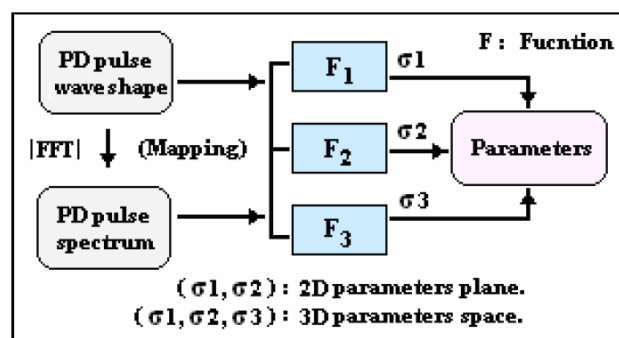


Abbildung 63 Ausarbeitung der aussagekräftigen Parameter [WEN08]

Eine Methode ist sich die durchschnittliche Zeit und Standardabweichung sowie die durchschnittliche Frequenz und Standardabweichung eines Teilentladungssignals anzusehen und als Wahrscheinlichkeitsverteilung aufzufassen. Dadurch erhält man die drei Parameter T,F und TF im dreidimensionalen Raum mit dem Namen „equivalent time-

frequency method“ (ETFM). Diese Methode kann zur Rauschunterdrückung und zur Erkennung von verschiedenen Teilentladungsquellen bei Gleichspannung verwendet werden [AUG05], [WEN08].

6.2. Die Weibull Verteilung

Die Weibull Verteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung über die positiven reellen Zahlen. Diese wird häufig verwendet um Lebensdauern oder Ausfallhäufigkeiten von Werkstoffen zu beschreiben. Der Name kommt vom Begründer dem schwedischen Ingenieur und Mathematiker Waloddi Weibull.

Zusammen mit dem Spezialfall der Weibull-Verteilung (Exponentialfunktion) ist sie die in der Praxis am meisten verwendete Lebensdauerverteilung [FIS70]; [RIN02]; [WIL04].

Anwendung [NIU08]:

Der Testaufbau besteht aus einem Generator mit einer maximalen Spannung von 35 kV, einem Koppelkondensator mit 1 nF und einer hochfrequenten Stromzange (HFCT) um die Teilentladungen zu detektieren. Als Messinstrument wurde der TechImp PDCheck verwendet, ein Messgerät mit einer Bandbreite bis zu 50 MHz und einer Samplerate von 100 MS/s. Die Untersuchungen fanden in einem abgeschirmten Labor statt. Für die Simulation der Koronaentladung wurde eine Spitze-Platte-Anordnung verwendet mit einem Abstand von 80mm. Für die Oberflächenentladung wurde dieselbe Ausführung genutzt, allerdings berührt die Spitze ein festes Dielektrikum, welches auf der Platte liegt. Für die innere Entladung diente ein Modell mit einer Lücke eingebettet in Epoxidharz [NIU08].

Die Teilentladungseinsetzspannung (PDIV=Partial Discharge Inception Voltage) war als jene Spannung definiert, bei der eine Wiederholungsrate von über eine Entladung pro Minute auftritt gemäß [MOR05].

Die statistischen Parameter, die in diesem Beispiel zur Unterscheidung herangezogen werden, sind der Formparameter β , die Varianz, die Schiefe und die Wölbung [CAC95].

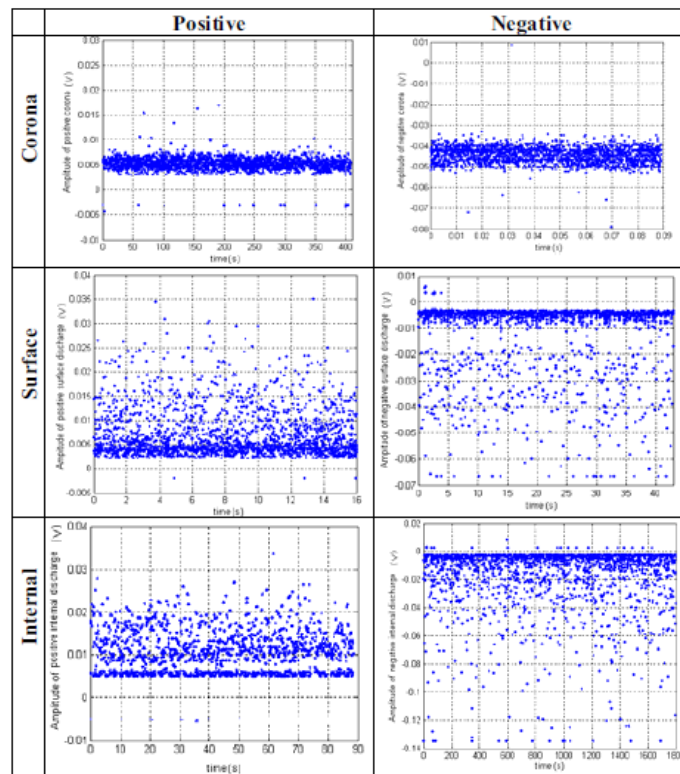


Abbildung 64 Teilentladungsamplituden verschiedener Modelle [NIU08]

Die Empfindlichkeit der einzelnen Kenngrößen wurde unter Berücksichtigung von Geometrie, Umweltbedingungen und Rauschen getestet und die weniger geeigneteren wurden verworfen, wodurch drei relevante Parameter übrig blieben [CAV03]:

1. β_Q , der Formparameter der Weibull Verteilung für die Amplitudenverteilung
2. β_T , der Formparameter der Weibull Verteilung für die TBD Verteilung
3. Sk_T , Schiefe der empirischen Verteilung von TBD

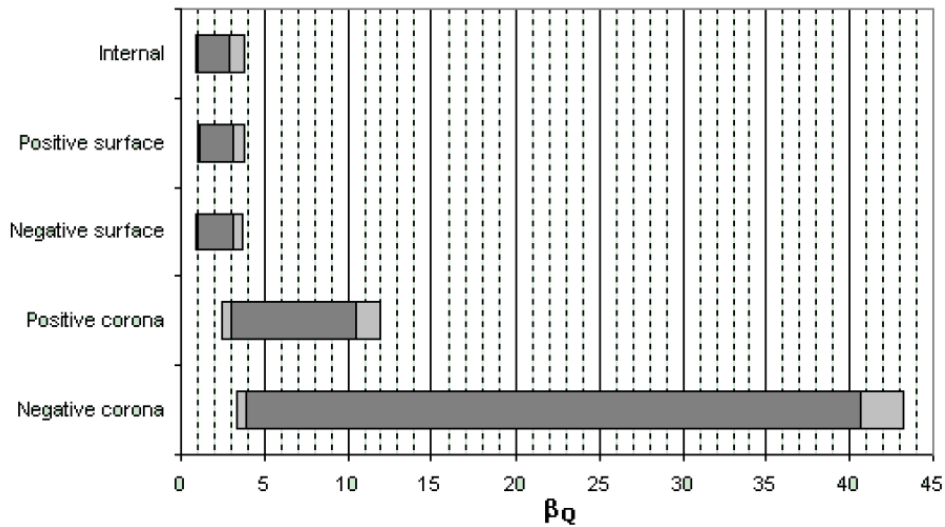


Abbildung 65 Reichweite von β_Q ; 90% der Werte im dunkelgrauen Bereich [NIU08]

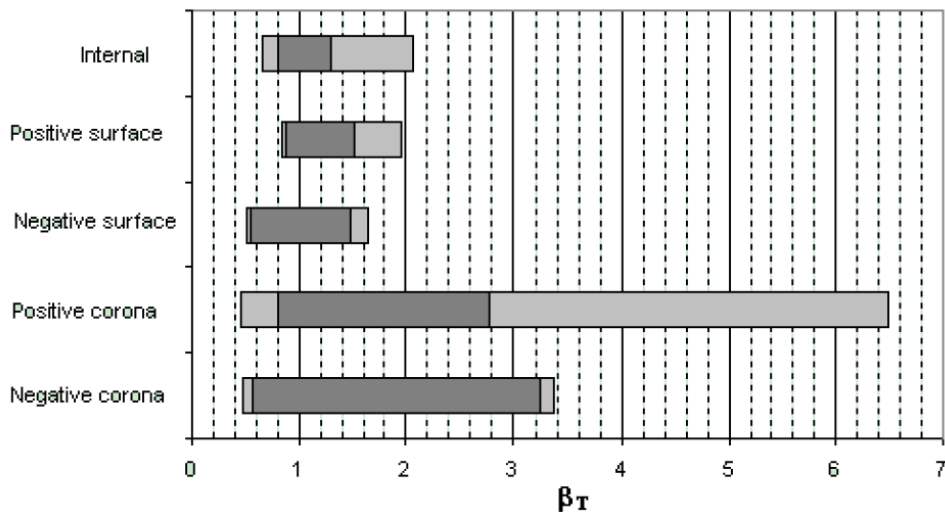


Abbildung 66 Reichweite von β_T ; 90% der Werte im dunkelgrauen Bereich [NIU08]

Analyse von β_Q :

In Abbildung 65 ist das Minimum, das Maximum und das Intervall, welches 90% enthält dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Werte bei Korona im speziellen bei negativer Korona deutlich höher sind verglichen mit jenen für Oberflächenentladungen und innere Entladungen. Das bedeutet, dass die Teilentladungsamplituden weniger gestreut sind bei Korona. Dieser Zusammenhang ist schon in Abbildung 64 zu erkennen. Somit ist eine Trennung bei einem Wert von 4 leicht möglich, um Korona zu identifizieren. Für positive Korona würde ein Schwellwert von 3 bedeuten, dass nur 5% der Koronaentladungen fälschlicherweise als Oberflächenentladung oder innere Teilentladung detektiert werden würden. Somit ist das Erkennen von Korona leicht möglich, die Unterscheidung zwischen

Oberflächenentladung und innerer Teilentladung ist allerdings praktisch unmöglich anhand von β_Q [NIU08].

Analyse von β_T :

In Abbildung 66 ist der Bereich für β_T dargestellt. Dieser Parameter kann helfen die Detektionssicherheit von Korona weiter zu verbessern, allerdings nicht wirklich in Bezug auf die Trennung zwischen innerer Teilentladung und Oberflächenentladung [NIU08].

Analyse von Sk_T :

Die Schiefe der TBD Verteilung wurde ebenfalls als Parameter getestet. Allerdings konnte er keine zusätzliche Information liefern [NIU08].

6.2.1. Feuchtigkeitsanalyse bei Oberflächenentladungen:

Wie in den Analysen zuvor gesehen ist es allgemein schwierig zwischen innerer Teilentladung und Oberflächenentladung zu unterscheiden. Hierzu kann die Abhängigkeit der Teilentladungen von den Umweltbedingungen genutzt werden. Diese beeinflussen natürlich nur die Oberflächenentladungen. Wichtigste Umweltbedingung mit großem Einfluss auf Oberflächenentladungen ist die Feuchtigkeit [STO05].

Im Versuchsaufbau wurde einmal mit einer relativen Feuchte von 30% und einer relativen Feuchte von 80% gemessen, um die Abhängigkeit zu beweisen. Dies wurde sowohl für positive als auch für negative Oberflächenentladungen durchgeführt. Es wurde eine starke Abhängigkeit der Wiederholungsrate detektiert und eine weniger starke Abhängigkeit der Teilentladungsamplitude (siehe Abbildung 67). Somit eignet sich die Wiederholungsrate zur Unterscheidung zwischen äußerer und innerer Teilentladung. Außerdem nimmt der PDIV Wert mit zunehmender Feuchte ab, was mit dem markanten Anstieg der Wiederholungsrate erklärt werden kann [NIU08].

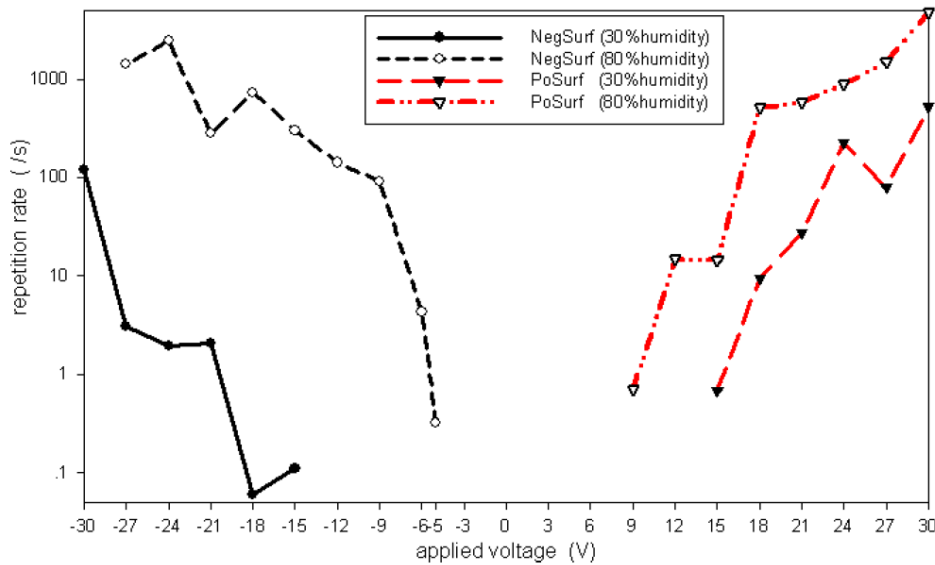


Abbildung 67 Wiederholungsrate von Oberflächenentladungen vs. angelegter Spannung bei unterschiedlicher Feuchte [NIU08]

6.3. Neuronale Netze

Für die Teilentladungsdiagnose von Bedeutung können auch so genannte künstliche neuronale Netze sein. Es wird versucht ein künstliches neuronales Netz zu entwickeln, welches die vielen Informationen bei Teilentladungsmessungen verarbeitet und ein Modell für den Prüfling erstellt, welches anschließend zur Beurteilung herangezogen werden kann. Die Zuordnung von Verbindungen und Knoten muss in Abhängigkeit von der Aufgabe des Netzes also gut durchdacht sein. Nach der Konstruktion kann das Netz aber auch verändert werden und lernen. Ein Netz lernt durch Entwickeln von neuen Verbindungen oder Löschen Bestehender, Ändern der Gewichtung, Anpassen der Schwellenwerte der Neuronen und Hinzufügen oder Löschen von Neuronen.

Neuronale Netze sind für Probleme geeignet, bei denen nur geringes oder gar kein systematisches Wissen über das Problem vorliegt, welches untersucht werden soll. Das Teilentladungsverhalten bei Gleichspannung stellt z.B. ein solches Problem dar [ERT09]; [HAY99]; [KNI07].

Klassifikation mittels künstlicher neuronaler Netze

Die selbstorganisierende Kohonen Karte ist jenes Modell, dass sich für die Teilentladungsdiagnose als sehr leistungsfähig bewährt hat. Sie ist in der Lage selber zu lernen und nichtlinear selbstorganisierend zu klassifizieren. Diese Art der nichtkonventionellen Teilentladungsdagnostik ist sehr gut geeignet zur Fertigungskontrolle bei Serienerzeugnissen und zur Laborprüfung einander ähnlicher Betriebsmitteln. Sie hat

sich also zur Fehlerarterkennung bewährt. Problematisch wird es jedoch wenn man versucht mögliche Schädigungsentwicklungen mittels der Kohlen Karte zu beschreiben.

Anwendungsbeispiel: Klassifikation der DGA (Dissolved Gas Analysis) Resultate und ihre Merkmale

Die Gasanalyse (DGA) ist eine Routineuntersuchung, um die Verschlechterung des Öls bzw. des ölprägnierten Materials festzustellen. Die gelösten Gase bilden sich durch Teilentladungen, Alterung, Durchschläge und Erhitzungen. Mittels eines neuronalen Netzwerkes kann festgestellt werden, welcher der genannten Gründe die Ursache für das Vorhandensein von gelösten Gasen ist [FUC99].

6.4. Fuzzy Logik

Die Fuzzy Logik ist eine unscharfe Logik oder unscharfe Theorie. Diese eignet sich gut für die Modellierung von Unsicherheiten und Unschärfen bei vielen Problemen. Mit Hilfe dieser Logik können Werte „ein bisschen“, „stark“, „sehr“ oder „ziemlich“ in ein mathematisches Modell integriert werden. Die Basis dieses Systems besteht aus den Fuzzy-Mengen und den Zugehörigkeitsfunktionen. Bei technischen Anwendungen muss auch noch eine Fuzzyifizierung und Defuzzifizierung durchgeführt werden [BIE97]; [MCN94]; [MAY93].

Zur Anwendung bei der Erkennung von Teilentladungsmessungen wird Fuzzy C-Means (FCM) verwendet. Die Fuzzy C-Means Methode ist eine Ableitung von der k-Means Methode. Bei FCM werden die Teilentladungen im Gegensatz zur k-Means Methode nicht direkt einem Clusterzentrum zugeordnet. Stattdessen wird abhängig von der Zugehörigkeit zu den jeweiligen Gruppen ein Satz Gewichte zugeordnet. Für jede Art Teilentladung werden die Gewichte als sogenannte Fuzzy-Zahlen bezeichnet. Diese können aber müssen sich nicht zu eins addieren [FLU88].

Anwendungsbeispiel [WEN08]:

Eine Methode um ein selbstablaufendes Einteilen in Cluster zu ermöglichen ist die Fuzzy C-Means (FCM). Dabei werden ähnliche Impulsformen zu einer Gruppe zusammengefasst. Durch Erstellen neuer Parameter, die mit Hilfe multivarianter Statistik erstellt worden sind, kann viel Information in zwei (T,F) oder drei (T,F,TF) Parametern enthalten sein. Dadurch wird der Speicher- und Zeitbedarf verringert. Die Clustermethode erkennt dann die Eigenschaften der Impulsformen. Das Ergebnis wird dann abhängig ob zwei oder drei Parameter verwendet wurden im 2D bzw. 3D Raum dargestellt. Der FCM Algorithmus kann unter [BEZ81] nachgelesen werden.

6.5. Analyse der Impulsform

Um ein unverzerrtes Abbild des Signals zu erhalten, muss bei der Analyse der Impulsform eine sehr breitbandige Signalerfassung erfolgen. Informationen über Größe und Art der Fehlerstelle sollten rein theoretisch in der Impulsform bzw. im hochfrequenten Spektrum enthalten sein. Ein Nachteil ist, dass die Impulse nur in günstigen Fällen über breitbandige Feldsonden ausgekoppelt werden können (z.B. in gasisolierten Schaltanlagen). Meistens ist die unverfälschte Impulsform nicht zu erfassen. Schließlich ist aus der Systemtheorie bekannt, dass diese immer die Systemeigenschaften der gesamten Strecke wiedergibt [KÜC09].

Anwendungsbeispiel [LI07]:

Die Autoren haben drei verschiedene Modelle untersucht. In Abbildung 68 ist die Impulsform bei einem mit Luft gefülltem Hohlraum, in Abbildung 69 eine Spitze-Kugel Anordnung und in Abbildung 70 eine Spitze-Platte Anordnung als Modell dargestellt.

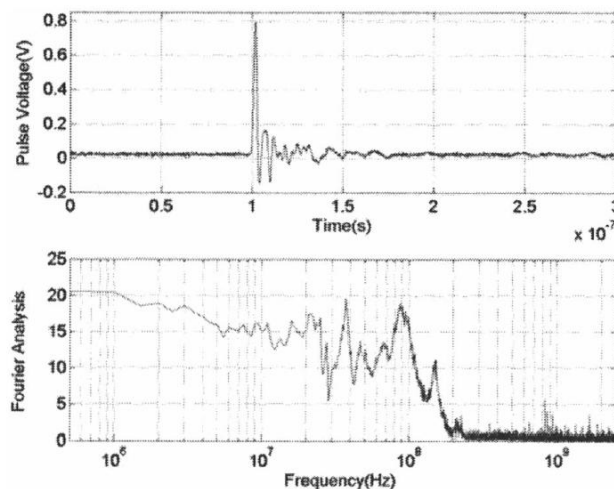


Abbildung 68 Impulsform bei innerer Teilentladung [LI07]

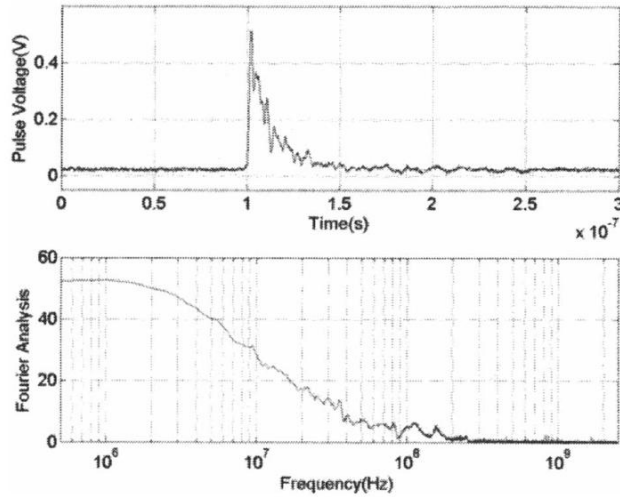


Abbildung 69 Impulsform bei Oberflächenentladung [LI07]

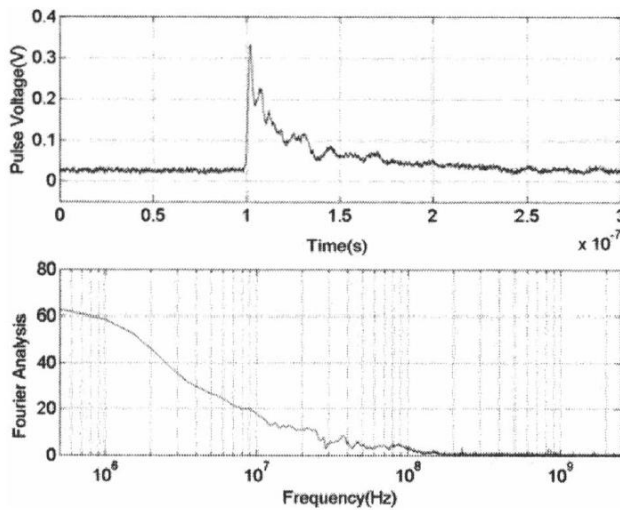


Abbildung 70 Impulsform bei Corona Entladungen [LI07]

Das Teilentladungsverhalten der drei Prüflinge wurde bei steigender, bei konstanter und bei abnehmender Spannung untersucht, wie in Abbildung 71 dargestellt.

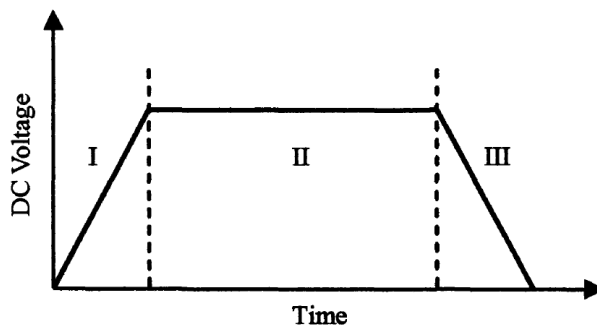


Abbildung 71 3 Stufen der Gleichspannung [LI07]

Hohlraummodell

Bei steigender Spannung im Hohlraummodell war die Teilentladungsrate relativ hoch. Sobald die Spannung konstant gehalten wird, kommt es kaum noch zu Teilentladungen. Sinkt die Spannung so treten sehr viele Teilentladungen mit umgekehrter Polarität auf. In Abbildung 68 ist ein Teilentladungsimpuls bei einer Spannung von 3kV dargestellt. Die meiste Energie dieses Impulses mit einer Breite von ungefähr 2,5ns ist innerhalb eines Frequenzspektrums von 200MHz, wobei zwischen 10MHz und 100MHz einige Spitzen liegen [LI07].

Oberflächenmodell

Auch beim Oberflächenmodell kommt es bei steigender Spannung zu hohen Teilentladungsraten, die sich reduzieren, wenn die Spannung konstant bleibt. Senkt man die Spannung, tritt gar keine Teilentladung auf. Ein Teilentladungsimpuls bei 3kV ist in Abbildung 69 dargestellt. Der Impuls ist mit einer Breite von 30ns mehr als zehnmal so breit, wie jener der im Hohlraum auftritt. Die meiste Energie ist innerhalb von 30MHz [LI07].

Koronamodell

Diese Art der Teilentladung tritt nur oberhalb der Zündspannung auf. Deshalb kam es sowohl bei steigender als auch bei abnehmender Spannung zu keinen Teilentladungen. Die Spannung musste bei diesem Versuch auf 3670 erhöht werden um überhaupt Teilentladungen zu erzeugen. Der Teilentladungsimpuls ähnelt stark jenem bei Oberflächenentladungen, jedoch mit einer Breite von 80ns und die meiste Energie innerhalb von 10MHz [LI07].

6.6. Pulsfolgenanalyse

Der große Vorteil bei der Pulsfolgenanalyse (pulse sequence analysis) ist, dass die obengenannten Schwierigkeiten bei diesem Verfahren nicht auftreten oder zumindest nur in geringem Maß. Durch neu definierte Entladungsparameter soll bei dieser Analyse ein deterministischer Zusammenhang zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen gezeigt werden. Dabei betrachtet man die Prüfspannungsänderung Δu zwischen zwei Teilentladungsereignissen. Wird der Spannungshub zwischen den Ereignissen n und $n+1$ über dem Spannungshub zwischen den Ereignissen $n-1$ und n aufgetragen, ergeben sich bei zusammengehörenden, gleich hohen Spannungshüben Punkte auf der Bilddiagonale (sich Abbildung 72). Der Spannungshub Δu bestimmt die Lage der Punkte. Unabhängig von der Prüfspannungsform ergibt sich ein charakteristischer Spannungshub für die Fehlstelle. Es ergeben sich sehr scharfe Bilder im Vergleich zu den phasenaufgelösten Wolkenplots. Schließlich spielen weder die Prüfspannungsverzerrung noch die raumladungsbedingte

Phasenverschiebung eine Bedeutung. Würde es einen zweiten Fehler geben, so würde dieser durch einen wieder anderen Spannungshub auffallen. Es bilden sich statistisch streuende Spannungsdifferenzen, wenn nicht zusammengehörende aufeinanderfolgende Impulse auftreten. Das gilt auch für Störimpulse, woran erkennbar ist, dass es keinen deterministischen Zusammenhang zwischen den Impulsen gibt. Man kann bei der Pulsfolgeanalyse Muster erkennen, welche charakteristisch sind und physikalisch begründbar. Äußere Entladungen haben sehr geringe Spannungsdifferenzen und konzentrieren sich deswegen im Ursprung. Wohingegen sich innere Entladungen, wie vorher beschrieben, in den Diagonalen abbilden. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Pulsfolgeanalyse einen Beitrag zur Fehleridentifikation leisten kann [KÜC09].

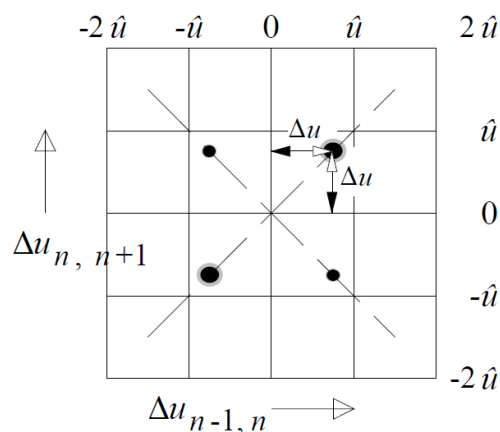


Abbildung 72 Pulsfolgeanalyse [KÜC09]

Die Abfolge der Teilentladungsereignisse ist sehr viel deterministischer als man aufgrund der statistischen Analyse bemerken kann. So konnte festgestellt werden, dass die Überlagerung von Raumladungsfeldern die Streuung der Phasenlage verursacht und dass diese systematisch ist. Damit ist es möglich genauere physikalische Interpretationen anzustellen, weil die Teilentladungsmuster schärfer sind (wegen der Auswertung der Spannungshübe) und durch statistische Mittelung nicht verwischt werden [KÜC09].

6.7. Klassifikation mittels LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine)

Bei dieser Methode wurde zunächst ein digitales Teilentladungsmesssystem mit einer Bandbreite von 10 kHz bis 40 MHz entwickelt. Zur Gruppierung wird zunächst ETFM (Equivalent Time-Frequency Method) verwendet. Als selbstablaufende Clustermethode wurde wie bereits oben erwähnt FCM verwendet. Nun soll die Klassifikation anhand LS-SVM erläutert werden. Die Messungen wurden bei Gleichspannungsbeanspruchung durchgeführt

und es wurden typische Defekte bei einer Öl-Papier-Isolation untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das Teilentladungsdetektionssystem mit künstlicher Intelligenz praktisch und effektiv funktioniert [WEN08].

Die LS-SVM Methode ist eine Weiterentwicklung der SVM Methode. Im Teilentladungsmesssystem wird diese Methode zur Pulssequenzklassifikation verwendet (Abbildung 73) [SUY99].

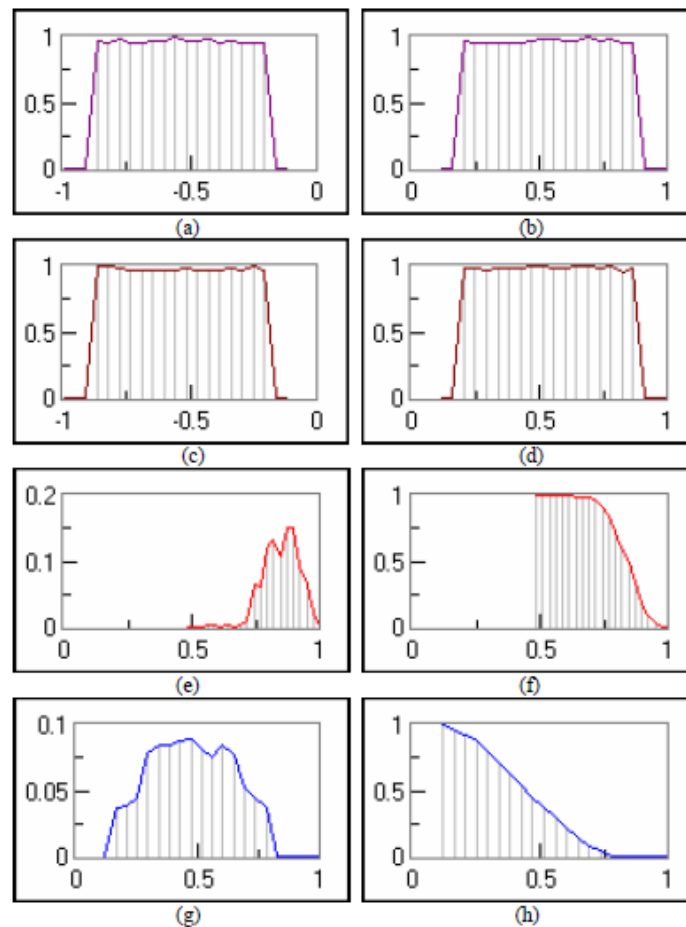


Abbildung 73 Verteilung zur Identifikation der Teilentladungsquelle mit normierten Koordinatenachsen: (a) und (b) sind $H_{q_{\max}}(\Delta t_{\text{pre}})$ und $H_{q_{\max}}(\Delta t_{\text{suc}})$; (c) und (d) sind $H_{qn}(\Delta t_{\text{pre}})$ und $H_{qn}(\Delta t_{\text{suc}})$; (e) und (f) sind $H_n(q)$ und $H_{\Sigma n}(q)$; (g) und (h) sind $H_n(\Delta t)$ und $H_{\Sigma n}(\Delta t)$ [WEN08]

Mittels eines entwickelten Teilentladungsmesssystems, das auf einer LS-SVM Klassifikation beruht, ist es möglich anhand von Fingerprints zwischen den typischen Defekten Korona, innere Entladung und Oberflächenentladung für den Fall bei Öl-Papier-Isolation zu unterscheiden.

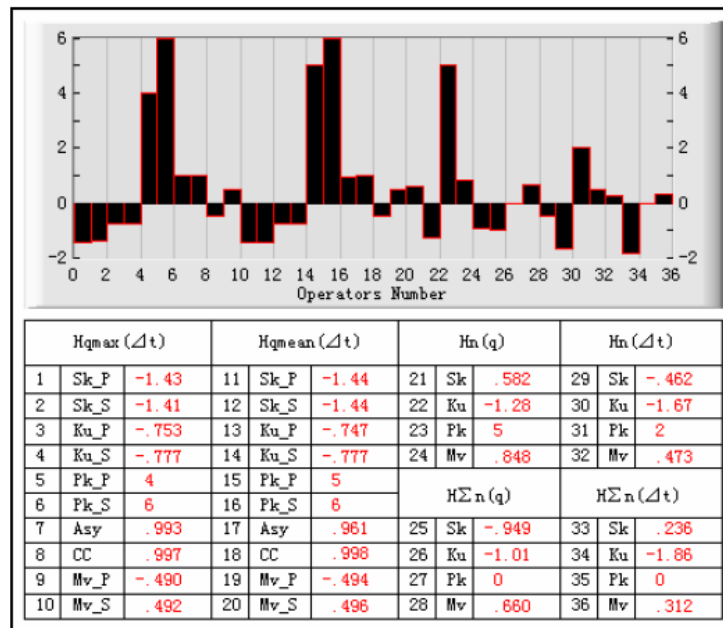


Abbildung 74 Fingerprint für die Entladungsquelle für die Verteilung von Abbildung 73 [WEN08]

Damit man die Qualität der Ergebnisse dieses Systems überprüfen kann, werden künstliche Defekte bei einer Öl-Papier-Isolierung unter hoher Gleichspannung getestet. Das Schema des Testsystems ist unter [WE08] nachzulesen. Nachfolgend werden zwei Anwendungsbeispiele betrachtet in Bezug auf die Eigenschaften der Detektion, Gruppierung und Klassifikation.

Beispiel : Rauschunterdrückung

Die gemessenen Daten einer Teilentladungsmessung sind in Abbildung 75 dargestellt. Dabei wird es von einem zufälligen Rauschsignal gestört. Bei dem Prüfling handelt es sich um ein Transformatoröl mit drei isolierenden Papierschichten [WEN08].

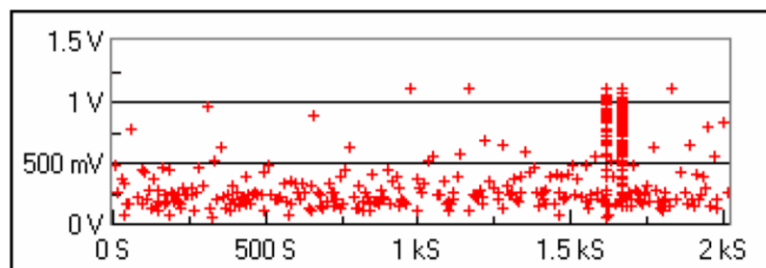


Abbildung 75 Teilentladungsmessung von inneren Teilentladungen über 2000s [WEN08]

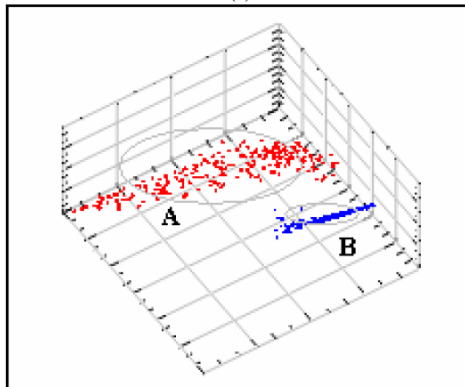


Abbildung 76 Ergebnisse der Teilentladungsmessung gruppiert im 3D Parameter Raum [WEN08]

Die entsprechende Darstellung unter der Annahme optimaler Datenabteilungen im 3D Parameter Raum besteht aus zwei Untergruppen (siehe Abbildung 76). Die zwei typischen Impulsformen im Zeit- und Frequenzbereich entsprechend der zwei Untergruppen A und B sind in Abbildung 77 dargestellt.

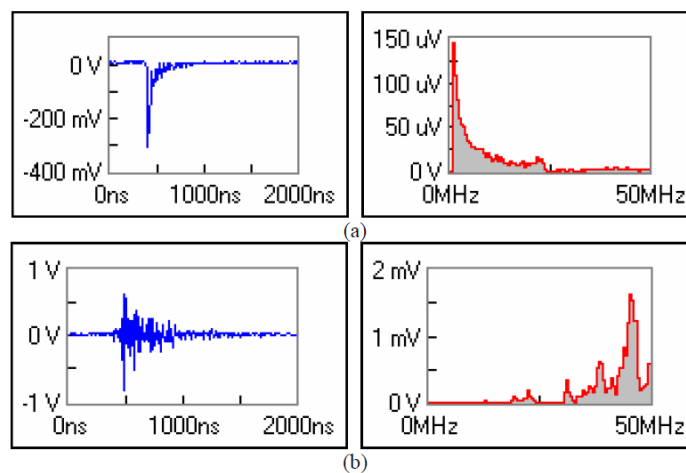


Abbildung 77 Impulsform im Zeitbereich und im Frequenzbereich entsprechend der beiden Untergruppen A und B: (a) ist Untergruppe A; (b) ist Untergruppe B [WEN08]

Zwei verschiedene Teilentladungssequenzen sind in Abbildung 78 dargestellt.

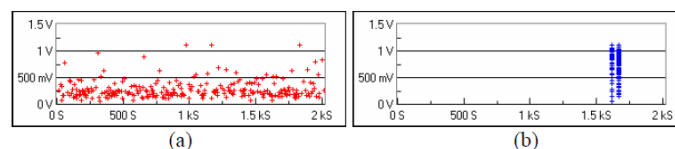


Abbildung 78 Teilentladungsimpulssequenz: (a) ist Untergruppe A; (b) ist Untergruppe B [WEN08]

Die von der stochastischen Analyse von q und Δt abgeleiteten 2D Histogramme sind in Abbildung 79 dargestellt, wobei nur jene aus Untergruppe A dargestellt ist.

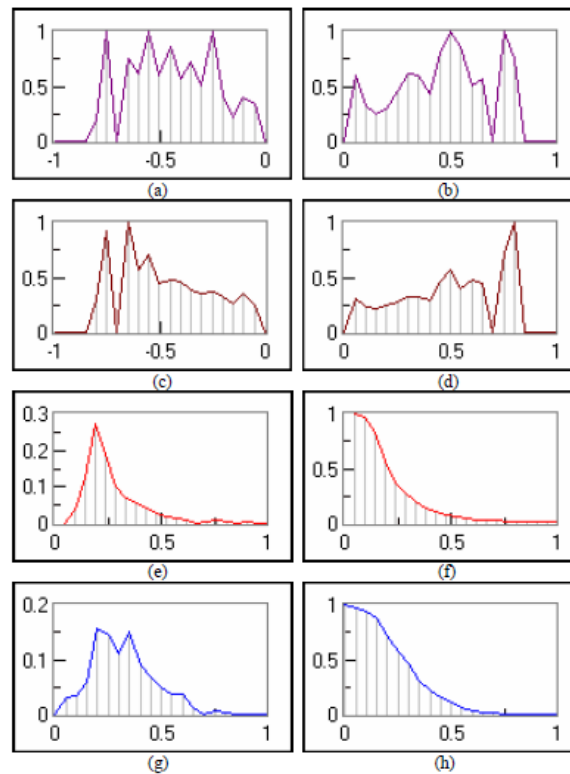


Abbildung 79 Verteilung der Impulse aus Abbildung 77a: (a) und (b) sind $H_{q_{\max}}(\Delta t_{\text{pre}})$ und $H_{q_{\max}}(\Delta t_{\text{suc}})$; (c) und (d) sind $H_{q_n}(\Delta t_{\text{pre}})$ und $H_{q_n}(\Delta t_{\text{suc}})$; (e) und (f) sind $H_n(q)$ und $H_{\Sigma n}(q)$; (g) und (h) sind $H_n(\Delta t)$ und $H_{\Sigma n}(\Delta t)$
 [WEN08]

In Abbildung 80 ist der Fingerprint dargestellt.

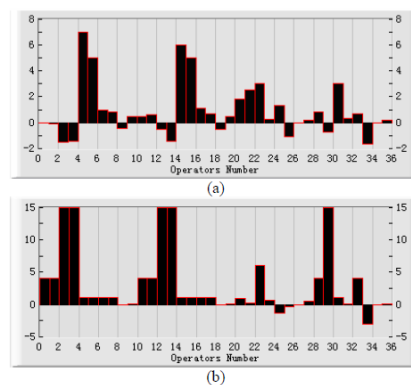


Abbildung 80 Fingerprint: (a) ist Untergruppe A; (b) ist Untergruppe B [WEN08]

Entsprechend des Fingerprints ist mittels der entwickelten LS-SVM Methode eine Klassifikation möglich und das Ergebnis ist in Abbildung 81 dargestellt.

Type	Sub-group
Corona:	
<input checked="" type="checkbox"/> Internal discharge:	A
Surface discharge:	
<input checked="" type="checkbox"/> Noise:	B

Abbildung 81 Ergebnis der Klassifizierung [WEN08]

Das System ist also in der Lage eine Rauschunterdrückung durchzuführen, sofern es aufgezeichnete Impulsformen und Fingerprints in der Datenbank gibt [WEN08].

In einem weiteren Beispiel ist bewiesen [WEN08], dass die Unterscheidung zwischen Koronaentladungen, inneren Teilentladungen, Oberflächenentladungen und Rauschen funktioniert [WEN08].

6.8. Klassifikation mittels CAPD (Chaotic Analysis of Partial Discharge)

Die fundamentalen Parameter für die modifizierte CAPD sind die Amplitudengröße der Teilentladung und das Zeitintervall zwischen dem Auftreten der einzelnen Teilentladungsimpulse. Diese werden normalisiert und differenziert, wodurch sich die NDQs (Normalized differenced quantities) ergeben (siehe Abbildung 82).

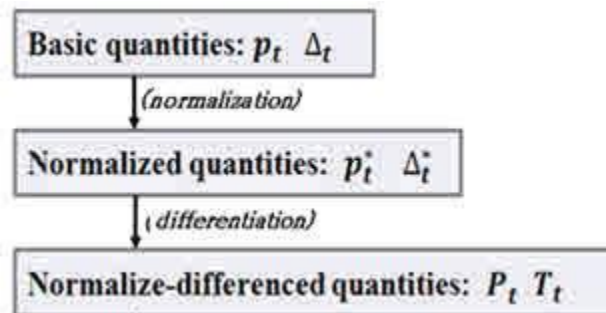


Abbildung 82 Schematische Darstellung der modifizierten CAPD

Die fundamentalen Parameter werden mittels Gleichung 21 und Gleichung 22 normalisiert und man erhält p_t^* und Δ_t^* :

$$p_t^* = \frac{p_t - p_{min}}{p_{tmax} - p_{tmin}} \quad (0 \leq p_t^* \leq 1)$$

Gleichung 21

$$\Delta_t^* = \frac{\Delta_t}{\Delta_{tmax}} \quad (0 \leq \Delta_t^* \leq 1)$$

Gleichung 22

Die NDQs der Parameter p_t^* und Δ_t^* erhält man mittels Gleichung 23 und Gleichung 24:

$$P_t = |p_n^* - p_{n-1}^*| \quad (0 \leq P_t \leq 1)$$

Gleichung 23

$$T_t (= \Delta_t^*) = \frac{\Delta_t}{\Delta_{tmax}} \quad (0 \leq T_t \leq 1)$$

Gleichung 24

In Gleichung 24 muss beim Einsetzen für Δ_{tmax} der Unterschied zwischen Wechselfspannung und Gleichspannung berücksichtigt werden. Bei Wechselfspannung ist der Wert mit 16,7ms fix vorgegeben aber bei Gleichspannung ist er variabel, weil kein Phasenbezug besteht.

Damit Muster bei der modifizierten CAPD erkannt werden, müssen die Teilentladungen entsprechend klassifiziert werden. Dafür verwendet man eine Ebene, wobei jede Achse unterteilt ist in 100 Segmente, was 10^4 verschiedenen Zonen entspricht. Zusätzlich wird die Konzentration in verschiedenen Farben von schwarz bis rot dargestellt. Drei Ebenen werden verwendet und verglichen um eine Mustererkennung von Teilentladungen zu ermöglichen:

1. $P_t - P_{t+\Delta t}$: Dabei werden die Amplituden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilentladungsimpulsen dargestellt und in ein Cluster zusammengefasst. Die Clusterzone stellt die Korrelation der Amplitude zwischen den zwei Teilentladungsimpulsen dar.
2. $T_t - T_{t+\Delta t}$: Dabei wird das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilentladungsimpulsen dargestellt und geclustert. Diese Clusterzone stellt die Korrelation der Zeitintervalle zwischen zwei Teilentladungsimpulsen dar, wobei ein Teilentladungsimpuls nur gewährt wird, wenn er einen vorher bestimmten Grenzwert überschreitet.
3. $P_t - T_t$: Dabei wird die Korrelation zwischen der Amplitude und der Zeit des Auftretens der Teilentladungsimpulse dargestellt und geclustert. Diese Clusterzone kann verwendet werden um die Ursache des Defekts zu identifizieren.

Versuchsaufbau:

Beim Versuch wurden vier künstliche Fehler produziert und mit folgenden Spannungen belastet:

- a) Windungsschluss (15kV)
- b) Spitze aus Oberfläche; Erhöhung der Inhomogenität (20kV)
- c) Partikel (24kV)
- d) Hohlraum (8kV)

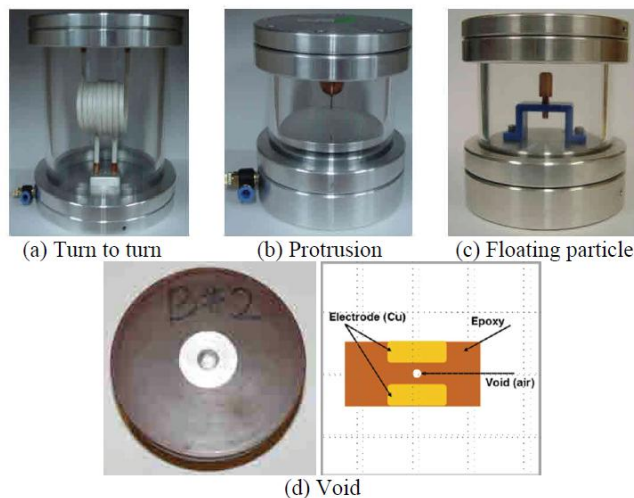


Abbildung 83 Vier Typen künstlicher Defekte

Das Isoliermedium war SF₆ Gas mit einem Druck von 3kg/cm² und zur Detektion wurde ein UHF Sensor verwendet. Es wurde berechnet, dass das Hintergrundrauschen maximal 2 pC betragen darf.

Ergebnisse:

Windungsschluss:

- a) Das Maximum der beiden Achsen ist 1, was einem Wert von 100 mV entspricht. Das Cluster zeigt die Form eines Pentagons im Mittelpunkt der Zone (siehe Abbildung 84a).
- b) Der Maximalwert der Achsen ist 1, was einem Defekt von 60ms entspricht. Das Cluster sieht aus wie eine zufällige Verteilung (siehe Abbildung 84b).
- c) Dieses Cluster zeigt ein breites Band, dass in 3 Gruppen unterteilt ist (siehe Abbildung 84c).

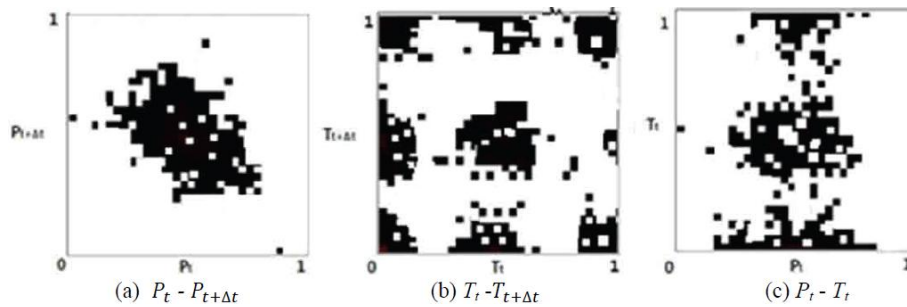


Abbildung 84 Muster eines Windungsschlusses

Spitze aus Oberfläche:

- Das Maximum der Achsen ist jeweils 1, was einem Wert von 20 mV entspricht. Das Cluster ähnelt einem Dreieck mit dem Zentrum bei 0,5 und 0,5 (siehe Abbildung 85a).
- Das Maximum der Achsen liegt jeweils bei 1, was einem Defekt von 50 ms entspricht. Das Cluster zeigt ein rechtwinkliges Dreieck (siehe Abbildung 85b).
- Das Cluster zeigt ein Band, welches in der Mitte der P_t Achse liegt und parallel zur anderen Achse verläuft (siehe Abbildung 85c).

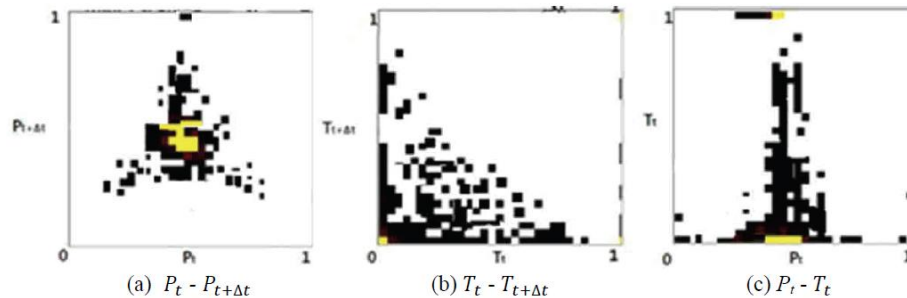


Abbildung 85 Muster eines Überstandes

Partikel:

- Das Maximum der beiden Achsen ist 1, was einem Wert von 90 mV entspricht. Das Cluster gleicht einem weit verteilten Dreieck entlang der Diagonale mit negativer Steigung (siehe Abbildung 86a).
- Das Maximum der beiden Achsen ist 1, was einem Defekt von 450 ms entspricht. Das Cluster zeigt zwei schmale Bänder entlang der beiden Achsen (siehe Abbildung 86b).
- Das Cluster von $P_t - T_t$ zeigt zwei schmale Bänder entlang der Linien $T_t=0$ und $T_t=1$ (siehe Abbildung 86c).

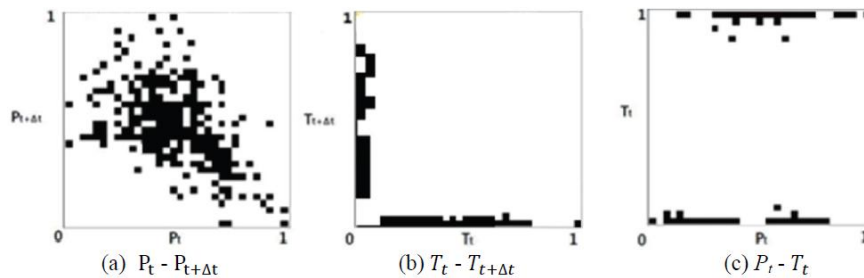


Abbildung 86 Muster eines Partikels

Hohlraum:

- Das Maximum der Achsen ist 1, was einem Wert von 100 mV entspricht. Das Cluster gleicht einem Dreieck, welches schräg im Viereck liegt (siehe Abbildung 86a).
- Das Maximum der Achsen ist 1, was einem Defekt von 80 ms entspricht. Das Cluster sieht aus wie ein relativ kleines rechtwinkeliges Dreieck (siehe Abbildung 86b).
- Das Cluster von $P_t - T_t$ zeigt einen schmalen Peak mit einer starken Konzentration bei 0,5 und 0 (siehe Abbildung 86c).

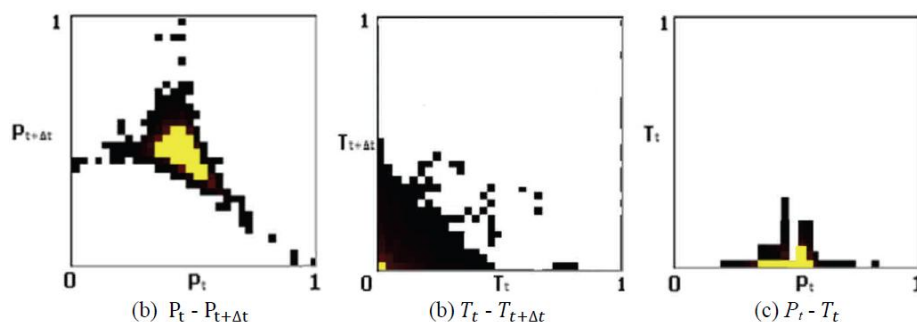


Abbildung 87 Muster einer Lücke

Die für Gleichspannung modifizierte CAPD Methode hat gute Möglichkeiten beim Erkennen von Teilentladungen auf dessen Ursachen rückzuschließen. Die relevante Hardware und Software zu entwickeln stellt kein Problem dar, allerdings muss systematisch Wissen über die verschiedenen Teilentladungen gesammelt werden und eine Datenbank angelegt werden [SEO12].

6.9. Strategie zur Identifikation von Teilentladungsquellen

Die statistische Analyse, die zuvor dargestellt wurde ist ein gutes Mittel um die Art der Teilentladung zu identifizieren. Allerdings sind die Grenzen zwischen den jeweiligen Kategorien nicht immer eindeutig, was auch zu Fehlurteilen führen kann. Eine Identifikation ohne jede Unsicherheit ist zurzeit nicht möglich. Aufgrund dieser Unsicherheit sind

Identifikationssysteme, welche mit FIS (Fuzzy Identification System) arbeiten gut geeignet. Dabei gibt es eine Zugehörigkeitsfunktion, welche definiert welcher Messwert zu welcher Gruppe gehört. Entscheidend ist, dass z.B. ein grauer Punkt mit einer Zugehörigkeit von 60% zu schwarz gehört, aber zu 40% zu weiß. Mit dieser Zugehörigkeitsfunktion kann der Wahrheitsgehalt auf numerische Eigenschaften umgelegt werden. In Abbildung 88 bedeuten alle Werte kleiner als 3 eine Zugehörigkeit 0 und alle Werte größer als 4 eine Zugehörigkeit 1. Die Werte dazwischen sind entweder Coronaentladungen oder interne/Oberflächenentladungen [CAV11].



Abbildung 88 Zugehörigkeitsfunktion für „ β_q ist groß“ [CAV11]

Um eine ordentliche Klassifikation mittels FIS zu ermöglichen, muss man sprachliche Begriffe wie groß und klein mit logischen Operatoren verknüpfen. In Abbildung 89 sieht man z.B. eine Kastengrafik von $Ku_{H(q)}$ und $Sk_{H(\Delta t)}$ für innere Entladungen und Oberflächenentladungen beider Polaritäten. Man erkennt, dass negative Oberflächenentladung durch folgenden Zusammenhang definiert werden kann: „ $Ku_{H(q)}$ ist groß“ und „ $Sk_{H(\Delta t)}$ ist groß“. Nachdem man getrennt entsprechende Zugehörigkeitsfunktionen definiert hat, kann die gemeinsame Zugehörigkeitsfunktion mittels Fuzzy und Operatoren (T-Norm) ermittelt werden [CAV11].

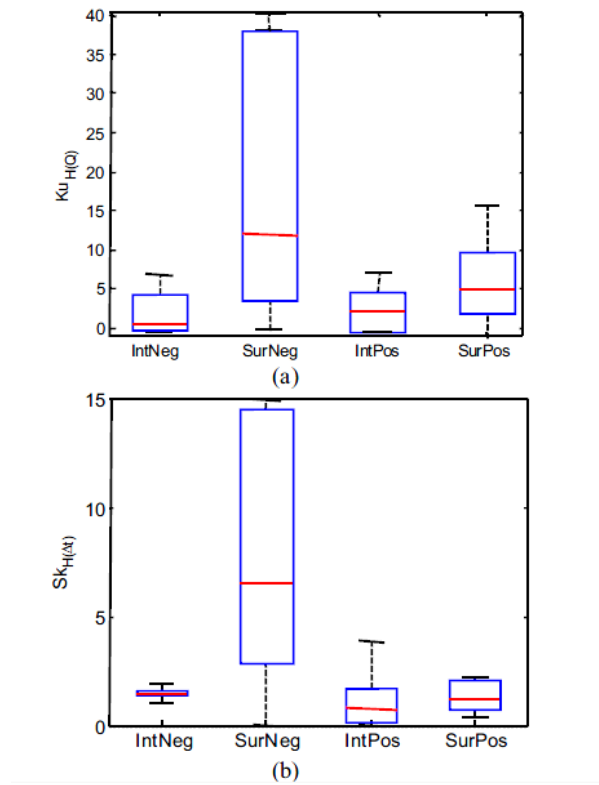


Abbildung 89 Kastengrafik von (a) Wölbung der Amplitudenverteilung ($KU_{H(\Delta t)}$) und (b) der Verteilung der Schiefe ($SK_{H(\Delta t)}$) für interne und oberflächliche Teilentladungsquellen [CAV11]

7. Resümee

Nachdem sich die Wechselstromtechnik gegenüber der Gleichstromtechnik für die Energieversorgung durchgesetzt hatte, wurden Teilentladungen für sehr lange Zeit praktisch ausschließlich bei hoher Wechselspannungsbeanspruchung untersucht. Durch den Einzug von hohen Gleichspannungskomponenten in der modernen Energieübertragung über weite Entfernungen hat die Betrachtung von Teilentladungen bei hohen Gleichspannungen heute in der Praxis jedoch einen hohen Stellenwert. Dadurch ergibt sich allerdings die Problemstellung, dass über Teilentladungen bei hoher Gleichspannung bis heute sehr wenig bekannt ist.

Aufgrund des großen Wissensvorsprungs versucht man die Erkenntnisse von Wechselspannung auf Gleichspannung zu übertragen. Die Norm für Teilentladungen IEC 60270 stellt allerdings eindeutig fest, dass ein allgemeines Schließen von Teilentladungserkenntnissen von Wechselspannung auf Gleichspannung nicht gültig ist.

Allgemein ist festzuhalten, dass das Fehlen des Phasenbezugs nach wie vor ein großes Problem bei der Teilentladungsmessung unter hoher Gleichspannung ist. Eine Unterscheidung zwischen innerer und äußerer Teilentladung ist daher schwieriger. Das Teilentladungsverhalten bei hoher Gleichspannung ist ein statistischer Prozess, der jedoch von anderen Parametern (Dielektrizitätszahlen, Leitfähigkeiten, Bewegung von Ladungsträgern und Inhomogenitäten) sehr stark beeinflusst wird. Diese wiederum sind jedoch von schwer zu kontrollierenden Parametern abhängig, wie der Temperatur, der Feldstärke, dem Alterungszustand, der Verschmutzung und der Feuchte. Udo Fromm hat in seiner Doktorarbeit 1995 ein Modell für das statistische Verhalten erstellt und wissenschaftlich hinterlegt. Außerdem kommt in seiner Doktorarbeit auch ein Ersatzschaltbild für Teilentladungen bei Gleichspannungsbeanspruchung vor. Dieses ist allgemein jedoch insofern umstritten, als dass es erst beim Auftreten von Teilentladungen ein kapazitives Verhalten gibt. Vor Auftreten der Teilentladungen handelt es sich im Prinzip um ein rein ohmsches Verhalten. Des Weiteren muss bei Gleichspannungsbeanspruchung zwischen transienten und stationären Zuständen unterschieden werden.

Im Kapitel 6 werden einige Analyseverfahren vorgestellt. Das Problem bei diesen Beispielen ist, dass es sich nur um einzelne Versuche handelt. Es gibt kein allgemein anerkanntes Messverfahren für Teilentladungen bei hoher Gleichspannung.

Die praktische Herausforderung besteht darin, erstens ein allgemein anerkanntes Messsystem zur Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannung zu entwickeln und zweitens die jeweiligen Analyseverfahren auf Vor- und Nachteile weiter zu untersuchen und schließlich allgemein anerkannte Grenzwerte zu finden.

Auch die Theorie der Teilentladungen bei hoher Gleichspannung muss weiter untersucht werden. Das Ersatzschaltbild müsste abgeändert werden, um für alle Zeitpunkte gültig zu sein, oder man arbeitet mit mehreren, für entsprechende Zeitpunkte gültigen Ersatzschaltbildern. Ebenso ist im Bereich der Wahrscheinlichkeit zu untersuchen, ob es vielleicht ein Modell gibt, welches das Teilentladungsverhalten bei hoher Gleichspannung so beschreibt, dass man es auch für praktische Anwendungen verwenden kann.

8. Zusammenfassung

Das elektrische Netz steht zurzeit vor einigen großen Veränderungen. Der Transport von großen Mengen an elektrischer Energie über weite Entfernung gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei vor allem der Versuch der Energiewende hin zu erneuerbaren Energiequellen wesentlich dazu beiträgt. Für diese Anforderungen bietet die HGÜ einige Vorteile gegenüber der herkömmlichen Übertragung mit Wechselstrom, weshalb Gleichspannungsbeanspruchungen der Systeme die Techniker vor neue zum Teil andere Probleme stellen.

In Kapitel 2 werden die Teilentladungen allgemein behandelt. Dabei wird auf die Unterschiede zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Isolierstoffen eingegangen.

Kapitel 3 beschreibt die die unterschiedliche Feldverteilung bei AC und DC. Außerdem werden spezielle Eigenschaften der Gleichspannungsbeanspruchung behandelt, sowie die Problemstellung erläutert.

In Kapitel 4 wird die generelle Teilentladungsmesstechnik erläutert.

In Kapitel 5 wird beschrieben, wie Teilentladungen gemessen und ausgewertet werden. Zudem wird auf den aktuellen Stand der Normung eingegangen, wobei anzumerken ist, dass die Norm IEC 60270 nur ein einziges Kapitel über Gleichspannung beinhaltet. Abschließend werden die Herausforderungen für die Teilentladungsmessungen bei hoher Gleichspannung kurz beschrieben.

Kapitel 6 bildet inhaltlich den wesentlichen Bestandteil dieser Diplomarbeit. In diesem Kapitel sind die verschiedenen Analyseverfahren zur Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannung dargestellt. So wird zum Beispiel die Teilentladungsdiagnose mittels multivarianter Statistik, neuronaler Netze oder Fuzzy Logik vorgestellt. Die Analyse mittels der Weibull Verteilung ist dabei zum Teil schon recht weit fortgeschritten und ein Erkennen von Koronaentladungen ist relativ leicht möglich. Zur Unterscheidung zwischen Oberflächenentladungen und inneren Teilentladungen braucht man allerdings zusätzliche Messungen, wie z.B. die Analyse bei verschiedener Feuchtigkeit, weil diese nur die Oberflächenentladungen beeinflussen. Außerdem wird in diesem Kapitel unter 6.7 auch die Klassifikation mittels LS-SVM und unter 6.8 mittels CAPD vorgestellt, welche sich beide für die Teilentladungsanalyse bei hoher Gleichspannung bewährt haben. Bei diesen Verfahren werden Fingerprints anhand von Clustern für verschiedene Defekte erstellt. Dabei muss eine

Datenbank existieren, in welcher bekannte Fehler gespeichert sind, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Den Abschluss bildet eine Darstellung der Probleme, die es bei der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung gibt, eine Analyse der bisherigen Methoden sowie eine Auflistung für weiterführende Arbeiten.

9. Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>engl. Alternating Current</i> (Wechselstrom)
CAPD	<i>engl. Chaotic Analysis Of Partial Discharge</i>
CFRD	<i>engl. Center Frequency Relation Diagram</i>
dBm	Leistungspegel bezogen auf Milliwatt
DC	<i>engl. Direct Current</i> (Gleichstrom)
DGA	<i>engl. Dissolved Gas Analysis</i> (Gas-in-Öl-Analyse)
DIV	<i>engl. Division</i>
ETFM	<i>engl. Equivalent Time-Frequency Method</i>
FCM	<i>engl. Fuzzy C-Means</i>
FFT	Fast Fourier Transformation
FIS	<i>engl. Fuzzy Identification System</i>
GIS	Gasisolierte Schaltanlagen
HFCT	<i>engl. High Frequency Current Transformer</i>
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HVDC	<i>engl. High Voltage Direct Current</i>
IEC	<i>engl. International Electrotechnical Commission</i> (internationale Normungsorganisation, Sitz in Genf, Schweiz, Europa)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (weltweiter Berufsverband von Ingenieuren der Elektrotechnik und Informatik, Sitz in New York, USA)
LS-SVM	<i>engl. Least Squares Support Vector Machine</i>
MCC	<i>engl. Maximum Correlation Coefficient</i>
NDQ	<i>engl. Normalized Differenced Quantities</i>
PARD	<i>engl. Phase Amplitude Relation Diagram</i>

PDIV	engl. Partial Discharge Inception Voltage
ppm	engl. Parts Per Million (Teile einer Million)
SF6	Schwefelhexafluorid
SVM	engl. Support Vector Machine
TE	Teilentladung
TEA	Teilentladungsaussetzspannung
TEE	Teilentladungseinsetzspannung
UHF	Ultra-Hoch-Frequenz
UV	Ultraviolett

10. Symbolverzeichnis

C	Kapazität
C_p	Kapazität des Prüflings
C_s	Kapazität seriell zur Teilentladungskapazität
D	dielektrische Verschiebungsdichte
E	Elektrische Feldstärke
f	Frequenz
$H_{\Sigma n}$	aufsummierte Dichtefunktion
H_n	Dichtefunktion der Zeit zwischen den Teilentladungen
$H_{q_{\max}}$	maximale Teilentladungsamplitude
H_{q_n}	durchschnittliche Teilentladungsamplitude
I	elektrischer Strom bzw. elektrische Stromstärke
i_c	Kapazitätsstrom
J	Stromdichte
N	Anzahl der Teilentladungen (Häufigkeit)
n	Teilentladungsrate
P	elektrische Leistung
q	elektrische Ladung
q^2	elektrische Ladung ²
Q_s	scheinbare Ladung
R	Widerstand
R_m	Messwiderstand
S_{kT}	Schiefe der empirischen Verteilung von TBD

T	Zeit
$\tan \delta$	Verlustfaktor
T_{ref}	Referenzzeit
V_e	Teilentladungsaussetzspannung
V_i	Teilentladungseinsetzspannung
V	elektrische Spannung
α	Ionisationskoeffizient
β_Q	Formparameter der Weibullverteilung für die Amplitudenverteilung
β_T	Formparameter der Weibullverteilung für die TBD Verteilung
Δf	Frequenzbreite
ΔQ	tatsächlicher Ladungsumsatz
Δt	Zeit zwischen den Teilentladungen
Δt_{pre}	Zeitdifferenz zur vorherigen Teilentladung
Δt_{suc}	Zeitdifferenz zur folgenden Teilentladung
ε	Permittivität (auch: dielektrische Leitfähigkeit)
κ	elektrische Leitfähigkeit
τ	Zeitkonstante

11. Literaturverzeichnis

- [AHR81] H. Ahrens, J. Läuter: "Mehrdimensionale Varianzanalyse", Akademie-Verlag, Berlin, 1981
- [AnnexH] Erweiterung IEC 60270
- [AUG05] F. Auger, P. Flandrin, P. Goncalves, O. Lemoine: "Time-Frequency Toolbox Reference Guide", French CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), Rice University, USA, 2005
- [BAC06] K. Backhaus, B. Erichson, R. Plinke: "Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung", 11. Auflage, Springer Verlag, ISBN 3-540-27870-2, Berlin 2006
- [BEY02] J. Beyer: "Space Charge and Partial Discharge Phenomena in HVDC Devices", Doctoral Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-6734-097-9, 2002
- [BEZ81] J. Bezdek: "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum, New York, 1981
- [BIE97] B. Biewer: "Fuzzy-Methoden: Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen", Springer, ISBN 3-540-61943-7, Berlin 1997
- [CAC95] M. Cacciari, A. Contin, G. Montanari: "Use of a mixed-Weibull distribution for the identification of Defects in Solid insulation Systems", IEEE Trans. On DIE, 1995
- [CAV03] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, G. Montanari: "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part2: Identification of Defects in Solid insulation Systems", IEEE Trans. On DIE, June 2003
- [CAV11] A. Cavallini, G. Montanari, M. Tozzi, X. Chen: "Diagnostic of HVDC Systems Using Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Februar 2011
- [DEV84] J. Devins: "The Physics of Partial Discharge in Solid Dielectrics, 1984

- [ERT09] W. Ertel: "Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung", 2. Auflage, Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-8348-0783-0, Wiesbaden 2009
- [FAB12] J. Fabian: "Dielektrische Kennwerte von Isolierstoffen bei Gleichspannungsbeanspruchung", Dissertation, Technische Universität Graz, Graz 2012
- [FIS70] M. Fisz: "Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik", Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1970
- [FLU88] B. Flury, H. Riedwyl: "Multivariate Statistics: A Practical Approach", 1. Auflage, Chapman&Hall, ISBN 978-0412300301, London 1988
- [FRO95] U. Fromm: "Partial Discharge and Breakdown Testing at High dc Voltage", Delft University of Technology, Niederlande, ISBN 90-407-1155-0, 1995
- [FUC99] W. Fuchs: "Anwendung Neuronaler Netze in der TE Messtechnik", Diplomarbeit, TU Graz, 1999
- [HAY99] Simon Haykin: "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", 2. Auflage, ISBN 0-13-273350-1, 1999
- [IEC 60270] Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000); Deutsche Fassung EN 60270:2001, August 2001
- [KNI07] Simeon Knieling: "Einführung in die Modellierung künstlich neuronaler Netzwerke", WiKu-Verlag, ISBN 978-3-86553-192-6, Duisburg 2007
- [KRE95] F. Kreuger: "Industrial High DC Voltage", TU Delft, Delft University Press, ISBN , Delft 1995
- [KÜC09] A. Küchler: "Hochspannungstechnik" Berlin: Springer-Verlag ISBN 978-3-540-78412-8, 2009
- [LI07] X. Li, G. Wu, X. Zhang, S. Bian: "Partial Discharge Pulse Shape Detection and Analysis under DC Condition", Jiatong University, China 2007
- [MA02] X. Ma, C. Zhou, I. Kemp: "Interpretation of wavelet analysis and it`s application in partial discharge detection", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2002
- [MAY93] A. Mayer: "Fuzzy Logic: Einführung und Leitfaden zur praktischen Anwendung", Addison-Wesley, ISBN 3-89319-443-6, Bonn 1993

- [MCN94] D. McNeill, P. Freiberger: "Fuzzy Logik: Die unscharfe Logik erobert die Technik", Droemer Knauer, ISBN 3-426-26583-4, München 1994
- [MOR05] P. Morshius, J. Smit: "Partial Discharge at dc voltage: their mechanism, detection and analysis", IEEE Trans. Dielectr. Insul., 2005
- [NIU08] H. Niu, A. Cavallini, G. Montanari: "Identification of Partial Discharge Phenomena in HVDC Apparatus", Department of Electrical Engineering of Bologna University, Italy, Electrical Power School of South China University of Technology, China, 2008
- [NIU09] H. Niu, A. Cavallini, G. Montanari, Y. Zhang: "Noise Rejection Strategy and Experimental Research on Partial Discharge at DC Voltage", School of Electric Power of South China University of Technology, Guangzhou, China, Department of Electrical Engineering of Bologna University, Bologna, Italy, 2009
- [RET09] K. Rethmeier, M. Krüger, A. Kuchler, M. Liebschner, C. Krause: "Neue Ansätze zur Interpretation von Teilentladungsmessungen bei DC Prüfspannung", ETG Kongress, Düsseldorf, Oktober 2009
- [RIN02] H. Rinne, H. Mittag: "Statistische Methoden der Qualitätssicherung", Hanser, ISBN 3-446-15503-1, Wien 2002
- [SAT03] L. Satish, B. Nazneen: "Wavelet denoising of PD signals buried in excessive noise and interference", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2003
- [SCH12] R. Schwarz: "Skriptum Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik", TU Graz, 2012
- [SCH81] A. Schwab: "Hochspannungsmesstechnik", New York, Springer-Verlag, ISBN 3-540-10545, 1981
- [SEO12] L. Seo, J. Koo, Y. Lee, B. Lee, J. Kim, J. Lee: "Identification of Insulation by modified Chaotic Analysis of Partial Discharge under DC Stress", Hanyan University, Daejin University, Hoseo University, Korea, 2012
- [STO05] G. Stone, M. Fenger: "Investigations into the effect of humidity on stator winding partial discharges", IEEE Trans. On DIE, April 2005

- [SUY99] J. Suykens, J. Vandewalle: "Multiclass least squares support vector machines", Intern. Joint Conf. Neural Networks, Washington DC, USA, 1999
- [TAB06] B. Tabachnick, L. Fidell: "Using Multivariate Statistics", 5. Auflage, Allyn&Bacon, ISBN 0-205-45938-2, Boston 2006
- [VAN90] R. Van Brunt, S. Kulkarni: "Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena, 1990
- [VAN91] R. Van Brunt: "Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena", 1991
- [WE08] S.Wenrong, L. Junhao, Y. Peng, H. Haibo and L. Yanming: "Measurment and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage", Jiaotong Univerity, China, 2008
- [WEN08] S. Wenrong, L. Junhao, Y. Peng, L. Yanming: "Digital Detection, Grouping and Classification of Partial Discharge Signals at DC Voltage", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., School of Electrical Engineering Xi'an Jiatong University, China, 2008
- [WIL04] H. Wilker: "Weibull- Statistik in der Praxis, Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte", Norderstedt 2004
- [ZHO05] X. Zhou, C. Zhou, I. Kemp: "An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurment denosing", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2005