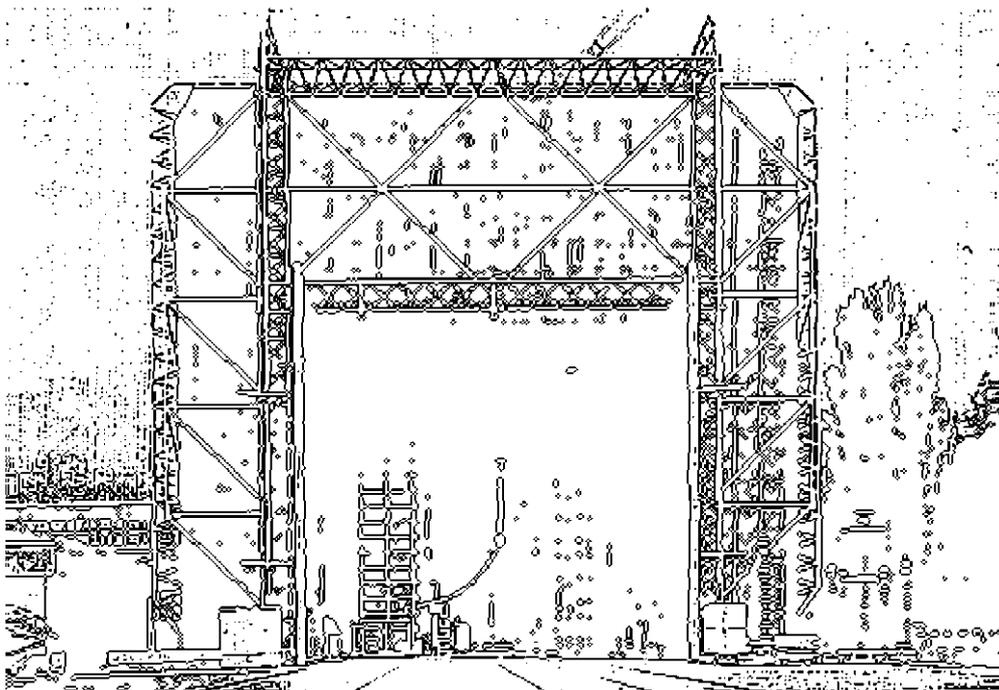


Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

Benedikt Schwarz, BSc

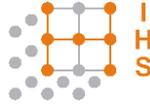
Oktober 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND
SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

OPTIMIERUNG DER UHF- TEILENTLADUNGSDETEKTION IN GIS/GIL

Masterarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Betreuer

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

Vorgelegt von Benedikt Schwarz, 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 / Oktober 2014



Danksagung

Ein Studium der Technik gipfelt in der Masterarbeit, dies ist der interessanteste und zugleich der herausforderndste Abschnitt im Studentenleben. Es ist auch die Zeit, zurück zu blicken und jene dankend zu erwähnen, ohne deren Unterstützung ich nicht dort wäre, wo ich heute bin.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr sowie meinem vormaligen Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Thomas Berg, die mich während meiner Arbeit mit ihrer Expertise und ihrem Blick für das Wesentliche unterstützt haben. Ihr wissenschaftlicher Rückhalt hat mir im Laufe der Arbeit sehr geholfen. Ferner möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Ehsan Mohammad Zamani für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen inklusive der teilweise sehr zeitintensiven Vor- und Nachbereitungen für die Versuche herzlich bedanken.

Auch möchte ich mich bei den Herren des Instituts für Hochfrequenztechnik, Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Gadringer, Dipl.-Ing. Philipp Freidl, Michael Vorderderfler BSc und Dominik Amschl für die professionelle und konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

Ohne die Annehmlichkeiten eines fixen Arbeitsplatzes inklusive hervorragender Infrastruktur hätte ich mein Studium nicht in dieser Form absolvieren können. Deshalb mein Dank an den Hochspannungszeichensaal und dessen Mitglieder.

Ich schulde meinen Mitstreitern im Studium großen Dank: Arno, Benjamin, Harry und Robert. Mit vereinten Kräften haben wir zu guter Letzt alle Herausforderungen des Studiums gemeistert, unsere gemeinsamen Lernrunden werde ich immer in Erinnerung behalten. Wir schaffen das leicht!

Meinen Eltern möchte ich besonders danken, sie haben mich während meines Studiums nicht nur finanziell, sondern auch emotional unterstützt. Danke, dass ihr an mich geglaubt und mir mein Studium ermöglicht habt.

Abschließend möchte ich in besonderem Maße meiner Freundin Anja danken, die mich immer, aber vor allem während dem Endspurt, seelisch unterstützt und mich immer wieder aufs Neue motiviert hat.

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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

Graz,

.....

(signature)

KURZFASSUNG

Aufgrund der vielen Vorteile von gasisolierten Systemen werden sie im Bereich der Energieverteilung und –übertragung in Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen. Um eine hohe Betriebssicherheit gewährleisten zu können, ist die Überwachung dieser Systeme entscheidend. Anhand der Teilentladungen, welche von Störstellen innerhalb der Systeme verursacht werden, können Defekte im Ultrahochfrequenzbereich detektiert und geortet werden.

Zur Bestimmung des Verbesserungspotentials der UHF-Teilentladungsdetektion wurde eine bestehende UHF-Sonde an einem Prüfaufbau mit unterschiedlichen charakteristischen Defekten gemessen sowie die Teilentladungsspektren untersucht. Gasgekapselte Anlagen sind aus hochfrequenztechnischer Sicht Koaxialleiter mit vielen sich überlagernden Wellenmoden, daher wurden im zweiten Schritt der Arbeit die Auswirkungen von Multimodenausbreitung überprüft.

ABSTRACT

Due to their many advantages, gas-insulated systems will play a vital part in power transmission and distribution grids of the future. The monitoring of these systems is crucial to maintain high reliability. Discontinuities within the installation are causing partial discharges, which can be detected and located in the ultrahigh frequency range (UHF).

In order to improve the detection of partial discharges in the UHF-range an existing UHF-antenna was tested with several characteristic defects. Also the spectra of the partial discharges were investigated. High frequency technology describes gas-insulated systems as coaxial transmission lines with various overlaying wave modes. In the second part of this thesis the influence of multimode dispersion was analyzed.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	8
1.1. Aufgabenstellung.....	8
1.2. Einführung in das Thema GIS/GIL.....	9
1.2.1. Grundlagen zu gasisolierten Systemen	9
1.2.2. Beschreibung und Standards für GIS/GIL	10
1.2.3. Beanspruchungen für GIS/GIL	11
1.3. Teilentladungen.....	13
1.3.1. Gasentladung.....	14
1.3.2. Entladungsmechanismen in Gas.....	16
1.3.3. Entladung im inhomogenen Feld und Polaritätseffekt	18
1.3.4. Erscheinungsformen von Teilentladungen.....	23
2. Teilentladungsmessung.....	24
2.1. Grundlagen der Teilentladungsmessung.....	26
2.2. Konventionelle elektrische Teilentladungsmessung	31
2.3. UHF Teilentladungsmessung	34
2.4. Vergleich von UHF-TE-Messung und konventioneller TE-Messung	38
3. UHF-Sonden.....	38
3.1. Wellenausbreitung	39
3.2. Signalverarbeitung.....	43
3.3. Feldsonden	45
3.3.1. Plattenelektroden.....	45
3.3.2. Kegelsonden	46
3.3.3. Weitere Antennenformen	46
4. Bewertung von TE-Messungen.....	47
4.1. Interpretation der Messergebnisse.....	47
4.2. Beispiele für die Auswertung von Teilentladungen	48
4.2.1. Typische Defekte in gasisolierten Systemen	49
4.2.2. Ortung beweglicher Partikel.....	50
4.2.3. Variation des Gasgemischs	51
4.2.4. Kombination von konventioneller und UHF-TE-Messung	52
4.3. Antennendesign	53
4.3.1. Anforderungen Hochfrequenztechnik.....	53
4.3.2. Anforderungen Hochspannungstechnik.....	54
4.3.3. Zusammenfassung der Anforderungen.....	55

5.	Messaufbau und Vorbereitung.....	56
5.1.	Messaufbau	57
5.1.1.	Versuchsaufbau	58
5.1.2.	Messsysteme	61
5.1.3.	Verwendete UHF-Sonde	63
5.2.	Aufgabenstellungen	65
5.2.1.	Defekte	65
5.2.2.	Arbeitsschritte	65
5.3.	Erste Messreihe	66
5.4.	Zweite Messreihe	68
6.	Ergebnisse.....	70
6.1.	Erste Messreihe	70
6.1.1.	Feldbilder.....	71
6.1.2.	Leerlaufmessung	73
6.1.3.	Verstellbare Nadel.....	73
6.1.4.	Spitze auf Kapselung.....	78
6.1.5.	Spitze auf Leiter	79
6.1.6.	Bewegliche Partikel	80
6.1.7.	Analyse der Spektren.....	82
6.1.8.	Ergebnisse.....	84
6.2.	Zweite Messreihe	86
6.2.1.	Feldbilder.....	86
6.2.2.	Ergebnisse der konventionellen Messung.....	87
6.2.3.	Analyse der Spektren.....	89
6.2.4.	Ergebnisse.....	94
6.3.	Resümee	94
7.	Zusammenfassung.....	95
8.	Ausblick.....	96
9.	Literaturverzeichnis.....	97
10.	Anhang.....	99
10.1.	Referenzmessung	99
10.2.	Vollständige Messtabellen der zweiten Messreihe.....	100
10.3.	Weitere Diagramme zur Analyse der Spektren der zweiten Messreihe	101

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Anhand von praktischen Beispielen soll mögliches Verbesserungspotential der UHF-Teilentladungsdetektion in gasisolierten Systemen untersucht werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochfrequenztechnik wurde vorab der Reflexionsfaktor der eingesetzten Sonde im vorhandenen Prüfaufbau gemessen. Aus Sicht der Hochfrequenztechnik sind die verwendeten Sonden verbesserungswürdig, da sie im einsetzbaren Bereich starke Dämpfungen und Reflexionen aufweisen. Neben der genauen Systemkenntnis ist für die Bewertung von UHF-Antennen besonders die Beschaffenheit der vorkommenden Spektren von Interesse, da diese bei den verschiedenen möglichen Fehlerarten in einem gasisolierten System sehr unterschiedlich sind. Um Überlegungen zur Optimierung der Sonden anstellen zu können, bedarf es also im Vorfeld einiger Versuche, um die unterschiedlichen Herausforderungen am realen Beispiel zu beherrschen. Im Vordergrund steht die universelle Einsetzbarkeit der Sonden. Es sollen daher die Spektren von typischen Defekten in einem gasisolierten System aufgezeichnet werden. Die Spektren sind danach auszuwerten, bei welchen Frequenzbändern eine Verbesserung möglich ist oder wie man bei einer schmalbandigen Messung die Mittenfrequenz und die Bandbreite festlegen sollte. Da es sich aus Sicht der Hochfrequenztechnik bei GIL um Koaxialleiter mit vielen sich überlagernden Wellenmoden handelt, soll in weiterer Folge untersucht werden, in welcher Form sich die verschiedenen Moden auf das Übertragungsverhalten der bestehenden Sonden auswirken.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle vorgenommenen Messungen an einem bestehenden Prüfaufbau in Kooperation mit dem Institut für Hochfrequenztechnik durchgeführt. Die Aufgabenstellungen können folgendermaßen zusammengefasst werden.

- Aufzeichnung der Spektren von charakteristischen Defekten
- Simulation des Übertragungsverhaltens
- Überprüfung der Auswirkungen von Multimodenausbreitung
- Vergleich der konventionellen TE-Messung mit den Ergebnissen der Spektren
- Bewertung der bestehenden Sonde
- Verbesserungspotential einschätzen

1.2. Einführung in das Thema GIS/GIL

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und Gasisolierte Leitungen (GIL) bzw. Rohrleitungskabel [1] sind jeweils vollständig gekapselte Anlagen, welche in der Hoch- und Mittelspannungsebene eingesetzt werden. Zur Isolierung der Leiter wird Schutzgas (Schwefelhexafluorid SF₆ oder ein N₂-SF₆-Gemisch) eingesetzt, die Stützisolatoren, die den Leiter im Rohr zentrieren, bestehen meist aus Gießharz. [2]

1.2.1. Grundlagen zu gasisolierten Systemen

Der Aufbau von GIS/GIL ist im Wesentlichen ein durch Stützisolatoren zentrierter Hohlleiter in einem mit Schutzgas gefüllten und unter Druck stehenden Aluminiumrohr auf Erdpotential. Das Schutzgas besitzt gute elektrische, thermische und chemische Eigenschaften und lässt dadurch kompaktere Bauweisen zu. Ein weiterer Vorteil rührt durch die Kapselung, wodurch Beeinträchtigungen durch Luftverschmutzung, direkte Blitzeinwirkung und Berührung ausgeschlossen werden, zudem haben GIS/GIL aufgrund der geringen elektrischen Verluste und der zuverlässigen Konstruktion einen geringen Wartungsbedarf. [3] Durch die Bauweise der gasisolierten Systeme ist die Leitung nach außen geschlossen und geschirmt, die Dielektrizitätszahl und die Kapazität sind jedoch geringer als bei vergleichbaren Kabeln. Das Dielektrikum kann nicht altern, ist selbstheilend und kann auch thermisch nicht überlastet werden. [1] Die am häufigsten genannten Vorteile von gasgekapselten Hochspannungsanlagen im Vergleich zu luftisolierten Anlagen sind:

- Geringer Platzbedarf
- Hohe Betriebssicherheit
- Geringe Betriebs- und Wartungskosten
- Hohe Lebensdauer
- Vollständige Kapselung der aktiven Komponenten bietet einen definierten Schutz
- Sicherer Berührungsschutz
- Wegfallen von Fremdschichtproblemen
- Geringe Verluste bei großer Übertragungsleistung
- Geringe elektromagnetische Felder
- Ausführung der Geräte in Bausteintechnik
- Reduktion der Montagezeit (Vormontage und Prüfung)
- Umweltfreundlichkeit, fällt landschaftlich weniger auf
- Geringes Gewicht
- Wartungs- und Geräuscharm

In der ersten Generation konnten 30 Jahre Erfahrung gesammelt werden, die neue Generation von gasisolierten Systemen zeichnet sich durch eine Reihe von Verbesserungen aus. So wurde zum Beispiel statt reinem Schwefelhexafluorid eine Gasmischung aus N₂/SF₆ eingeführt, elastische

Einleitung

Verbindungen der Aluminiumrohre und Verwendung standardisierter Module sowie die direkte Verlegung nach Pipeline-Verlegungsmethoden erhöhen die Verlegungsgeschwindigkeit von GIL. Damit wurden Kostensenkungen erreicht, welche den Einsatz von GIL auch bei großen Leistungen ab 1000MVA zu einer wirtschaftlichen Alternative machen. [1]

Gasisolierte Schaltanlagen haben eine hohe Betriebssicherheit und kommen seit über 40 Jahren im Hochspannungsnetz zum Einsatz. Bei gasisolierten Leitungen (GIL) kommt die von den gasisolierten Schaltanlagen bekannte Technik gekapselter Rohrleitungen zum Einsatz. Neben der Entwicklung hin zu immer größeren Schaltanlagen werden auch vermehrt gasisolierte Leitungen als Alternative zu Hochspannungskabel oder Freileitungen diskutiert, besonders in dicht bebauten Gebieten ist der Einsatz von GIL sinnvoll. Der im Vergleich zu Kabeln geringere Kapazitätsbelag von GIL ist vorteilhaft. [3] Eine gasisolierte Leitung kann man wie eine Freileitung betreiben, so ist es durch ihre hohe Übertragungskapazität möglich, mit der gleichen Leistung eine Freileitung durch die GIL unterirdisch fortzusetzen, auch Kurzunterbrechungen sind möglich. Durch die niedrige kapazitive Last ergibt sich ein kleiner Einschaltstrom. [2]

Die Teilentladungsmessung ist zusätzlich zu anderen Diagnose- und Wartungsverfahren ein gängiges Mittel, um Defekte innerhalb der Druckgaskapselung von GIS/GIL bei der Instandsetzung und während des Betriebes zu erkennen und zu orten.

1.2.2. Beschreibung und Standards für GIS/GIL

Schaltanlagen sind die Knotenpunkte zwischen den Spannungsebenen. Bei GIS sind neben den Sammelschienen wesentliche Komponenten gasgekapselt. Die in den untereinander mit Schotts getrennten Gaskammern befinden sich zum Beispiel Leistungsschalter, Trenner, Löschelemente, Strom- und Spannungswandler. Ein gasisoliertes System wird auf die maximale Betriebsspannung, die Nennstehblitzstoßspannung, die Nennstehschaltstoßspannung und die Nennstehwechselfspannung ausgelegt. Der Nennstrom, Wärmeverlust und Umgebungstemperatur sind vom thermischen Gesichtspunkt zu beachten, mechanisch muss die Anlage auf Innendruck, Biegeradius und Erdbebenbeanspruchung dimensioniert werden. Das Leiterrohr aus Aluminium besitzt eine hohe mechanische Festigkeit, aufgrund des geringen elektrischen Widerstandes ist auch die Verlustleistung gering. Die ebenfalls aus Aluminium gefertigte Rohrkapselung bildet das Gehäuse für das Schutzgas, es muss alle auftretenden Kräfte wie Kurzschluss-, Lager- und Biegekräfte aufnehmen. Bei GIL ist das Rohr beidseitig geerdet und an gewissen Punkten werden Gleitkontakte oder Kompensatoren verbaut, um die Wärmeausdehnungsdifferenzen zwischen Leiter und Kapselung aufzunehmen. Gasisolierte Leitungen können oberirdisch, in Tunneln oder erdverlegt werden. Bei der Instandsetzung von gasisolierten Systemen werden Ultraschalltests an den Schweißnähten durchgeführt. Vor der Inbetriebnahme einer Anlage findet eine Reihe von Prüfungen statt. Darunter

Einleitung

Druck- und Gasdichtheits tests mit leicht überhöhtem Konstruktionsdruck, Widerstandsmessung des Leiters, dielektrische Funktionstests der Hilfsstromkreise, Messung des Gaszustandes sowie einige Hochspannungsprüfungen. Diese umfassen unter anderem eine AC-Messung mit definiertem Nennstehwechselfeldwert per Resonanzprüfgerät sowie eine Teilentladungsmessung mit der UHF-Methode. Das Innenleben eines gasisolierten Systems gilt als wartungsfrei für Zeitspannen über 40 Jahre, in der Regel ist auch kein Nachfüllen von Gas nötig. Bei GIL sind im Betrieb keine Fehler zu erwarten, das System muss jedoch überwacht werden. Für die Diagnose sind UHF-Sonden und Drucksensoren notwendig, bei erdverlegten GIL muss auch der äußere Zustand, also die Lackierung und die Antikorrosionsschicht, kontrolliert werden. [2]

Gasisolierte Schaltanlagen werden aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit bei geringem Platzbedarf besonders in dicht bebauten Gebieten vermehrt eingesetzt. In Ballungsgebieten bietet sich auch der Einsatz von GIL an, doch auch bei Bergdurchquerungen, Energieausleitungen von Kraftwerken oder bei der Verbindung von Schaltanlagen sind gasisolierte Leitungen sinnvoll. [2]

Aufbau, Typprüfungen und Betrieb von gasisolierten Anlagen unterliegen folgenden Normen:

- DIN EN 62271-203 (VDE 0671-203) Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen – Teil 203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 52kV (IEC 62271-203:2011); Deutsche Fassung EN 62271-203:2012
- DIN EN 62271-204 (VDE 0671-204) Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen – Teil 204: Starre gasisolierte Übertragungsleitungen für Bemessungsspannungen über 52kV (IEC 62271-204:2011); Deutsche Fassung EN 62271-204:2011

Bekannte Hersteller von gasisolierten Systemen sind u.a. ABB, Siemens, ALSTOM und Mitsubishi.

1.2.3. Beanspruchungen für GIS/GIL

Dass es in gasisolierten Systemen zu Fehlern kommt, die zu einem Lichtbogen führen ist sehr unwahrscheinlich. Durch Isolationskoordination, Überwachung des Gasdrucks und Verriegelung der Schaltgeräte kann man die Wahrscheinlichkeit für solche Fehler niedrig halten. Durch innere Lichtbögen kann der Druck des Schutzgases ansteigen, sogar ein Durchbrennen der Kapselung ist möglich. Durch geeigneten Schutz müssen die Auswirkungen von äußeren Lichtbögen beschränkt werden auf einen Riss oder ein Loch in der Kapselung, ohne dass Bruchstücke fortgeschleudert werden (Bersten). Die Kapselung muss immer mit der Erdung verbunden bleiben. [4]

Einleitung

In GIS sind Entladungsvorgänge wegen der geringen Isolationsabstände und hohen Gasdrücke mit geringen Anstiegszeiten im Nanosekundenbereich verbunden. Durch die coaxialen Rohrleiter breiten sich Wanderwellen mit geringer Dämpfung aus, die an Diskontinuitäten des Leitungswellenwiderstandes reflektiert werden, somit kann es zu Überlagerungen und Auslöschungen verschiedener Wellen kommen. Es kann dabei zu erheblichen transienten Überspannungen kommen, welche die Isolierungen gefährden. Wellen können sich auch außerhalb des Mantelrohrs ausbreiten und in Sekundärsysteme der Anlage einkoppeln, daher müssen Maßnahmen zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit getroffen werden. [1]

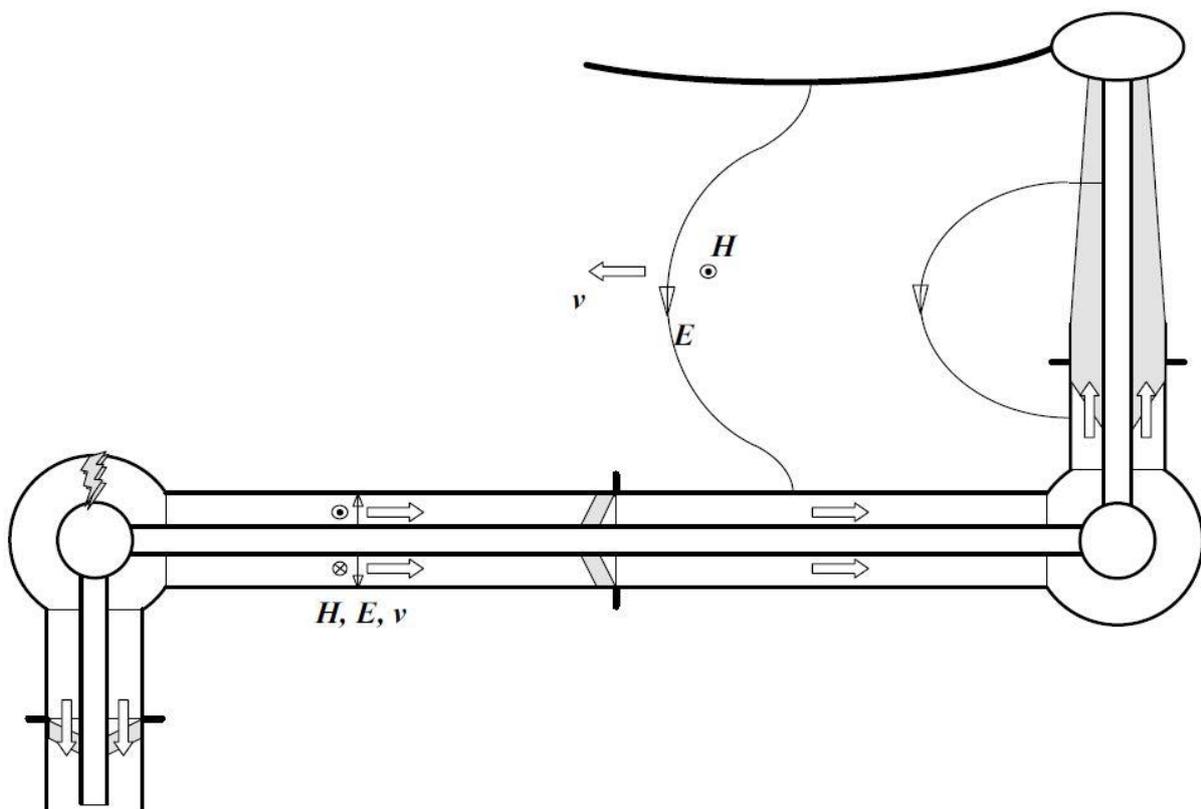


Abb. 1: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wanderwellen innerhalb und außerhalb einer GIS nach einem Überschlag ohne Berücksichtigung von Reflexionen [1]

Freie elektromagnetische Wellen können sich in Messsysteme einkoppeln und Messsignale verändern, bei der Teilentladungsdagnostik kann das Strahlungsfeld aber gezielt für die Erfassung von TE eingesetzt werden. Schnellveränderliche Beanspruchungen lassen sich als leitungsgebundene Wanderwellen (TEM-Wellen) beschreiben. Einer elektromagnetischen Welle sind rechtwinklig die Vektoren E (elektrische Feldstärke), H (magnetische Feldstärke) und die Phasengeschwindigkeit v zugeordnet, wobei sich die zeitlich veränderlichen Feldgrößen E und H gegenseitig über das Induktions- bzw. das Durchflutungsgesetz bedingen. Aufgrund der zur Ausbreitungsrichtung transversalen elektrischen und magnetischen Feldvektoren bezeichnet man diesen Modus als TEM-Modus, welcher eine große Rolle für die elektrische Beanspruchung spielt. Darüber hinaus gibt es aber noch weitere Moden, die auch für die UHF-Messung von Interesse sind (vgl. Kap. 3.1.). Es

Einleitung

kommt zu einer Vereinfachung der Betrachtung, wenn nur infinitesimal kleine Leitungsabschnitte betrachtet werden, bei denen man von quasistationären Bedingungen ausgeht. Man kann also statt der Feldgrößen E und H mit den integralen Größen Spannung und Strom rechnen. Man betrachtet demnach Spannungs- und Stromwellen, die Phasengeschwindigkeit v wird als Funktion der Leitungsbeläge C' und L' angegeben. Strom- und Spannungswellen gehören immer zusammen, da es sich nur um unterschiedliche Darstellungsmethoden derselben Wanderwelle handelt. Die Amplituden stehen in einem festen Verhältnis zueinander, dem Leitungswellenwiderstand. Die Art der Leitung und deren Geometrie gehen durch die Leitungsbeläge und den Leitungswellenwiderstand in die Betrachtung ein. [1]

1.3. Teilentladungen

Für alle Hochspannungsanlagen ist die Isolierung nach der höchsten auftretenden Feldstärke und der Isolierstoff nach der höchsten zulässigen Feldstärke zu bemessen. Ist die Spannung ausreichend hoch, sodass die resultierende Feldstärke an irgendeinem Punkt die Durchschlagfeldstärke überschreitet, kommt es zu Teilentladungen (TE), die im homogenen Feld direkt zum Durchschlag führen. Nur in einem inhomogenen Feld gibt es stabile Teilentladungen, erst wenn die Spannung weiterhin erhöht wird, erfolgt der Durchschlag. Um den Isolierstoff, in diesem Fall Gas, bis an die technische Grenze ausnutzen zu können, ist die Kenntnis der Grenzspannungen nötig. Also einerseits die Anfangsspannung, bei denen Teilentladungen auftreten, und die Durchschlagsspannung.

Teilentladungen sind unvollständige Entladungen, die in der Regel nicht sofort zum Durchschlag führen. Für die Beurteilung der Isolationsqualität sind das Auftreten und die Intensität von Teilentladungen von entscheidender Wichtigkeit. Die Intensität der TE ist neben anderen Kenngrößen ein Maßstab für das Bestehen einer Hochspannungsprüfung. [1] Die Grundvoraussetzung für das Auftreten von Teilentladungen ist eine inhomogene Feldverteilung, da es im homogenen Feld sofort zum Durchschlag kommt. Die Bedeutung von Teilentladungen wird nachfolgend anhand der Gasentladung erläutert.

Einleitung

1.3.1. Gasentladung

Man unterscheidet zwischen Vorentladungen, die nicht sofort zum Durchschlag führen, und dem Durch- bzw. Überschlag, welcher die gesamte Isolationsstrecke mit einem leitfähigen Kanal überbrückt und die Spannung zusammenbrechen lässt. Je homogener das Feld ist, desto wahrscheinlicher führt das Erreichen der Zündspannung zum sofortigen Durchschlag. [1]

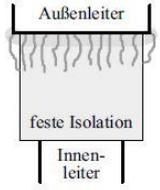
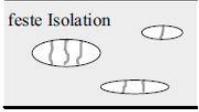
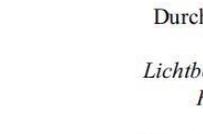
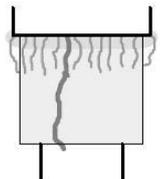
	Homogenes und schwach inhomogenes Feld	Inhomogenes Feld	Grenzflächen	Hohlräume
Vorentladungen <i>(Teilentladungen)</i> Entladungen, die nicht unmittelbar zum Durchschlag (Spannungszusammenbruch) führen. <i>treten nicht auf, Entladungseinsatz führt unmittelbar zum Durchschlag</i>	  <i>treten nicht auf, Entladungseinsatz führt unmittelbar zum Durchschlag</i>	  Koronaentladungen Äußere Teilentladungen (TE) Glimmentladungen ("Glimmen") Büschel- und Stielbüschelentladungen (Streamer- und Leader-Entladungen)	 Oberflächen-Entlad. Gleitentladungen	 Hohraum-Entladung Innere Teilentladungen (TE) ("Glimmen")
Durchschlag, Überschlag Entladung, die eine gut leitfähige Verbindung zwischen den Elektroden herstellt und damit zum Zusammenbruch der Spannung führt.	  Durchschlag Lichtbogen, Bogenentladung (bei thermischem Gleichgewicht) Funken (bei begrenztem Energievorrat der Quelle) Blitzentladungen (sehr lange Funken bei atmosph. Entlad.)	 Überschlag Gleitfunken	 Überschlag Gleitfunken	 Durchschlag Erosions- oder Teilentladungs-Durchschlag

Abb. 2: Wichtige Erscheinungsformen von Gasentladungen: Übersicht und Verwendung von Begriffen [1]

Im homogenen und schwach homogenen Feld treten keine Vorentladungen auf. Wird der Entladungsstrom durch einen ausreichend großen Vorwiderstand begrenzt, setzt statt Bogen- oder Funkenentladungen eine Glimmentladung ein. Handelt es sich um ein stark inhomogenes Feld, wird die Zündbedingung nur in einem kleinen Bereich vor der gekrümmten Elektrode erreicht, daher können sich die einsetzenden Entladungen nicht über die gesamte Isolationsstrecke ausbreiten. Man spricht von Vor- bzw. äußeren Teilentladungen, an den Spitzen und Kanten der Elektrode kommt es zu sichtbaren Koronaentladungen. Anschließend kommt es zum Durchschlag der gesamten Isolationsstrecke. [1]

Bei allen Formen der Entladung im Isoliermedium Gas werden Ladungsträger, also Elektronen und Ionen, durch das anliegende elektrische Feld beschleunigt. Nehmen sie genügend Energie auf, wird durch Ionisationsprozesse die Neubildung von Ladungsträgern ermöglicht. Es kommt zur Entladung,

Einleitung

wenn ab einer kritischen Feldstärke die Isolierfähigkeit verloren geht. Werden nur Teilstrecken des Feldes leitend spricht man von einer unvollständigen Entladung oder Teilentladung, diese sind z.B. Glimmen, Koronaentladungen, Sprühen oder Büschelentladungen.

Die Beschreibung der charakteristischen Entladungserscheinungen unter Beanspruchung erfolgt durch die Gasentladungskennlinie, die den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wiedergibt. Der durch eine Entladungstrecke fließende Strom ist bei kleinen Feldstärken proportional zur angelegten Spannung, man spricht vom ohmschen Bereich. Durch Photoionisation und Thermoionisation entstehen im Gas bewegliche Ladungsträger, deren Zahl durch das Gleichgewicht aus Generation und Rekombination bestimmt wird. Man spricht von unselbstständiger Entladung, da durch den im Gas fließenden Strom keine neuen Ladungsträger gebildet werden. Der Strom erreicht mit zunehmender Feldstärke einen Sättigungswert, bei dem alle Ladungsträger durch das elektrische Feld abgezogen werden, bevor sie rekombinieren können. Nimmt die Feldstärke weiter zu, können innerhalb der zur Verfügung stehenden freien Weglänge die im elektrischen Feld beschleunigten Ladungsträger ausreichend Energie aufnehmen, sodass durch Stoßionisation zusätzliche neue Ladungsträger erzeugt werden. Durch die Entladung selbst treten nun neue Ladungsträger in großer Zahl auf, daher spricht man von einer selbstständigen Entladung. Wegen der zusätzlichen durch Stoßionisation erzeugten Ladungsträger kommt es zum weiteren Ansteigen des Stromes bei nahezu konstanter Spannung (Zündspannung). [1]

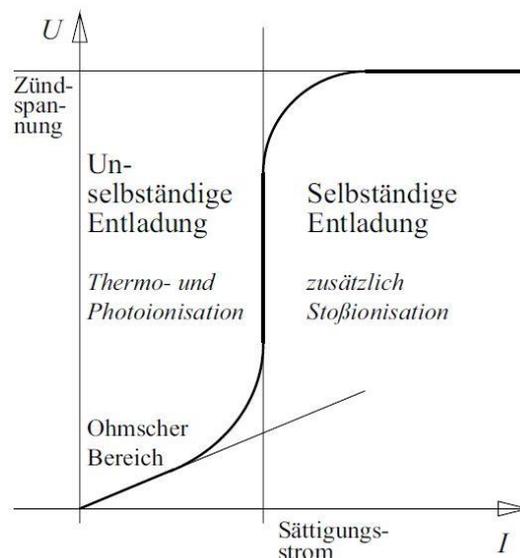


Abb. 3: Schematische Gasentladungskennlinie im Übergangsbereich von der selbstständigen zur unselbstständigen Entladung [1]

Während in einem niederohmigen Stromkreis und homogener Feldverteilung das Erreichen der Zündspannung unmittelbar zum Durchschlag und damit zum Zusammenbruch der Spannung führt, ergibt sich in einem Stromkreis mit Strombegrenzung zunächst ein stabiler Entladungszustand, es kommt nicht zum Durchschlag. Die Strombegrenzung kann durch einen Widerstand oder durch den

Einleitung

feldschwachen Bereich eines stark inhomogenen Feldes herbeigeführt werden. Für diese Vor- oder Teilentladungen ist die Zündspannung gleich der Einsetzspannung für TE. Dieser stark nichtlineare Zusammenhang zwischen Strom und Spannung einer Gasentladungstrecke wird in der Gasentladungskennlinie für ein annähernd homogenes Feld beschrieben (Abb. 4). [1]

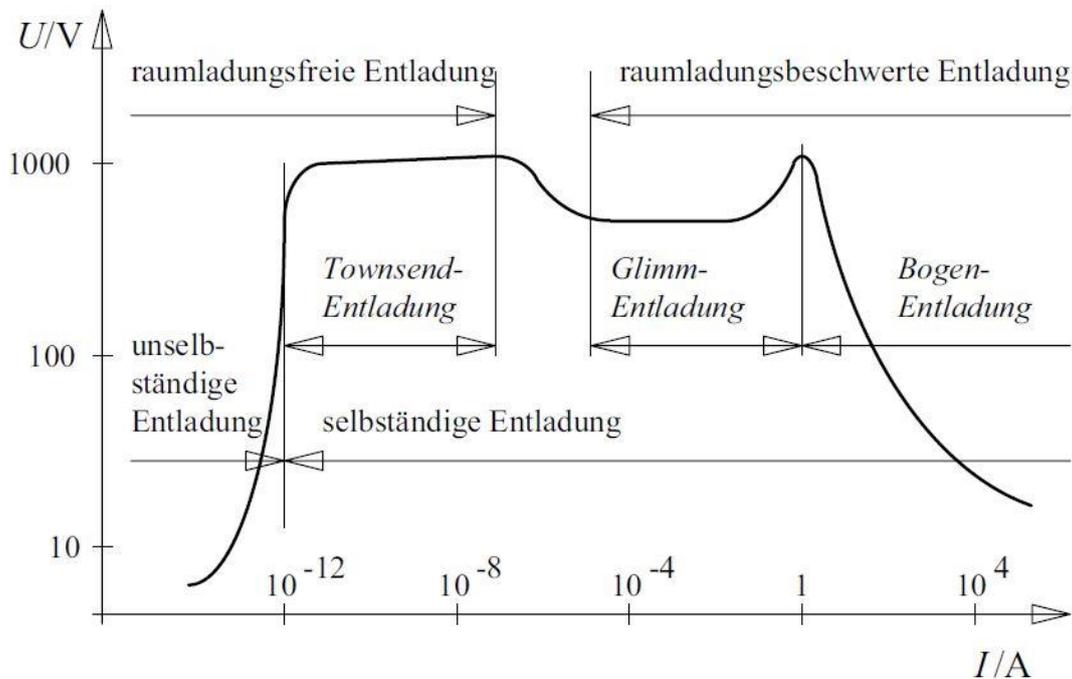


Abb. 4: Schematische U,I-Gasentladungskennlinie in doppelt logarithmischer Darstellung für eine Entladungstrecke geringer Feldinhomogenität [1]

Aufgrund der Stoßionisation kommt es nach Erreichen der Zündspannung weiterhin zum Stromanstieg bei konstanter Spannung. Die sich bildenden Raumladungen haben keinen Einfluss auf die elektrische Feldstärke im homogenen Feld, daher spricht man von der raumladungsfreien Townsend-Entladung. Steigt die Stromstärke weiterhin werden Raumladungen gebildet welche einen Einfluss auf die Feldgegebenheiten haben. Durch diese raumladungsbeschwerte Entladung steigt der Strom weiter an bei fallender Spannung. Die Glimmentladungen werden für das menschliche Auge sichtbar. Bei sehr großen Strömen werden durch die umgesetzte Stromwärme (Thermoionisation) viele Ladungsträger gebildet, somit entsteht ein gut leitendes Plasma, welches auch bei geringen Spannungen in der Lage ist, den Entladungsstrom zu treiben. Diese Bogenentladung wird aufgrund ihrer Leuchterscheinung auch als Lichtbogen bezeichnet. [1]

1.3.2. Entladungsmechanismen in Gas

Für die **raumladungsfreie Entladung im homogenen Feld** nach Townsend und Paschen ist es möglich, ein physikalisches Modell zur Findung der Zündbedingung für den Einsatz von Entladungen aufzustellen sowie ein Gesetz über die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Abstand, Druck und Temperatur zu formulieren. Die folgende Betrachtung bezieht sich auf ein homogenes Feld, bei dem der Einfluss von Raumladungen vernachlässigt wird. [1]

Einleitung

Ein gängiges Modell ist, sich die Moleküle eines Gases als elastische Kugeln vorzustellen, die sich geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit durch den Raum bewegen, bis sie entweder mit anderen Molekülen oder Wänden zusammenstoßen. Hierbei muss man unterscheiden, ob es sich um einen elastischen oder einen unelastischen Stoßvorgang handelt. Während beim elastischen Stoß die kinetische Gesamtenergie konstant ist, geht beim unelastischen Stoß ein Teil der gesamten kinetischen Energie in eine andere Energieform über. Die Elektronen erreichen aufgrund ihrer geringen Masse sehr große Geschwindigkeiten verglichen mit den trägeren Molekülen. Somit erfolgen die meisten Stöße mit Elektronen. Sie geben bei elastischen Stößen kaum Energie ab, bei unelastischen Stößen jedoch fast die gesamte, sie können also fast verlustlos Energie aus dem elektrischen Feld aufnehmen, bis es für die Anregung oder Ionisation ausreicht.

Es wird angenommen, dass sich aufgrund Fremdionisierung durch äußere Strahlung an der negativen Elektrode ein Elektron seiner Bindung entledigt und zum Startelektron wird. Zunächst führt das Elektron eine ungeordnete Bewegung aus und da die kinetische Energie geringer ist als die Ionisierungsenergie kommt es bei den Stoßvorgängen nicht zur Anregung anderer Moleküle. Allerdings verliert das Elektron bei elastischen Stößen mit schwereren Gasmolekülen aufgrund des Impulserhaltungssatzes kaum Energie und nimmt im Gegenzug zwischen den Stößen Energie aus dem angelegten elektrischen Feld auf. Somit nimmt das Elektron durch die Beschleunigung im Feld zwischen den Stößen so lange Energie auf, bis die nötige Ionisierungsenergie erreicht ist und ein ionisierender Stoß erfolgen kann. [1]

Bei diesem Vorgang entstehen weitere Elektronen, die im Feld beschleunigt werden und durch Stöße weitere Elektronen aus ihren Bindungen lösen. Dadurch kommt es schnell zum Anwachsen der Ladungsträgerzahl, man spricht von einer Elektronenlawine. Durch die Stoßionisation ergeben sich Rekombinationsvorgänge, durch welche Lichtquanten (Photonen) ausgesendet werden, die wiederum neue Startelektronen aus der Kathode herauslösen können. Die Zündbedingung nach Townsend sieht also vor, dass das durch Fremdionisation erzeugte Startelektron über den Prozess der Lawinenbildung und Rückwirkung auf die Kathode mindestens ein weiteres Startelektron erzeugen muss. Somit erzeugt jede Lawine mindestens eine Folgelawine wodurch ein leitfähiger Kanal entsteht. [1]

Damit sich eine Lawine bilden kann, muss der effektive Ionisierungskoeffizient größer als Null sein, es muss also die Bildung neuer Elektronen der Anlagerung von Elektronen überwiegen. Der effektive Ionisierungskoeffizient α_e setzt sich aus der Differenz von Ionisierungszahl α und Anlagerungskoeffizient η zusammen. [1]

$$\alpha_e = \alpha - \eta \quad (1)$$

Einleitung

Die Ionisierungszahl α ist die Anzahl der ionisierenden Stöße pro Längeneinheit durch Multiplikation der Stoßwahrscheinlichkeit mit der Ionisierungswahrscheinlichkeit. Gerade bei stark elektronegativen Gasen wie SF_6 muss die Anlagerung der Elektronen an die Gasmoleküle durch den Anlagerungskoeffizienten berücksichtigt werden, welcher die Anlagerungswahrscheinlichkeit eines Elektrons je Längeneinheit angibt. [1]

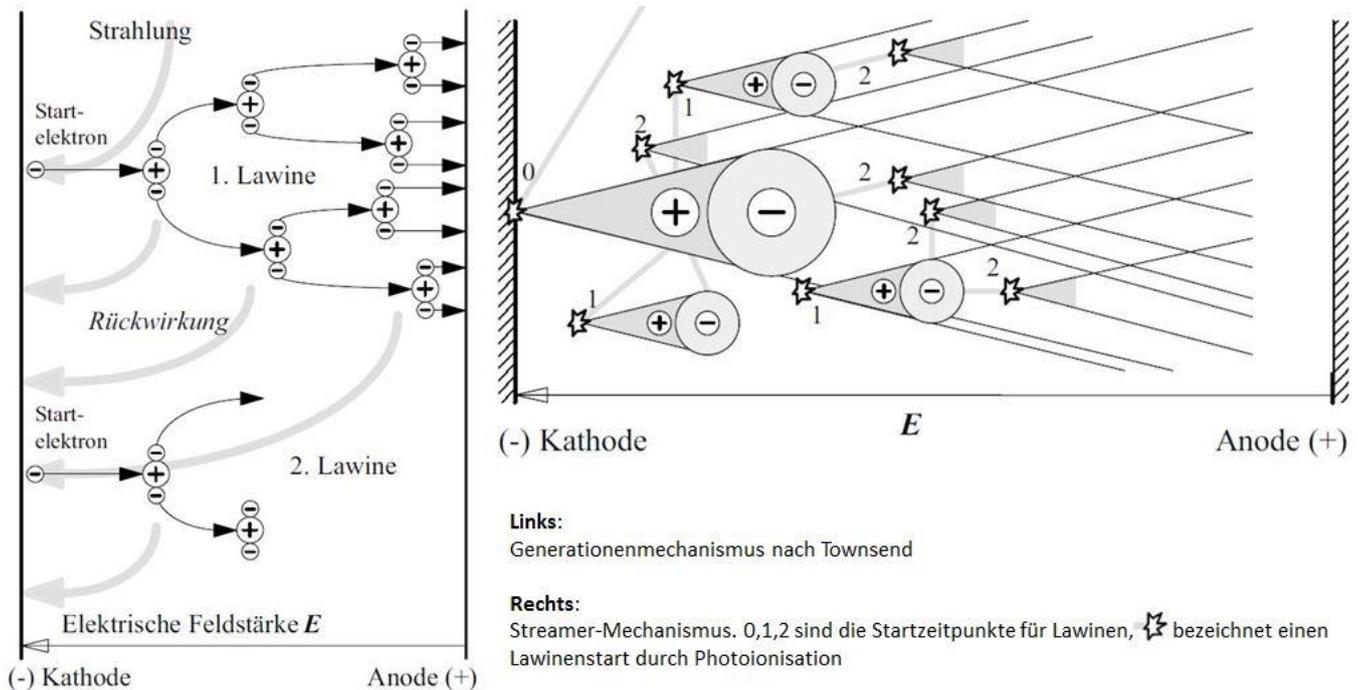


Abb. 5: Links: Physikalisches Modell zur Beschreibung des Townsend- bzw. Generationenmechanismus, Raumladungsfreie Entladung; Rechts: Physikalisches Modell zur Beschreibung der raumladungsbeschwerten Entladung (Kanalentladung bzw. Streamer-Mechanismus) [1]

Wenn die Lawine auf etwa 10^6 bis 10^8 Elektronen zunimmt, findet eine nicht mehr vernachlässigbare Veränderung der elektrischen Feldstärke in der Umgebung der Lawine statt. Die vergleichsweise langsamen positiven Ionen bleiben im Lawinenschwanz zurück, während die beweglicheren Elektronen den negativen Lawinenkopf bilden, dessen nahezu kugelförmiger Durchmesser aufgrund von Diffusionsvorgängen weiter zunimmt. Durch die Verstärkung des elektrischen Feldes an der Lawinenfront gegenüber dem Grundfeld erhöht sich aufgrund von Raumladungen die Zahl der Stoßionisationsvorgänge sowie der mit der Aussendung von Photonen zusammenhängende Zahl der Rekombinationsvorgänge. Durch die Photoionisation werden in der Umgebung der Lawine weitere Sekundärlawinen ausgelöst. Durch die Summe aller Lawinen wird ein leitfähiger Kanal gebildet, man bezeichnet diesen Vorgang auch als Kanalentladung oder Streamer, es handelt sich dabei um eine **raumladungsbeschwerte Entladung**. [1]

1.3.3. Entladung im inhomogenen Feld und Polaritätseffekt

In einem schwach homogenen Feld herrschen bei entsprechender Feldstärke auf der gesamten Strecke günstige Bedingungen für eine Ionisation mit $\alpha_e > 0$. Werden die Zündbedingungen für den

Einleitung

Townsend- oder Streamer-Mechanismus erfüllt, kommt es sofort zum Durchschlag. Beim stark inhomogenen Feld gibt es nur unmittelbar vor der gekrümmten Elektrode (Spitze) hohe Feldstärken und somit geeignete Ionisierungsbedingungen. Im feldschwachen Bereich wird der Ionisationskoeffizient bei elektronegativen Gasen wie SF_6 oder Luft negativ, da dort die Anlagerung von Elektronen vorherrscht. Es kommt bei erfüllter Zündbedingung also nicht zum Durchschlag, sondern zu stabilen Vorentladungen (Koronaentladungen), die als Glimmen beginnen und sich bei höherer Spannung als raumladungsbeschwerte Streamer in den feldfreien Bereich fortpflanzen. Der Streamer erlischt, wenn die Feldstärke des Grundfeldes nicht mehr für das weitere Wachstum des Streamers ausreicht. Je inhomogener das Feld wird, desto geringer wird auch die Einsetzspannung von Vorentladungen, die Durchschlagsspannung stabilisiert sich auf einen höheren Wert, da die Spitze durch Raumladungen abgeschirmt wird. Bei ausreichender Beanspruchungszeit und großen Schlagweiten über einem Meter sowie schneller Spannungsänderungsgeschwindigkeit kann sich aus dem Streamer durch zusätzliche Thermoionisation ein strom- und lichtstarker Kanal bilden, den man als Leader bezeichnet. An dessen Spitze bilden sich Streamer-Büschel, über welche der für die Thermoionisation nötige Strom zum leitfähigen Kanal des Leaders geführt wird. [1]

Bei stark inhomogener Beschaffenheit des Aufbaus mit großem Feldgradienten kommt es nur mit einem kombinierten Streamer-Leader-Mechanismus zum Durchschlag, also der vollständigen Überbrückung der Isolationsstrecke. [5]

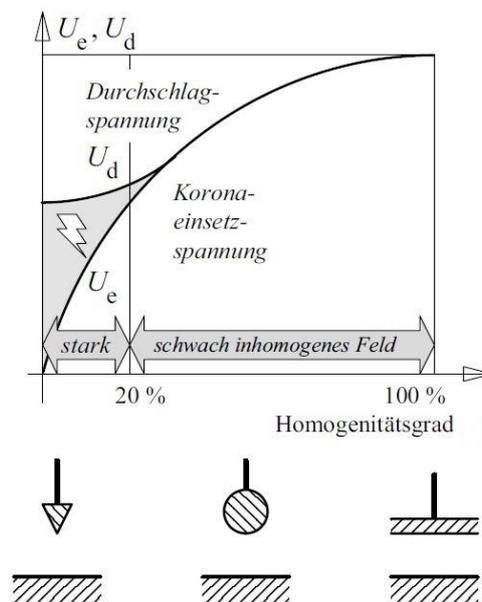


Abb. 6: Unterschied zwischen Korona-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung im stark inhomogenen Feld bei konstantem Elektrodenabstand [1]

Einleitung

Anhand einer Spitze-Platte Anordnung mit einem inhomogenen elektrischen Feld wird der Polaritätseffekt erkennbar.

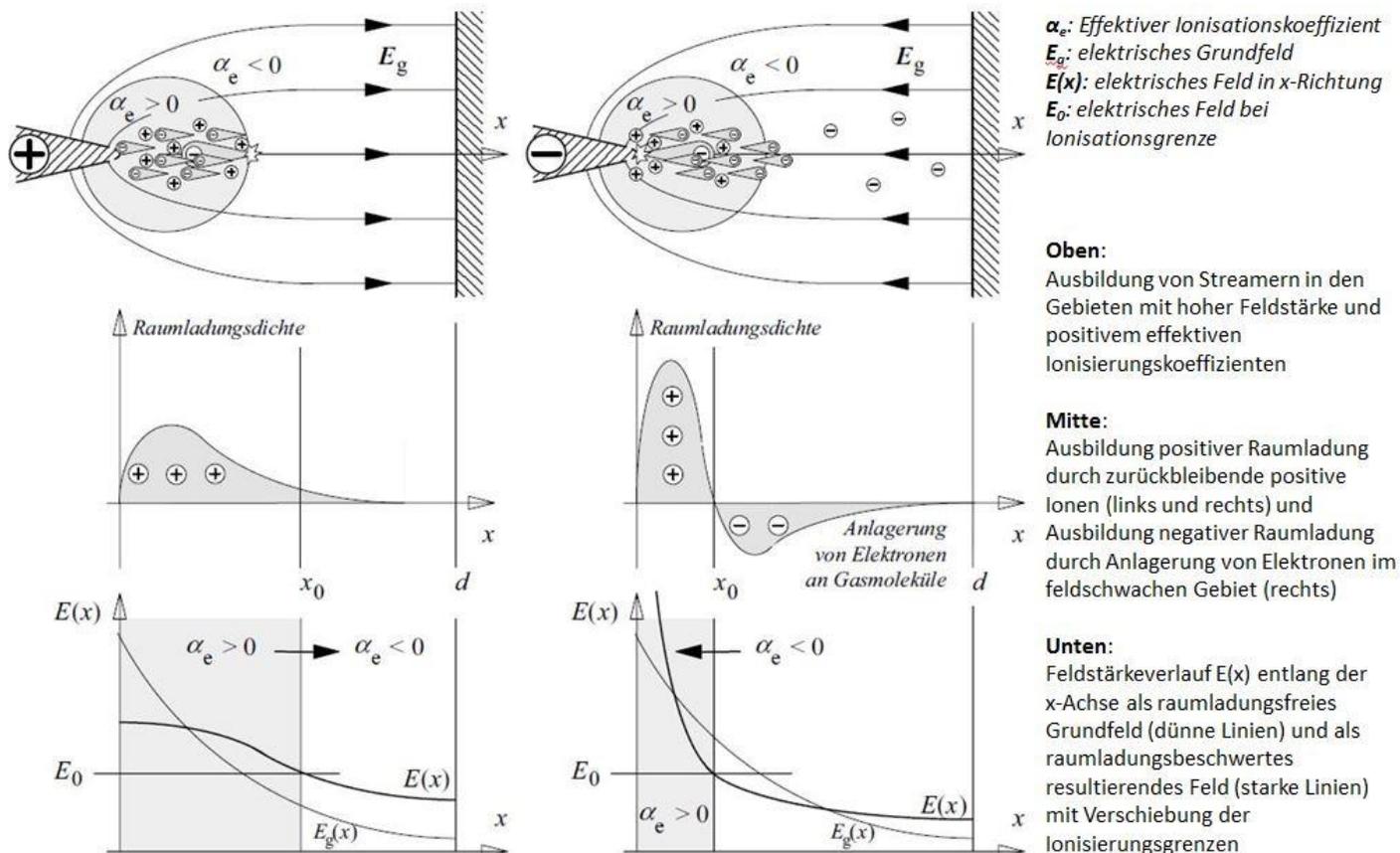


Abb. 7: Polaritätseffekt im stark inhomogenen Feld bei positiver Spitze (links) und negativer Spitze (rechts) [1]

Wird bei **positiver Spitze** ein durch Strahlungsenergie gebildetes Startelektron innerhalb des Nahbereichs mit positivem Ionisationskoeffizient gebildet, entsteht eine Primärlawine, welche in das Gebiet mit zunehmender Feldstärke vorwächst. Die Lawine muss im Gasraum starten, weil die Feldstärke vor der Kathode zu gering ist. Wird die für den Streamermechanismus erforderliche kritische Elektronenzahl erreicht, entstehen stets neue Folgelawinen durch Photoionisation. Nach dem Start der Primärlawine kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des Stromes und einer stabil glimmenden Vorentladung. Die beweglicheren negativen Elektronen werden von der positiven Spitze abgesaugt und hinterlassen eine positive Raumladungswolke aus vergleichsweise schlecht beweglichen positiven Ionen. Die elektrische Feldstärke vor der Spitze wird dadurch verringert, sie erhöht sich jedoch im feldschwachen Bereich. Die Ionisationsgrenze verschiebt sich in Richtung der Kathode, womit die positive Spitze gewissermaßen Richtung Kathode anwächst. Die Anhebung der Feldstärke im feldschwachen Bereich fördert bei steigender Spannung die Entstehung von Streamerentladungen und Durchschlägen. [1]

Bei der **negativen Spitze** kann es aufgrund der statistischen Streuzeit wesentlich länger dauern bis ein Startelektron entsteht, da es in einem sehr kleinen Bereich direkt an der Spitze zur Verfügung

Einleitung

stehen muss. Nach Erreichen der Einsatzspannung kommt es deshalb zu unregelmäßigen Folgen von Koronaimpulsen, welche auch von der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials abhängen. Die Streamer wachsen in das feldschwache Gebiet hinein. Überschreiten sie die Ionisationsgrenze verringert sich die Elektronenzahl der Lawinen durch Anlagerung an elektronegative Gasmoleküle, dadurch entsteht eine negative Raumladungswolke. Die weniger beweglichen positiven Ionen bilden eine positive Raumladungswolke direkt vor der Spitze. Das führt zu einer beträchtlichen Erhöhung der Feldstärke vor der Spitze und einer Vergleichmäßigung der Feldverteilung bis zur Gegenelektrode, gleichzeitig verschiebt sich die Ionisationsgrenze Richtung Spitze. Durch diese Vergleichmäßigung des Feldes wird das Wachstum der Streamer und der Durchschlag verzögert, sodass man grundsätzlich sagen kann, dass die Durchschlagsspannung bei negativer Spitze höher ist als bei positiver Spitze. [1]

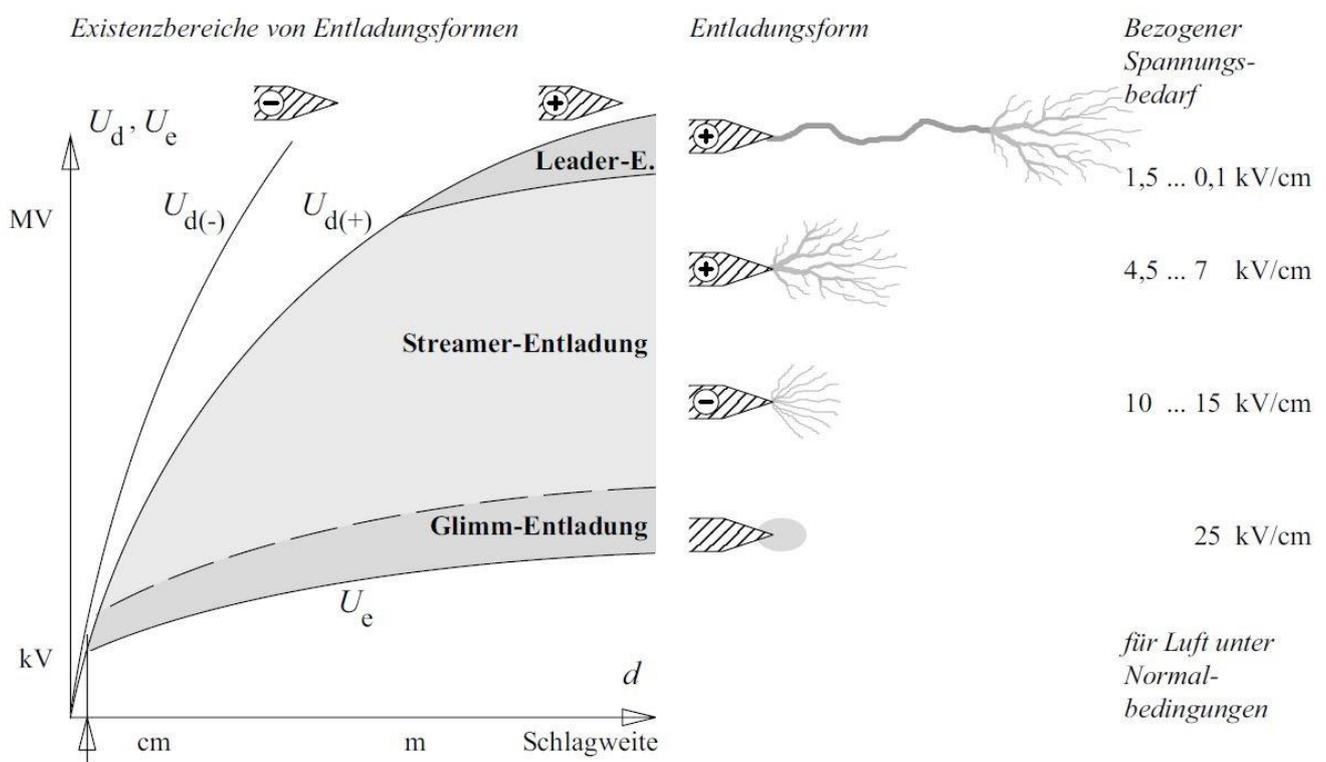


Abb. 8: Links: Schematische Existenzbereiche für Vorentladungen in einer luftisolierten Spitze-Platte-Anordnung. Einsatz- und Durchschlagsspannungen als Funktion der Schlagweite d für positive und negative Spitzen; Rechts: Entladungsformen (von oben nach unten: Stielbüschelentladung, positiver Streamer, negativer Streamer, Glimmentladung) und der jeweils erforderliche bezogene Spannungsbedarf, der kleinere Wert gilt für Längen ab etwa 20cm [1]

Beginnend mit der Glimmentladung wachsen die Entladungskanäle in Form von Streamern in den feldschwachen Bereich vor. Wie in Abb. 8 rechts in der Mitte zu erkennen, führt die Überlagerung mehrerer Streamer bei beiden Polaritäten zu einem büschelförmigen Entladungsbild. Der negative Streamer (negative Spitze) breitet sich in einem durch Raumladungen verminderten Feld aus, weswegen er einen höheren Spannungsbedarf hat. Die negativen Streamer beginnen direkt an der Spitze und erreichen durch konstante Feldverhältnisse eine nahezu konstante Ausdehnung.

Einleitung

Der positive Streamer (positive Spitze) dehnt sich in einem durch Raumladungen verstärkten Feld aus, weswegen er einen geringeren Spannungsbedarf relativ zum Grundfeld hat. Demnach ist die Reichweite positiver Streamer wesentlich größer als jene der negativen, dadurch ergibt sich auch die niedrigere Durchschlagspannung. Die positiven Streamer bilden sich über das beanspruchte Volumen und wachsen Richtung Spitze. Sie weisen sehr unterschiedliche Längen auf und können sich in Richtung Spitze zu stromstärkeren Kanälen aufsummieren. Im Vergleich zu den negativen Streamern sind die positiven deutlich unruhiger und unregelmäßiger. Erhöht sich die Stromdichte kommt es zur Bildung eines Leaders, also eines intensiv leuchtenden Entladungskanals, welcher durch Thermoionisation eine erhöhte Leitfähigkeit bei geringerem Spannungsbedarf aufweist. Die nötige Stromzufuhr erfolgt durch eine an der Leaderfront befindliche Leaderkorona, man spricht von einer Stielbüschelentladung. [1]

Verschiedene Parameter haben einen deutlichen Einfluss auf die Entstehung von Teilentladungen, die wichtigsten sind Geometrie, Druck, Temperatur, Art des Gases, Feldstörungen und Luftfeuchtigkeit. Die Spitze-Platte-Anordnung weist den geringsten Homogenitätsgrad auf, bei der Spitze-Spitze-Anordnung sind die Feldstärken an den gekrümmten Elektroden wesentlich geringer, weswegen die Koronaeinsatzspannung höher ist. Die für das Einsetzen von Vorentladungen kritische Feldstärke wird demnach bei der Spitze-Platte-Anordnung rascher erreicht. Die Durchschlagspannungen werden zwar erhöht, sie sind jedoch vom vorherrschenden Entlademechanismus abhängig. Für den Einfluss von Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit gibt es Korrekturfaktoren, um aus der Durchschlagspannung unter Normalbedingungen auf die tatsächliche Durchschlagspannung zu kommen. Diese linearen Korrekturfaktoren können allerdings nicht auf Druckgasisolationen angewendet werden, da sich im stark inhomogenen Feld das Entladungsverhalten bei Druckerhöhung deutlich verändert. [1]

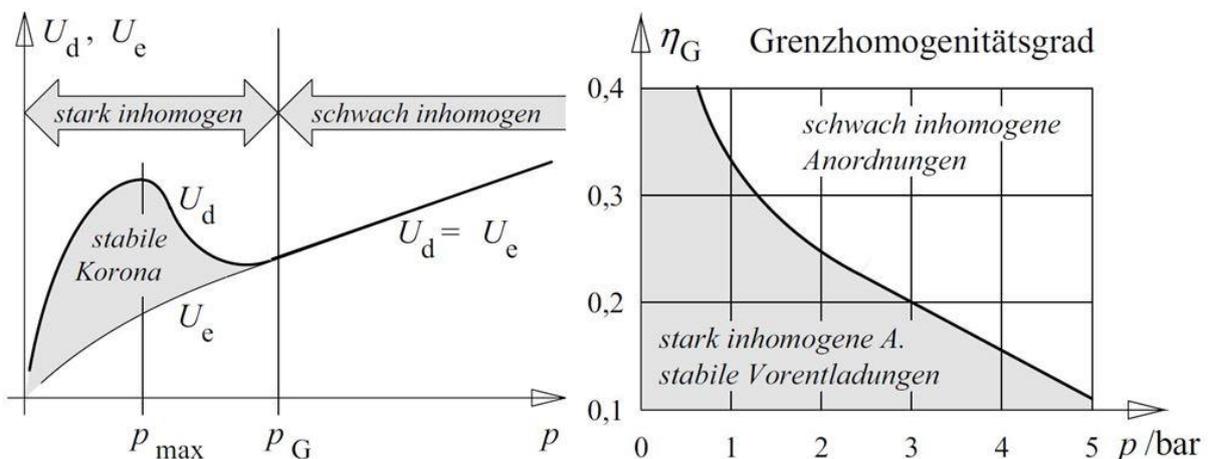


Abb. 9: Links: Schematische Veränderung des Entladungsverhaltens einer Spitze-Platte-Anordnung bei Veränderung des Gasdruckes; Rechts: Veränderung des Grenzhomogenitätsgrades mit dem Druck in Schwefelhexafluorid [1]

Einleitung

Es kann also bei niedrigem Druck ein klarer Unterschied zwischen Einsetz- und Durchschlagspannung bestehen, während sich bei hohem Druck die Spannungswerte gleichen, somit wird mit zunehmenden Druck aus einer stark inhomogenen Anordnung lediglich eine schwach inhomogene. Man kann dies umgekehrt auch als Abnahme des Homogenitätsgrades bei zunehmendem Druck betrachten. Man kommt also bei konstantem Homogenitätsgrad und Drucksteigerung von einem Bereich, in dem Vorentladungen auftreten, über die Grenze, ab der keine Vorentladungen mehr entstehen können. Der Grund dafür liegt in der verminderten Reichweite der Photonen bei höherer Gasdichte, was die Bildung von Sekundärlawinen deutlich erschwert. [1]

1.3.4. Erscheinungsformen von Teilentladungen

Teilentladungen kommen in gasförmigen, flüssigen und festen Isolationssystemen vor, ihre Intensität wird über die Ladung in Coulomb angegeben. Bei Gasentladungen wird, wie bereits erwähnt, zwischen Glimmentladung (einige pC), Streamerentladung (Impulsladungen zwischen 10pC und 100pC) und der Leaderentladung (>1000pC) unterschieden. [6] In Druckgasisolationen werden durch bewegliche Partikel, Spitzen oder Kanten Teilentladungen ausgelöst. In GIS/GIL können durch Fertigungs- oder Montagefehler Spitzen, Kanten, Graten, ortsfeste oder bewegliche Partikel in Form von Metallspänen entstehen, welche lokal ein sehr stark inhomogenes Feld erzeugen. Die Einsetz- und Durchschlagspannung werden dabei stark von der Geometrie der Inhomogenität bestimmt. Aufgeladene frei bewegliche Partikel können bei ausreichender Feldkraft abheben (Abhebespannung) und an der stark gekrümmten Elektrode durch ihre Ladung zusätzlich das Feld erhöhen. [1]

Flüssige Dielektrika wie Öle kommen in Verbindung mit Papier in Transformatoren und ölgetränkten Kabeln vor. Das Entladungsverhalten ist ähnlich wie bei Gasen, durch die große Anzahl an Stoffkomponenten müssen unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften berücksichtigt werden. Durch öldampfhaltige Mikrobäschen entstehen Gebiete unterschiedlicher Dichte. Reicht die freie mittlere Weglänge für Stoßionisation aus, kommt es zu einer sogenannten verschleierten Gasentladung. In der Isolierflüssigkeit herrscht völlige Unordnung der Moleküle, durch Erhöhung der Feldstärke findet ein Ladungsträgertransport statt, was mit lokaler Erwärmung und Verdampfung einher geht und zur Entstehung eines Streamers führt. Diese Vorgänge werden in der Perkolations- theorie untersucht. Durch Verschmutzung und Alterung kommt es zur Feuchtigkeitszunahme in der Isolierflüssigkeit, eine Folge davon können faserförmige Verunreinigungen sein, welche zum Faserbrückendurchschlag führen können. Weitere Teilentladungsquellen in Flüssigkeiten sind Spitzen oder Partikel, Gasblasen oder Gasschichten an Barrieren. [6]

Teilentladungsmessung

Ursachen für Teilentladungen in festen Isolierstoffen sind zum Beispiel Hohlräume oder Lunker mit oder ohne Elektrodenkontakt, es kann auch zur Delamination an Fasergrenzen kommen. Durch Risse, Spalten, Ablösungen, unvollkommenen Schichtungen oder Imprägnierungen können Teilentladungsquellen entstehen. Bei Kabeln gibt es neben Hohlräumen an Grenzflächen auch durch Erosion (Treeing) verursachte Hohlräume. [6]

2. Teilentladungsmessung

Teilentladungsmessverfahren sind durch die IEC 60270 international normiert. Je nach Gegebenheit sind unterschiedliche Kenngrößen von Teilentladungsstromimpulsen von Interesse. Bei einzelnen Impulsen achtet man auf den zeitlichen Verlauf und die Ladung, während man bei einer Folge von Teilentladungsstromimpulsen auch den Teilentladungsstrom und die Anzahl der TE-Ereignisse berücksichtigen muss. Bei Folgen von Impulsen in Verbindung mit den zeitlich zugeordneten Augenblickswerten der Hochspannungsschwingung werden zudem die Teilentladungsenergie und die Teilentladungsleistung betrachtet. [6]

Grundgrößen	Symbol	Einheit
Scheinbare Ladung bzw. Intensität	q	pC oder nC
Phasenlage	φ	Grad
Impulshäufigkeit	n	Impulse pro Sekunde
Einsetzspannung	U_F	V
Aussetzspannung	U_A	V
Polarität	+,-	

Tab. 1: Grundgrößen von Teilentladungen [6]

Abgeleitete Größen	Formel	Einheit
Mittelwert des Entladestroms	$I = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m q_j $	μA
Quadratische Ladungsgröße	$D = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m q_j^2$	$(nC)^2/s$
Entladeleistung	$P = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (q_j u_j)$	W

Tab. 2: Abgeleitete Kenngrößen von Teilentladungen [6]

In Tab. 1 und Tab. 2 sind Grundgrößen und abgeleitete Größen zusammengefasst. Erweiterte Kenngrößen sind die umgesetzte Energie, die Anzahl der Entladungen, die mittlere Entladungsmenge und die mittlere Entladungsenergie sowie die Summenladung. Für die Auswertung durch Winkelanalyse mit Häufigkeitsverteilungen sind u.a. die Verteilung der Entladungsmenge, die Entladungsanzahl und das Entladungsmaximum relevant.

Teilentladungsmessung

Teilentladungen können durch ihre Auswirkungen wie dielektrische Verluste, Schalldruckwellen, Wärme, Licht, chemische Reaktionen und Hochfrequenzwellen erfasst werden. Die optischen, akustischen und chemischen Nachweisverfahren für nicht elektrische Teilentladungskenngrößen sind zwar nicht universell einsetzbar, können aber in Spezialfällen aussagekräftige Ergebnisse erzielen. [6]

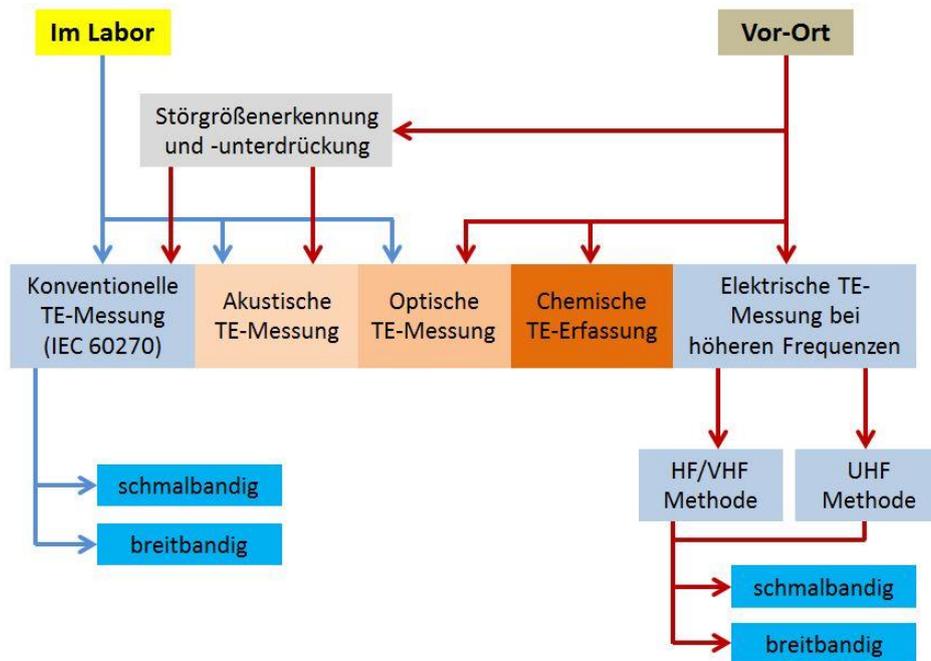


Abb. 10: Einteilung der Teilentladungsmessmethoden [6]

Bei der Einteilung der Teilentladungsmessmethoden ist eine Unterteilung zwischen Vor-Ort-Methoden und rein im Labor angewandten Verfahren sinnvoll. Neben der konventionellen elektrischen TE-Messung haben sich auch andere Messmethoden durchgesetzt, wie die akustische, optische und chemische Teilentladungserfassung. Bei der TE-Erfassung bei höheren Frequenzen wird zwischen den Frequenzbereichen unterschieden. Oftmals werden mehrere Methoden parallel angewendet. [6]

Man kann Teilentladungen nicht am Ort ihres Auftretens messen. Die kurzzeitige Spannungsänderung wird durch Zuführung von messbaren Stromimpulsen aus dem Netz ausgeglichen. Das Einsetzen von Teilentladungen führt zu Ausgleichsvorgängen, die zu einem impulsförmigen Strom in der Zuleitung führen. Die Intensität als scheinbare Ladung anzugeben hat sich international durchgesetzt. [6]

2.1. Grundlagen der Teilentladungsmessung

Prinzipiell unterscheidet man zwischen äußeren Teilentladungen (Koronaentladungen), inneren Teilentladungen innerhalb eines Isolierstoffes und Oberflächen- oder Grenzflächenentladungen.

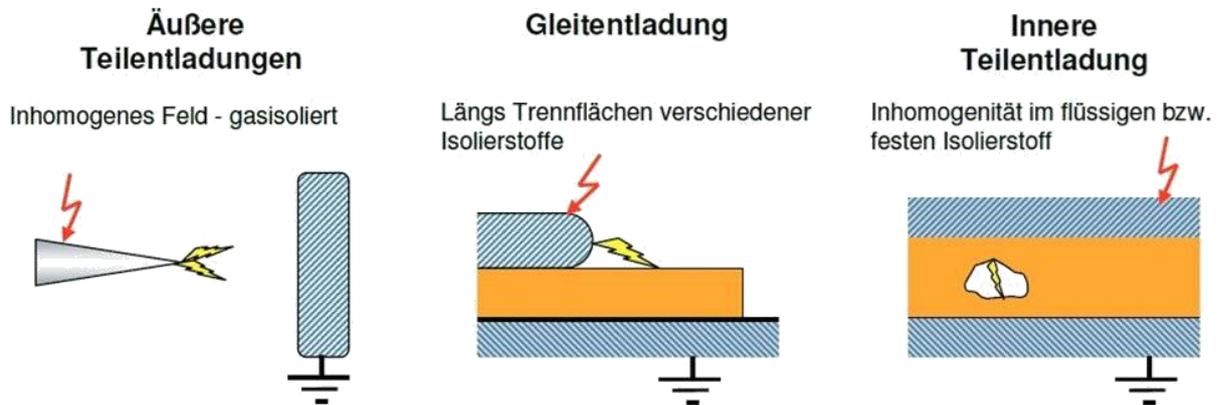


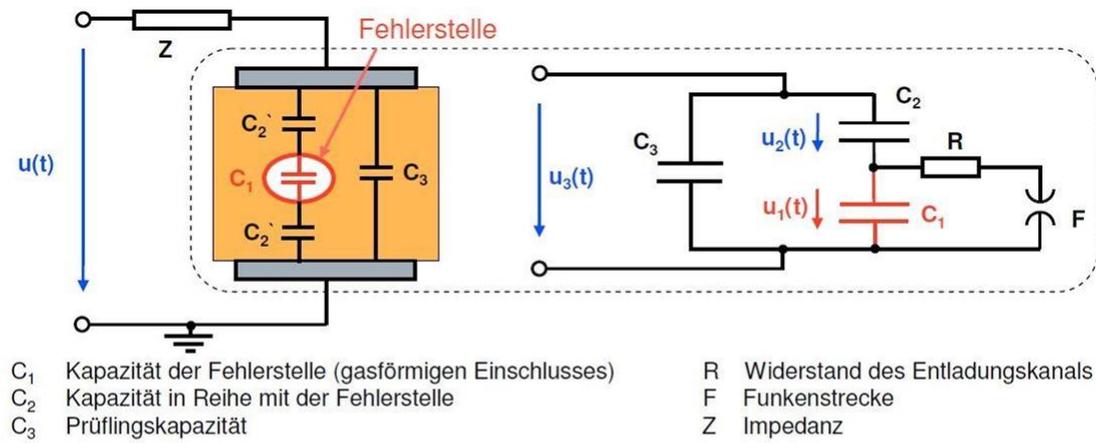
Abb. 11: Grundsätzliche Erscheinungsformen von Teilentladungen. Äußere TE und Gleitentladung treten z.B. als Glimmentladung, Korona-Entladung, „Trichel“-Impulse an Elektroden ausreichend hoher Krümmung in Gasen und bei Oberflächen von Feststoffisolierungen auf. Innere TE als Gasentladung umgeben von einem Feststoff- und/oder Feststoffdielektrikum [6]

Die Gleitentladungen entwickeln sich bei weiterem Ansteigen der Spannung ähnlich der Gasentladung, der Isolierstoff fungiert lediglich als Hindernis, welches den direkten Durchschlag blockiert. Durch die tangentielle Feldkomponente bilden sich an der gewölbten Elektrodenkante Streamer, die aufgrund der hohen Querkapazität höhere Ströme zulassen als bei Spitze-Platten-Anordnungen. Somit reichen bereits Reichweiten von wenigen Zentimetern für die Ausbildung eines thermoionisierten Kanals, der zur Leader-Entladung führt. [1]

In Fehlstellen bei festen oder flüssigen Isolierstoffen kommt es zu inneren Teilentladungen. Durch diese Hohlräume oder Blasen kommt es in Verbindung mit Ladungsverschiebungen zu Feldveränderungen. Sobald die Spannung am Hohlraum die Zündspannung erreicht, finden Entladungen statt.

Anhand von vereinfachten Ersatzschaltbildern sowie Spannungs- und Stromverläufen wird der Unterschied zwischen inneren und äußeren Teilentladungen deutlich. Bei den inneren TE folgt die Hohlraumspannung der äußeren Spannung gemäß dem kapazitiven Teilverhältnis ohne Phasenverschiebung. Sobald die Zündspannung erreicht ist und ein Startelektron zur Verfügung steht, bricht die Hohlraumspannung auf den Wert der Löschspannung zusammen, worauf sich die Hohlraumkapazität mit gleichbleibender Spannungsanstiegsgeschwindigkeit nachlädt. Abhängig von der Höhe der Hohlraumspannung kann es bis zum Erreichen des Spannungsmaximums mehrfach zu Teilentladungen und damit zur Verschiebung der Spannungskurve kommen. [1] Die Teilentladungen treten als dichte Folge von Stromimpulsen auf.

Teilentladungsmessung



- | | | | |
|-------|---|-----|---------------------------------|
| C_1 | Kapazität der Fehlerstelle (gasförmigen Einschlusses) | R | Widerstand des Entladungskanals |
| C_2 | Kapazität in Reihe mit der Fehlerstelle | F | Funkenstrecke |
| C_3 | Prüflingskapazität | Z | Impedanz |

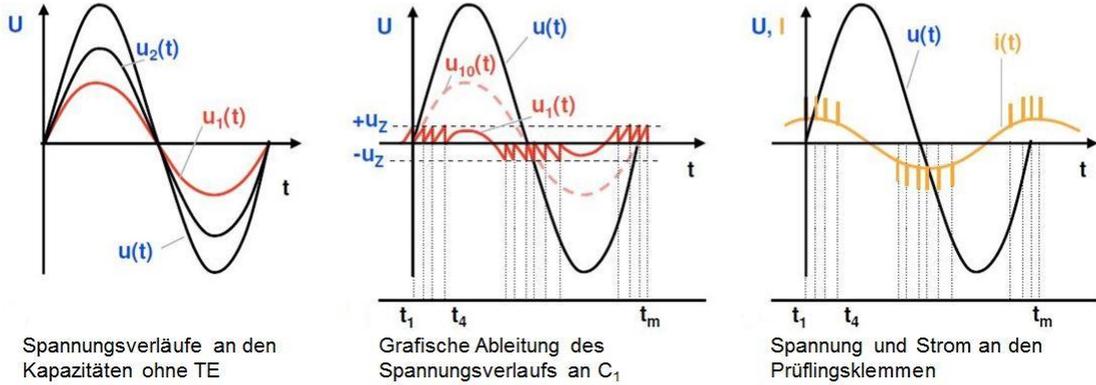
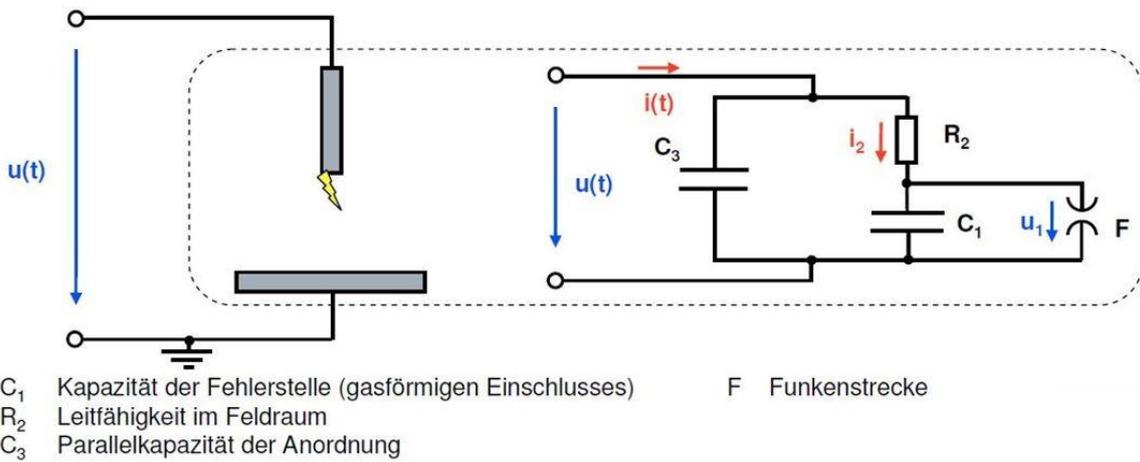


Abb. 12: Schematische Darstellung der Fehlstelle, vereinfachtes Ersatzschaltbild und Spannungs- und Stromverläufe bei inneren Teilentladungen und Oberflächenentladungen [6]



- | | | | |
|-------|---|-----|---------------|
| C_1 | Kapazität der Fehlerstelle (gasförmigen Einschlusses) | F | Funkenstrecke |
| R_2 | Leitfähigkeit im Feldraum | | |
| C_3 | Parallelkapazität der Anordnung | | |

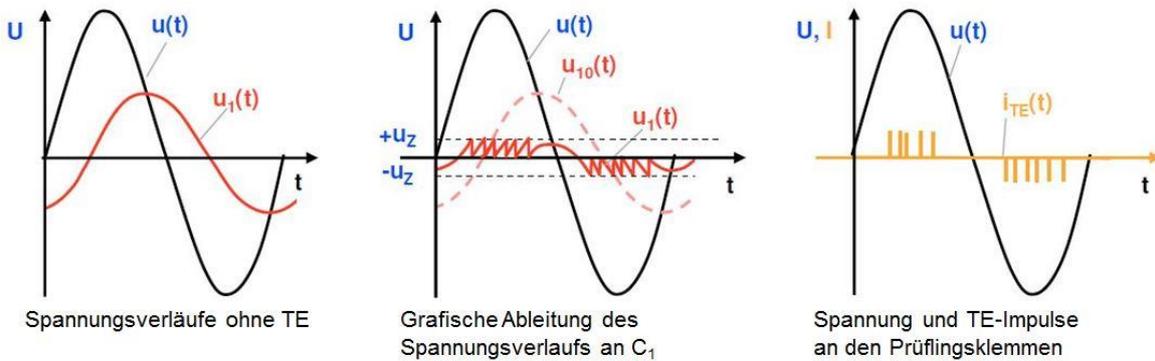


Abb. 13: Schematische Darstellung der Fehlstelle, vereinfachtes Ersatzschaltbild und Spannungs- und Stromverläufe bei äußeren Teilentladungen [6]

Bei inneren Fehlstellen sind die Stromimpulse der Teilentladungen beim Spannungsnulldurchgang, die äußeren Teilentladungen sind um 90° phasenverschoben und treten demnach beim

Teilentladungsmessung

Spannungsmaximum auf. Ein frei bewegliches Partikel würde durchgehende Stromimpulse verursachen. Diese Betrachtungen sind für Wechselspannung, bei Gleichspannung fällt der Phasenbezug weg. Stellt man innere und äußere Teilentladungsvorgänge gegenüber, so bemerkt man, dass es bei der inneren Entladung zu keinem Ladungsträgerdrift entlang der Fehlstelle Richtung der Elektroden kommt und damit der kapazitive Charakter ($C_2 \gg C_1$) weiterhin besteht. Bei der äußeren TE driften die Ladungsträger in das Gasdielektrikum hinein, wodurch sich ein ohmscher Charakter ($R_2 \gg 1/\omega C_1$) ergibt. [6]

Anhand des Ersatzschaltbildes für innere Teilentladungen (Abb. 12) kann der Begriff der scheinbaren Ladung erklärt werden. Der tatsächliche Ladungsumsatz kann an den Prüflingsklemmen nicht erfasst werden, wird allerdings die Zündspannung überschritten, so kommt es zu einer Entladung an der Fehlstelle. Beim nachfolgenden Ausgleichsvorgang fließt die Ladung aus C_2 und C_3 in die Entladestelle, wodurch es an den Prüflingsklemmen zu einer Ladungsverminderung bzw. einem Spannungseinbruch kommt. Unter der Annahme, dass die starre Quelle den Spannungseinbruch vollständig ausgleichen kann, betrachtet man die aus dem Koppelkondensator messtechnisch erfassbare nachfließende Ladung, welche als **scheinbare Ladung** bezeichnet wird. Diese Größe ist viel kleiner als der tatsächliche Ladungsumsatz durch die Umladungsprozesse, da die Art, Größe und Lage der Fehlstelle nicht erfassbar sind. Dennoch hat sich die scheinbare Ladung als Kennwert für die Teilentladungsintensität durchgesetzt. [1]

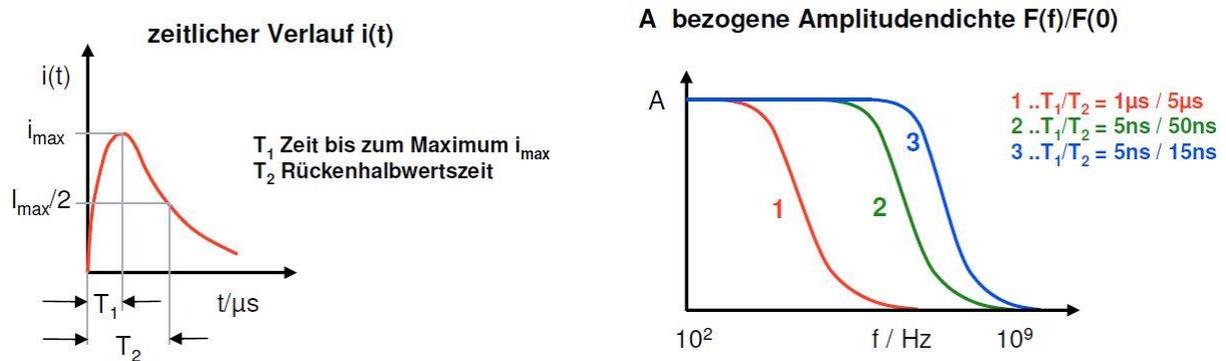


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf und Spektrum von Teilentladungen; Links: Idealisierter TE-Impuls als Überlagerung zweier Exponentialfunktionen; Rechts: Spektrum verschiedener Impulse [6]

Betrachtet man zunächst den zeitlichen Verlauf und das Spektrum von Teilentladungen, stellt sich der idealisierte Teilentladungsstromimpuls als Überlagerung von zwei Exponentialfunktionen dar. Die Anstiegszeiten der Impulse sind üblicherweise im ns- bis μs -Bereich. Die Ladung des Stromimpulses ergibt sich als Fläche des Strom-Zeit-Verlaufs:

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (2)$$

Teilentladungsmessung

Durch die Fourier-Analyse wird das Spektrum des Stromimpulses gebildet und als bezogene Amplitudendichte $F(f)/F(0)$ über die Frequenz f dargestellt. Bis zu einer gewissen Frequenz ist die Amplitudendichte konstant und gleich dem Gleichanteil $F(0)$ bei Frequenz $f=0\text{Hz}$. Das komplexe Spektrum eines Stromimpulses ist:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

$$\text{für } \omega = 2\pi f = 0 \text{ ergibt sich } q = F(0) \quad (4)$$

Somit entspricht die Impulsladung q dem Gleichanteil $F(0)$ der Amplitudendichte, daraus folgt für den Frequenzbereich in dem die Amplitudendichte annähernd konstant ist:

$$q = F(0) = F(f) \quad (5)$$

Die Ermittlung von q findet entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich statt, hierbei ist die Bandbreite eines Systems entscheidend. Bei schmalbandigen oder begrenzt breitbandigen Geräten wird die Integration im Frequenzbereich angewendet, sehr breitbandige Systeme setzen Integration im Zeitbereich ein. [6]

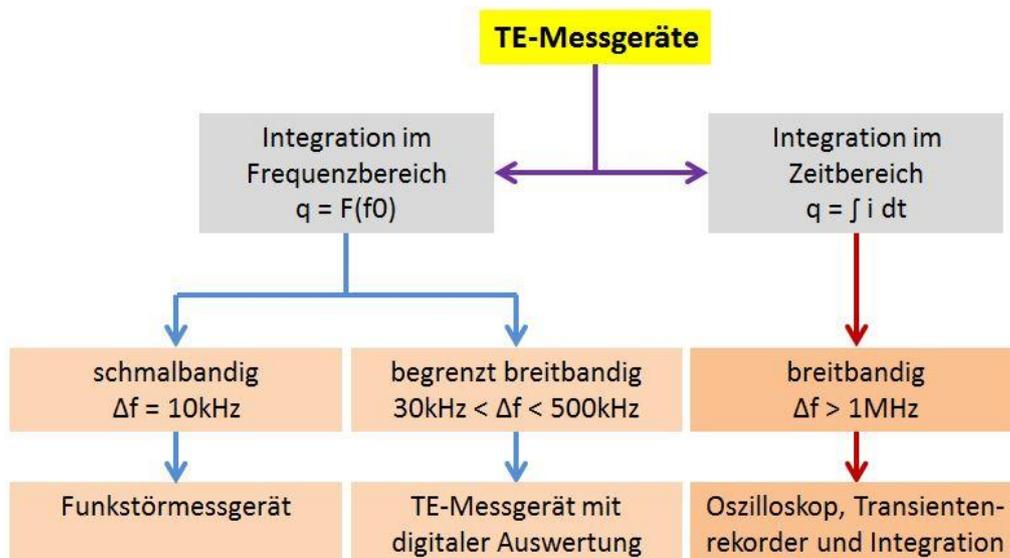


Abb. 15: Einteilung der TE-Messgeräte zur Messung der scheinbaren Ladung nach Frequenzbereichen [6]

Je schmalbandiger ein System ist, desto mehr wird das Signal gegenüber dem Originalimpuls verbreitert. Beim schmalbandigen System (einige kHz) sind unzulässige Überlagerungen der Impulsantworten und sonstige Störer vermeidbar. Durch das Verschieben der Mittenfrequenz kann man offensichtlichen Störungen ausweichen. Beim begrenzt breitbandigen System (einige 100kHz) ist das Impulsaufhebungsvermögen höher, dadurch haben aber auch Störungen mehr Einfluss. Beim sehr breitbandigen System kommen neben dem Originalimpuls weitere unterschiedlich gedämpfte Impulsverformungen, die Integration der einzelnen Stromimpulse liefert allerdings trotz Beeinflussungen durch das Messsystem stets die gleiche Ladung. [6]

Teilentladungsmessung

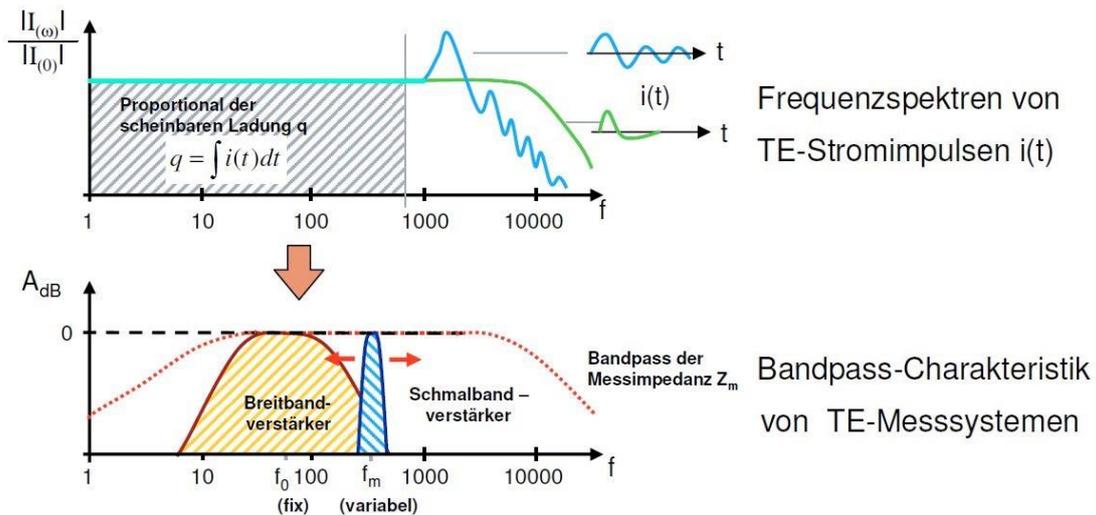


Abb. 16: Frequenzspektren von Teilentladungsstromimpulsen [6]

Je nach Anstiegszeit der auftretenden TE-Stromimpulse muss die Bandbreite gewählt werden. Der Messbereich ist so zu wählen, dass im gesamten abgedeckten Bereich die Amplitudendichte konstant ist, da es sonst zu Messfehlern kommt. Man nimmt bei der breitbandigen Messung mehr Signalenergie auf und man kann die Polarität unterscheiden. Bei der schmalbandigen Messung ist die Polarität nicht unterscheidbar, die einzelnen Impulse sind zwar unterscheidbar, ab einer gewissen Impulshäufigkeit ist dies aber nicht mehr auflösbar. [6]

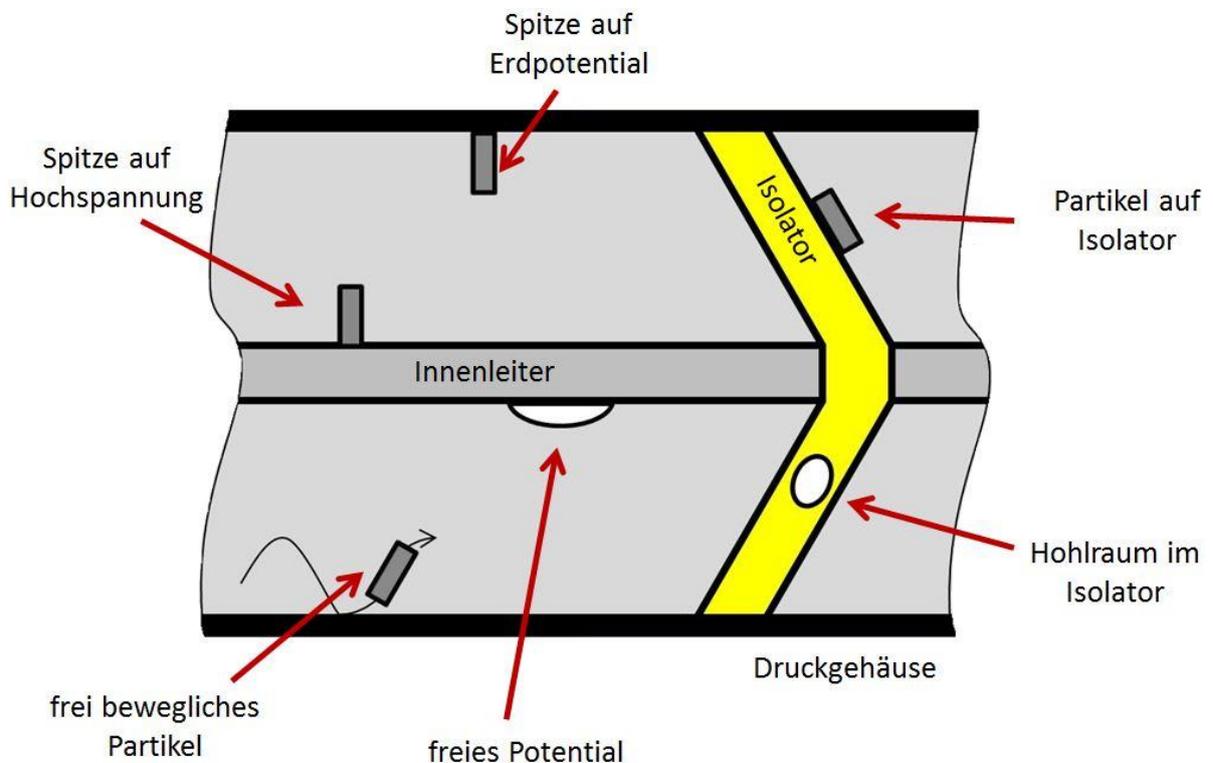


Abb. 17: Mögliche Teilentladungsquellen in gasisolierten Systemen [6]

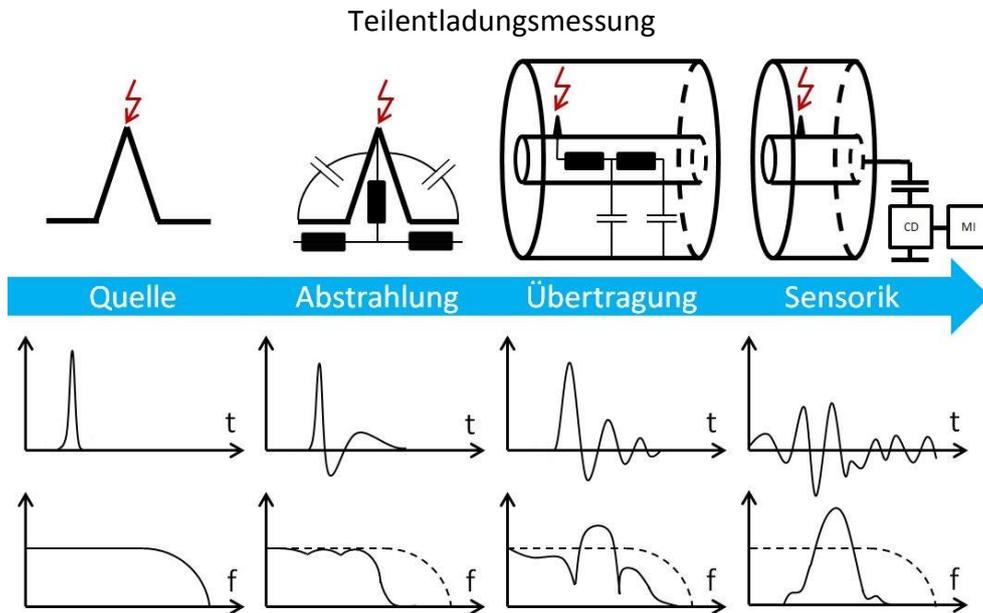
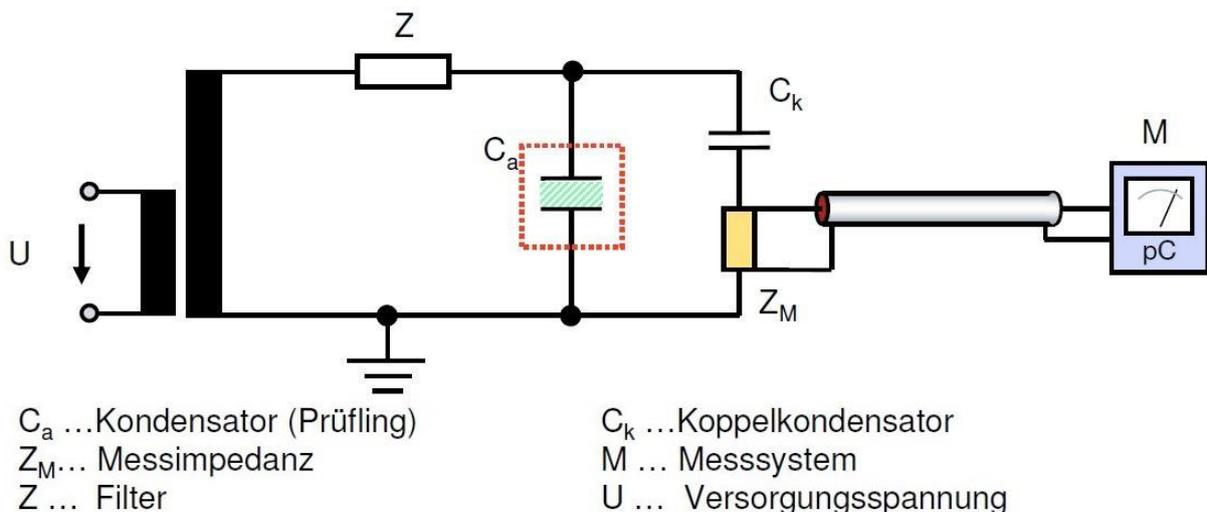


Abb. 18: Übertragungspfad von Quelle zu Sensor [7]

Die Signale der Quelle werden durch Abstrahlung, Übertragung und Sensorik verändert und das Spektrum bandbegrenzt, gedämpft oder überhört durch Resonanzen. Die leitende Struktur arbeitet als Wellenleiter für höhere Frequenzen, die Grenzfrequenz ist stark von der inneren Geometrie abhängig. Reflexionen an Unstetigkeiten führen zu Stehwellen (Resonanzen) und Interferenzmustern, daher ist eine gasgekapselte Anlage aus Sicht der Hochfrequenztechnik als „heavily overmoded waveguide“ zu betrachten, also ein Wellenleiter mit äußerst vielen Ausbreitungsmodi. [7]

2.2. Konventionelle elektrische Teilentladungsmessung

Nur bei der konventionellen Messung kann der TE-Intensität eine scheinbare Ladung zugeordnet werden. Für den Prüfaufbau der konventionellen elektrischen Teilentladungsmessung gibt es mehrere Möglichkeiten, im Folgenden wird aber nur auf die bei den Versuchen angewendete Methode eingegangen.



C_a ... Kondensator (Prüfling)
 Z_M ... Messimpedanz
 Z ... Filter

C_k ... Koppelkondensator
 M ... Messsystem
 U ... Versorgungsspannung

Abb. 19: Grundschiung für die konventionelle elektrische Teilentladungsmessung, Messimpedanz in Reihe mit Kopplungskondensator (Prüfling geerdet) [6]

Teilentladungsmessung

Der Unterschied zwischen den angesprochenen Methoden liegt im Wesentlichen in der Position der Messimpedanz. Baut man die Messimpedanz unter den Prüfling wird die Messung zwar empfindlicher, sollte der Prüfling allerdings defekt werden, liegt Hochspannung am Auskoppelvierpol. In der abgebildeten Anordnung befindet sich die Messimpedanz unter dem Koppelkondensator, der etwa die zehnfache Kapazität des Prüflings aufweisen sollte. Durch die Messimpedanz bzw. dem Auskoppelvierpol findet die Teilentladungsimpulsauskopplung aus dem Hochspannungskreis statt. Er beinhaltet einen Überspannungsableiter, eine Induktivität und einen Widerstand (ca. 100Ω), unvermeidliche Induktivitäten und Streukapazitäten begrenzen das Übertragungsverhalten hin zu höheren Frequenzen. [6]

Der beschriebene Teilentladungsmesskreis ist sowohl bei Wechsel- als auch bei Gleichspannung einsetzbar, jedoch treten TE-Impulse bei Gleichspannung wesentlich seltener und unregelmäßiger auf, da die Nachladung einer entladenen Fehlstelle nicht durch Verschiebungsströme sondern durch deutlich geringere Leitungsströme stattfindet. Das TE-Messgerät registriert daher die Ladung einzelner Impulse über die Zeit statt einer kontinuierlichen Ladungsanzeige. Generell sind TE-Messungen bei Gleichspannung äußerst anfällig gegen äußere Störungen und gegen Störungen im Messaufbau. [1]

Vor einer Messung bzw. auch nach Änderungen am Prüfaufbau muss das Messsystem kalibriert werden. Die Kalibrierung findet im vollständigen Prüfkreis statt, bei angeschlossener aber spannungsloser Anspeisung wird der Maßstabsfaktor ermittelt. [6]

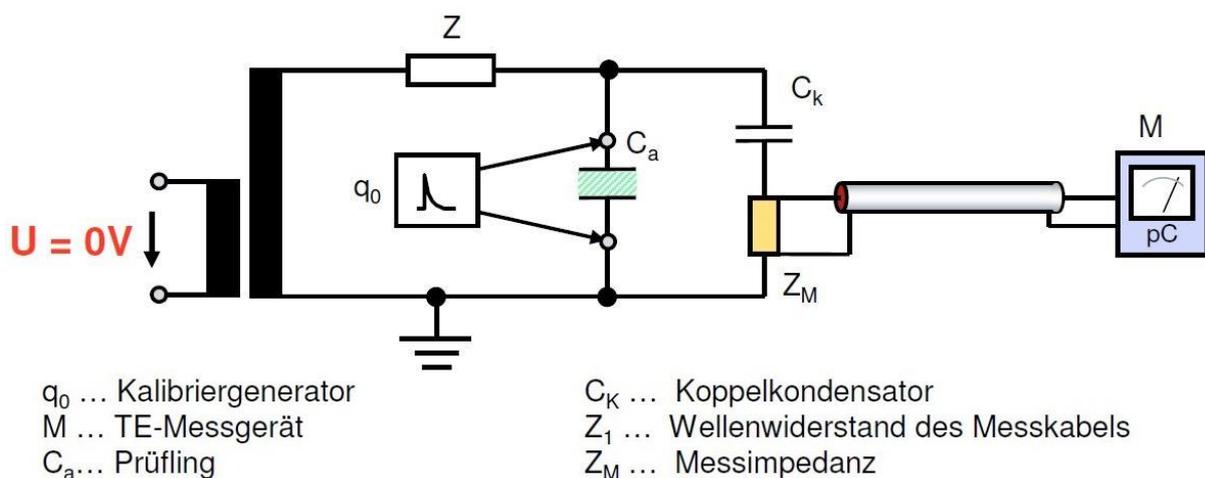


Abb. 20: Kalibrierung im vollständigen, spannungslosen Prüfkreis [6]

Der Kalibriergenerator sendet Stromimpulse konstanter Ladungsmenge über die Parallelschaltung aus, wodurch das TE-Messgerät ein entsprechendes Signal anzeigt. Diese messbare Ladung wird um den Kalibrierfaktor korrigiert, sodass das Messgerät die scheinbare Ladung anzeigt. [1]

Teilentladungsmessung

Es gibt eine Reihe von Darstellungsmöglichkeiten für Entladungsdaten. Neben Fingerprints, dreidimensionaler Darstellung und zeitaufgelöster Darstellung können TE auch als Einzelimpulse, Anzahl der Entladungen in Abhängigkeit der Phasenlage oder Ladungshöhe wiedergegeben werden.

Aus den Charakteristika der aufgenommenen Signale wie Frequenzgang, Struktur, Häufigkeit etc. können mit entsprechender Systemkenntnis über kritische Stellen und Felder o.Ä. Informationen für die Auswertung gesammelt werden. Die korrekte Interpretation von Teilentladungen führt zur Defektcharakterisierung, welche Typ, Ort und Risikoeinschätzung beinhaltet. [6]

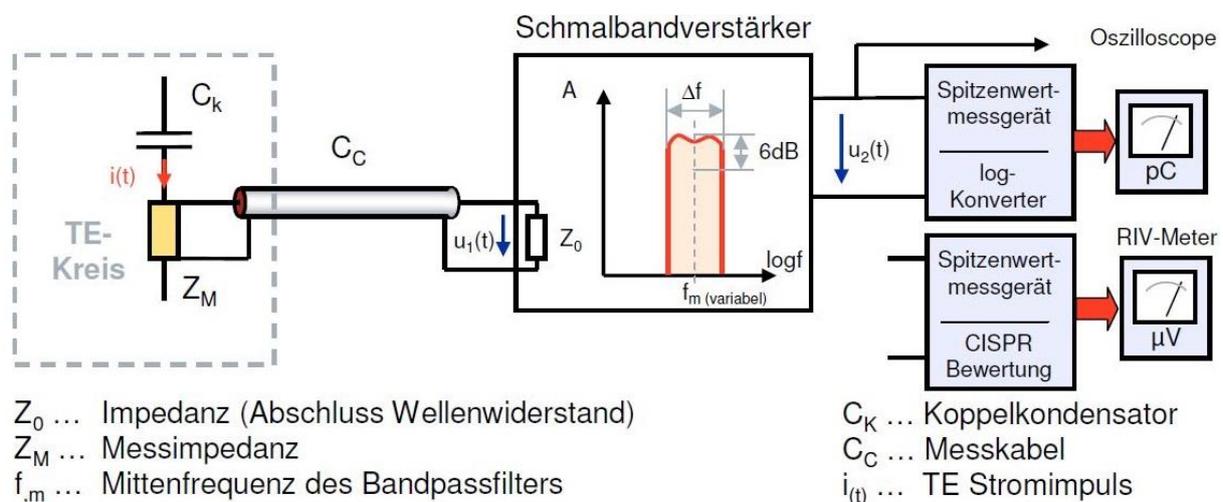


Abb. 21: Schmalbandige TE-Messung und RIV [6]

Da die mit dem Auskoppelvierpol gemessenen Stromimpulse wegen der komplexen Systemeigenschaften des Messkreises oft wenig aussagekräftig sind, werden sie zur Bildung der Kenngröße Ladung integriert. Diese Quasi-Integration kann mit breit- und schmalbandigen TE-Messgeräten sowie mit Störspannungsmessgeräten (radio-interference-meter, RIV-Meter) durchgeführt werden. [1]

Das Verhalten eines **breitbandigen Messsystems** entspricht einer Integration über einen RC-Tiefpass, wobei der Kondensator auf den Spannungswert aufgeladen wird, der proportional zur Ladung ist. Dabei muss die Zeitkonstante hinreichend groß gegenüber der Impulsdauer sein, aber nicht zu groß wegen der Impulsauflösung. **Schmalbandige TE-Messgeräte** haben sehr stark schwingende Impulsantworten, dabei entspricht die Frequenz der Schwingung der eingestellten Mittenfrequenz des Filters. Die Amplitude der Schwingung ist proportional der Ladung des erregenden Impulses, allerdings geht dabei die Information über die Polarität verloren. **Störspannungsmessgeräte** sind durchstimmbare Messempfänger mit Bandpasscharakteristik zur Quasi-Integration von Impulsen. Im Unterschied zu anderen schmalbandigen Messgeräten erfolgt die Anzeige als Spannung (μV) statt als Ladung (pC). [1]

2.3. UHF Teilentladungsmessung

Der Bereich von sogenannten Dezimeterwellen erstreckt sich von 300MHz bis 3GHz, dieses Frequenzband wird allgemein als UHF-Band bezeichnet. In diesem Frequenzbereich sind die elektromagnetischen Wanderwellen angesiedelt, die von den Teilentladungsstromimpulsen mit sehr kurzen Anstiegszeiten verursacht werden. Es kommt zur Ausbreitung von:

- TEM-Welle (transversal elektromagnetische Welle, breitet sich über Innenleiter aus)
- TE-Wellen (transversal elektrische Welle)
- TM-Wellen (transversal magnetische Welle)

Zum ortsselektiven Auskoppeln der Signale bei GIS/GIL werden in der Regel Scheiben- oder Konussensoren verwendet. Sie sollen eine breitbandige Aufzeichnung hoher Empfindlichkeit ermöglichen. Die Sonde darf keine Spitzen oder Kanten haben, die zu Felderhöhungen führen und damit das Gesamtsystem beeinflussen.

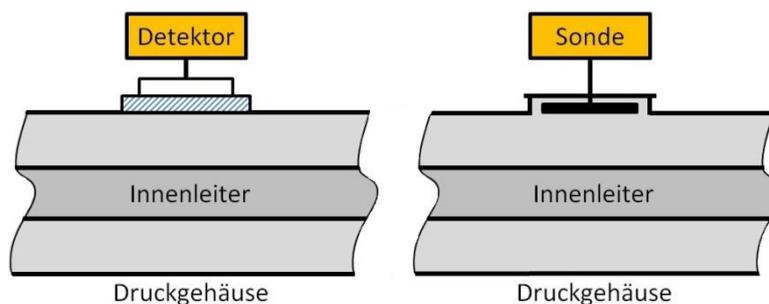


Abb. 22: UHF-Sensor außerhalb der Druckkapselung (links) und innerhalb (rechts) [6]

An Sichtfenstern können temporäre Sensoren angebracht werden, ohne Eingriff in den Gasraum, allerdings ist dadurch die Dämpfung des Signales höher und die Messung weniger empfindlich. Bei Sonden, die in den Gasraum eindringen, ist die Messempfindlichkeit besser, der Aufwand beim Abrüsten ist aber wesentlich größer. Zusätzlich darf die Sonde nicht zu sehr in den Gasraum eindringen um Feldverzerrungen zu vermeiden. Wie bei der konventionellen TE-Messung kann ein schmal- oder breitbandiges Messverfahren angewendet werden.

Teilentladungsmessung

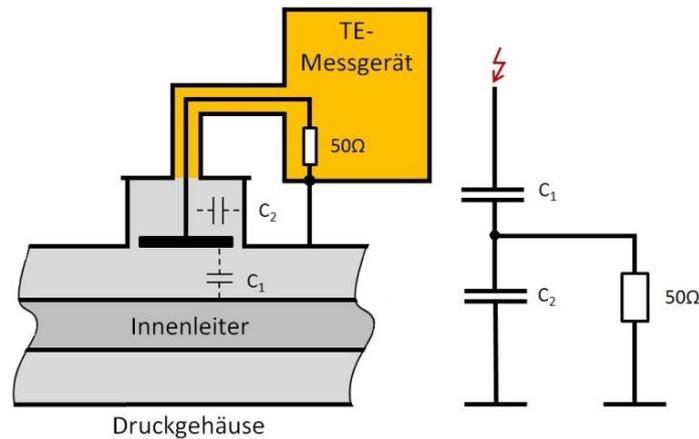


Abb. 23: UHF-TE-Sensor und vereinfachtes Ersatzschaltbild [6]

Die Auskopplung der TE-Signale erfolgt über einen kapazitiven Koppler. Das Teilverhältnis des kapazitiven Spannungsteilers ergibt sich aus der Geometrie der Kapselung und des Innenleiters, wodurch sich bei verschiedenen Einbauorten unterschiedliche Teilverhältnisse ergeben. Da zwischen der scheinbaren Impulsladung und der Anzeige der UHF-Messung keine eindeutige Relation besteht, kann im Gegensatz zur konventionellen elektrischen Teilentladungsmessung die UHF-Messung nicht kalibriert werden, stattdessen wird ein Empfindlichkeitsnachweis durchgeführt.

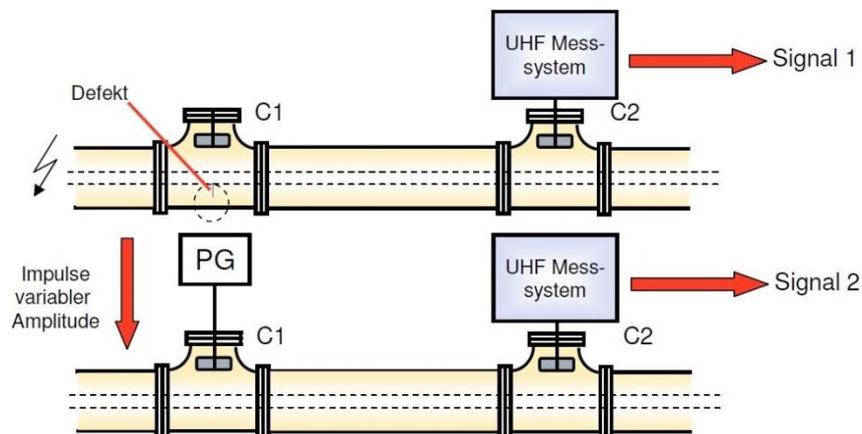


Abb. 24: Empfindlichkeitsnachweis von UHF-Sensoren [6]

Beim Empfindlichkeitsnachweis wird zunächst ein definierter, künstlicher Defekt eingebaut, dessen TE-Intensität (meist 5pC) mit einem konventionellen Messsystem erfasst wird. Währenddessen zeichnet ein UHF-Sensor das Spektrum des Defektes auf. Im nächsten Schritt wird der künstliche Defekt entfernt und an derselben Stelle über einen weiteren Sensor ein Vergleichsimpuls mit geringer Anstiegszeit eingespeist. Die Amplitude des Impulses wird solange verändert, bis sich die beste Übereinstimmung mit dem Spektrum des künstlichen Defektes einstellt. Dieser ermittelte Vergleichsimpuls dient dann als Referenzwert für TE-Impulse mit derselben eingestellten Intensität (im Beispiel 5pC). Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist begrenzt, aufgrund der unterschiedlichen Geometrie bei verschiedenen Anlagen und Einbauorten müssen für jede einzelne Sonde die Vergleichsimpulse ermittelt werden. [1] Von der Anzeige des UHF-Messgerätes kann man jedoch

Teilentladungsmessung

nicht auf die tatsächliche TE-Intensität schließen, vielmehr definiert man durch den Empfindlichkeitsnachweis eine Schwelle, ab dem die UHF-Sensoren ansprechen. Der Ausschlag am Messgerät soll möglichst realitätsnah den TE-Impuls einer Störung abbilden. Der erste Schritt, die Intensität eines künstlichen Defektes zu erfassen, erfolgt im Werk, die Vergleichsimpulse der einzelnen UHF-Sonden werden vor Ort bei der Inbetriebnahme der Anlage ermittelt. Prinzipiell kann die UHF-Diagnose auch online, also unter Betriebsspannung, durchgeführt werden (Monitoring). [6]

Der Funktionsnachweis einer Anlage muss vor Ort, also auf der Baustelle, erbracht werden. Die Erkennung und Ortung von Verschmutzungen, also leitfähigen Fremdkörpern im Aufbau, ist die wichtigste Anwendung von UHF-TE-Messsystemen. Für die UHF-Diagnose sind ungedämpfte Übertragungswege im Gerät und die breitbandige Auskopplung der Signale entscheidend, was bei gasisolierten Systemen gegeben ist. Die meist direkt am TE-Sensor verstärkten Signale werden über einen Multiplexer einem Oszilloskop und einem Spektrumanalysator zugeführt, um Zeit- und Frequenzbereichsmessungen durchzuführen.

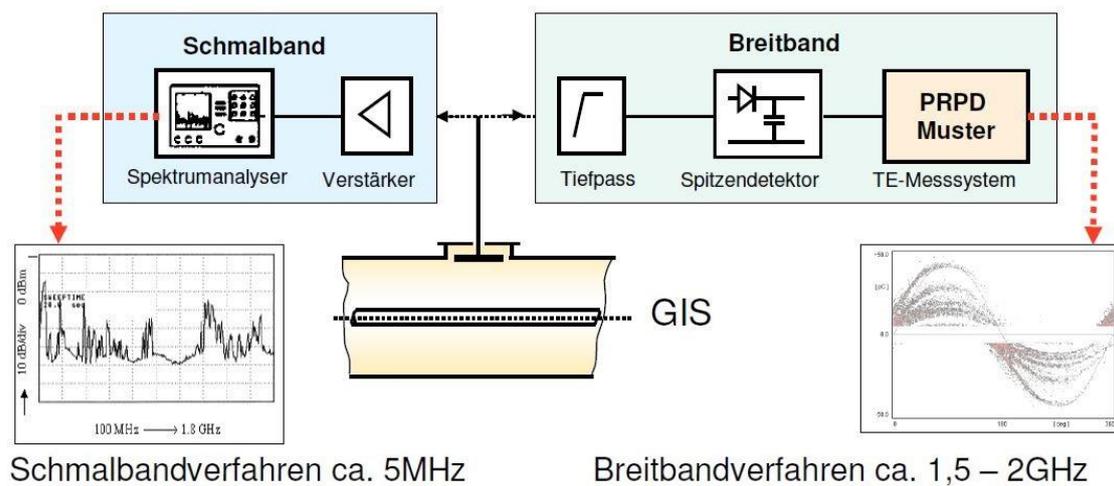


Abb. 25: Beispiele für UHF-Teilentladungsmesssysteme [6]

Vor Ort können mehrere UHF-Verfahren angewendet werden:

- Abgestimmte UHF-Schmalbandmessung mit veränderlicher Mittenfrequenz
- UHF-Breitbandmessung mit fester Bandbreite
- UHF-Schmalbandmessung mit fester Frequenz, oder mehreren festen Frequenzen

Teilentladungsmessung

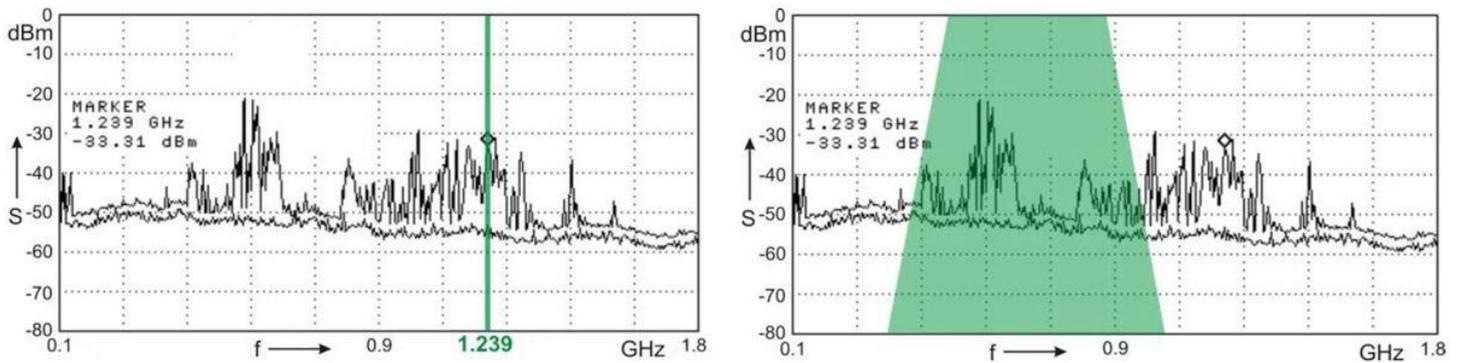


Abb. 26: Links: Beispiel für eine abgestimmte UHF-Schmalbandmessung mit veränderlicher Mittenfrequenz; Rechts: Bandbreite für UHF-Breitbandmessung mit fester Bandbreite (schematische Beispieldarstellung) [7]

Bei der schmalbandigen Methode mit einstellbarer Mittenfrequenz kann idealerweise ein geeignetes Messfenster gefunden werden, in dem durch eine große SNR (signal-to-noise ratio, Verhältnis Signal zu Störabstand) eine hohe Messempfindlichkeit erzielt wird. Bei der breitbandigen Messung wird über eine Bandbreite von mehreren hundert MHz das TE-Spektrum aufgezeichnet und die Hüllkurve des Amplitudensignals mit fester Bandbreite direkt an das TE-Messsystem übertragen. [7]

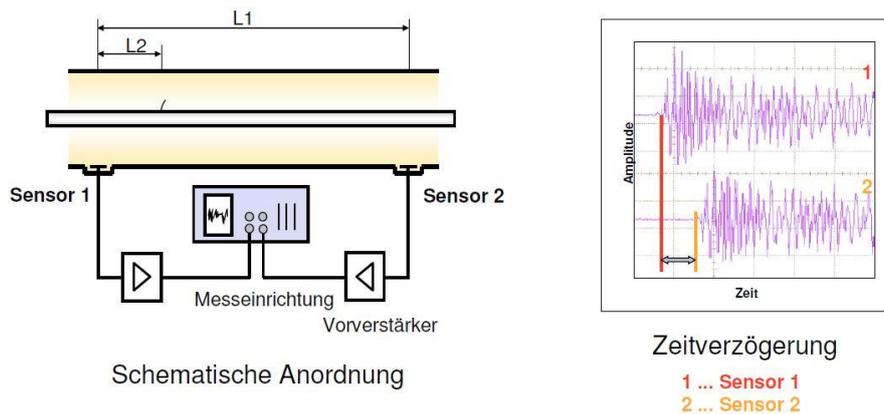


Abb. 27: Fehlerortung mit UHF-Sonden (Lokalisierung) [6]

Mit Laufzeitverfahren ist eine Ortung von Teilentladungsquellen möglich. Durch die Zeitverzögerung zwischen dem Ansprechen zweier benachbarter UHF-Sensoren in einem Teilstück der Anlage kann man auf die Position des Defektes schließen.

2.4. Vergleich von UHF-TE-Messung und konventioneller TE-Messung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Methoden liegt im Anwendungsgebiet. Die konventionelle elektrische TE-Messung liefert zwar die besten Aussagen über TE in gasisolierten Anlagen, ihr Einsatzgebiet beschränkt sich jedoch auf das Labor. Die UHF-Methode eignet sich am besten in Kombination mit akustischen und ggf. optischen Messverfahren zum Monitoring einer Anlage im Betrieb. Mit diesen unkonventionellen Messsystemen können TE erkannt und genau geortet werden, allerdings kann die TE-Intensität nicht als scheinbare Ladung gemessen werden.

	Elektrisch	UHF
Typprüfung	++	-
Stückprüfung	++	-
Inbetriebnahme	++	++
Im Betrieb	--	+
Messbereich	Gesamte Anlage	Distanzabhängig
Mustererkennung	++	+
Aufwand (Zeit)	++	-
Aufwand (Gerät)	++	+
Aussage	++	+

Tab. 3: Vergleich der Verfahren und Einsatzgebiete (++: sehr gut/sehr hoch; +: gut/mittel; -:schlecht/gering; --: sehr schlecht/sehr gering) [6]

Die UHF-Methode bietet eine hohe Empfindlichkeit, die Messung hindert nicht den Betrieb und kann durch externe Sensoren einfach nachgerüstet werden. Allerdings gibt es keine Kalibrierung des UHF-Messsystems sondern nur einen Empfindlichkeitsnachweis, zudem können geringe Störungen aus externen Quellen die Messung beeinflussen. Bei der konventionellen elektrischen TE-Messung kann das gesamte betrachtete System kalibriert werden, aufgrund der Messung unter Laborbedingungen kann der Einfluss von Störern gering gehalten werden.

3. UHF-Sonden

Die Lage der Sonden in einer gasisolierten Anlage kann nach den Festlegungen der Hochfrequenztechnik immer im Fernbereich angenommen werden, da der Abstand zum Defekt (Sendeantenne) größer ist als dessen Abmessungen (üblicherweise wenige mm bei Defekten in GIS/GIL). Ortsfeste Störstellen, wie die in dieser Arbeit verwendeten fixierten Defekte oder Nadeln, entsprechen einer Stabantenne (Monopol). Ihr Verhalten kann durch das Ersatzschaltbild einer Dipolantenne beschrieben werden, da ihre Eigenschaften bezüglich der Stromverteilung und der Feldstärke im Fernfeldbereich denen eines Dipols gleichen. [8]

3.1. Wellenausbreitung

Bei gasisolierten Anlagen liegt ein koaxiales Zweileitersystem vor, das durch die Zylinderkoordinaten r , ϕ und z beschrieben wird. Die Ausbreitung transientser elektromagnetischer Wellen können mit den Maxwell-Gleichungen beschrieben werden. Nach der Umformung der Gleichungen ergibt sich folgende Form:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = j\omega \mu \vec{j} - \frac{\text{grad div } \vec{j}}{j\omega \epsilon} \quad (6)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = -\text{rot } \vec{j} \quad (7)$$

Die rechten Terme der Gleichungen entfallen für landungs- und stromfreie Bereiche und man erhält die Wellengleichungen für \vec{E} und \vec{H} .

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = 0 \quad (9)$$

Diese Gleichungen sind unabhängig von der Leitergeometrie allgemein gültig. Die Form und die Abmessungen der Anlage geben das Wellenverhalten vor, damit werden die Wellenmoden durch die Randbedingungen bestimmt. Für die obigen Gleichungen gibt es verschiedene Lösungen, die zahlreiche Feldformen beinhalten, die sich entlang des Leiters ausbreiten können (TEM-, TE-, TM-Welle). [8]

Die Transversal Elektromagnetische Welle besitzt keine Feldkomponenten in Ausbreitungsrichtung ($E_z = H_z = 0$) und tritt bei allen Frequenzen ab 0Hz auf. Bei ausreichend kleinen Frequenzen ist er der einzig auftretende Mode, weswegen er als Grundmode bezeichnet wird. Die Transversalen Elektrischen Wellen (TE-Wellen) und die Transversalen Magnetischen Wellen (TM-Wellen) kommen auch in koaxialen Systemen vor. Die TE-Wellen haben keine Komponente des elektrischen Feldes in Ausbreitungsrichtung während die TM-Wellen keine magnetische Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung haben. [8] Daher sind auch folgende Bezeichnungen gängig:

- E-Wellen haben elektrische Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung, die magnetischen Feldlinien sind quer dazu (TM-Wellen)
- H-Wellen haben magnetische Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung, die elektrischen Feldlinien sind quer dazu (TE-Wellen)

In Zweileitersystemen, wie der Koaxialleitung, treten TEM-, TE- und TM-Wellen gleichzeitig auf. TE- und TM-Wellen sind unerwünschte höhere Wellentypen und tragen zur Signalverzerrung auf dem Übertragungsweg bei. Sie existieren neben der gewünschten TEM-Welle, die die Grundwelle bei Hochfrequenzübertragungen darstellt. [9] Für alle gewählten Zylinderkoordinaten können Lösungen gefunden werden, man betrachtet im weiteren die Lösung der z-Komponente in

UHF-Sonden

Ausbreitungsrichtung, um die Werte der Modenkonstante k_{mn} für die verschiedenen TE_{mn} - und TM_{mn} -Moden zu berechnen. [8] Die Indizes m und n dienen zur Unterscheidung der Vielzahl von denkbaren Wellentypen und beschreiben in Kurzform die elektrischen bzw. die magnetischen Feldbilder in der Querschnittsebene, wobei sie sich auf die Anzahl der Maxima bzw. die Anzahl der Nullstellen beziehen. [9] Für weitere Betrachtungen wird nun die Ausbreitungskonstante $\underline{\gamma}$ berücksichtigt, die sich aus einer reellen Dämpfungskonstante α und einer imaginären Phasenkonstante β zusammensetzt.

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (10)$$

Bei den Wellenmoden liegt ein **Dämpfungstyp** vor, wenn die Ausbreitungskonstante rein reell ($\beta=0$) ist und sich die Welle durch die sehr starke Dämpfung nicht ausbreiten kann. Ist die Ausbreitungskonstante rein imaginär ($\alpha=0$) ist die Mode ein **Wellentyp** und kann sich ungedämpft ausbreiten. Für die TE- und TM-Wellen existiert eine Grenzfrequenz f_g , bei welcher unterhalb ein Dämpfungstyp und oberhalb ein Wellentyp vorliegt. [8]

$$f_{g,mn} = \frac{k_{mn}}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (11)$$

Durch die unterschiedlichen Werte der Modenkonstanten k_{mn} gibt es für jeden Wellenmode eine eigene Grenzfrequenz. In die Berechnung der Grenzfrequenzen der Moden fließen die Abmessungen des Koaxialleiters ein, die elektrischen und magnetischen Feldlinien zeigen für jeden TE- bzw. TM-Mode einen anderen Verlauf. [8]

UHF-Sonden

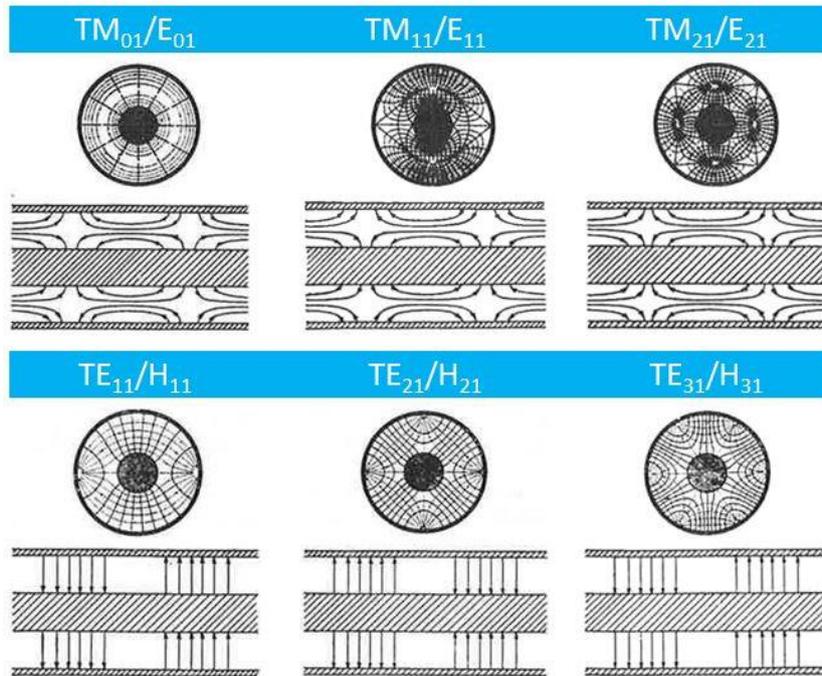


Abb. 28: Schematische Feldlinien verschiedener höherer Wellenmoden [8]

Bei der TE_{11} -Welle (H_{11}) enden einige elektrische Feldlinien auf dem Innenleiter, die magnetischen Feldlinien werden in einer anderen Betrachtung als Pfeile in Längsrichtung der Leitung dargestellt. Die E-Felder der rotationssymmetrischen TM_{01} -Welle (E_{01}) biegen in die z-Richtung um, die Magnetlinien bleiben transversal. Die Feldlinien der Moden können mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) berechnet werden, was eine Triangulierung des Leiterquerschnitts erfordert. [9]

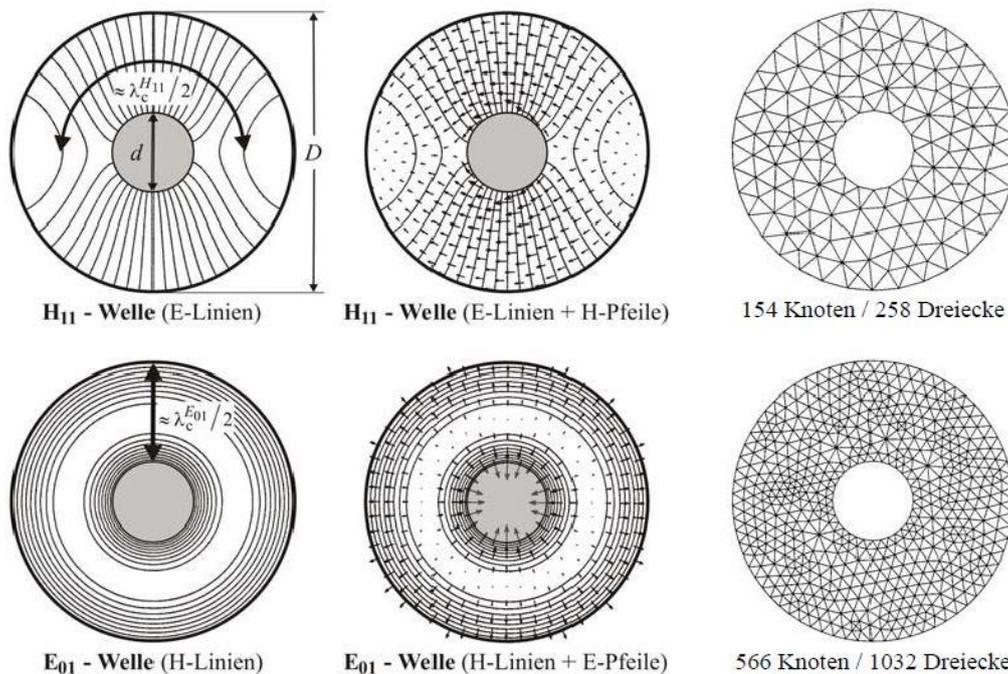


Abb. 29: Andere Betrachtung der TE_{11} - bzw. TM_{01} -Welle (H_{11} und E_{01}) sowie Berechnungsgitter der FEM. Die halbe Grenzwellenlänge λ_c markiert die Stelle, an der sich die Feldrichtung umkehrt [9]

Die einzelnen Moden beeinflussen sich gegenseitig, es kommt zu Modenkopplungen. Leiterverluste rufen unvermeidliche Wandströme hervor, die zu Tangentialfeldstärken an den Leiteroberflächen führen. Durch Überlagerung der Tangentialfelder mit den Moden kann es zu Überkopplungen

UHF-Sonden

zwischen den Moden kommen. An Diskontinuitäten wie Stützisolatoren, Änderungen des Leitdurchmessers, Enden der Anordnung, Verzweigungen oder Flanschöffnungen ist eine Modenwandlung möglich, es kommt zu einer zumindest teilweisen Reflexion und nur ein Teil der Welle kann diese Stellen passieren. Zwischen zwei Diskontinuitäten kommt es durch die Reflexionen zur Ausbildung stehender Wellen. Man kann für ausgewählte Wellenmoden Resonanzfrequenzen berechnen, bei höheren Moden treten die Resonanzen in vergleichsweise dichten Abständen oberhalb der Grenzfrequenz auf. Betrachtet man zusätzlich die unterschiedlichen Abstände zwischen den Stoßstellen in einer realen gasisolierten Anlage, so ergibt sich ein komplexes und dicht besetztes Resonanzspektrum. [8]

Durch die endliche Leitfähigkeit des Leitermaterials ist die Ausbreitung der TEM-Welle verlustbehaftet und es kommt zur Dämpfung, welche vom Leitermaterial und der Geometrie der Anordnung abhängt. Die Dämpfung nimmt mit der Wurzel der Frequenz zu. Für die TM- und TE-Wellen muss ebenfalls mit endlicher Leitfähigkeit der verwendeten Materialien gerechnet werden. Es stellt sich heraus, dass oberhalb der Grenzfrequenzen die Ausbreitungskonstante der Moden nicht rein imaginär ist. Sie besitzen einen reellen Anteil, der durch die Dämpfungskonstante beschrieben wird. Bei den TM-Wellen fällt bei steigenden Frequenzen die Dämpfung von sehr hohen Werten nahe der Grenzfrequenz auf niedrige Werte und nimmt bei höheren Frequenzen aufgrund der frequenzabhängigen Flächenwiderstände des Außen- und Innenleiterquerschnitts wieder proportional zur Frequenz leicht zu. Auch bei den TE-Wellen nimmt die Dämpfungskonstante bei steigenden Frequenzen zu. Bei zunehmenden Frequenzen reduziert sich durch den Skineneffekt der für den Stromfluss zur Verfügung stehende Leitungsquerschnitt, somit führt die endliche Leitfähigkeit der Leiter bei höheren Frequenzen zu größeren Verlusten. [8]

3.2. Signalverarbeitung

Da keine Spitzen oder Kanten in den Gasraum hineinragen dürfen, die das Feld verzerren, sind die Antennen meist als Plattenelektroden in Flanschöffnungen ausgeführt. Die Antenne wird als Spannungsquelle dargestellt, im Modell wird die Leitung von der Sonde zur N-Buchse zur Signalübertragung mit der Länge l_D und der charakteristischen Impedanz Z_D berücksichtigt. [10]

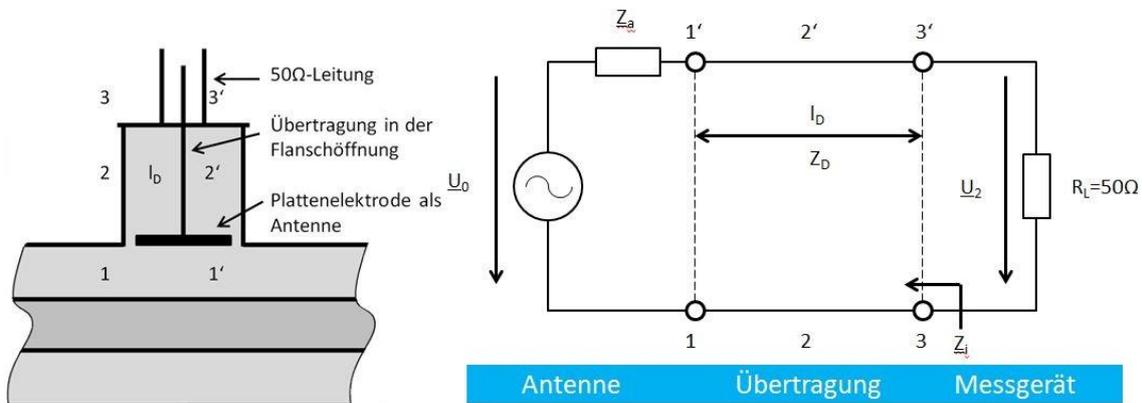


Abb. 30: Interne UHF-Sonde schematisch und dazugehöriges Ersatzschaltbild [10]

Durch den TE-Adapter, auf dem die Sonde angebracht ist, wird die Erdung der Feldsonde aufgehoben. Der Adapter ist mit einem Widerstand und einem Kondensator mit dem Deckel verbunden. Mit dieser Schutzschaltung werden unzulässig hohe betriebsfrequente Spannungen an der Sonde verhindert, außerdem ist die Sonde vor transienten Schaltspitzen und Durchschlägen geschützt. [11] Über Koaxialkabel werden die breitbandig aufgenommenen TE-Signale über verschiedene Zwischenstationen einer Zeit- bzw. einer Frequenzmessung zugeführt (vgl. Kap. 2.3.). Bevor das hochfrequente Signal ausgewertet werden kann, wird der Spannungsverlauf, um die Empfindlichkeit der Messkette zu erhöhen, breitbandig verstärkt. Die Nachweisgrenze kann durch mehrere kaskadierte Verstärker verbessert werden. Je nach Anwendung kann die Auswertung im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen. Auf einem Frequenz-Analysator werden die Amplitudengänge der ausgekoppelten Signale dargestellt. [8]

UHF-Sonden

Die Frequenzmessung kann schmal- oder breitbandig durchgeführt werden. Die Messmethoden können folgendermaßen charakterisiert werden:

Schmalbandige UHF-Messung	
+ Hohe Empfindlichkeit (hohe Signalgüte)	- Oft ist nur ein Spektrumanalysator verfügbar, also kann nur ein Kanal gleichzeitig beobachtet werden
+ Unempfindlich gegen externe Störer	- Automatisches Monitoring schwierig (wo legt man die Mittenfrequenz fest)
+ Grobe Lokalisierung der TE-Quelle möglich aufgrund messbarer Frequenzkomponenten des TE-Signals	
+ Elektrische Ortung am Oszilloskop möglich, da gesamter Frequenzbereich am Spektrumanalysator verfügbar ist	

Tab. 4: Vor- und Nachteile der schmalbandigen UHF-TE-Messung [12]

Besonders bei Vor-Ort-Prüfungen ist eine hochempfindliche, durchschlagsichere, störungsfreie Teilentladungsmessung mit Echtzeitmonitoring aller verfügbaren Kanäle zum Aufspüren und Orten von TE-Quellen von Interesse. [12]

Breitbandige UHF-Messung	
+ Hohe Empfindlichkeit bei Abwesenheit starker elektromagnetischer Störungen	- Ortung anhand des Frequenzspektrums nicht durchführbar
+ Einfacher Aufbau (Verstärker, Detektor, Anzeigegerät)	- Ortung mit Laufzeitverfahren (meist) nicht möglich, da nicht vorgesehen
+ Einfaches automatisches Monitoring möglich	- Durch die niedrige Anzeigegeschwindigkeit oft nicht geeignet für Vor-Ort-Messungen
+ Kanäle mehrerer Sonden gleichzeitig überwachbar (nicht teuer)	- Lange Zuleitungen wirken sich stark auf das Signal-Rausch-Verhältnis aus

Tab. 5: Vor- und Nachteile der breitbandigen UHF-TE-Messung [12]

Bei der schmalbandigen Methode werden die Frequenz linear und die Amplitude logarithmisch dargestellt (vgl. Abb. 26), es wird eine Peak-Hold-Messung mit einer Integrationszeit von einer Minute durchgeführt. Das Frequenzfenster, in dem die Teilentladungen gemessen werden, ist abhängig von der Art des Defektes und der verwendeten Sonde. Ist ein geeignetes Fenster gefunden, wird die Mittenfrequenz darin zentriert und eine Bandbreite von einigen wenigen MHz eingestellt. Wird die Kurvenform des Testsignals mit der Messung synchronisiert, kann ein phasenkorreliertes

Muster angezeigt werden. Bei der FFT Peak-Hold-Messung werden die Spitzenwerte beibehalten und mit neuen Spitzen verglichen, ist der aktuelle Maximalwert höher, ersetzt er den alten. Bei der breitbandigen Messung wird die Hüllkurve des Amplitudensignals aufgezeichnet. Dabei wird das verstärkte Signal über einen Trennverstärker und Gleichrichterdiode einem Tiefpass zugeführt, der die hochfrequenten Anteile des Trägersignals unterdrückt. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird dabei allerdings schlechter, da schmalbandige Störungen im Messbereich zu einer Reduzierung der Empfindlichkeit führen. [7]

3.3. Feldsonden

Wie bereits erwähnt, sind Plattenelektroden die gängigste Variante als Messaufnehmer. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, die hochfrequenten Signale auszukoppeln. Alle möglichen Aufnehmer werden aufgrund ihrer Größe und der zu messenden ultrahochfrequenten Signale als Antennen und nicht als kapazitiver Teiler betrachtet. [8]

3.3.1. Plattenelektroden

Der Aufbau und der Signalabgriff von Plattenelektroden wird in Kap. 2.3. und 3.2. beschrieben. Der Durchmesser der Feldsonde ist durch vorhandene Flanschgrößen begrenzt. Es kann gezeigt werden, dass sich mit zunehmendem Durchmesser die Messempfindlichkeit erhöht. [8]

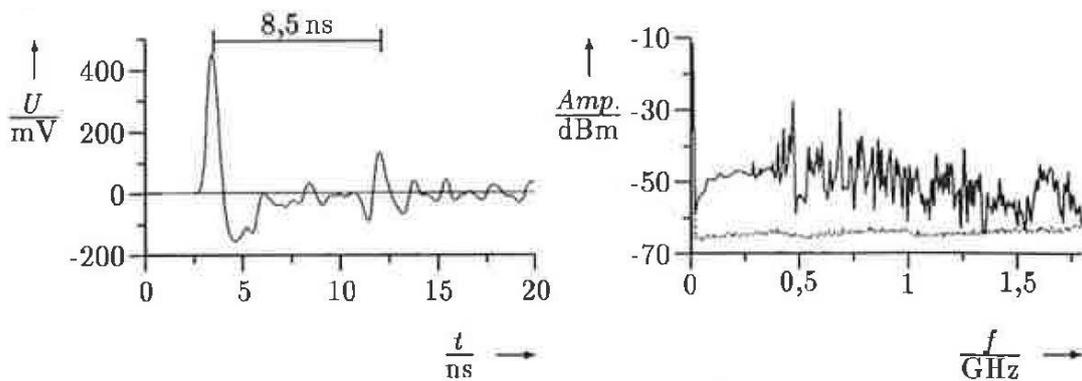


Abb. 31: Beispiel für die Impulsantwort einer Plattenelektrode; Links: Zeitbereich; Rechts: Frequenzbereich mit Rauschsignal [8]

Es gibt Versuche, eine höhere Messempfindlichkeit durch eine alternative Formgebung der Plattenelektroden zu erreichen.

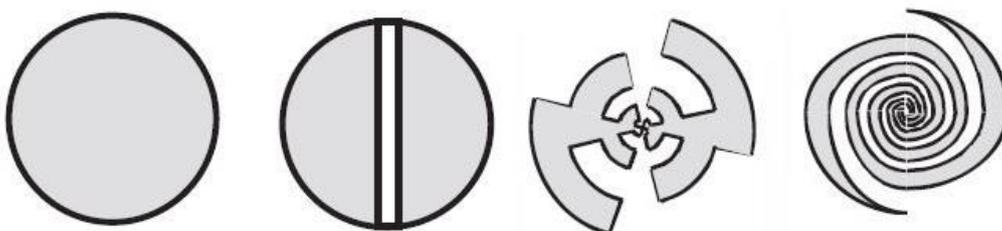


Abb. 32: Verschiedene Varianten von Plattenelektroden; V.l.n.r.: Klassische Plattenelektrode, halbkreisförmiger Dipol, logarithmisch-periodisch (Logper) und Spiralförmig [13]

Mit den von der normalen Plattenelektrode abweichenden Designs lassen sich unter anderem eine bessere Richtcharakteristik [13] oder eine brauchbarere Reflexionsdämpfung [14] erzielen.

3.3.2. Kegelsonden

Die klassische Plattenelektrode weist bei den Übergängen von der Sensoroberfläche auf den Innenleiter des Messkabels an der Elektrode und dem Innenleiter des Messleiters auf das Koaxialkabel zwei Unstetigkeitsstellen auf, die zu Reflexionen führen. Diese Reflexionen verzerren das ausgekoppelte Signal. Dieser Einfluss soll durch eine alternative Sondenkonstruktion verringert werden. Bei der Kegelsonde wird ein konischer Übergang von der Messleitung auf die Sensorfläche realisiert. [8]

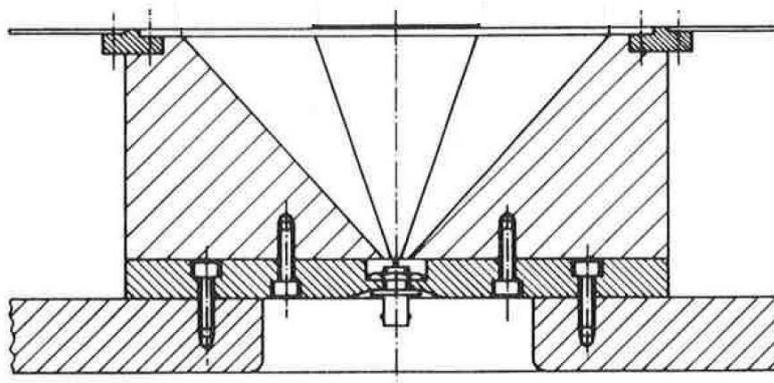


Abb. 33: Kegelsonde mit Innen- und Außenkegel, Halterung (oben) aus nichtleitfähigem Dielektrikum [8]

Der aktive Elektrodendurchmesser ist jener des inneren Kegels. Der innere und äußere Kegel müssen so dimensioniert werden, dass der Wellenwiderstand der Messleitung (50Ω) bis zur Sensoroberfläche fortgeführt wird. Im Vergleich zur Plattenelektrode ist die aktive Sensoroberfläche zwar nur ein Fünftel, es können aber Signale vergleichbarer bzw. gegen höhere Frequenzen sogar höherer Amplitude ausgekoppelt werden. Entscheidend für den Einsatz von Kegelsonden ist der Durchmesser des äußeren Kegels, der durch die zur Verfügung stehende Flanschöffnung begrenzt ist. Bei vorgegebener Baugröße weisen Platten- und Kegelsonden eine vergleichbare Messempfindlichkeit auf. [8]

3.3.3. Weitere Antennenformen

Neben Platten- und Kegelsonden gibt es weitere Antennenformen für die interne oder externe Auskopplung der TE-Signale bei gasisolierten Systemen. Für die Erfassung der magnetischen Feldkomponenten können Stab- oder Mehrstabantennen eingesetzt werden. Bei der internen Anwendung sind die abgerundeten Stäbe parallel zum Innenleiter ausgerichtet, was bei niedrigeren Frequenzen zu einer höheren Messempfindlichkeit führt. [8] Auch Hornantennen können auf die Flanschöffnungen aufgesetzt werden, mit denen eine breitbandige Messung durchgeführt werden kann. Wie bei der Kegelsonde ist beim Aufbau der Hornantennen der Einsatz von nichtleitfähigen Dielektrika als Stützmaterial notwendig.

TE-Signale können auch außerhalb der Kapselung mit verschiedenen Antennenformen aufgenommen werden. Diese externen Antennen können als Hornantennen, logarithmisch-periodische Schmetterlingsantennen, Magnetantennen oder Dipolantennen ausgeführt sein. [15]

4. Bewertung von TE-Messungen

In die vollständige Bewertung von Teilentladungsmessungen fließen einige Faktoren ein, wobei die Aussagekraft von Teilentladungsmessungen an die richtige Interpretation gebunden ist. In diesem Kapitel soll unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen und Aufgabenstellungen auf die Interpretationsmöglichkeiten eingegangen werden. Anhand von Beispielen wird gezeigt, in welcher Weise Teilentladungsquellen eindeutig bestimmt und geortet werden können und wie sich Änderungen der Anordnung oder andere Maßnahmen am Aufbau auf die Messergebnisse auswirken. Passend zur Bewertung wird aufgezeigt, in welchem Ausmaß eine Optimierung der bestehenden Systeme möglich und sinnvoll ist, indem die Vorgaben an ein UHF-Messsystem analysiert werden.

4.1. Interpretation der Messergebnisse

Die Ergebnisse von Teilentladungsmessungen sollen auch Aufschluss über die Art der vorliegenden TE-Quelle liefern. Die Form der Teilentladungen auf der Anzeige der jeweiligen Messgeräte unterliegt vielen Einflussfaktoren, sodass man anhand bestimmter Charakteristika auf die Art der Störstelle schließen kann. Folgende Faktoren beeinflussen unter anderem die Spektren bzw. die Signalverläufe in gasisolierten Systemen:

- Art des Defektes (vgl. Abb. 17)
- Größe des Defekts
- Intensität der TE (Impulssteilheit)
- Zusammensetzung des Gasgemischs
- Druck
- Geometrie (Stoßstellen, Moden)
- Externe Störer
- Mehrfachfehlerstellen, Überlagerung mehrerer Störquellen
- Art der Spannung (+/-DC, AC)
- Spannungshöhe

Bei der konventionellen elektrischen Teilentladungsmessung gibt es charakteristische Teilentladungsbilder, die kurz nach dem TE-Einsatz zustande kommen.

Bewertung von TE-Messungen

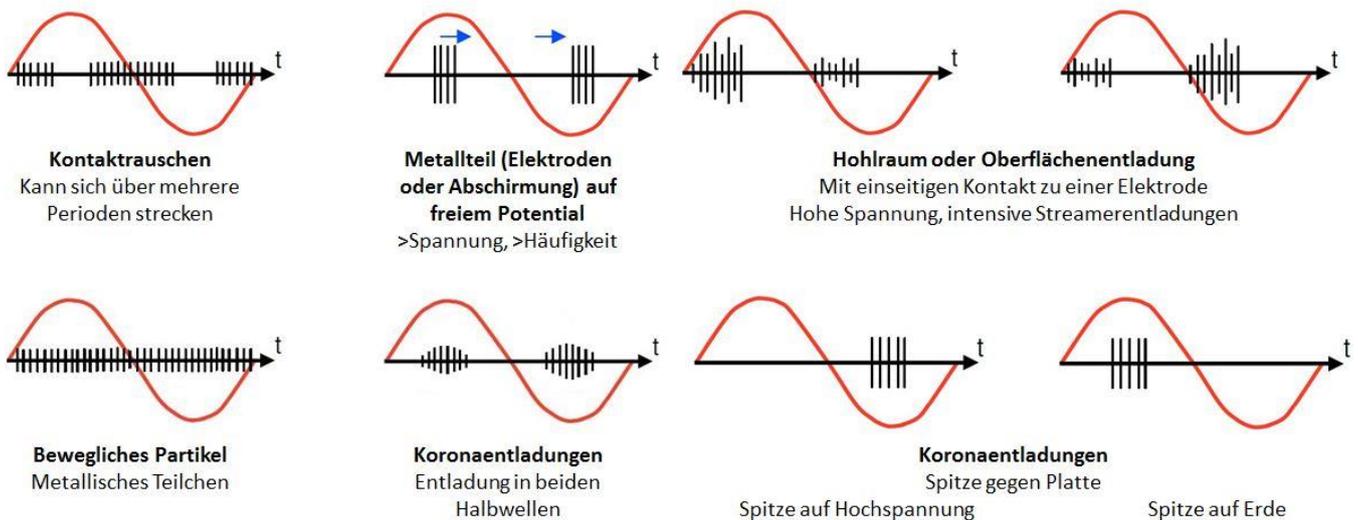


Abb. 34: Teilentladungsbilder bei der TE-Messung bei Wechselspannung [6, 11]

In Abb. 34 sind jeweils einzelne Fehlstellen abgebildet, also keine Mehrfachstörungen. Bei höherer Spannung verändern sich die TE-Bilder deutlich. [6]

Bei TE-Messungen unter Gleichspannung ist der fehlende Phasenbezug das größte Problem bei der Interpretation der Ergebnisse. Auch setzen bei DC die Teilentladungen wesentlich unregelmäßiger ein, sodass sich eine eindeutige Zuordnung des vorliegenden Defekts komplizierter gestaltet als bei Wechselspannung. Bei der Bewertung von TE bei Gleichspannung können auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen zurückgegriffen werden, da bei den Teilentladungsvorgängen verschiedene statistische Parameter erfasst werden können.

Bei der Auswertung der Spektren von UHF-TE-Messungen sind vor allem die Frequenzbereiche mit hoher Signalenergie von Interesse. Abhängig von den oben genannten Einflussfaktoren, besonders von der Art des Defektes und der Spannungsart, prägen sich die Bereiche mit hoher Signalenergie unterschiedlich stark aus.

Generell ist bei allen Betrachtungen von Teilentladungsmessungen eine hohe Empfindlichkeit des Messaufbaus entscheidend. Durch externe Störer und durch die signalverzerrenden Eigenschaften der verwendeten Geräte in der Messkette können Teilentladungsmessungen verfälscht werden. Gegen diese Einflussfaktoren sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Schließlich sollen TE-Quellen getrennt von Störungen der Umgebung identifiziert und lokalisiert werden können, um das Risiko des Defektes einzustufen zu können.

4.2. Beispiele für die Auswertung von Teilentladungen

Durch die Veranschaulichung von Beispielen der elektrischen TE-Messung und der UHF-Methode sollen die Herausforderungen der korrekten TE-Interpretation verdeutlicht werden. Die Beispiele beschränken sich auf die gängigsten internen Fehlerarten in gasisolierten Systemen, die zu Teilentladungen führen.

4.2.1. Typische Defekte in gasisolierten Systemen

Es ist bekannt, dass von den phasenaufgelösten TE-Mustern (phase resolved partial discharge, PRPD) auf die Art des Defekts geschlossen werden kann, da jeder Defekt durch seine individuelle Geometrie, seinen Ort in der Anlage, seine dielektrischen Eigenschaften und seiner Feldemission einer speziellen Ablauffolge zugeordnet werden kann (vgl. Kap. 4.1.). Aber auch anhand der UHF-Spektren kann man auf die Art des Defektes schließen.

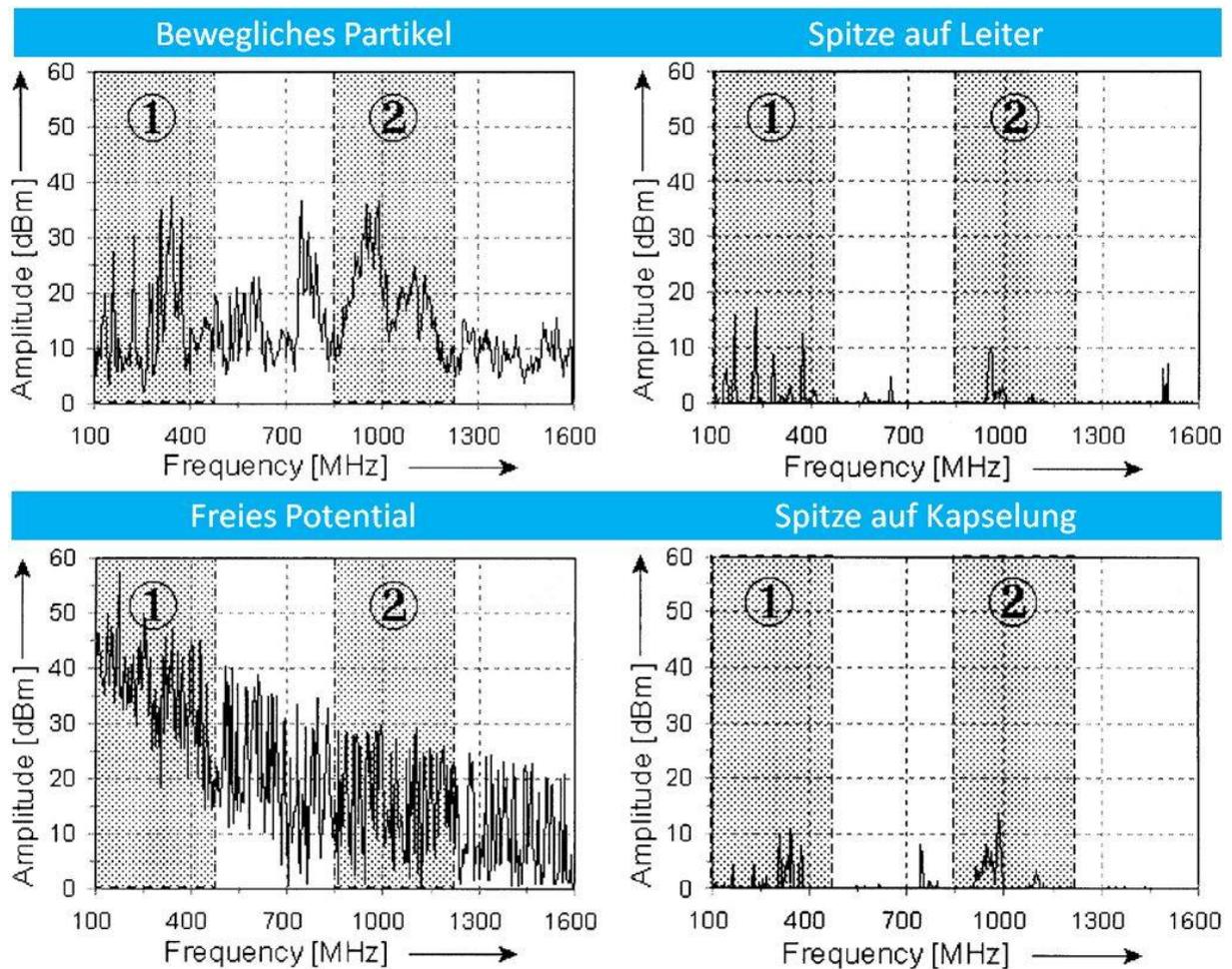


Abb. 35: Rauschbereinigte Spektren von vier typischen Fehlerarten bei gleicher Konfiguration der Messung, der gewählte niedrige (1) und hohe (2) Frequenzbereich ist jeweils markiert [16]

Zum besseren Vergleich wurden in den Spektren in Abb. 35 ein niedriger (100-475MHz) und ein hoher Frequenzbereich (850-1225MHz) gewählt. Der Spektralgehalt des beweglichen Partikels ist relativ dicht und im Vergleich zu den fixierten Defekten deutlich höher. Bei freien Potentialen nimmt die Amplitude mit steigender Spannung ab. Im Spektrum Spitze auf Leiter sind die Amplituden im niederen Frequenzband höher als jene der Spitze auf der Kapselung. Beim höheren Frequenzband tritt eine Umkehrung der Werte auf. Das kann anhand der vereinfachten Darstellung von durch Spitzen ausgelösten elektromagnetischen Wellen erklärt werden. Befindet sich die Spitze am Leiter, so sind TEM-Wellen (niedrige Frequenzen) dominant, während höhere Moden (höhere Frequenzen) bei Defekten an der Kapselung leichter angeregt werden (Abb. 36). [16]

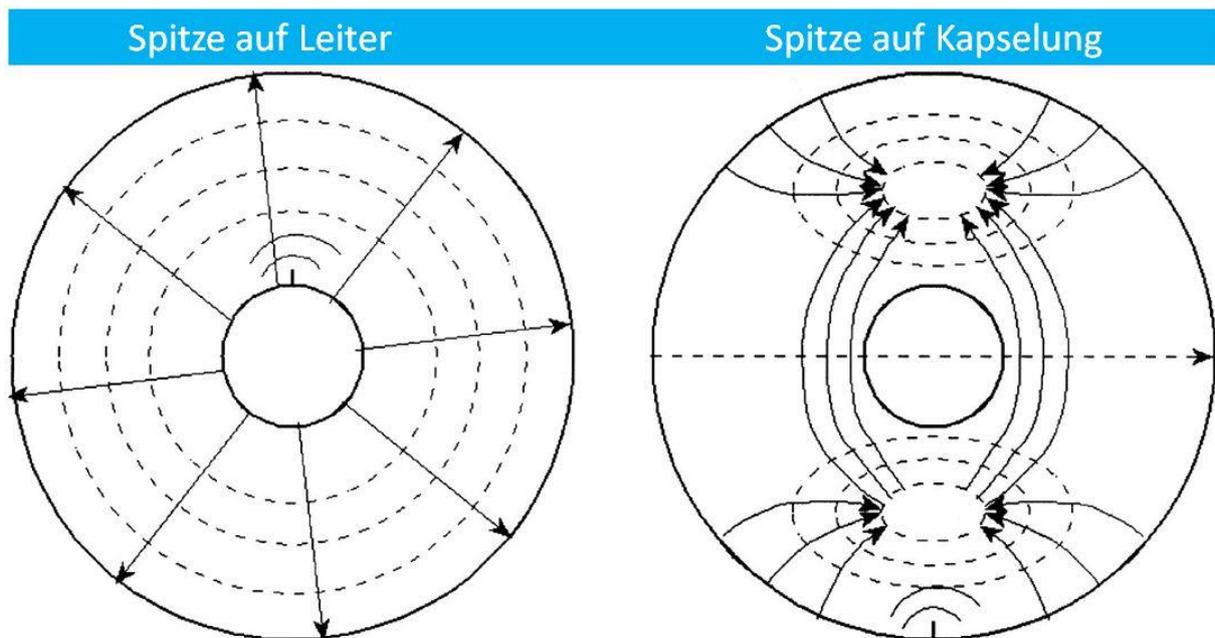


Abb. 36: Anregung von Wellenmoden; Links: Spitze auf Leiter, niederfrequente TEM-Welle; Rechts: Spitze auf Kapselung, höhere Wellenmoden können sich leichter ausbreiten [16]

Eine Möglichkeit weitere Vergleiche anzustellen ist, die Defekte hinsichtlich ihrer Amplitudenhöhe in den gewählten Frequenzbereichen gegenüberzustellen. Die Defekte werden danach sortiert, in welchem Frequenzbereich (vgl. Abb. 35) ihr Spektralgehalt höher ist. Für eine bessere Aussagekraft können die Frequenzspektren einer statistischen Analyse unterzogen werden. [16]

4.2.2. Ortung beweglicher Partikel

Die häufigsten Fehler in gasgekapselten Anlagen sind bewegliche Partikel. Sie können durch Abnutzung von Schaltelementen oder mechanische Arbeiten beim Zusammenbau entstehen und ins Innere der Anlage gelangen. Man unterscheidet zwischen länglichen (span- oder drahtartigen), sphärischen und staubartigen leitfähigen Metallpartikeln. Die Ortung kann sowohl im Zeitbereich mit einem digitalen Oszilloskop (vgl. Kap. 2.3.) als auch im Frequenzbereich mit einem Spektrumanalysator durchgeführt werden.

Für die Ortung durch Interferenzmessung werden drei Leistungsspektren aufgenommen, die Signale von zwei Sensoren und die überlagerten Sensorsignale beider betrachteten Signale. Für dieses Verfahren müssen die Signalveränderungen durch Dispersion klein gehalten werden. Die Dispersion ist bei niedrigen Frequenzen, wo die TEM-Welle vorherrscht, gering. Um die Interferenzen besser ermitteln zu können, misst man unterhalb der Grenzfrequenzen höherer Moden (TM- bzw. TE-Wellen). Das kombinierte Signal (Kosinusfunktion und überlagertes Signal) wird im Frequenzbereich dargestellt und nach sichtbaren Interferenzen untersucht. Im Interferenzbereich wird nun die Kosinusfunktion überlagert und man ermittelt den Frequenzabstand, der zur besten Übereinstimmung (Kovarianz) mit der Kosinusfunktion führt. Mithilfe der Wavelet-Transformation kann der gesuchte Frequenzabstand sichtbar gemacht werden. Der Frequenzabstand Δf kann dann in eine Zeitdifferenz Δt umgerechnet werden. [17]

Bewertung von TE-Messungen

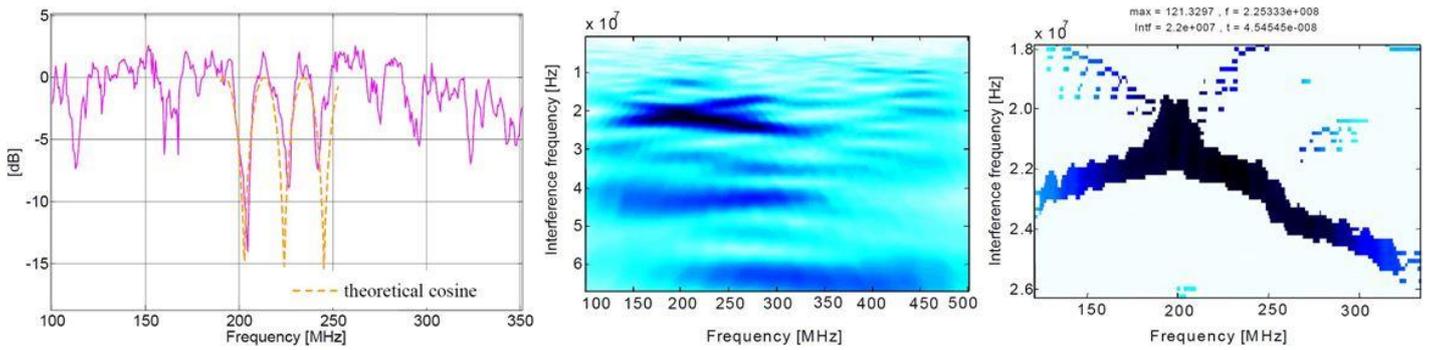


Abb. 37: Beispiel für Ortung durch Interferenzmessung; Links: Berechnete Kombination der Leistungsspektren mit Kosinusfunktion; Mitte: Wavelet-Transformation der Messung; Rechts: Detailansicht der Wavelet-Transformation mit Bestimmung des Maximums [17]

Je komplexer die zu untersuchende Anlage ist, desto aufwändiger wird die Auswertung der Messergebnisse im Frequenzbereich, da sich der Einfluss von Reflexionen und verschiedenen Moden durch die wechselnden geometrischen Verhältnisse stärker auswirkt. [17]

4.2.3. Variation des Gasgemischs

Aus verschiedenen Gründen kommen anstatt reinem Schwefelhexafluorid als Schutzgas vermehrt alternative Gase zum Einsatz. Die häufigste Variante ist, SF_6 mit Stickstoff zu mischen. An den UHF-Spektren kann man bei fixierten Defekten den Einfluss von Gasmischungen erkennen.

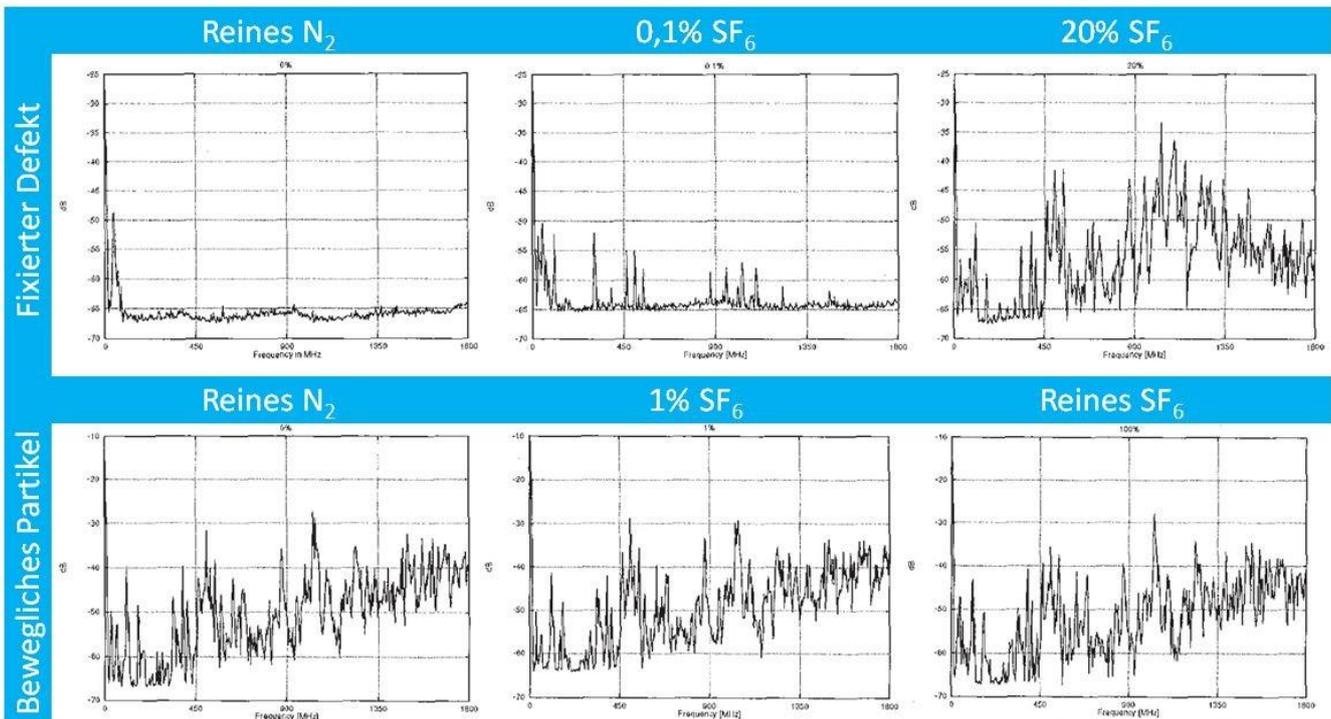


Abb. 38: Vergleich der UHF-Spektren bei Variation des N_2 - SF_6 -Gasgemischs; Unterschiede bei fixiertem Defekt und beweglichem Partikel (Ordinate bei fixiertem Defekt jeweils -70dB bis -25dB, bei beweglichem Partikel jeweils -70dB bis -10dB; Abszisse bei allen Spektren 0MHz bis 1800 MHz) [18]

Das UHF-Spektrum von frei beweglichen Partikeln ist unabhängig von der verwendeten Gasmischung und weist die höchsten Spitzen auf. Bei fixierten Defekten ist bei reinem Stickstoff kein UHF-Spektrum erkennbar, jedoch sind bereits bei 0,1% SF_6 spektrale Komponenten vorhanden. Bei N_2 - SF_6 -Gasmischungen mit 20% Schwefelhexafluorid ergeben sich die verwertbarsten UHF-Spektren. [18]

4.2.4. Kombination von konventioneller und UHF-TE-Messung

Je nach vorliegendem Fehlertyp gibt es einen starken oder schwachen Zusammenhang zwischen der UHF-Methode und der phasenaufgelösten Darstellung der konventionellen Messung. Im Labor können beide Methoden parallel durchgeführt werden.

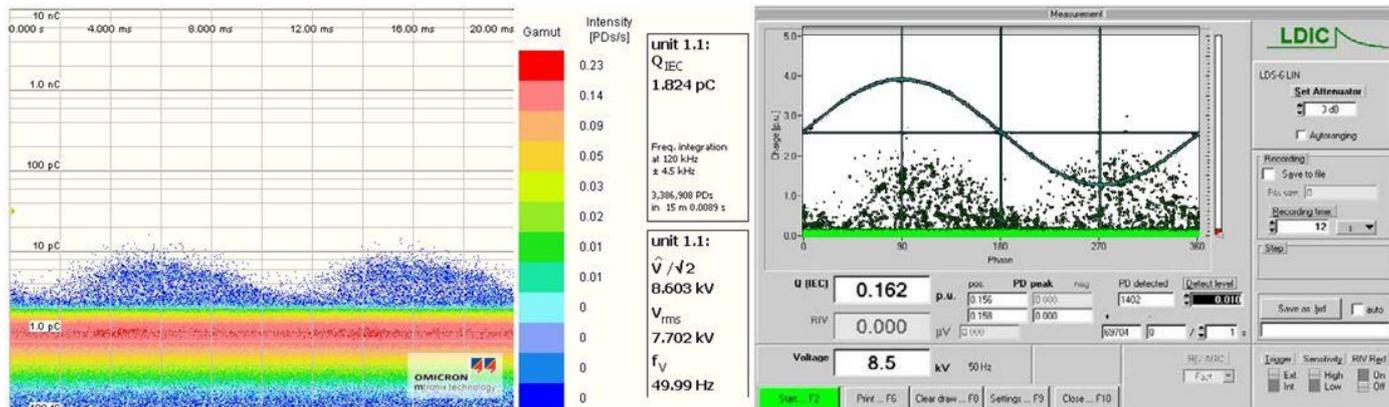


Abb. 39: Links: Messung eines beweglichen Partikels in Übereinstimmung mit IEC; Rechts: Aufzeichnung desselben Partikels mit der UHF-Methode [19]

In Abb. 39 sind die Messergebnisse der konventionellen TE-Messung und der UHF-Messung eines frei beweglichen Partikels nebeneinander dargestellt. Das charakteristische Muster eines beweglichen Partikels ist sowohl bei der phasenaufgelösten Darstellung der konventionellen Messung (links) als auch bei der Messung im UHF-Bereich erkennbar.

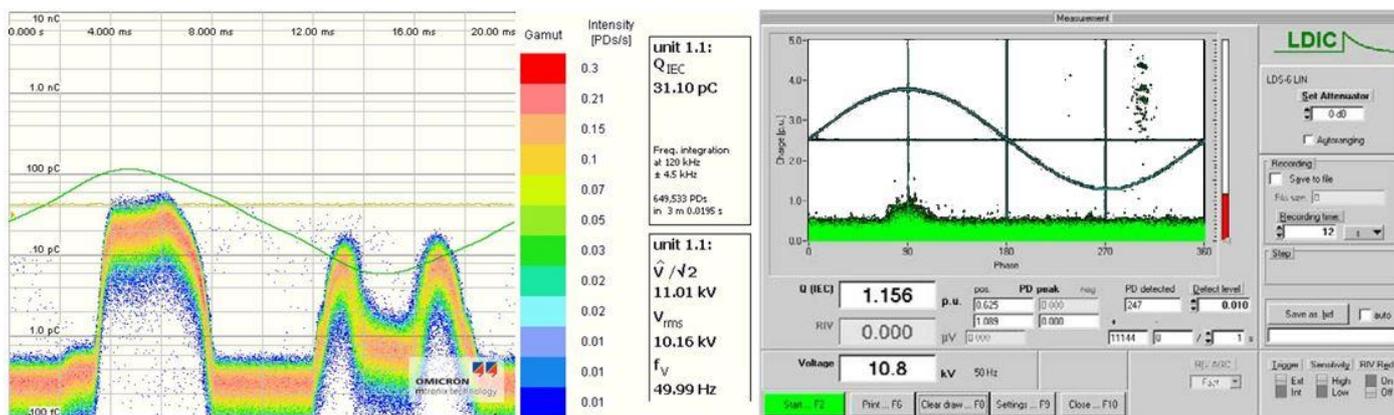


Abb. 40: Links: Konventionelle Messung von Spitze auf Leiter mit erhöhter TE-Intensität; Rechts: Aufzeichnung desselben Defektes mit der UHF-Methode [19]

Bei Spitzen auf Leiter oder Kapselung ist die messbare Signalintensität wesentlich niedriger. Erst bei höherer scheinbarer Ladung sind Teilentladungen in der UHF-Anzeige wahrnehmbar. Der Fingerprint der konventionellen Messung ist in diesem Fall nicht direkt mit dem Ergebnis der Messung im UHF-Bereich vergleichbar. In der zweiten Halbwelle der UHF-Messung (Abb. 40 rechts) sind deutlich höhere Signalanteile zu erkennen, während das Signal der konventionellen Messung eine vergleichbare Amplitude besitzt. Der Grund dafür ist, dass die geringe Bandbreite der im Vergleich zum beweglichen Partikel weniger persistenten Koronaentladung an der Spitze der Anordnung die

Detektion im UHF-Bereich erschwert. Diesen Umstand kann man zur Bestimmung der Empfindlichkeit eines UHF-Messsystems nutzen. [19]

Mit den Erfahrungswerten aus dem Labor, wo beide Methoden parallel zur Anwendung kommen, kann bei der Inbetriebnahme der Anlage auf die Ergebnisse der UHF-Messung zurückgegriffen werden, um TE-Quellen zu identifizieren.

4.3. Antennendesign

Wie bereits in Kap. 3.3. erwähnt, gibt es einige wichtige Parameter für interne UHF-Feldsonden, um der Teilentladungsidentifikation und Lokalisierung zu genügen. Je nach Fehlertyp sind die Frequenzspektren der Teilentladungsmessung derart unterschiedlich, dass die Begrenzung der Messung auf ein bestimmtes Band nicht ausreicht. Hinzu kommen die wechselnden geometrischen Bedingungen und weitere Variablen, die großen Einfluss auf die Ausprägung der Spektren haben (vgl. Kap. 4.1.). Man muss die komplette Messkette in die Betrachtungen mit einbeziehen, da z.B. durch die Auswirkungen von schlechten Messkabeln das Nutzsignal einer guten Antenne falsch wiedergegeben werden kann. Da eine Sonde universell einsetzbar sein soll, ergeben sich einige beschränkende Designparameter. Vom Standpunkt der Hochfrequenztechnik stehen einige Parameter im Konflikt mit den Anforderungen der Hochspannungstechnik. Nach hochfrequenztechnischen Gesichtspunkten würden Antennen im UHF-Bereich für vorliegende Spektren anders entworfen, jedoch ist man durch die metallische Kapselung, der Notwendigkeit, die Antenne vor Überschlägen zu schützen, und der Vorgabe, das elektrische Feld nicht verzerren zu dürfen, im Antennendesign eingeschränkt.

4.3.1. Anforderungen Hochfrequenztechnik

Im Bereich zwischen 100MHz und 2GHz ist ein schmalbandiges Messen der hochfrequenten spektralen Anteile mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis sowohl unter Laborbedingungen als auch Vor-Ort möglich. Zahlreiche externe Störer wie z.B. Mobilfunk, Radar, Freiluftkorona oder Fernsehen senden überwiegend schmalbandig oder in niedrigeren Frequenzbereichen und daher ist die Auskopplung dieser Störungen einfach. [1] Bei Freiluftanwendungen von UHF-Antennen in diesem Frequenzband würde z.B. einer Mehrstabantenne der Vorzug gegenüber Plattenelektroden gegeben werden, da mehr Signalenergie aufgenommen werden könnte. Aufgrund der Umgebungsbedingungen (Schutzgas unter Druck, metallgekapselte Anlage, Hochspannung etc.) ergeben sich aber Einschränkungen in der Formgebung der Antenne.

Bei der vorliegenden Sonde ist man daher bemüht, die signalstarken Bänder mit dem Reflexionsfaktor der Sonde in Einklang zu bringen. Die Antennenwirkfläche der UHF-Sonde steht in der Regel 90° auf die Ausbreitungsrichtung der Wellen in einer GIL. Sind die signalstarken Frequenzbänder innerhalb des Messbereichs bekannt, so kann der Reflexionsfaktor der Antenne in

diesen Bereichen verbessert werden, um ein möglichst ungedämpftes bzw. reflexionsarmes Nutzsignal auskoppeln zu können. Eine Anpassung der Antenne ist durch einen niedrigen Reflexionsfaktor in den interessanten Frequenzbereichen des vorliegenden TE-Spektrums zu erreichen. Die Herausforderung liegt darin, dass je nach vorliegender Konfiguration die Spektren sowohl in Form als auch in Intensität völlig unterschiedlich sind. Die Einflussfaktoren auf die Spektren sind in Kap. 4.1. angeführt, wobei insbesondere die Art des Defektes, die Spannungsart bzw. -höhe und die Geometrie der Anlage die Beschaffenheit des Spektrums bestimmen. Bei der Formgebung der Antenne muss also ein Kompromiss gefunden werden, damit die Sonde universell einsetzbar ist.

4.3.2. Anforderungen Hochspannungstechnik

Die wichtigsten hochspannungstechnischen Ansprüche an eine interne UHF-Sonde sind:

- Feldsensor darf das elektrische Feld nicht beeinflussen
- Antenne muss gegen Überschläge geschützt sein
- Im relevanten Frequenzbereich muss die Messempfindlichkeit ausreichend sein, um TE-Signale zuverlässig auskoppeln zu können
- Die Montage darf nicht zu kompliziert sein, es müssen auch ältere GIS/GIL nachgerüstet werden können

Wie bereits in Kap. 3.2. erwähnt, sind die verwendeten UHF-Sonden potentialfreie Elektroden, deren Messfläche als Antenne zu betrachten ist. [8] Ist keine Messeinrichtung angeschlossen, verhindern der Widerstand und der Kondensator im Adapter der Sonde eine unzulässig hohe betriebsfrequente Wechselspannung. [11] Durch Schaltvorgänge (meist durch Trenner, seltener durch Leistungsschalter) oder Erdschlüsse kann es in gasisolierten Systemen zu transienten Überspannungen kommen. Die Schalthandlungen führen zu Vor- und Rückzündungen, wobei die Rückzündungen von der Geschwindigkeit der Schaltkontakte bestimmt werden. Die Überspannungen beeinflussen alle angeschlossenen Betriebsmittel. An den Übergängen zu Kabeln oder Freileitungen entstehen lokale Überspannungen durch die Änderung der Impedanzverhältnisse, daher muss das Erdungssystem entsprechend ausgelegt werden. [20] Für den sicheren Betrieb müssen die Sonden daher gegen Überschläge und transiente Spannungen geschützt sein.

Die Sonde darf nicht übermäßig in den Gasraum hineinragen oder durch Spitzen und nicht abgerundete Kanten Feldverzerrungen hervorrufen. Durch den Einbau in ausgeweitete Flanschöffnungen ist dies bei Plattenelektroden gewährleistet.

4.3.3. Zusammenfassung der Anforderungen

Für ein sinnvoll überarbeitetes Antennendesign müssen unabhängig von den genauen Spezifikationen folgende Punkte erfüllt werden können:

- Alle vorkommenden Defekte müssen messbar und identifizierbar sein
- Sicherer Betrieb
- Muss bei Gleich- und Wechselspannung gleichermaßen funktionieren
- Unempfindlich gegen interne/externe Störer
- Nutzsignal muss unverzerrt an das Messgerät weitergegeben werden

Um einen Kompromiss zu finden werden die Anforderungen an die UHF-TE-Messung aus den unterschiedlichen Perspektiven gegenübergestellt. Die bei Hochspannung auftretenden gemessenen TE-Spektren müssen aussagekräftig und die Antenne möglichst angepasst sein. Gleichzeitig muss ein sicherer Betrieb der Sonde gewährleistet werden können.

Eine Übereinstimmung der Anforderungen kann nicht nur bei der Plattenelektrode gefunden werden. Eine Hornantenne, die auf dieselben Flanschöffnungen aufgesetzt werden kann, würde die vorgegebenen Bedingungen erfüllen.

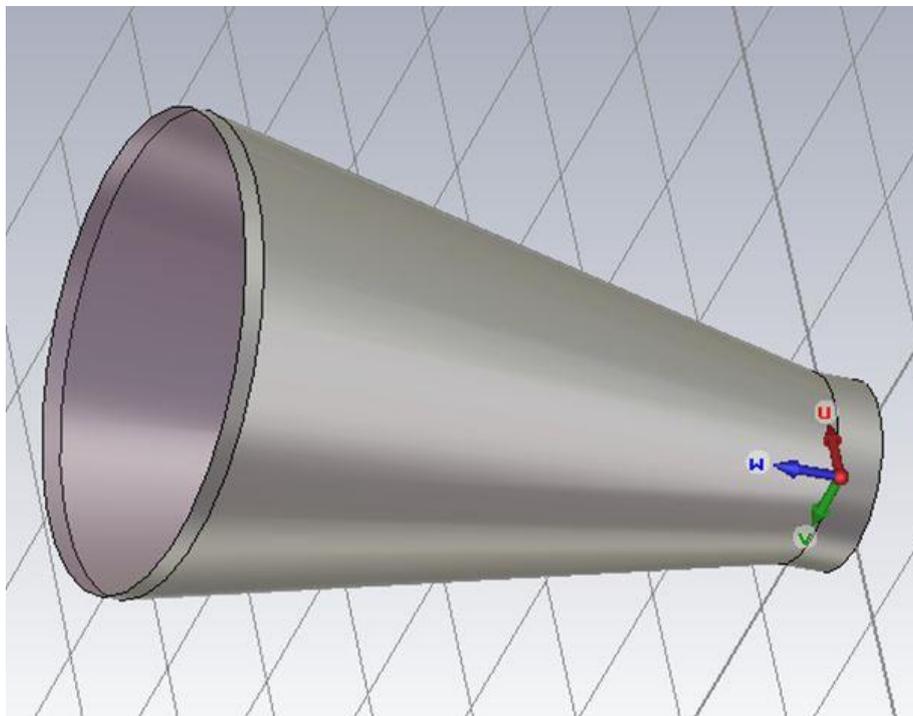


Abb. 41: Beispiel für eine dielektrisch gefüllte Hornantenne [21]

Mit einer dielektrisch gefüllten Hornantenne, bei der alle Metallflächen auf Masse sind, kann eine große Bandbreite erzielt werden. Es gibt nur wenige Designparameter, sodass sie für bestehende Flanschgrößen adaptiert werden kann. Die Hornantenne ist gasdicht durch die Füllung mit dem

Dielektrikum. Die untere Grenzfrequenz wird durch den Waveguidedurchmesser und das Dielektrikum bestimmt, die Anpassung erfolgt über die Hornlänge. [21]

Da die aktiven Flächen nicht in den Gasraum eindringen, ist mit keinen Feldverzerrungen zu rechnen. Für die Verwendung in GIS/GIL müssen jedoch weitere Faktoren neben der Signalauskopplung betrachtet werden. Bei den Plattenelektroden wird die Verbindung zwischen aktiver Messfläche und N-Buchse durch einen kleinen Spalt in einem Metalldeckel realisiert. Bei einer Hornantenne ist die Messfläche zwar ähnlich groß wie bei den üblichen Scheibensonden, jedoch kann die Kapselung nicht direkt hinter der aktiven Messoberfläche erfolgen, sondern erst am hinteren Ende der konusförmigen Hornantenne abgeschlossen werden. Die Hornantenne muss sich daher in einer ebenso konisch geformten Metallkapselung befinden, die gasdicht ist und den erhöhten Drücken standhält. Durch Anpassungen am Dielektrikum muss die Auskopplung nicht zwingenderweise mit der üblichen 50 Ω -Technik erfolgen, in irgendeiner Form muss jedoch ein Überspannungsschutz gegeben sein. An der Sonde müssen eventuell auftretende Überspannungen begrenzt werden, ohne dass die Begrenzungsschaltung den Betrieb beeinflusst. Sie darf zudem das Auskoppeln von hochfrequenten Signalen nicht behindern oder beeinflussen. Eine Hornantenne benötigt eine gewisse Länge, dadurch kann auch ein Platzproblem beim Einbau bzw. beim Nachrüsten entstehen.

5. Messaufbau und Vorbereitung

Alle Messungen wurden bei einem Teilstück einer GIL durchgeführt, die aus einer Durchführung und einem Leiterabschnitt mit Kugelabschluss zwischen zwei Winkelementen, in deren Flanschöffnungen die UHF-Sonden integriert sind, besteht. Bei den durchgeführten Messungen stand die Aufzeichnung der UHF-TE-Spektren im Vordergrund, parallel dazu wurde die klassische TE-Messung nach IEC 60270 zu Vergleichszwecken durchgeführt. Da zwei UHF-Sonden am Aufbau vorhanden sind, wurde bei der zweiten Sonde ein gebräuchliches UHF-TE-Monitoringsystem verwendet. Die Messungen wurden mit Gleichspannung durchgeführt, einzelne Punkte wurden zu Vergleichszwecken auch mit Wechselspannung gemessen. In diesem Kapitel wird die Versuchsvorbereitung beschrieben und die Vorgangsweise bei den Messungen erklärt.

5.1. Messaufbau

Die verwendeten Hochspannungskaskaden werden in Position gebracht und über die Zentralelektrode mit dem Prüfaufbau verbunden.

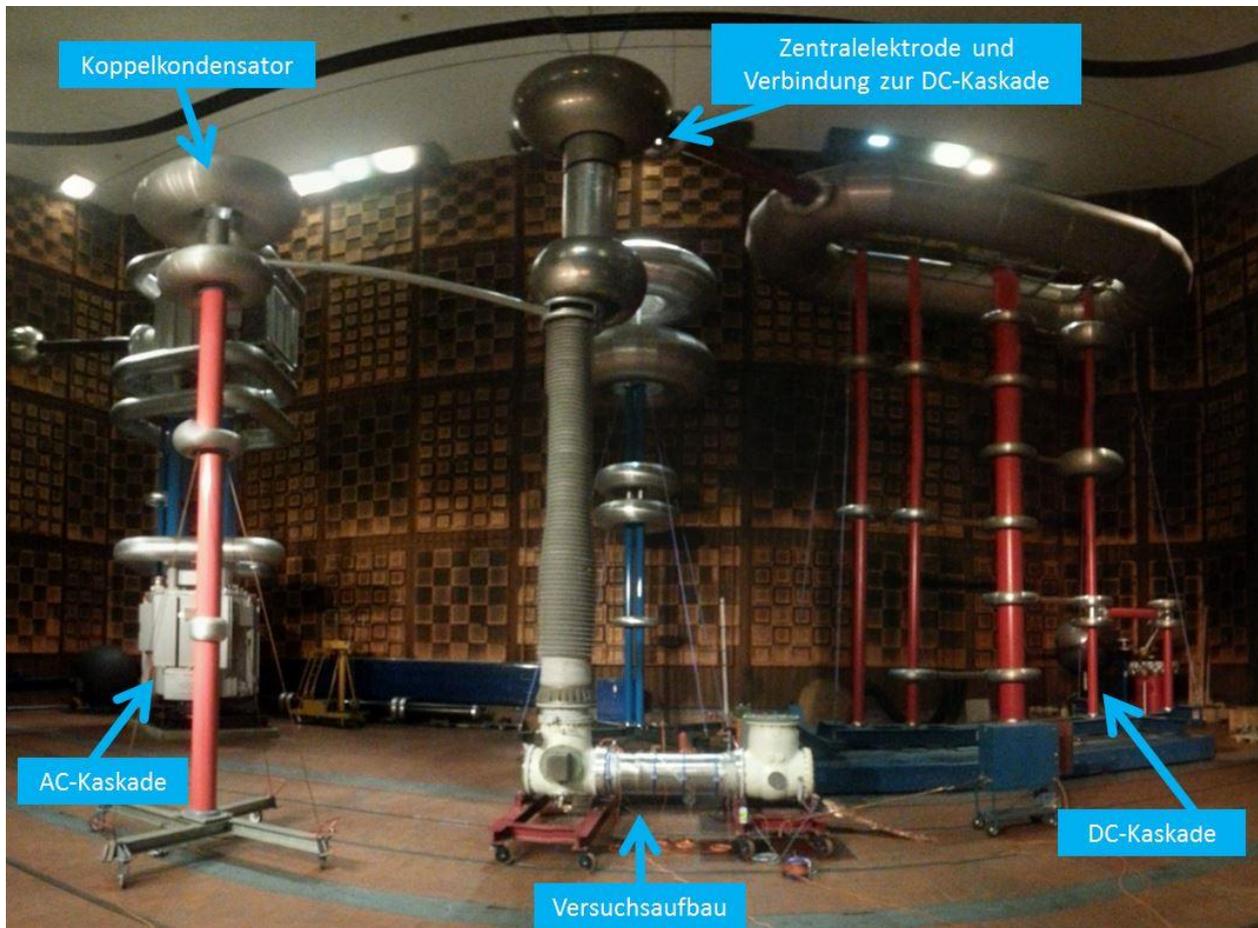


Abb. 42: Verwendeter Prüfaufbau bei DC

Der Prüfaufbau besteht aus zwei getrennten Gasräumen. Die Durchführung und das darunter verbaute Winkelement mit UHF-Sonde bilden einen Gasraum, der während der gesamten Versuchsreihe nicht geöffnet wurde. Während der Versuche war dieser Gasraum immer mit 0,73MPa SF₆ gefüllt. Wenn das Rohr vom Winkelstück mit der Durchführung abmontiert werden musste, z.B. beim Einbringen von Defekten oder beim Reinigen des Aufbaus, musste der Druck im Gasraum aus Sicherheitsgründen auf leichten Überdruck (0,13MPa) gemindert werden. Das Gasschott zwischen den beiden Gasräumen ist ein Stützisolator, welcher das Leiterrohr in den benachbarten Bereich der GIL überführt. Die Defekte wurden ausschließlich in das Verbindungsrohr zwischen den Winkelementen eingebracht. Außer bei einer Versuchsreihe wurde der zweite Gasraum immer auf 0,4MPa SF₆ gefüllt. Der Versuchsaufbau verfügt über drei Sichtfenster im rechten Winkelstück (Abb. 42). An der Front des Winkelstücks ist eine temperaturüberwachte Beleuchtung aus mehreren LED-Leisten angebracht, die von außen bedient wird. Am Rohr wurde eine von außen verstellbare Nadel als Defekt eingebaut, die bis zu 60mm aus der Kapselung herausragen kann und komplett einfahrbar

ist. Zwei Ventile auf dem Rohr stellen die Partikelschleuse dar, mit der die Partikel gezielt ins Innere der GIL gelangen können. Über diesen Anschluss kann der Gasraum auch befüllt werden.

5.1.1. Versuchsaufbau

Im folgenden Bild wird der schematische Aufbau der Anlage und dessen wichtigsten Komponenten veranschaulicht.

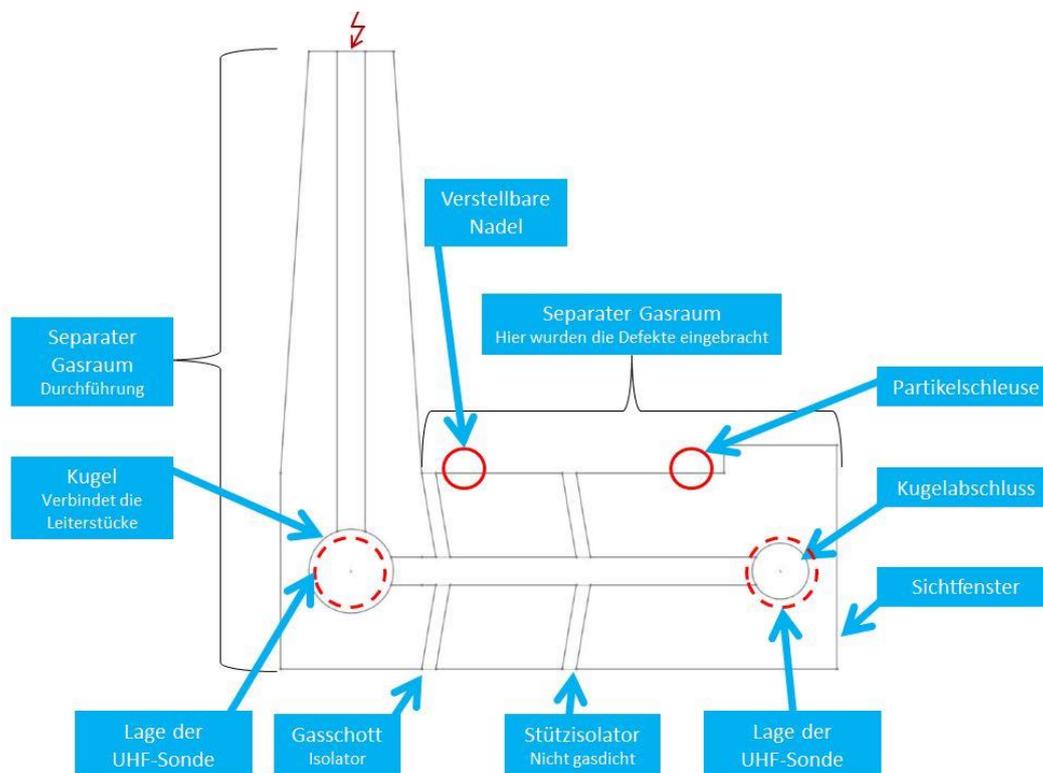


Abb. 43: Schematischer Aufbau und wichtigste Komponenten der Anlage

Für den Aufsatz der verstellbaren Nadel (Abb. 44) wurde in eine Öffnung im Rohr verwendet.



Abb. 44: Detailansicht der von außen verstellbaren Nadel

Messaufbau und Vorbereitung

Durch diese Vorrichtung kann ein definierter, ortsfester Defekt in Form einer Nadel in die GIL eingebracht werden, ohne die Anlage öffnen zu müssen. Während den Messungen wurde die Nadel mit einem Kupferseil geerdet, da die Nadel aufgrund der Teflondichtung der Klemmringverschraubung keinen leitfähigen Kontakt zur Kapselung besitzt.

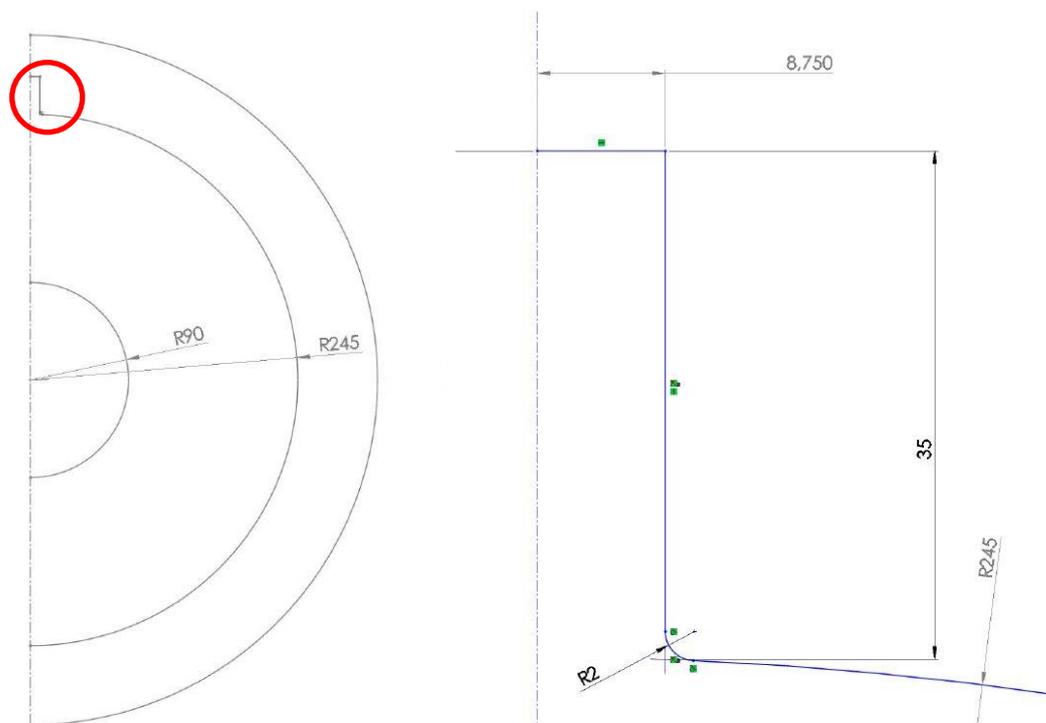


Abb. 45: Abmessungen von Leiter und Rohr sowie des Rundlochs bei eingefahrener Nadel (Leerlauf)

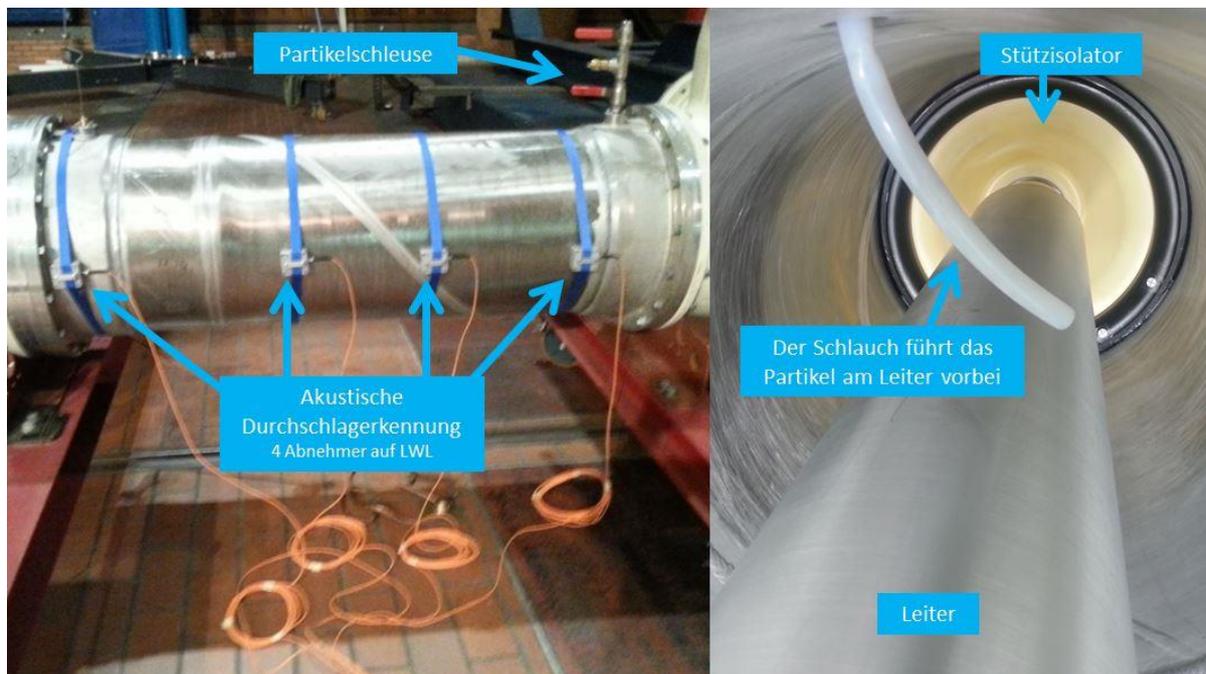


Abb. 46: Außen- und Innenansicht des Rohres mit akustischen Sensoren und Partikelschleuse

Messaufbau und Vorbereitung

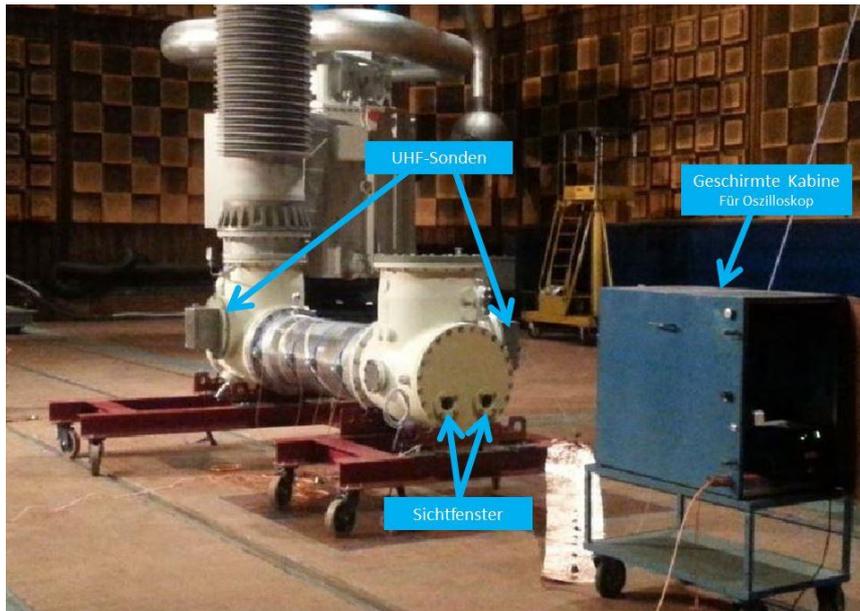


Abb. 47: Andere Ansicht der Anlage inklusive geschirmter Kabine für Oszilloskop und USV

In Abb. 47 sind die beiden an der Front angebrachten Sichtfenster und die beiden Flanschbauten für die UHF-Sonden zu erkennen. Der Aufbau ist auf einer rollenden Plattform aufgebaut und wird an drei Punkten mit Kupferfolie oder Kupferseil geerdet. Das digitale Oszilloskop, das für die Aufzeichnung der TE-Signale verwendet wurde, befand sich zusammen mit einer USV in der im Bild sichtbaren geschirmten Kabine.

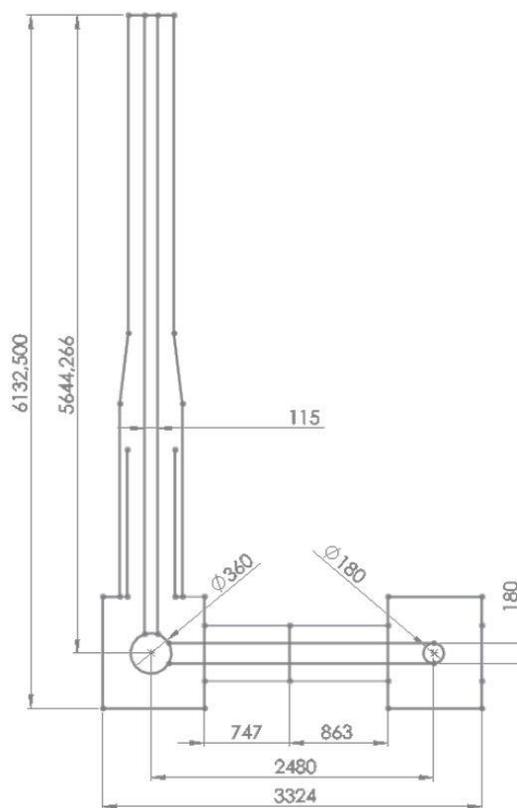


Abb. 48: Die wichtigsten Abmessungen der Anlage (in mm)

In Abb. 48 sind die relevantesten Abmessungen der Prüfanordnung angegeben. Die Kenntnis der Geometrie und der Positionen der Stützisolatoren sind unter anderem für die Ausbreitung von Wanderwellen und der Anregung von höheren Wellenmoden von Interesse.

5.1.2. Messsysteme

Bei den Versuchen kamen mehrere Messsysteme parallel zur Anwendung. Neben der konventionellen TE-Messung und der Aufzeichnung der UHF-Signale über das digitale Oszilloskop wurde ein gebräuchliches UHF-Monitoringsystem bei der zweiten Sonde angeschlossen. Zusätzlich wurden entlang des Rohres vier akustische Sensoren zur Durchschlagererkennung angebracht.

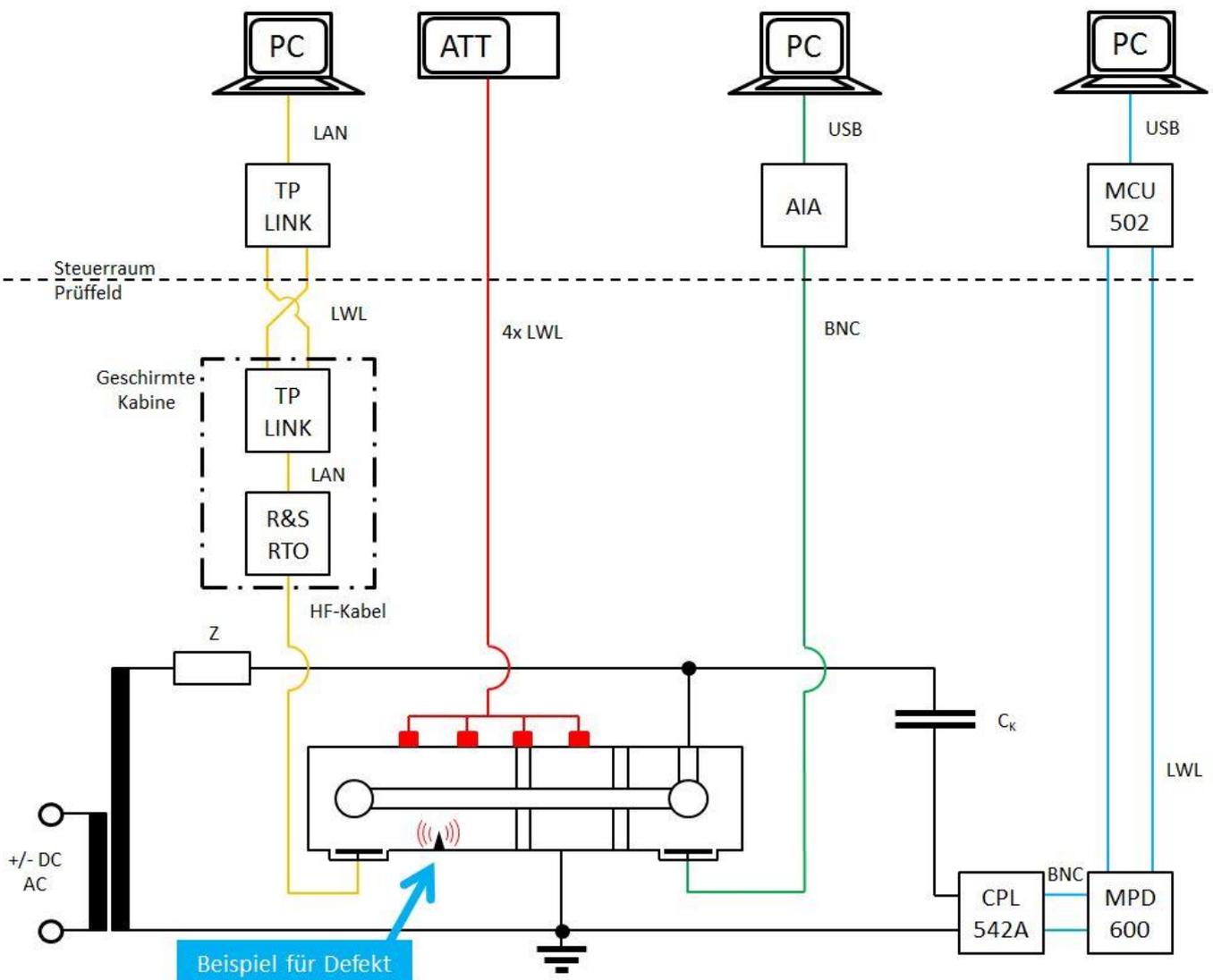


Abb. 49: Prinzipieller Aufbau der Messsysteme am Versuchsaufbau

Messaufbau und Vorbereitung

Folgende Bereiche des Messaufbaus in Abb. 49 sind farblich getrennt:

- Orange: Messung des UHF-Signals
- Rot: Akustische Durchschlagerkennung
- Grün: UHF GIS-Monitor
- Blau: Konventionelle Messung

Für die konventionelle Teilentladungsmessung wurde das MPD 600 System von Omicron verwendet. Die Anzeige der Messergebnisse erfolgt über eine eigene Software, die neben der Erfassung und Analyse noch die Möglichkeit der Aufzeichnung bietet. Der Auskoppelvierpol CPL 542A ist per BNC-Kabel mit der akkubetriebenen Messeinheit MPD 600 verbunden, welcher das elektrische Signal in ein optisches umwandelt. Die Kontrolleinheit MCU 502 wandelt das Signal der Lichtwellenleiter wieder in ein elektrisches Signal um und gibt es an den Rechner weiter, wo es von der Software verarbeitet wird. Vor jeder Messreihe, bzw. wenn am Aufbau etwas verändert worden ist, muss die Messung kalibriert werden (vgl. Kap. 2.2.). Hierfür wird parallel zum Prüfaufbau ein Signal von einem Kalibrator eingespeist, dessen Wert dann softwaremäßig übernommen wird. Man sollte etwa auf die Werte kalibrieren, mit denen man rechnet. Falls nicht anders angegeben, wurde immer auf 20pC kalibriert. Die Aufzeichnung der Teilentladungsimpulse und der dazugehörigen Ein- und Aussetzspannung erfolgt durch Streams.

An der zweiten UHF-Sonde im Gasraum der Durchführung wurde ein BNC-Kabel angeschlossen und mit dem UHF-TE-Messgerät AICompact des Herstellers Power Diagnostix verbunden. Diese Überwachungseinheit gibt per USB die Signale an einen Rechner weiter, wo mit der GISmonitor-Software bis zu acht Sensorsignale gleichzeitig angezeigt werden können. Diese Messung wurde zu Vergleichszwecken mit den anderen Messsystemen durchgeführt.

Vier akustische Sensoren entlang des Rohres dienen der akustischen Durchschlagerkennung. Über vier LWL werden die umgewandelten akustischen Signale an das Anzeigegerät ATTAnalyzer der Firma Power Diagnostix weitergegeben. Falls es bei den Messungen mit den Defekten zum Durchschlag kommt, kann mit diesem System der Ort des Durchschlages erkannt werden. So ist eine Differenzierung möglich, ob der eingebrachte Defekt, dessen Position man kennt, der Auslöser für den Durchschlag war, oder ob es im Aufbau noch z.B. Verunreinigungen oder Partikel gibt, die den Durchschlag eingeleitet haben.

Mit dem digitalen Oszilloskop RTO1044 des Herstellers Rhode und Schwarz sind 10 Gigasamples pro Sekunde möglich. Das Gerät misst, im Gegensatz zu einem Spektrumanalysator, die transienten UHF-Signale im Zeitbereich. Erst in der Nachbearbeitung werden aus den Aufzeichnungen die Spektren erstellt. Das hochempfindliche HF-Kabel von der N-Buchse zum Oszilloskop wurde durch ein

Kupferrohr zusätzlich geschirmt. Das Oszilloskop konnte über ausgekreuzte LWL vom Steuerraum fernbedient werden. Je nach Defekt, TE-Intensität oder Polarität waren Adjustierungen beim Rauschpegel und beim Trigger nötig.

5.1.3. Verwendete UHF-Sonde

Die beiden Sonden im Aufbau sind Feldsonden der Firma Siemens Typ 926 98850 174 B. Vor den Messungen im Hochspannungslabor wurde die Sonde vom Institut für Hochfrequenztechnik untersucht.

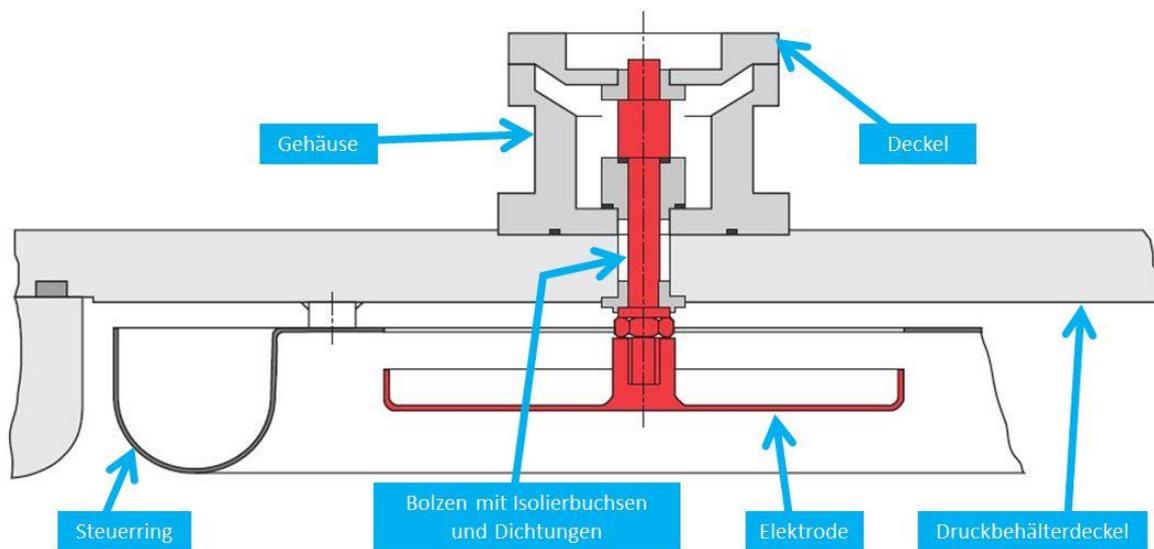


Abb. 50: Aufbau der Feldsonde [11]

In der obigen Abbildung wird der Aufbau der Feldsonde beschrieben, der im Gehäuse befindliche Überspannungsableiter ist nicht abgebildet. Diese Sonde kann auch als kapazitiver Spannungsteiler (mit VFT-Abgriff) oder zur Gleichspannungsmessung (mit VFT-Abgriff und DC-Kondensator) verwendet werden. Zur Verwendung als Teilentladungsdetektor ist ein TE-Adapter notwendig.

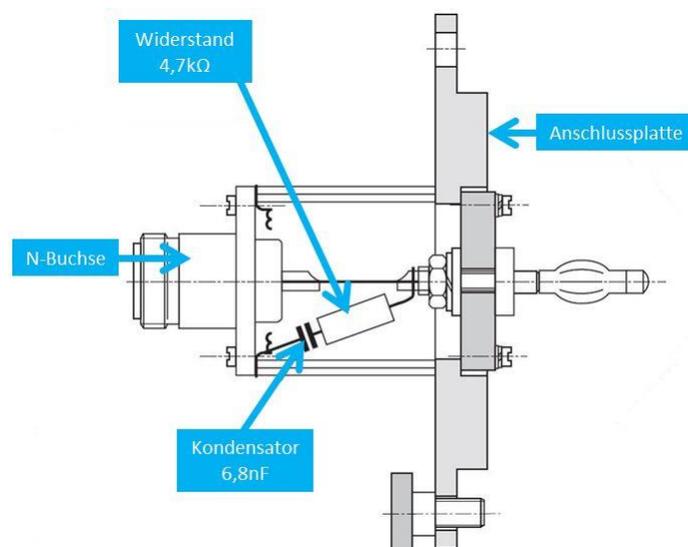


Abb. 51: Teilentladungsadapter, wird auf das Gehäuse der Sonde geschraubt [11]

Messaufbau und Vorbereitung

Auf die Funktion des Teilentladungsadapters ist bereits in Kap. 3.2. und Kap. 4.3.2. eingegangen worden. Er wird auf den Anschluss der Sonde aufgeschraubt. Als Dämpfung werden 2 bis 2,5dB angegeben, wobei auf eine zusätzliche Dämpfung durch Brechung und Reflexion an den Stoßstellen innerhalb der Anlage hingewiesen wird. [11]

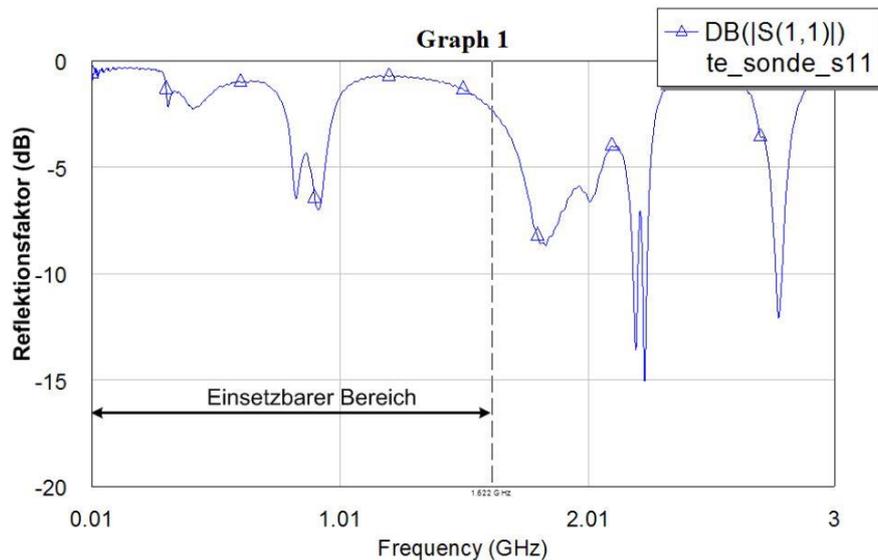


Abb. 52: Reflexionsfaktor der UHF-Feldsonde [22]

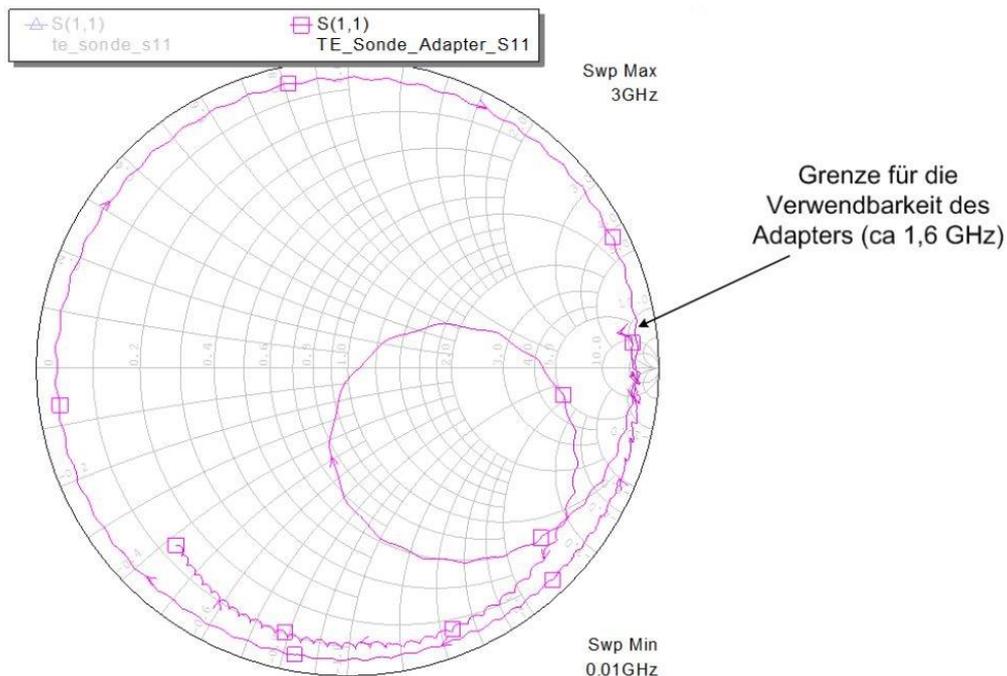


Abb. 53: Smith-Diagramm des TE-Adapters der Sonde [22]

In den obigen Abbildungen sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Sonde und des Adapters dargestellt. Für die Grenze der Verwendbarkeit des Adapters wurden 1,6GHz ermittelt. Der Reflexionsfaktor der Sonde ist nur im Bereich von ca. 770MHz bis 930MHz brauchbar. Im Allgemeinen ist der verwendete Feldsensor nicht als besonders hochwertig bzgl. seiner Eigenschaften im UHF-Bereich einzustufen. [22]

5.2. Aufgabenstellungen

Zunächst wurden die Spektren von charakteristischen teilentladungsverursachenden Fehlerquellen bei Gleich- und Wechselspannung aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Referenzmessung und das Wissen um die Beschaffenheit der Spektren fließen in die Simulation der gasisolierten Anlage ein. Nach der Auswertung der ersten Messreihe konnten die Einstellungen des Oszilloskops optimiert werden. Bei der abschließenden Messreihe wurde ein bestimmter Defekt an mehreren Stellen im Aufbau positioniert, um die Auswirkung von höheren Moden in der GIL zu untersuchen.

5.2.1. Defekte

Mit folgenden charakteristischen Defekten wurden die Messungen am Prüfaufbau durchgeführt:

- Spitze auf Leiter
- Spitze auf Kapselung
- Verstellbare Nadel auf Kapselung (vgl. Kap. 5.1.1.)
- Bewegliche Partikel unterschiedlicher Größe

Es wurde, noch vor der Einbringung der Defekte, eine Leerlaufmessung durchgeführt, um den Grundstörpegel bei den vorgesehenen Spannungen zu bestimmen. Durch Ausblendung von regelmäßigen, offensichtlich externen Störern konnte die konventionelle Messung hinsichtlich IEC 60270 auf Werte unter einem Pikocoulomb optimiert werden.

5.2.2. Arbeitsschritte

Bei einer Änderung der Anordnung oder beim Wechseln der Defekte sind folgende, teilweise zeitintensive, Arbeitsschritte zu tätigen:

- Gas rückspeichern auf 4 bis 5kPa
- Belüften
- Aufbau öffnen
- Partikel bzw. Defekte entfernen
- Reinigen, zuerst grob (Staubsauger), dann mit Azeton flächig reinigen
- Gereinigte Defekte für die nächste Messreihe einbringen und positionieren
- Nochmals mit Azeton reinigen
- Aufbau verschließen
- Evakuieren auf unter 100Pa
- Aufbau mit SF₆ befüllen, wenn nicht anders angegeben immer auf 0,4MPa
- Nach Bedarf kalibrieren

Besonders nach den Versuchen mit beweglichen Partikeln ist das genaue Reinigen des Versuchsaufbaus wichtig. Befinden sich im Aufbau noch Partikel, die dann zusammen mit dem neuen

Defekt aktiviert werden, so sind die Messergebnisse aufgrund von Mehrfachfehlern nicht verwertbar. Vom Ende einer Messreihe bis mit einem neuen Defekt gemessen werden kann, vergehen durch die notwendigen Arbeiten je nach Reinigungsaufwand zweieinhalb bis drei Stunden. Daher wurde bei der zweiten Messreihe (vgl. Kap. 5.4.) der Ablauf optimiert.

5.3. Erste Messreihe

Bei der ersten Messreihe wurden verschiedene repräsentative Defekte vorbereitet, um deren UHF-Spektrum bei gleichen Umgebungsbedingungen aufzuzeichnen. Bei der ersten Prüfsérie kam zusätzlich eine akustische Durchschlagserkennung zum Einsatz, deren vier Abnehmer entlang der Kapselung angebracht wurden. Folgende Messungen wurden durchgeführt:

Messung / Defekt	Variation (in mm)
Leerlauf	
Nadel	0, 4, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60
Spitze auf Kapselung	6, 9
Spitze auf Leiter	6, 9
Bewegliche Partikel	4, 6

Tab. 6: Durchgeführte Messungen der ersten Messreihe

Die verstellbare Nadel wurde bereits in Kap. 5.1.1. beschrieben. Als Spitzen wurden unterschiedliche Schrauben verwendet, die per Magnet am Leiter bzw. an der Kapselung befestigt wurden. Aluminiumspäne dienten als bewegliche Partikel.

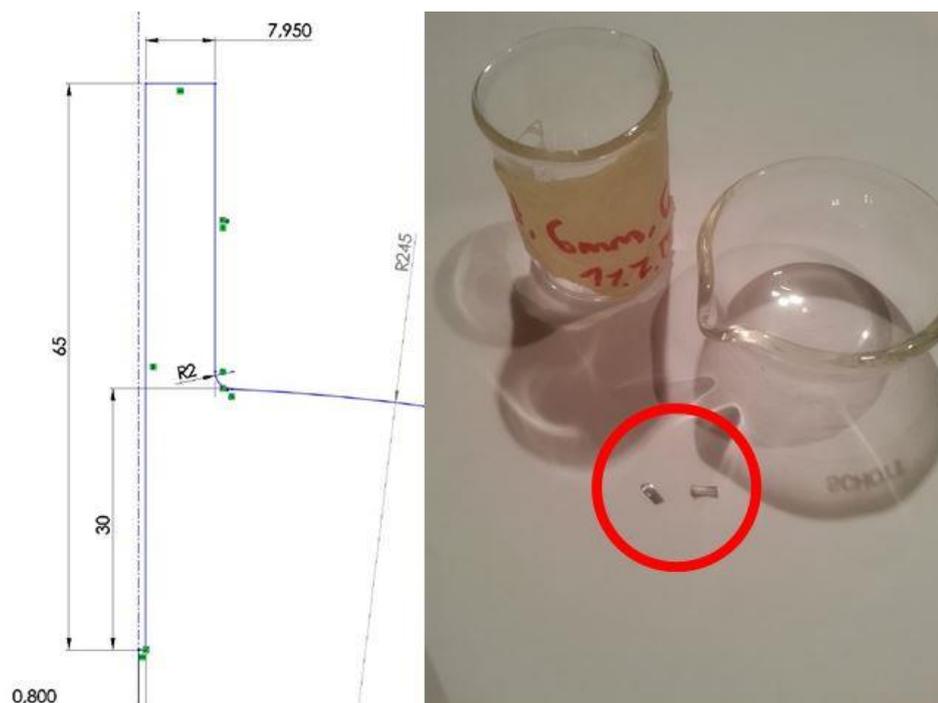


Abb. 54: Links: Abmessung der Nadel bei 30mm Eindringtiefe; Rechts: Beispiel für die verwendeten Aluminiumpartikel

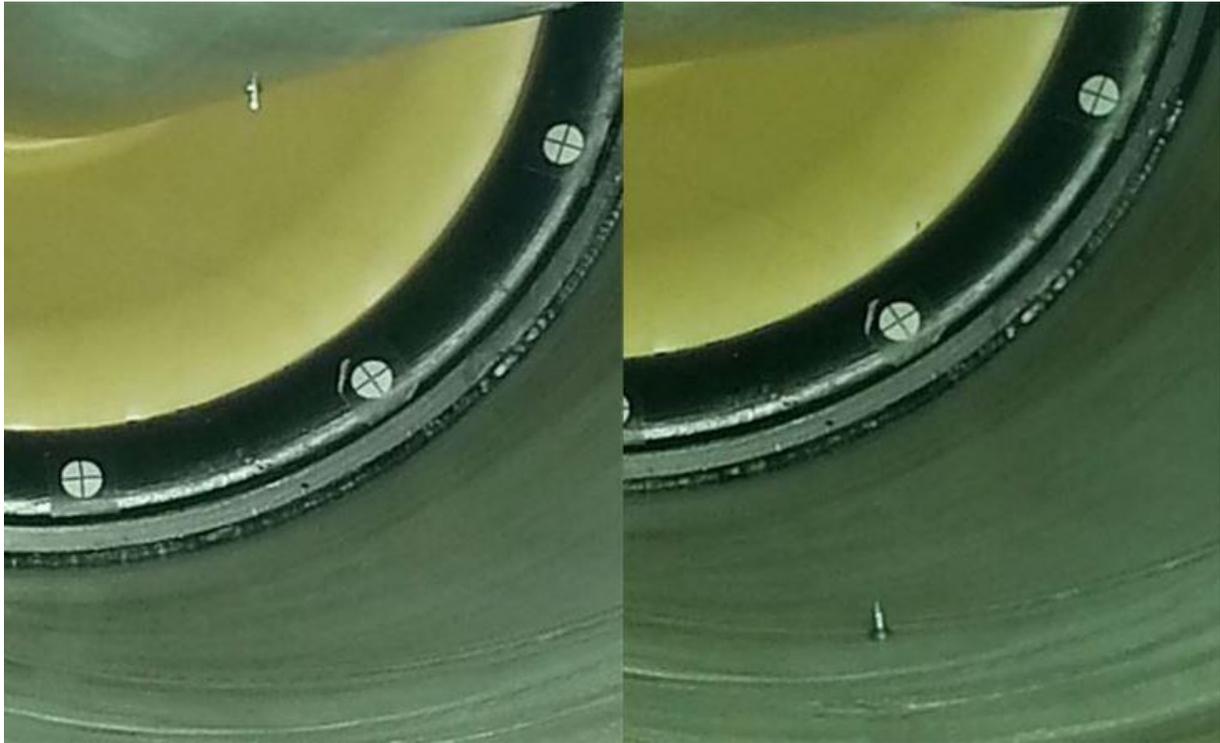


Abb. 55: Links: Spitze am Leiter; Rechts: Spitze auf Kapselung

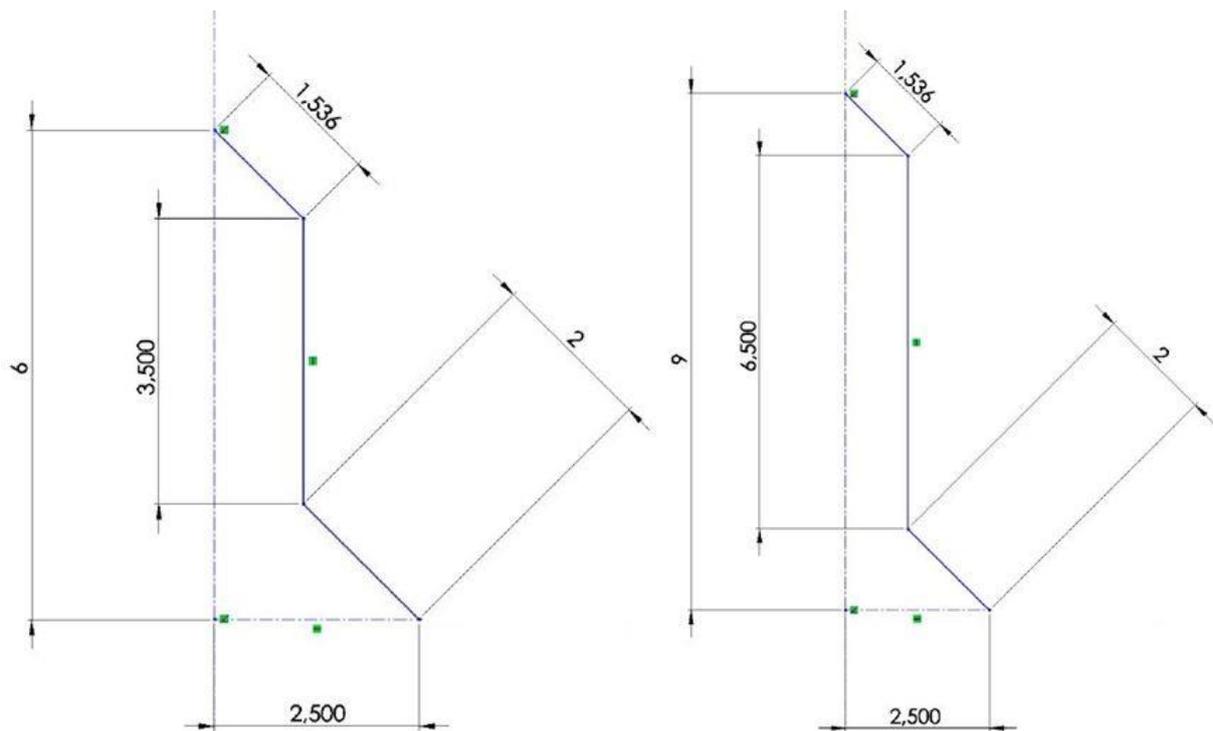


Abb. 56: Abmessungen der als Spitzen verwendeten Schrauben (in mm)

Beginnend mit der Leerlaufmessung wurden alle in Tab. 6 aufgezählten Defekte unterschiedlicher Größe gemessen. Die Spannung wurde bis zum Einsetzen von Teilentladungen erhöht und das UHF-Signal aufgenommen. Zusätzlich wurde bei der Spitze mit 9mm eine Versuchsreihe mit Luft (Atmosphärendruck) und mit verschiedenen Drücken SF₆ durchgeführt.

5.4. Zweite Messreihe

Bei der zweiten Messreihe wurde auf die akustische Durchschlagerkennung verzichtet, ansonsten wurde am Aufbau der verwendeten Messsysteme (vgl. Abb. 49) nichts verändert. Bei dieser Messreihe stand im Vordergrund, die Ausbreitung und Auswirkung von höheren Moden zu ermitteln. Da sich höhere Moden entlang einer Leitung auslöschten und überlagern können, musste der Defekt an mehreren Positionen eingebracht werden. Gibt es bei den Spektren der verschiedenen Positionen signifikante Unterschiede, so kann man daraus auf die vorkommenden Moden schließen. Als repräsentativer Defekt wurde eine Nadel auf der Kapselung ausgewählt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Messungen mit drei unterschiedlichen Eindringtiefen (30mm, 40mm und 50mm) durchgeführt. Zusammen mit der fix verbauten verstellbaren Nadel wurden fünf Positionen entlang des Rohres definiert.

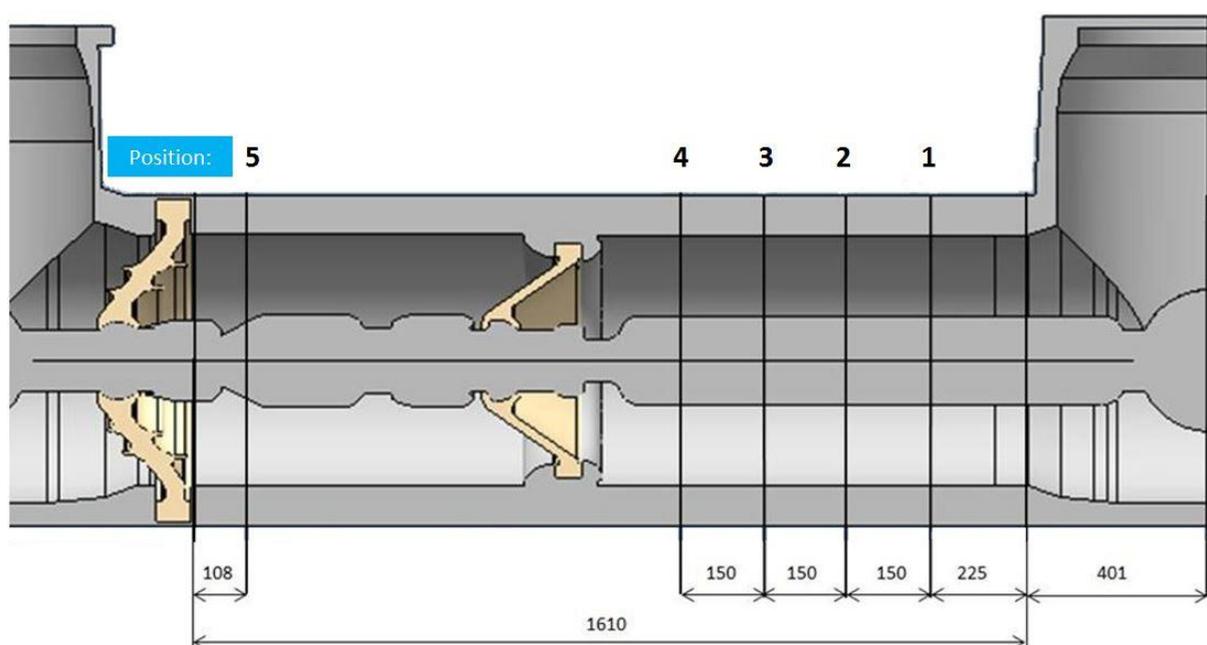


Abb. 57: Position der Defekte: Abmessungen (in mm) der einzelnen Positionen und Lage der an das Oszilloskop angeschlossenen UHF-Sonde im Winkelement (rechts), in Pos. 5 ist die verstellbare Nadel

Die verstellbare Nadel ist der einzige Defekt im Bereich hinter dem Stützisolator. Die anderen Positionen wurden davor gewählt, da dieser Bereich wesentlich leichter erreichbar ist. Die Messungen wurden mit positiver und negativer Gleichspannung durchgeführt, zusätzlich wurden vier Positionen mit Wechselspannung gemessen.

Eindringtiefe	Position 5	Position 4	Position 3	Position 2	Position 1
30mm	-DC	+DC / -DC	-DC	-DC	-DC
40mm	+DC / -DC	+DC / -DC / AC			
50mm	+DC / -DC	+DC / -DC	+DC / -DC	+DC / -DC	+DC / -DC

Tab. 7: Durchgeführte Messungen der zweiten Messreihe

Messaufbau und Vorbereitung

Bei 30mm Eindringtiefe hat sich herausgestellt, dass der Teilentladungspegel für die Erstellung der Spektren bei positiver Gleichspannung zu gering ist, daher gibt es nur eine Aufzeichnung.

Auch hier wurde vor der Einbringung der Defekte eine Leerlaufmessung durchgeführt. Bei der verstellbaren Nadel auf Position 5 konnten alle drei Eindringtiefen hintereinander gemessen werden, da zwischen dem Verstellen und Entfernen der Nadel keine Umbauten nötig sind. Für die anderen Positionen wurden drei Nadeln mit den drei vorgesehenen Eindringtiefen 30mm, 40mm und 50mm auf Scheiben befestigt. Um die Prüfzeit effizienter nutzen zu können, wurde eine PVC-Schiene in das Rohrstück vor dem Isolator befestigt, damit man die Nadeln von außen per Magnet in die richtige Position bringen kann.



Abb. 58: Links: Eine der drei Nadeln (im Bild 30mm) auf der Scheibe mit der noch unbearbeiteten PVC-Schiene; Rechts: Bearbeitete Schiene mit Positionsmarkierungen und Nadel (im Bild 40mm) auf Position 2 im Prüfaufbau

Durch die Markierungen kann die Position der Nadeln durch das Sichtfenster kontrolliert werden, somit kann man die vier ausständigen Positionen hintereinander messen, ohne den Aufbau öffnen zu müssen. Zusätzlich ist durch die Schiene gewährleistet, dass der Defekt nicht verrutscht.

6. Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die Ergebnisse der Simulationen und der Messungen eingegangen.

Tätigkeit	Zeitraum (2014)
Erste Messreihe	11.4. bis 23.4.
Referenzmessung	2.6.
Zweite Messreihe	21.6. bis 27.6.

Tab. 8: Zeitraum der durchgeführten Messungen

Die Zeiten, in denen in der Prüfhalle gearbeitet werden konnte, sind in der obigen Tabelle zusammengefasst.

Zu den fixierten Defekten wurden Feldsimulationen erstellt, anhand derer die Auswirkung der Defekte ersichtlich ist. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden die Ein- und Aussetzspannung sowie der Wert der scheinbaren Ladung bei Erreichen der Zielspannung notiert. Der in den Tabellen angegebene Ladungswert entspricht dem Wert, bei dem parallel das UHF-Signal aufgezeichnet wurde. Der Zielwert der Spannung wurde bei DC jeweils in Hunderterschritten auf +/- 500kV erhöht, bei AC genügten Fünzigerschritte bis maximal 250kV.

6.1. Erste Messreihe

Die durchgeführten Prüfanordnungen wurden bereits in Kap. 5.3. beschrieben. Falls nicht anders angegeben gilt bei jeder Messung:

- Gas: 0,4MPa SF₆ im vorderen Gasraum und 0,73MPa SF₆ im Gasraum mit der Durchführung
- Der Grundstörpegel lag immer bei ~300fC
- Es wurde immer auf 20pC kalibriert

Treten TE auf, wird deren UHF-Signal aufgezeichnet und die scheinbare Ladung sowie Ein- und Aussetzspannung notiert.

6.1.1. Feldbilder

Sowohl die verstellbare Nadel als auch die eingebrachten Spitzen führen zu einem stark inhomogenen elektrischen Feld im Inneren der GIL. Zur Veranschaulichung wurden einige Anordnungen mit dem Programm ElecNet 7.3 der Firma Infolytica simuliert (Abb. 59).

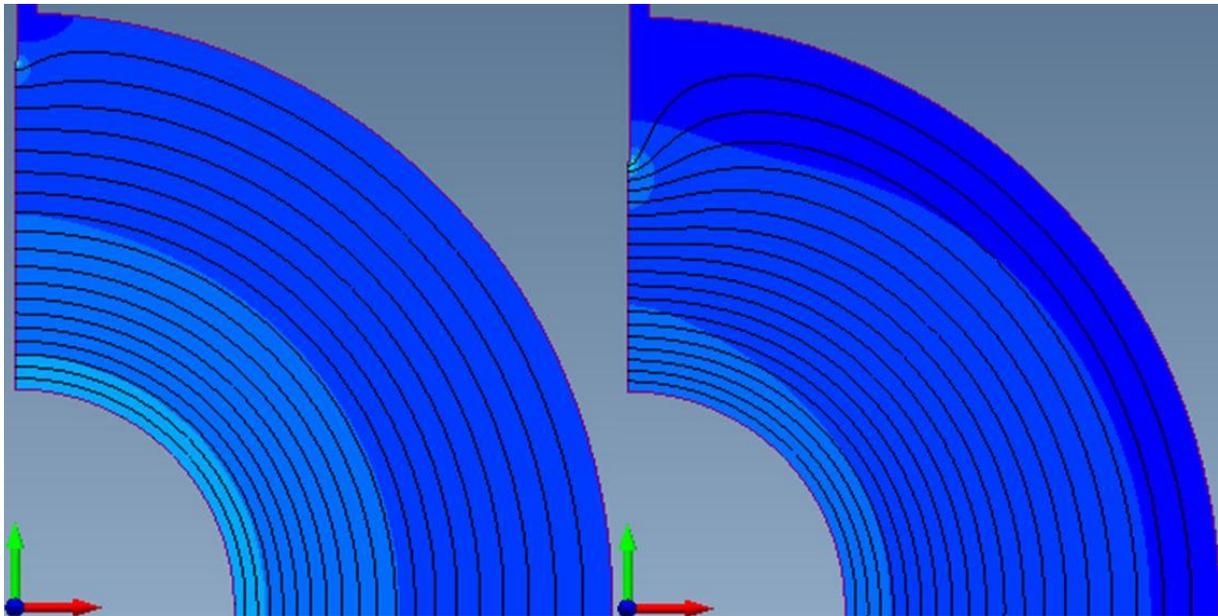


Abb. 59: Feldbilder bei unterschiedlicher Eindringtiefe der Nadel bei -500kV; Links: 20mm; Rechts: 60mm

Wenn sich kein Defekt in der GIL befindet, sind die Äquipotentiallinien parallel und äquidistant. Je weiter die Nadel eindringt, desto mehr wird das Feld verzerrt. Besonders an den Spitzen ist das elektrische Feld stark überhöht. In der vergrößerten Ansicht der Spitze der Nadeln wird ersichtlich, dass es bei der größeren Eindringtiefe zu deutlich höheren Feldstärken kommt. Die Feldbilder in Abb. 60 wurden bei gleicher Spannung und gleichem Maßstab aufgenommen. Durch die größere Eindringtiefe wird auch die Durchschlagspannung herabgesetzt.

Ergebnisse

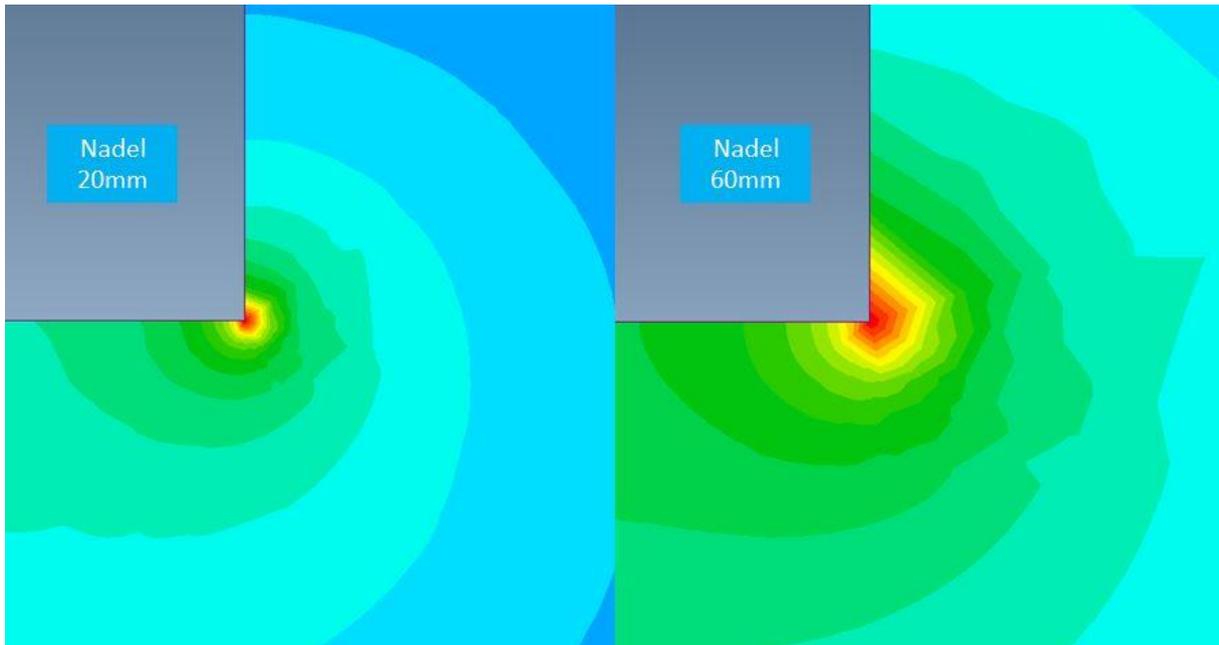


Abb. 60: Detailansicht des elektrischen Feldes bei unterschiedlichen Eindringtiefen der Nadel bei -500kV; Links: 20mm; Rechts: 60mm

Auch bei den Schrauben, die an Leiter und Kapselung angebracht wurden, kommt es an den Spitzen zu starken Felderhöhungen (Abb. 61).

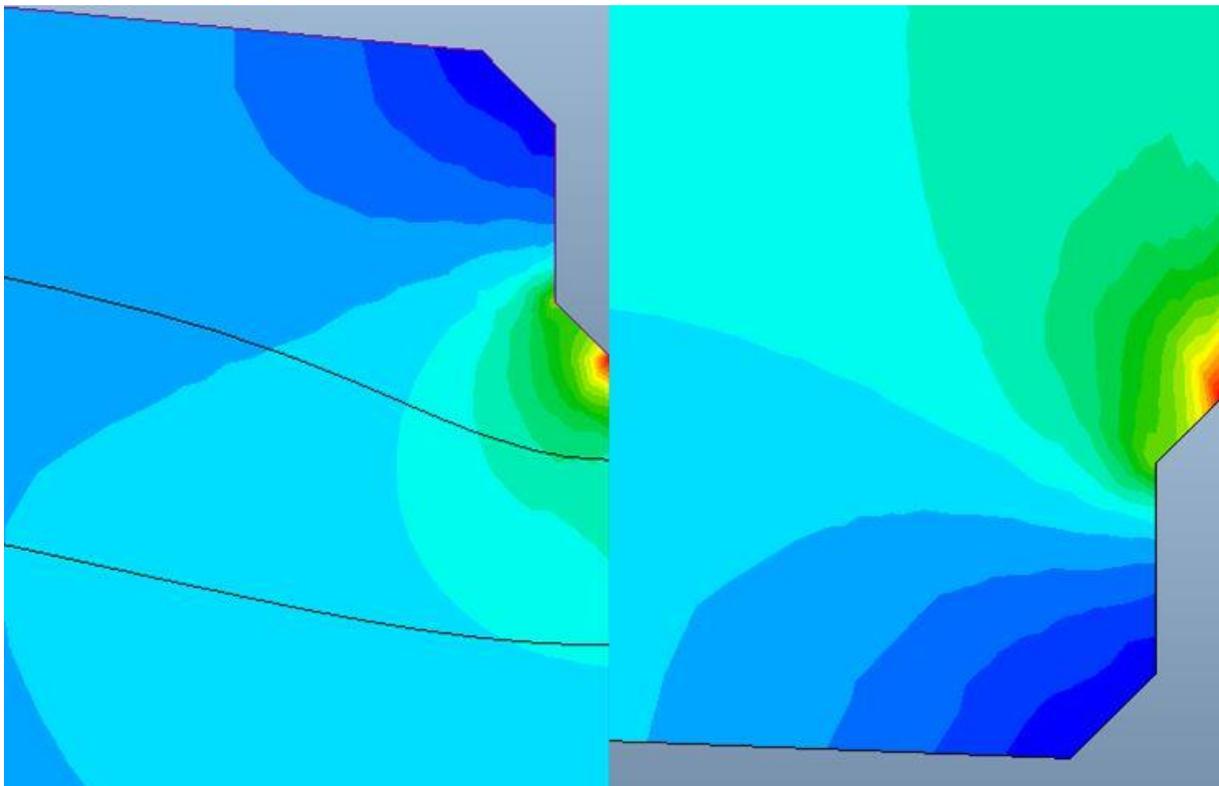


Abb. 61: Detailansicht des elektrischen Feldes bei den verwendeten Spitzen bei -500kV; Links: 6mm Schraube auf dem Leiter; Rechts: 6mm Schraube auf der Kapselung

Die Software legt für jedes erstelltes Feldbild eine neue Farbenskala an, wobei sich Rot immer auf den Maximalwert bezieht und Dunkelblau das Minimum darstellt. Die farblichen Abstufungen dazwischen sind auf den obigen Abbildungen deutlich zu sehen. Aufgrund der geringen Größe der

Ergebnisse

Schrauben im Vergleich zu den wesentlich weiter in den Raum hineinragenden Nadeln, ist auch der berechnete Maximalwert des elektrischen Feldes deutlich niedriger. Bei jedem Einzelbild stehen die jeweiligen Farbabstufungen demnach für andere Werte der elektrischen Feldstärke. Während also die tiefroten Bereiche in Abb. 60 einer Feldstärke von etwa 400kV/cm entsprechen, geben die dunkelroten Bereiche in Abb. 61 lediglich einen Wert von ungefähr 65kV/cm wider. Die Simulation von beweglichen Partikeln wurde nicht durchgeführt.

6.1.2. Leerlaufmessung

Die Leerlaufprüfung dient dazu, bei unterschiedlichen Spannungen den Unterschied zum Grundstörpegel zu eruieren. Der Prüfaufbau konnte gemäß IEC 60270 auf Werte kleiner 1pC optimiert werden (Tab. 9).

Spannung +DC kV	Scheinbare Ladung pC	Spannung -DC kV	Scheinbare Ladung pC	Spannung AC kV	Scheinbare Ladung pC
+100	0,471	-100	0,475	50	0,300
+200	0,514	-200	0,500	100	0,300
+300	0,525	-300	0,550	150	0,325
+400	0,575	-400	0,567		
+500	0,600	-500	0,633		

Tab. 9: Gemittelte Ladungswerte bei der Leerlaufmessung

6.1.3. Verstellbare Nadel

Die Messungen mit der verstellbaren Nadel bei 0mm, 4mm, 6mm und 10mm verursachten bis +/- 500kV keine Teilentladungen. Bei der Messung mit 0mm ist die Nadel bündig mit der Innenkante eingestellt. Die dadurch geringfügig andere Feldverteilung gegenüber der Leerlaufmessung hatte keinen Einfluss auf die scheinbare Ladung. Bis einschließlich 10mm Eindringtiefe hatte die gemessene scheinbare Ladung keine signifikanten Abweichungen zur Leerlaufmessung gezeigt. Es konnte daher auch kein UHF-Signal aufgezeichnet werden.

6.1.3.1. Nadel 20mm

Auch bei 20mm Eindringtiefe waren die Ladungswerte bei AC und +DC unauffällig, d.h. die scheinbare Ladung lag im Bereich des Grundstörpegels, jedoch kam es bei negativer Gleichspannung zu nennenswerten Teilentladungen. Ab -450kV traten spontan TE von ca. 9pC auf (Tab. 10).

Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
-500	-450	-425	9

Tab. 10: Verstellbare Nadel 20mm Eindringtiefe

Ergebnisse

Die Spannung wurde weiter bis zum Zielwert von -500kV erhöht, bevor das UHF-Signal aufgezeichnet wurde. Bei der Auswertung der Aufnahmen mit der Software des Omicron MPD 600 Systems werden eine Reihe von Diagrammen erstellt, zwei davon sollen zur Veranschaulichung herangezogen werden (Abb. 62). Es wurde ein Zeitintervall bei konstanter Spannung (Zielwert -500kV) ausgewählt.

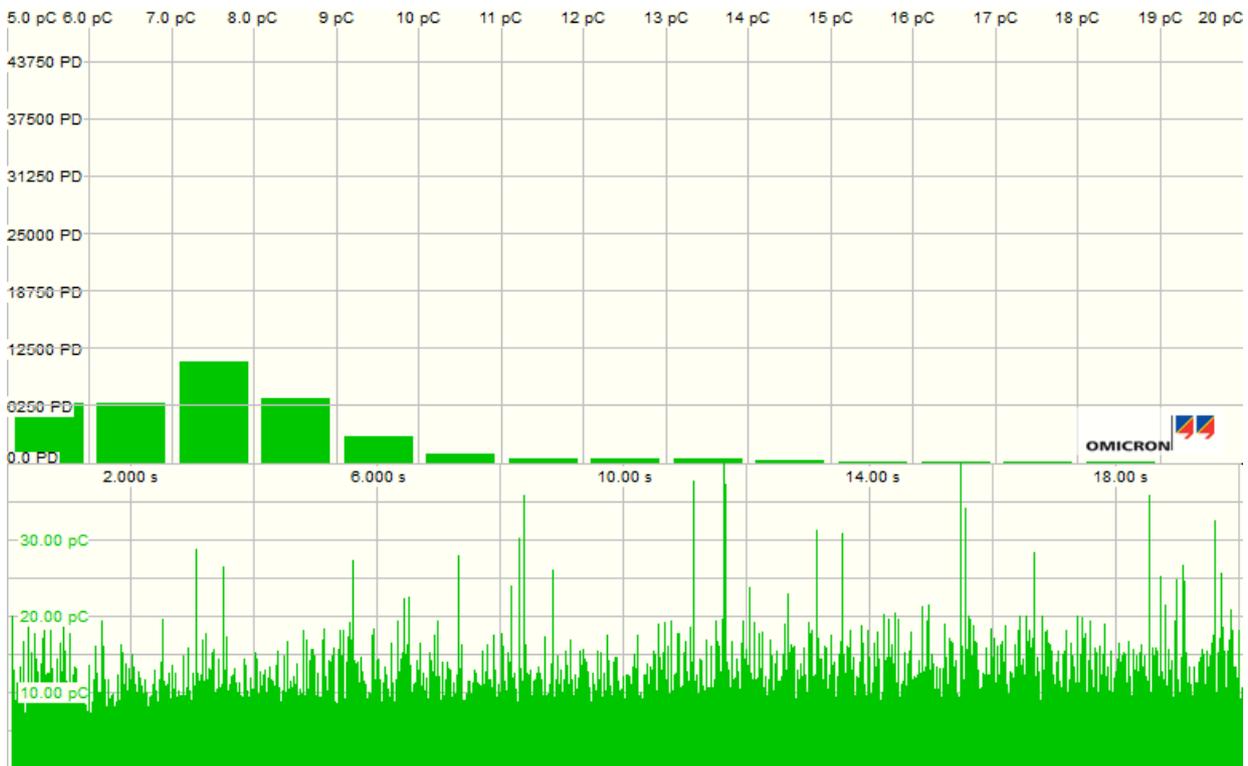


Abb. 62: Aufnahme bei -500kV DC und 20mm Eindringtiefe

Im Balkendiagramm werden die TE-Vorkommnisse gezählt und nach Ladungswert aufsteigend dargestellt. Je höher der Balken, desto mehr Teilentladungen wurden bei diesem Ladungswert registriert. Die Stufengröße des Ladungswertes kann beliebig eingestellt werden, hier wurde 1pC gewählt. Es ist zu sehen, dass die meisten Teilentladungsereignisse zwischen 7pC und 8pC liegen, es sind in dieser Ansicht auch Werte mit bis zu 19pC erkennbar.

Diese Spitzen sind auch im unteren Diagramm zu sehen, welches das Teilentladungssignal über das gesamte ausgewählte Zeitintervall beschreibt. Es wurden mehrere vereinzelte Spitzen aufgenommen, die teilweise 30pC deutlich übersteigen. Durch die Gewichtung der Vorkommnisse nach Häufigkeit im Balkendiagramm wird allerdings ersichtlich, dass TE über 10pC keinen großen Anteil am gesamten Signal haben.

In der Detailansicht des Teilentladungssignals (eine beliebige Sekunde des gesamten Intervalls in Abb. 63) sind die einzelnen TE zu sehen, es ist allerdings keine Regelmäßigkeit der Vorkommnisse erkennbar, es handelt sich um ein stochastisches Signal. Wie bereits durch die Häufigkeitsverteilung im Balkendiagramm bekannt ist, nimmt die Anzahl der TE über 8pC ab.

Ergebnisse

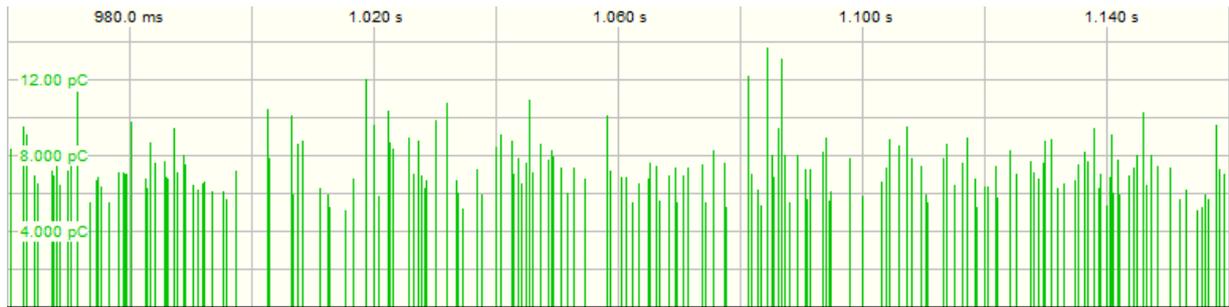


Abb. 63: Detailansicht der Pulssequenz über eine Sekunde des aufgenommenen Signals bei -500kV und 20mm Eindringtiefe

Der in der Tabelle angegebene Wert ist jener momentane Wert, bei welchem die Aufzeichnung des UHF-Signals gestartet wurde. Er entspricht in allen weiteren Fällen in etwa dem Durchschnittswert.

6.1.3.2. Nadel 30mm

Bis +500kV DC konnten keine nennenswerten TE aufgezeichnet werden. Bei der Messung bis zum Zielwert -400kV DC traten ab ca. -330kV DC Teilentladungen von mindestens 12pC auf, die Aussetzspannung lag bei -306kV. Das UHF-Signal wurde bei 12pC aufgezeichnet, aber auch hier traten, wie bei allen Messungen mit der verstellbaren Nadel, höhere Spitzen mit teilweise bis zu 80pC auf. Die Wechselspannungsmessung wies bis 150kV keine TE auf und wird daher nicht berücksichtigt.

Zielspannung	Einsetzspannung	Aussetzspannung	Scheinbare Ladung
kV	kV	kV	pC
-400	-330	-306	12

Tab. 11: Verstellbare Nadel 30mm Eindringtiefe

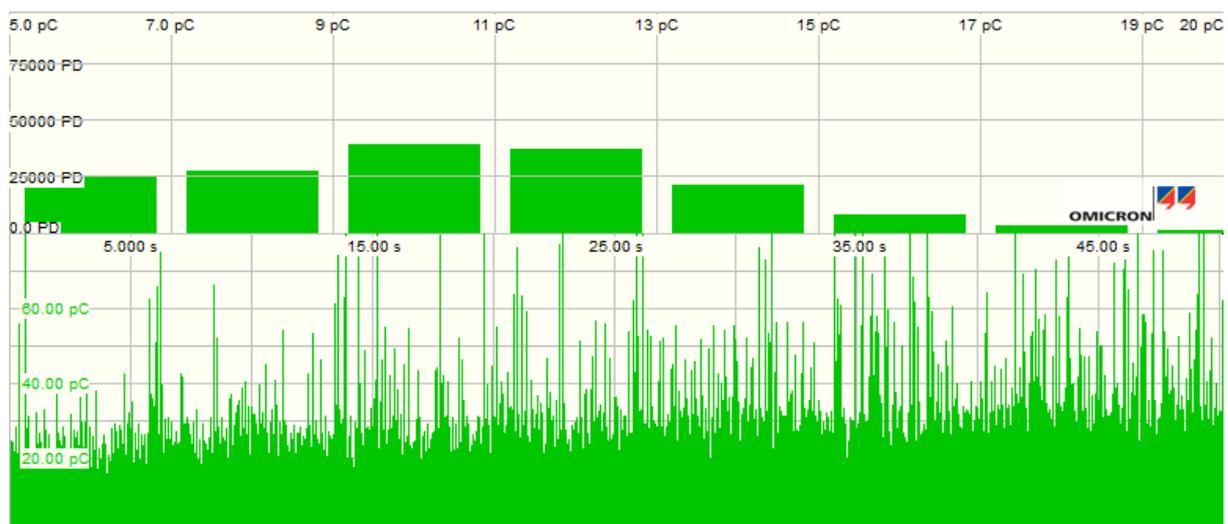


Abb. 64: Aufnahme bei -400kV DC und 30mm Eindringtiefe

Aus den Diagrammen geht hervor, dass die Teilentladungsereignisse zwischen 9pC und 13pC den größten Anteil am Signal bilden, was wiederum dem notierten Ladungswert bei der Aufnahme des UHF-Signals entspricht (Abb. 64).

Ergebnisse

6.1.3.3. Nadel 40mm

Bei 40mm Eindringtiefe gab es erstmals auch bei positiver Gleichspannung erkennbare TE. Diese Anordnung wurde nicht mit AC gemessen.

Zielspannung	Einsetzspannung	Aussetzspannung	Scheinbare Ladung
kV	kV	kV	pC
+500	+450	+365	2,2
-300	-240	-220	20

Tab. 12: Verstellbare Nadel 40mm Eindringtiefe



Abb. 65: Aufnahme bei +500kV DC und 40mm Eindringtiefe

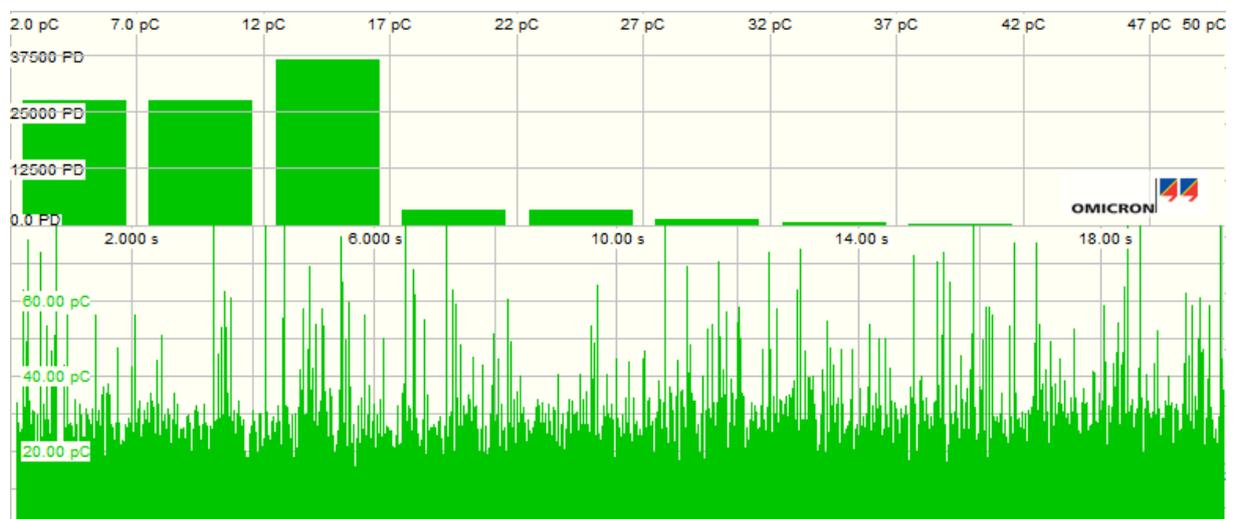


Abb. 66: Aufnahme bei -300kV DC und 40mm Eindringtiefe

Beim Vergleich der Aufnahmen wird deutlich, dass es bei positiver Gleichspannung zu wesentlich weniger Teilentladungen oberhalb des Grundrauschens kommt. Auch die Anzahl der aufgenommenen TE-Ereignisse ist wesentlich geringer (Abb. 65, Abb. 66).

6.1.3.4. Nadel 50mm

Bei dieser Eindringtiefe konnten bei positiver und negativer Gleichspannung deutliche Teilentladungen gemessen werden (Abb. 67). Auch der Fingerprint der AC-Messung kann auf den

Ergebnisse

eingebrachten Defekt zurückgeführt werden. Der Signalpegel bei der Wechselspannungsmessung reichte jedoch nicht aus, um ein aussagekräftiges Spektrum erhalten zu können, weshalb die Eindringtiefe weiter auf 60mm erhöht wurde.

Zielspannung	Einsetzspannung	Aussetzspannung	Scheinbare Ladung
kV	kV	kV	pC
+300	+290	+260	2,2
-300	-210	-170	65
~200	~152	~135	2,0

Tab. 13: Verstellbare Nadel 50mm Eindringtiefe

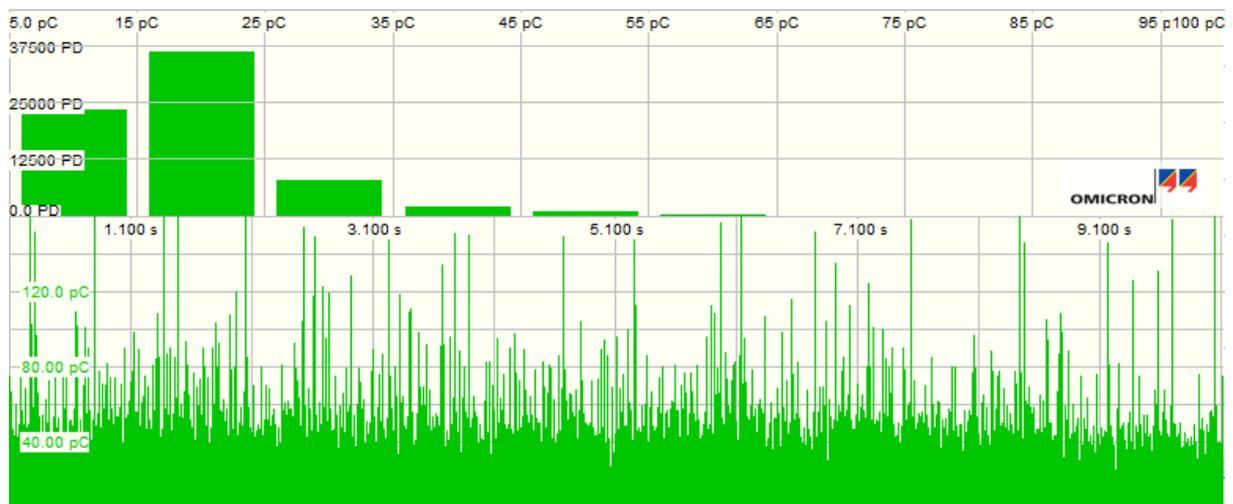


Abb. 67: Aufnahme bei -300kV DC und 50mm Eindringtiefe

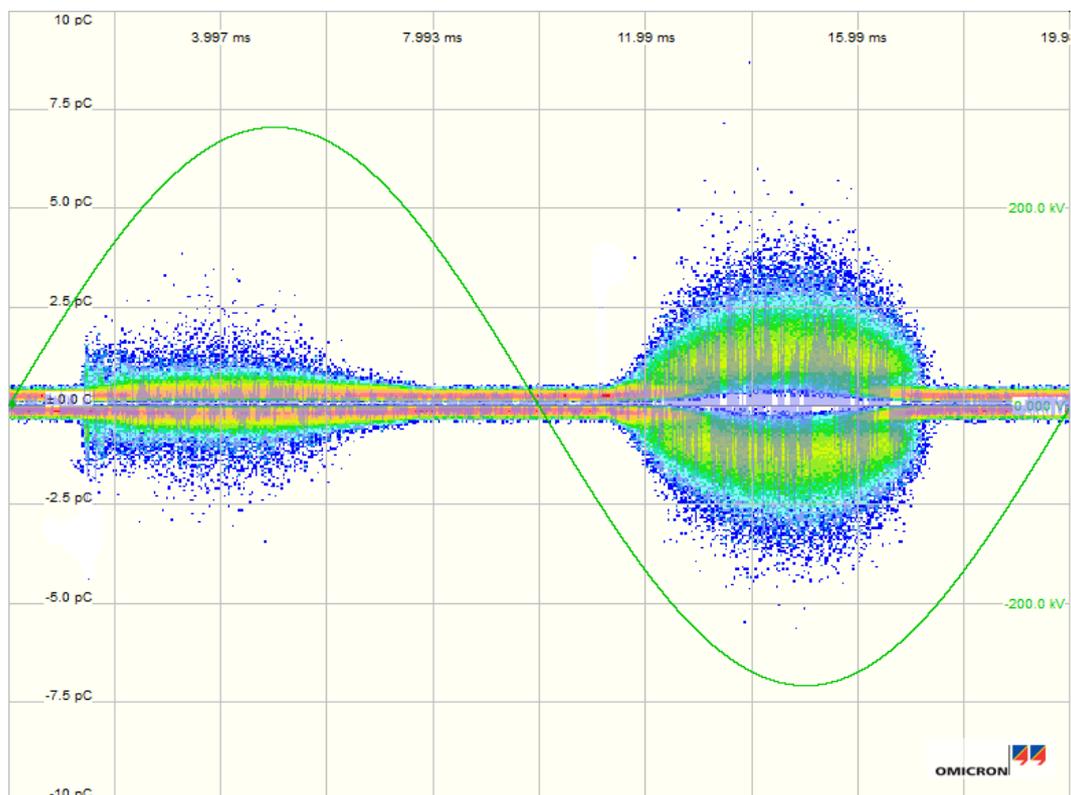


Abb. 68: Fingerprint bei 200kV AC und 50mm Eindringtiefe

Ergebnisse

Im Screenshot des Fingerprints der AC-Messung sind die für Koronaentladungen typischen Häufungen bei den Spannungsmaximalwerten zu erkennen (Abb. 68).

6.1.3.5. Nadel 60mm

Bei der maximalen Eindringtiefe konnten bei allen Spannungsarten Teilentladungen aufgezeichnet werden. Bei den in der Tabelle angeführten Werten der Gleichspannungsversuche wurde kein UHF-Signal aufgezeichnet. Der Signalpegel beim Wechselspannungsversuch reichte für die Erstellung eines Spektrums aus (Abb. 69).

Zielspannung	Einsetzspannung	Aussetzspannung	Scheinbare Ladung
kV	kV	kV	pC
+300	+290	+260	1,8
-200	-210	-170	20
~150	~140	~110	3,7

Tab. 14: Verstellbare Nadel 60mm Eindringtiefe

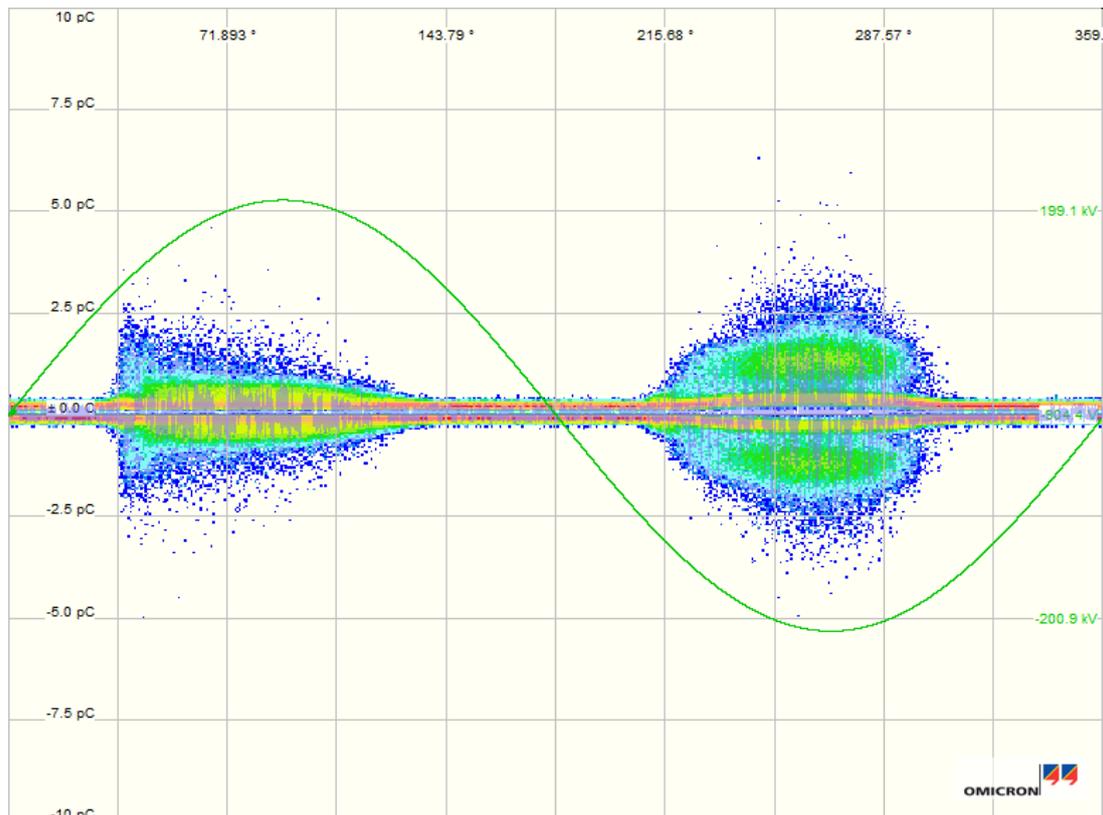


Abb. 69: Fingerprint bei 150kV AC und 60mm Eindringtiefe

6.1.4. Spitze auf Kapselung

Mit der 6mm langen Schraube konnten keine verwertbaren Teilentladungen erreicht werden, daher beziehen sich alle folgenden Ergebnisse auf die 9mm lange Schraube.

Die Messreihe wurde bei positiver und negativer Gleichspannung mit Luft und verschiedenen Drücken Schwefelhexafluorid durchgeführt. Es wurde kein UHF-Signal aufgenommen.

Ergebnisse

Druck/Gas	+DC		-DC	
	kV	pC	kV	pC
0,1MPa Luft	DS bei +300	1,1	DS bei -254	3
0,1MPa SF ₆	DS bei +472	1,4	DS bei -443	2,5
0,2MPa SF ₆	+500	2,6	-500	3
0,3MPa SF ₆	+500	3,1	-500	3,1
0,4MPa SF ₆	+500	2,9	-500	3

Tab. 15: 9mm Spitze auf Kapselung, Spannung immer auf +500kV bzw. -500kV eingestellt, scheinbare Ladung

Bei den Messungen mit 0,1MPa kam es sowohl bei Luft als auch bei SF₆ positiv wie negativ zum Durchschlag an der Unstetigkeitsstelle. Die in der obigen Tabelle (Tab. 15) angeführten Ladungswerte sind jene, die unmittelbar vor dem Durchschlag gemessen wurden. Bei den Versuchen mit der verstellbaren Nadel hat sich gezeigt, dass bis zu Spannungen von +/- 500kV DC unter einer Eindringtiefe von 20mm keine TE ausgelöst werden. Die Messungen der Nadel mit 10mm Eindringtiefe entsprachen annähernd denen des Leerlaufversuchs. Im Gegensatz zur Nadel, die plan abgesägt wurde, läuft die Schraube spitz zu, was den Homogenitätsgrad verringert.

6.1.5. Spitze auf Leiter

Mit der 6mm langen Schraube konnten keine verwertbaren Teilentladungen erreicht werden, daher beziehen sich alle folgenden Ergebnisse auf die 9mm lange Schraube. Diese Messung wurde nicht mit Wechselspannung durchgeführt (Abb. 70).

Zielspannung	Einsetzspannung	Aussetzspannung	Scheinbare Ladung
kV	kV	kV	pC
+300	+260	+220	10
-600	-550	-450	3,5

Tab. 16: Ladungswerte bei 9mm Spitze auf Leiter

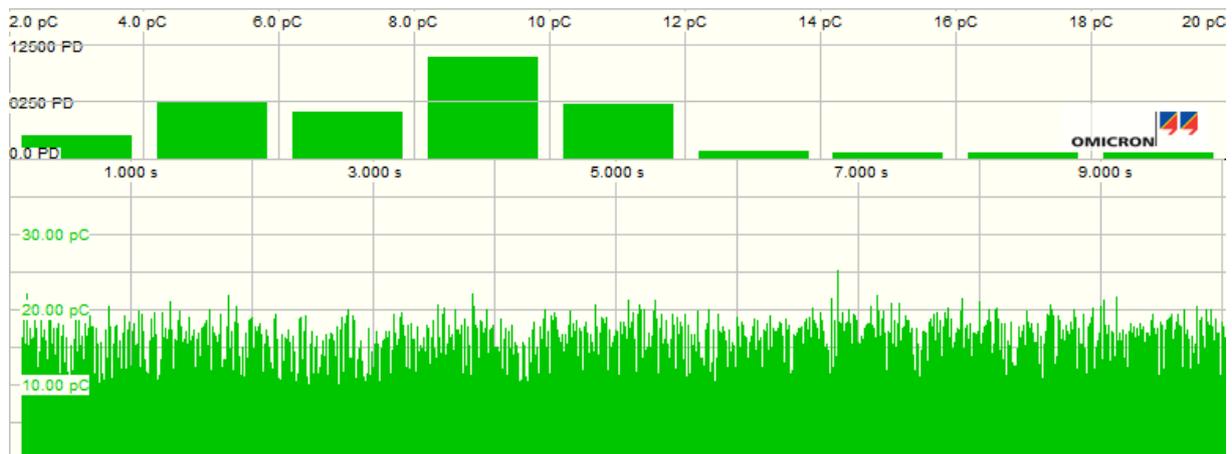


Abb. 70: Aufnahme bei +300kV DC und 9mm Schraube am Innenleiter

Wie zu erwarten war, kommt es aufgrund des Polaritätseffektes bei positiver Gleichspannung bei niedrigeren Spannungswerten zu deutlichen Teilentladungen. Es fällt auf, dass das Signal im Allgemeinen wesentlich gleichmäßiger verläuft als jene bei der verstellbaren Nadel. Die UHF-Signale

Ergebnisse

sind aufgrund der geringen Pegel, die der Defekt hervorruft, nur schlecht zur weiteren Analyse geeignet.

6.1.6. Bewegliche Partikel

Die 4mm und 6mm langen Aluminiumpartikel wurden bei Gleichspannung in den Aufbau eingebracht, die 6mm langen Partikel wurden zusätzlich bei Wechselspannung gemessen. Die Partikelbewegung ging mit dem Auftreten von Teilentladungen einher, es wurde die TE-Intensität und die Einsetzspannung notiert. Während der Partikelbewegung blieben die TE annähernd konstant, solange bis das Partikel in einem feldfreien Raum zum Erliegen kam. Bei allen Versuchen dauerte die Partikelbewegung längstens eine Minute. Die 6mm langen Aluminiumpartikel benötigten, wie zu erwarten war, eine höhere Spannung und damit eine höhere Abhebefeldstärke um aktiviert zu werden. Auch hier ist der angegebene Ladungswert jener, bei dem die Aufzeichnung des UHF-Signals gestartet wurde (Abb. 71).

Partikellänge	Einsetzspannung	Scheinbare Ladung
mm	kV	pC
4	+200	25
4	-200	130
6	+490	22
6	-370	22
6	~140	8

Tab. 17: Bewegliche Partikel

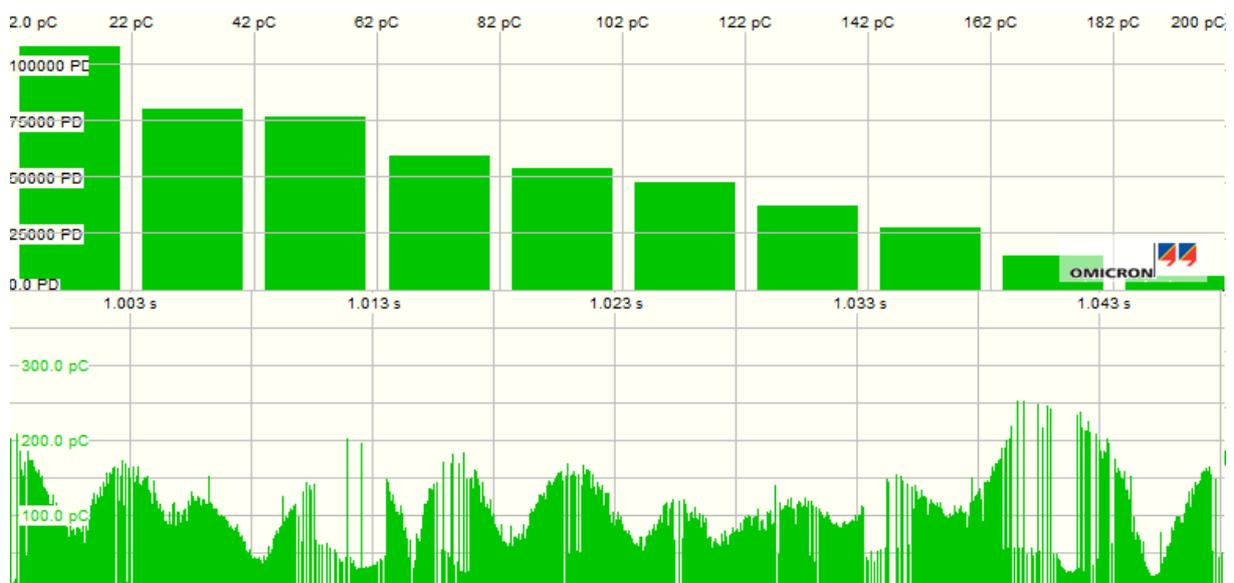


Abb. 71: Aufnahme bei -200kV DC und 4mm bewegliches Partikel

Die Häufigkeitsverteilung fällt nahezu linear, es bildet sich kein auffälliges Maximum bei einem bestimmten Ladungswert. Durch die Detailansicht des Signals ist die Partikelbewegung

Ergebnisse

nachvollziehbar, es gibt keine unverhältnismäßigen Ausreißer wie bei den Aufnahmen mit der verstellbaren Nadel.

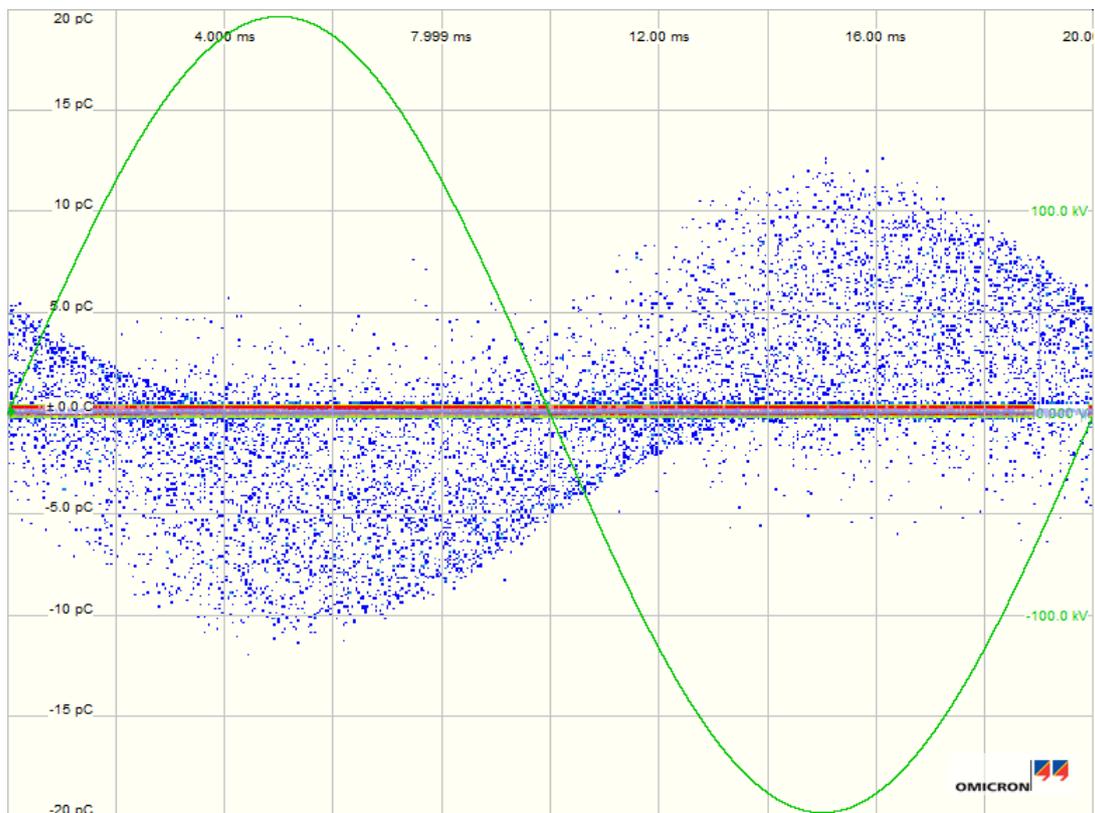


Abb. 72: Fingerprint bei 150kV AC und 6mm bewegliches Partikel

Auf dem Fingerprint (Abb. 72) bei Wechselspannung sind durchgehend TE über die gesamte Periode zu erkennen, wie es für bewegliche Partikel typisch ist. Die TE-Ereignisse folgen einem sinusförmigen Verlauf.

6.1.7. Analyse der Spektren

Bei der Auswertung der Aufnahmen des Oszilloskops hat sich herausgestellt, dass sich nicht alle Defekte gleichermaßen zur genaueren Untersuchung eignen.

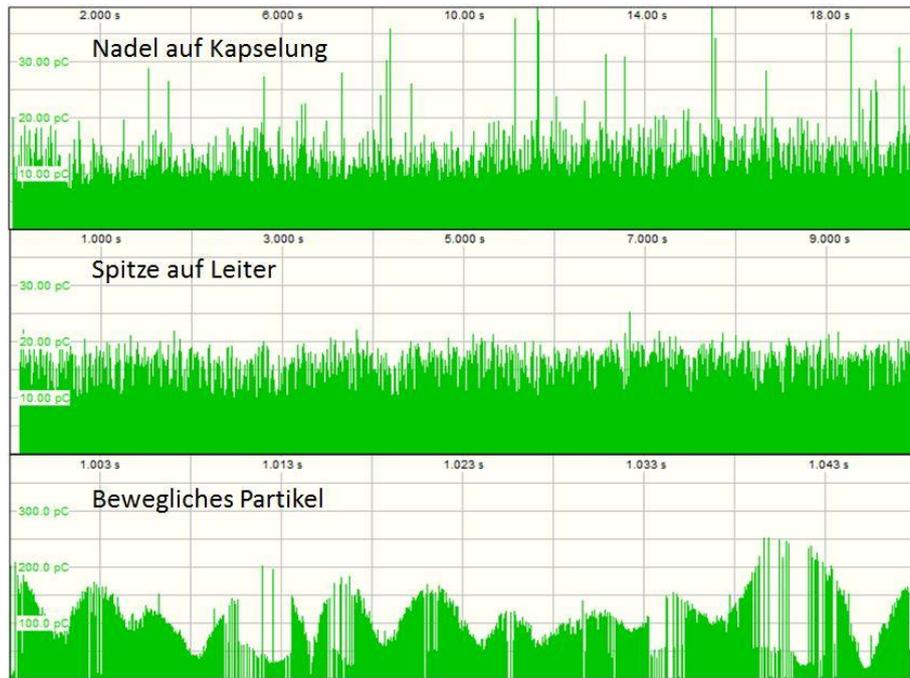


Abb. 73: Vergleich der TE-Signale bei unterschiedlichen Defekten

In Abb. 73 sind Beispiele für die unterschiedlichen Signalverläufe bei den verschiedenen Defekten zu sehen. Bei den Aufzeichnungen der Nadel kommt es zu vergleichsweise hohen Ausreißern gegenüber der durchschnittlichen scheinbaren Ladungshöhe. Zusätzlich konnte die Nadel tiefer in den Gasraum eindringen und somit, verglichen mit den anderen Defekten, höhere Teilentladungspegel erzielen. Für die Analyse der aufgenommenen UHF-Signale werden Peaks herangezogen, die sich klar vom Grundrauschpegel abheben. Aus diesem Grund, und wegen der besseren Vergleichbarkeit durch die verstellbaren Eindringtiefen und der fixen Position, wurde die Nadel als repräsentativster Defekt befunden und näher betrachtet.

Ergebnisse

Folgende Betrachtungen beziehen sich allesamt auf die exemplarisch ausgewählte Messung der Nadel bei einer Eindringtiefe von 40mm und -300kV Gleichspannung.

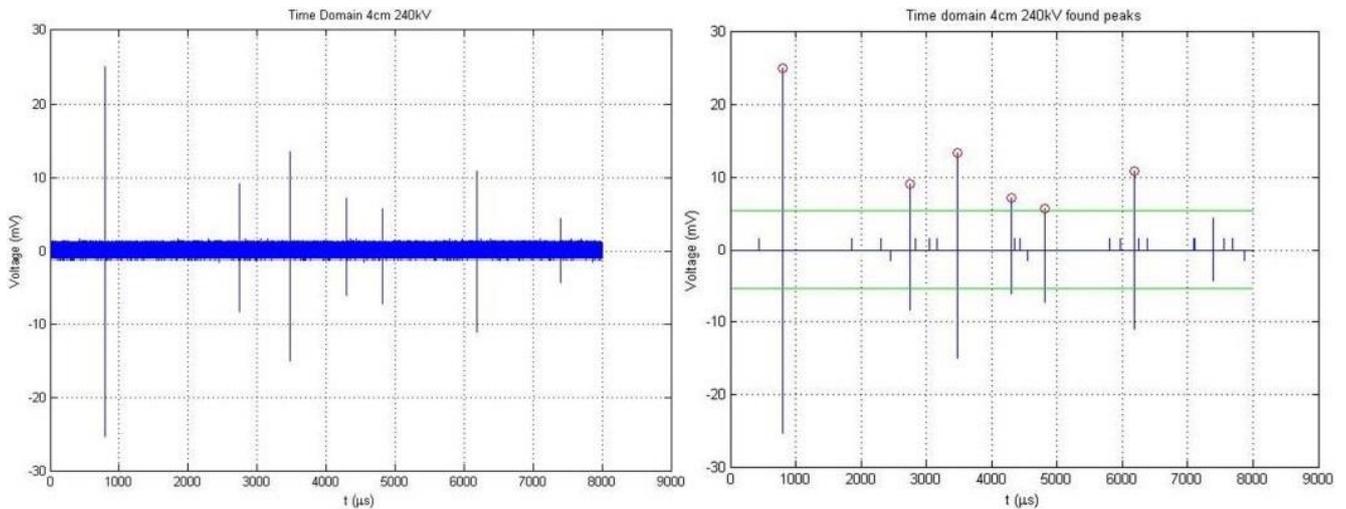


Abb. 74: Messergebnis im Zeitbereich; Links: Kontinuierliches Signal; Rechts: Isolierte Spitzen ohne Rauschen [23]

Bei den hochauflösenden Aufnahmen des Rhode & Schwarz RTO werden die Peaks betrachtet, dazu ist es nötig, das Grundrauschen auszublenden (Abb. 74). Zusätzlich wurde eine dynamische Ermittlung der Schwelle zur Erkennung der Peaks implementiert. Danach werden die übrigen Peaks übereinander gelegt und ein resultierender mittlerer Peak gebildet (Abb. 75).

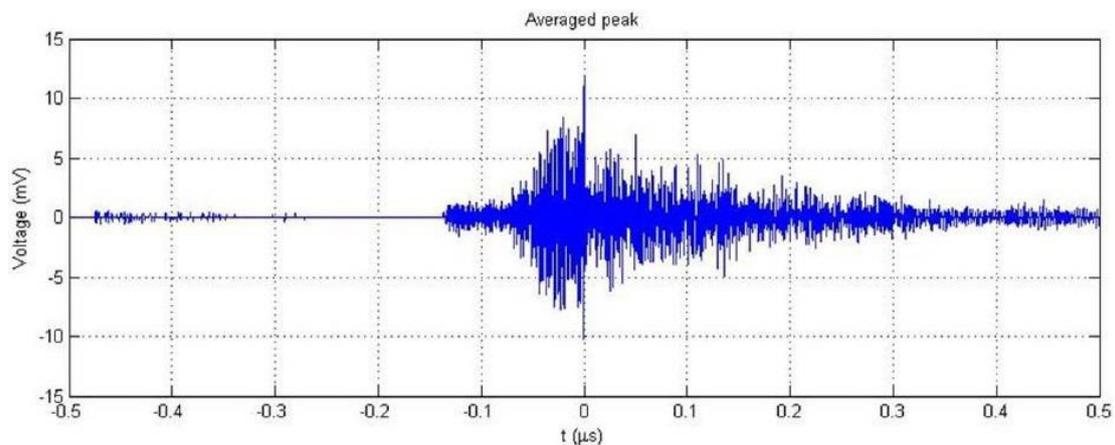


Abb. 75: Gemittelter Peak über $-0,5\mu\text{s}$ bis $0,5\mu\text{s}$, Maximum des Peaks bei $0\mu\text{s}$ [23]

Ergebnisse

Im nächsten Schritt wurde das Leistungsspektrum des mittleren Peaks erstellt. Durch die Beschaffenheit des resultierenden Spektrums bietet es sich an, zwei Frequenzbänder mit hoher Signalenergie zu bestimmen (Abb. 76).

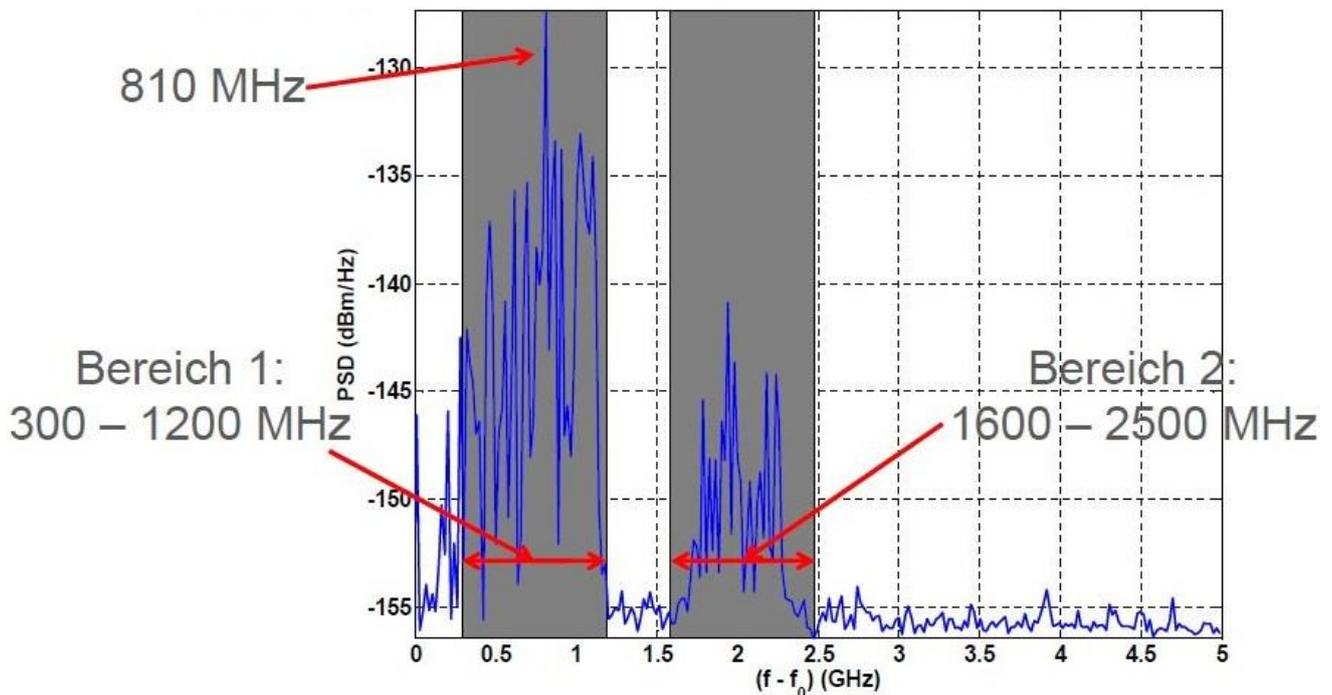


Abb. 76: Leistungsdichtespektrum des mittleren Peaks bei 40mm Eindringtiefe der Nadel und -300kV [23]

Im obigen Spektrum ist neben der Definition der Frequenzbereiche noch die Frequenz beim Maximum eingetragen. Der signalarme Bereich zwischen den ausgewählten Bändern lässt sich durch den Reflexionsfaktor der Sonde erklären. Zwischen 2,5GHz und 5GHz gibt es bei dieser Aufnahme keine signalstarken Bereiche mehr, daher wurde diesbezüglich der Messbereich bei der zweiten Messreihe optimiert. [23]

6.1.8. Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass bei Eindringtiefen der verstellbaren Nadel unter 20mm bis +/- 500kV keine Teilentladungen auftraten. Bei den Schrauben mit 9mm kam es jedoch aufgrund des etwas niedrigeren Homogenitätsgrades bei gleicher Spannung zu Teilentladungen. Generell setzen TE bei Wechselspannung schon bei niedrigeren Spannungen ein, was zu erwarten war.

In der Nachbearbeitung hat sich herausgestellt, dass der Defekt mit den brauchbarsten Ergebnissen die verstellbare Nadel war. Verglichen mit den Messreihen bei negativer Gleichspannung werden bei der verstellbaren Nadel unter positiver Gleichspannung weniger Teilentladungen hervorgerufen. Zusätzlich hebt sich die durchschnittliche Ladungshöhe der TE bei positiver Gleichspannung kaum vom Grundrauschen ab. Das wird durch die Betrachtung der Aufnahmen der Häufigkeitsverteilungen und des Signals über die Zeit verdeutlicht. Zum Zweck der besseren Auswertung der Spektren ist also der für den realen Betrieb ungünstigste Fall das Ziel, um ein Spektrum mit hoher Aussagekraft zu

Ergebnisse

erhalten. Anders formuliert war im ersten Anlauf das Ziel, Spektren hoher Energiedichte zu aufzeichnen. Aufgrund der dem Teilentladungssignal überlagerten 50Hz Komponente bei der Wechsellspannungsmessung, gestaltet sich die Erstellung der Spektren bei AC als schwierig. Bei Gleichspannung sind die Peaks leichter vom Rauschen zu trennen.

Anhand der Auswertungen des Instituts für Hochfrequenztechnik wurden wertvolle Systemkenntnisse erlangt. So können für die Messungen der zweiten Messreihe die Abtastzeit (Samples/s) und die Anzahl der Messwerte adjustiert werden, um mehr verwertbare Signalanteile aufnehmen zu können. Aufgrund der Unregelmäßigkeit des Signals ist es möglich, einen Bereich zu messen, der wenig oder nur sehr schwache Peaks beinhaltet. Es wurde daher so verfahren, dass die Messung so oft wiederholt wurde, bis im wenigen Millisekunden großen Zeitfenster viele und deutliche Peaks auftreten. Um bessere Spektren zu erhalten, wurde bei der nächsten Messreihe darauf geachtet, noch mehr deutliche Peaks aufzunehmen.

Die Multimodenausbreitung innerhalb der GIL ist ein großer Unsicherheitsfaktor, da es durch die Veränderung der Position eines Defektes entlang der Leitung womöglich zu erheblichen Überlagerungen und Auslöschungen kommen kann, welche die Messungen verfälschen können. In der Vorbereitung auf die zweite Messreihe wurden daher die in Kap. 5.4. erwähnten Positionen für die Nadel festgelegt um die Auswirkungen von mehreren sich überlagernden Moden bestimmen zu können.

Da für brauchbare Aussagen über die Spektren eine genaue Systemkenntnis erforderlich ist, soll zur Erstellung eines Simulationsmodells des Prüfaufbaus mit den zwei Sonden eine Referenzmessung durchgeführt werden.

6.2. Zweite Messreihe

Die durchgeführten Prüfanordnungen wurden bereits in Kap. 5.5. beschrieben. Falls nicht anders angegeben gilt bei jeder Messung:

- Gas: 0,4MPa SF₆ im vorderen Gasraum und 0,73MPa SF₆ im Gasraum mit der Durchführung
- Der Grundstörpegel lag immer bei ~300fC
- Es wurde immer auf 20pC kalibriert

Treten TE auf, wird deren UHF-Signal aufgezeichnet und die scheinbare Ladung sowie Ein- und Aussetzspannung notiert.

6.2.1. Feldbilder

Mit steigender Eindringtiefe der Nadel ergibt sich ein Anstieg der elektrischen Feldstärke an der Spitze (Abb. 77).

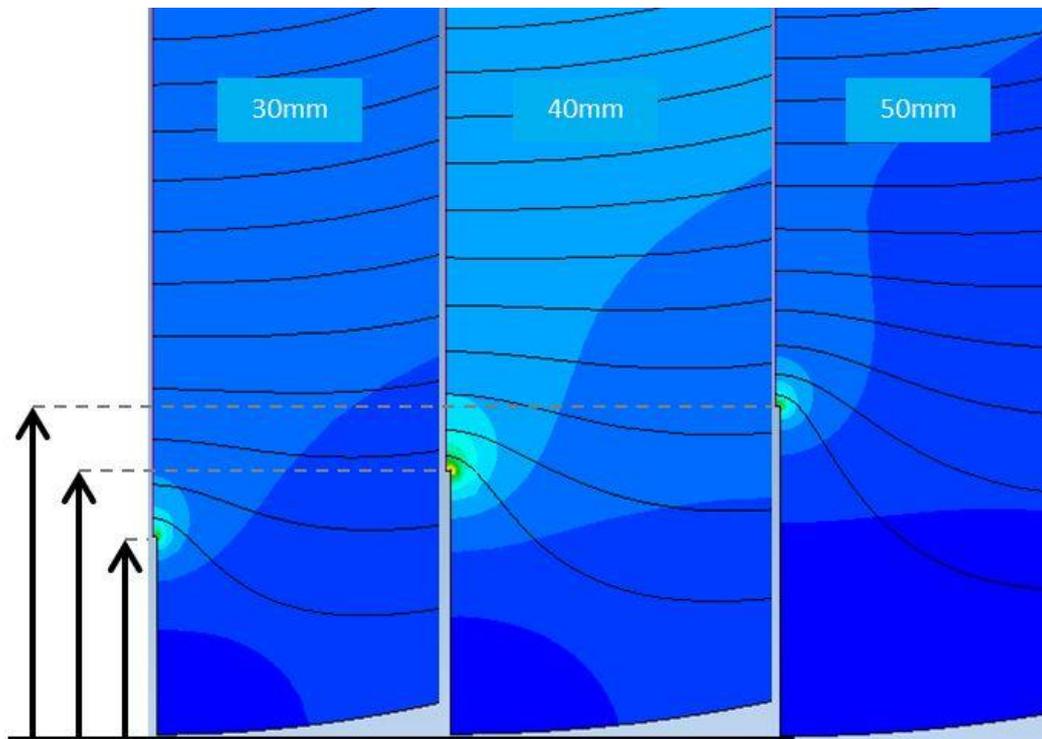


Abb. 77: Elektrisches Feld der drei in der Schiene angebrachten Nadeln bei -500kV

Wie in der obigen Abbildung zu sehen, werden die Äquipotentiallinien mit zunehmender Eindringtiefe stärker verzerrt. An den Spitzen kommt es zu starken Feldüberhöhungen. Wie bereits in Kap. 6.1.1. erwähnt, stehen die farblichen Abstufungen in jedem Einzelbild für unterschiedliche Feldstärken (Abb. 78).

Ergebnisse

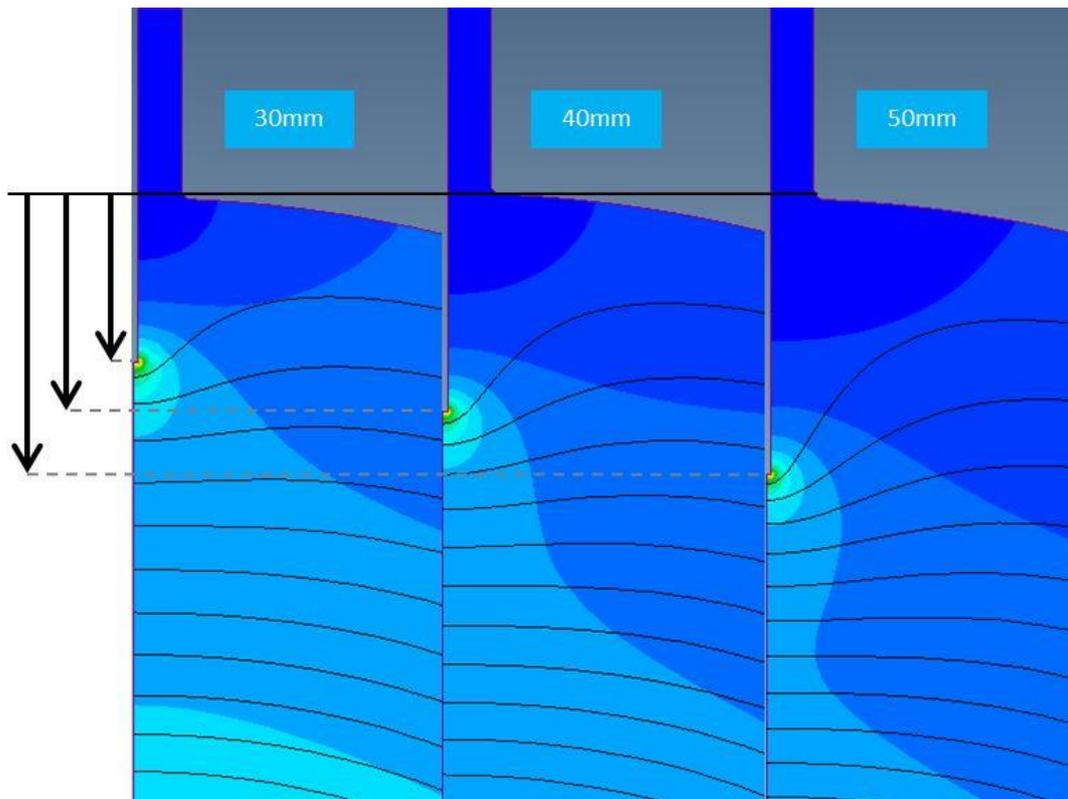


Abb. 78: Elektrisches Feld bei den drei verwendeten Einstellungen der verstellbaren Nadel bei -500kV

6.2.2. Ergebnisse der konventionellen Messung

Wie bei der Leerlaufmessung der ersten Messreihe, konnte der Prüfaufbau gemäß IEC 60270 auf Werte kleiner 1pC optimiert werden. Die gemessenen Leerlaufwerte lagen sogar durchschnittlich unter jenen der ersten Messreihe (Tab. 9).

Die durchschnittlichen Messergebnisse über alle Positionen bei der jeweiligen Spannungsart bzw. Eindringtiefe der in Tab. 7 angegebenen Messungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tab. 18).

Eindringtiefe und Spannungsart	Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
+DC 30mm	+500	+479	+450	2,4
+DC 40mm	+500	+385	+307	4,7
+DC 50mm	+400	+321	+289	4,8
-DC 30mm	-400	-279	-248	18,4
-DC 40mm	-300	-256	-220	46
-DC 50mm	-300	-204	-183	105
AC 40mm	~250	~164	~148	3,5

Tab. 18: Durchschnittliche Messergebnisse über alle Positionen

Bei linear steigender Eindringtiefe ist bei negativer Gleichspannung eine exponentiell steigende scheinbare Ladung feststellbar, bei den Werten von Ein- und Aussetzspannung ist der Trend nicht so

Ergebnisse

stark ausgeprägt. Bei der positiven Gleichspannung verhält es sich ähnlich, durch die um 100kV niedrigere Zielspannung sind die Ladungswerte der 40mm und 50mm Nadeln nicht sehr unterschiedlich, zwischen 30mm und 40mm ist jedoch ein deutlicher Sprung feststellbar. Sowohl Einsetz- als auch Aussetzspannungen unterlagen teilweise großen Schwankungen. Die Werte der verstellbaren Nadel in Position 5 wiesen verglichen mit den Ergebnissen von Position 1 bis 4 teilweise Abweichungen auf, bei gleichen Eindringtiefen konnten ähnliche Werte gemessen werden.

Das Signal wies, wie bei den Messungen der ersten Messreihe, starke unregelmäßige Spitzen gegenüber dem Grundpegel auf, auch die Häufigkeitsverteilung der Ereignisse ist mit den Ergebnissen in Kap. 6.1.3. vergleichbar (Abb. 79).

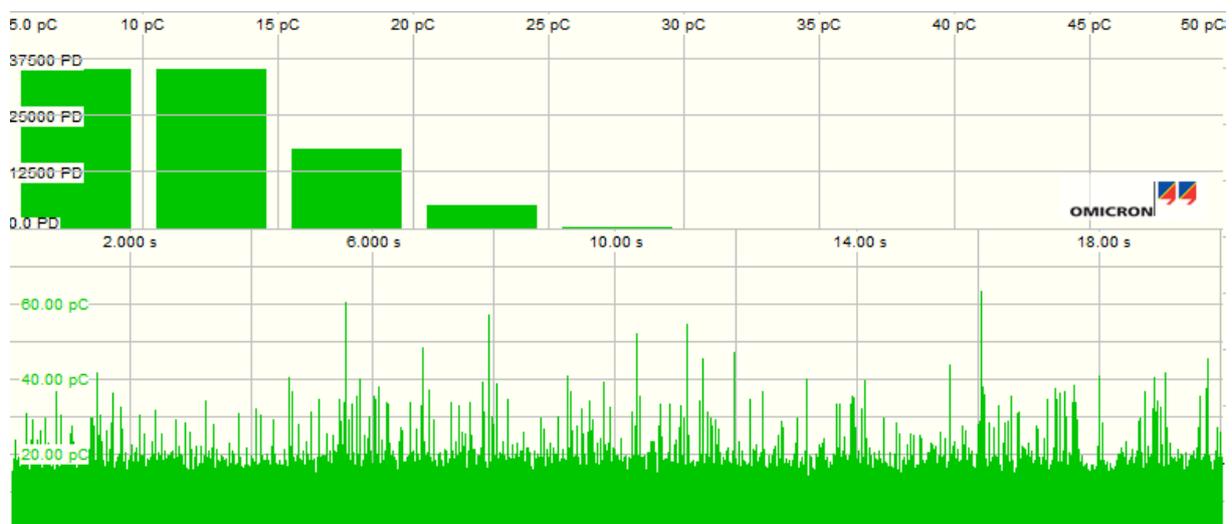


Abb. 79: Aufnahme bei -300kV DC und 40mm Eindringtiefe bei Position 5

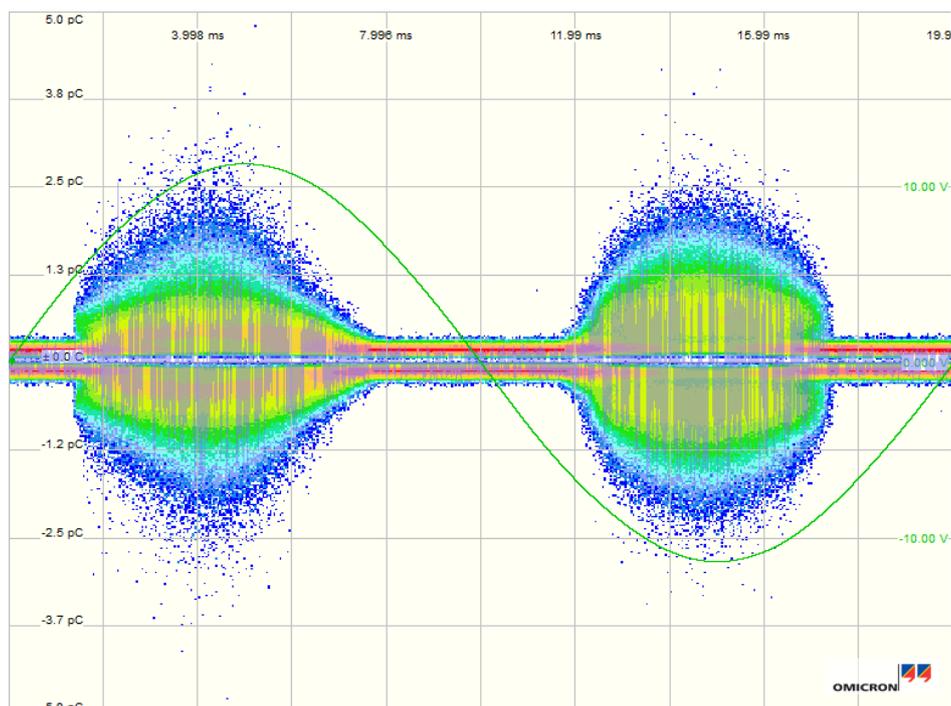


Abb. 80: Fingerprint bei 250kV AC und 40mm Eindringtiefe bei Position 4

Ergebnisse

Auch der Fingerprint der AC-Messung zeigte gegenüber den bereits durch die erste Messreihe bekannten Ergebnissen keine Unregelmäßigkeiten (Abb. 80).

6.2.3. Analyse der Spektren

Zur Auswertung der Spektren wurden wieder die Ergebnisse bei negativer Polarität aufgrund der durchschnittlich höheren Pegel herangezogen. Im ersten Schritt werden für jede Eindringtiefe die Spektren jeder Position übereinandergelegt (Abb. 81).

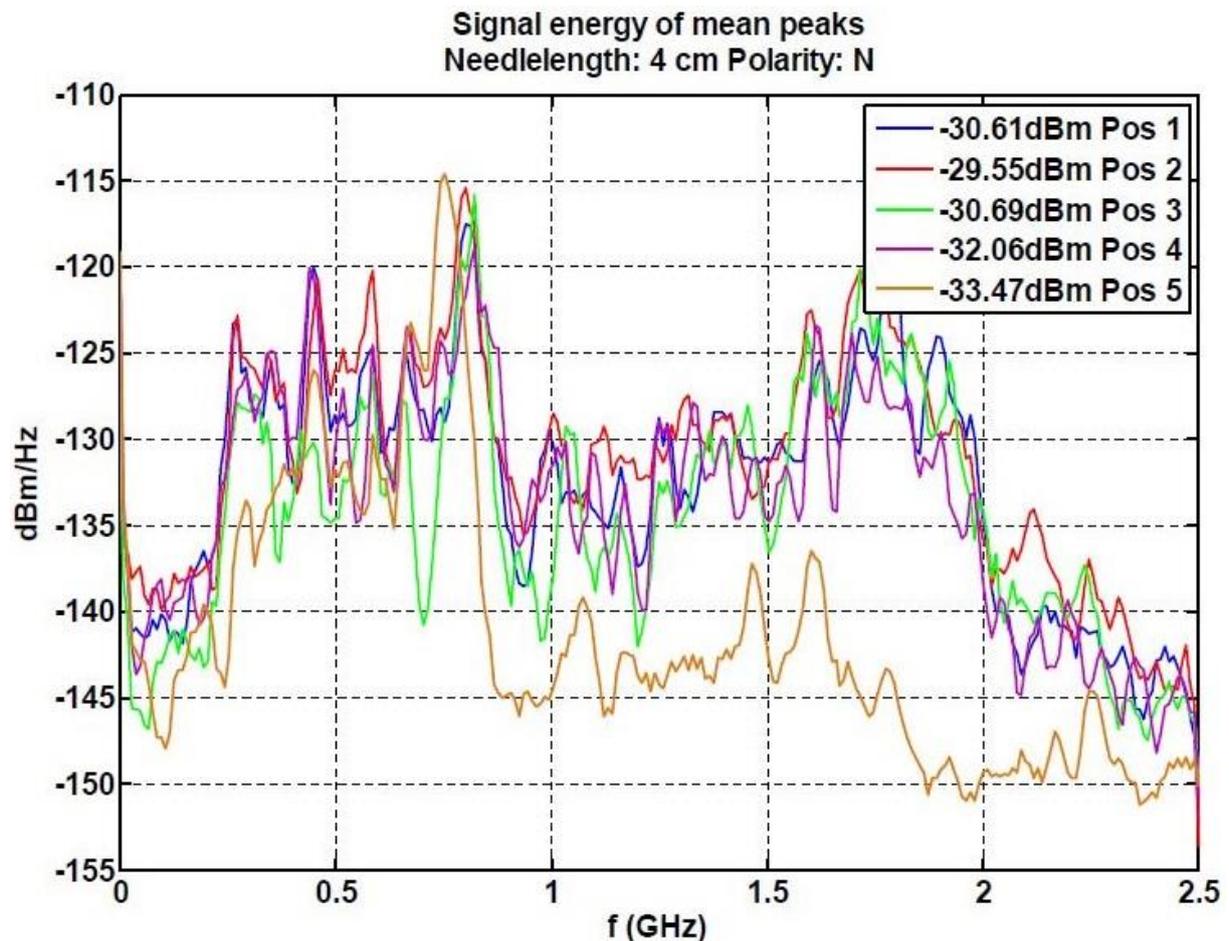


Abb. 81: Gemeinsame Spektren aller Positionen bei 40mm Eindringtiefe [24]

Der Vergleich der Spektren zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit, der Verlauf ist bei allen Positionen ähnlich. Allerdings sind bei dieser Darstellung keine Aussagen über Multimodenausbreitung möglich. [24]

Ergebnisse

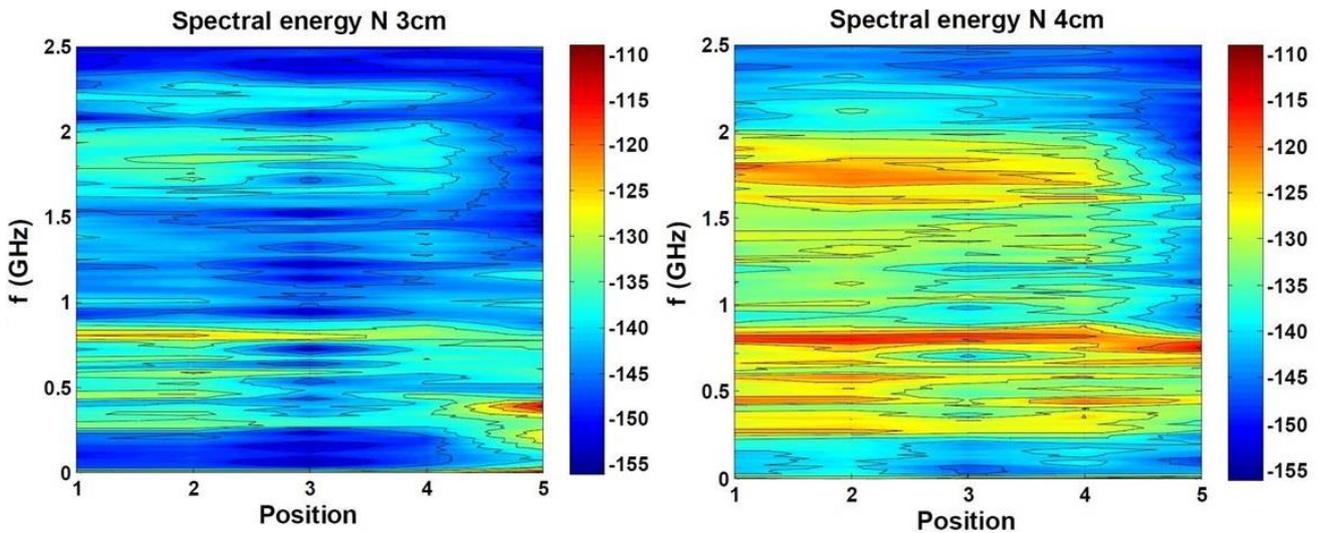


Abb. 82: Gleitende Darstellung Spektren über die Positionen der Nadel, Vergleich 30mm mit 40mm Eindringtiefe [24]

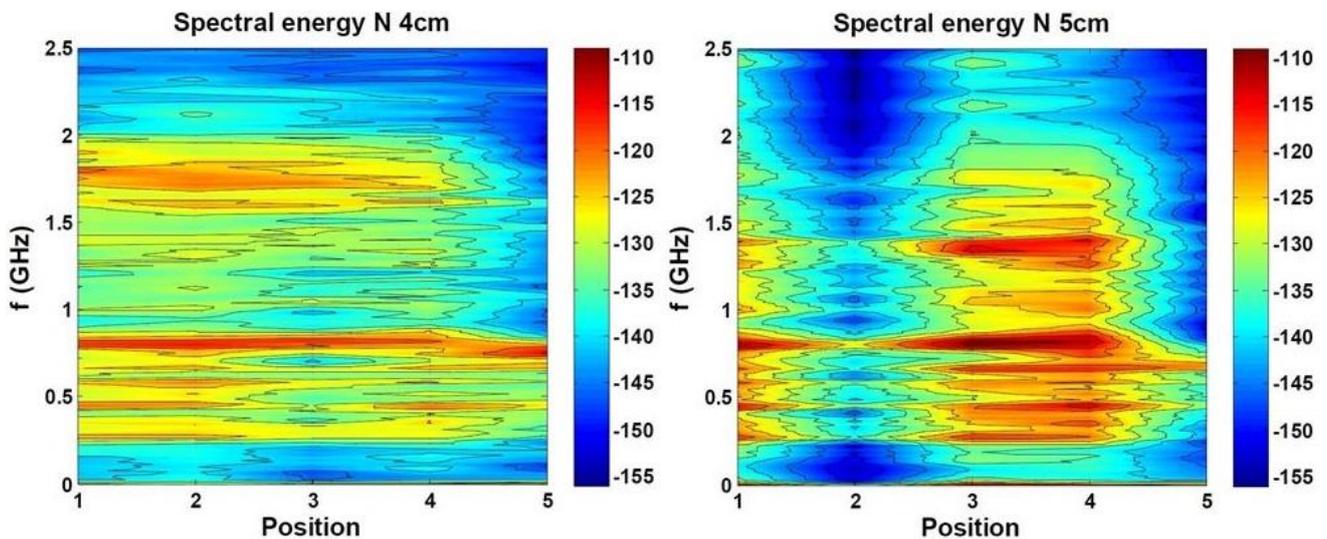


Abb. 83: Gleitende Darstellung Spektren über die Positionen der Nadel, Vergleich 40mm mit 50mm Eindringtiefe [24]

Stellt man die Spektren wie in den obigen Abbildungen (Abb. 82, Abb. 83) dar, lässt das einige Schlüsse zu. Man erkennt im Bereich von etwa 0,3GHz bis 0,8GHz drei stark ausgeprägte Bänder hoher Leistungsdichte, die sich über sämtliche Positionen strecken und mit steigender Eindringtiefe verstärkt werden. Zwischen 1,5GHz und 2GHz befindet sich ein schwächeres Band, dass sich von Position 1 bis 4 erstreckt und mit steigender Eindringtiefe stärker wird und sich dabei gleichzeitig etwas nach unten verschiebt. Bei 50mm Eindringtiefe befindet es sich etwa auf 1,4GHz. Position 5 ist die verstellbare Nadel hinter dem Stützisolator und damit der von der Sonde aus gesehen entfernteste Punkt. Es wäre denkbar, dass deshalb dieses obere Band bei dieser Position nicht mehr erkennbar ist. Das ist allerdings Gegenstand weiterer Untersuchungen. [24]

Besonders auffällig ist, dass bei Position 2 der Nadel mit 50mm Eindringtiefe das gesamte Spektrum über alle Frequenzen niedriger ist als bei den anderen Positionen. Nach Kontrolle der Teilentladungsmessergebnisse konnte keine Abweichung gegenüber den anderen Positionen dieser Eindringtiefe festgestellt werden. Nach Betrachtung der Aufnahme des UHF-Signals hat sich jedoch

Ergebnisse

herausgestellt, dass offenbar in einem Fenster wesentlich niedrigerer Signalenergie gemessen wurde, was schließlich die geringere Signalenergie erklärt. Wie bereits in Kap. 6.1.8. erwähnt, wurde die Aufnahme des TE-Signals solange wiederholt, bis ein Signal mit ausreichend deutlichen Peaks gefunden war. Bei der Betrachtung der fraglichen Aufnahme wird klar, dass der Signalpegel der Peaks im Vergleich mit den anderen Aufnahmen dieser Eindringtiefe um ein Vielfaches geringer ist, was die niedrige Leistungsdichte im Spektrum erklärt.

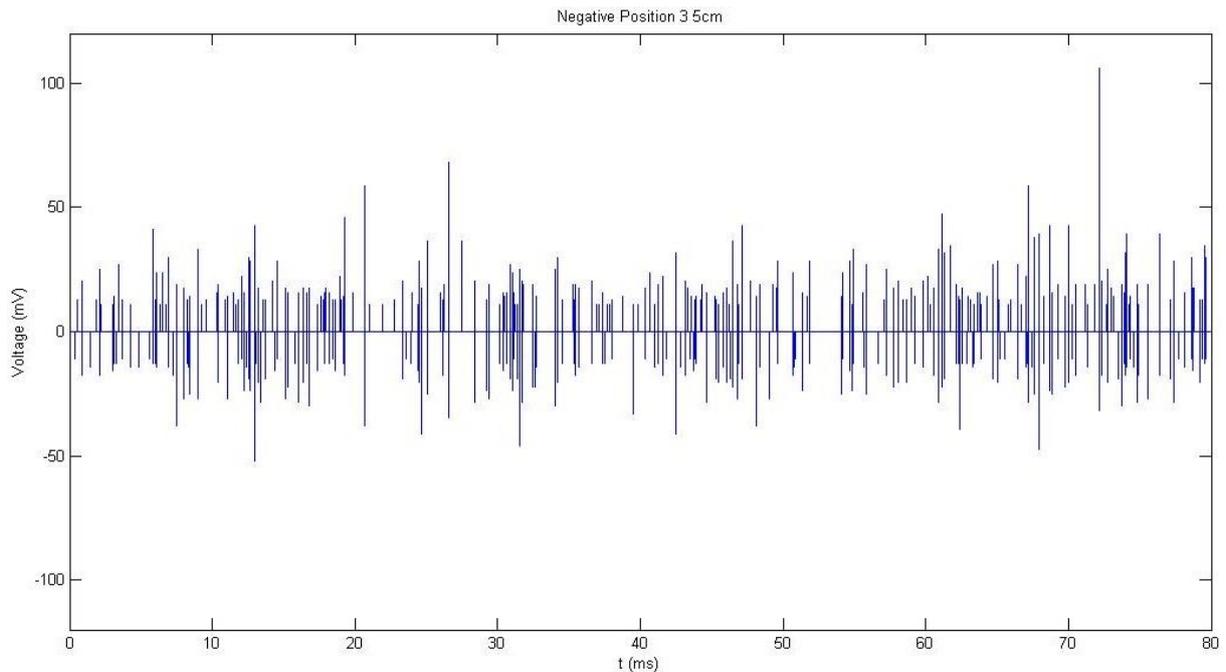


Abb. 84: Aufgenommenes Signal bei Position 3 und 50mm Eindringtiefe [25]

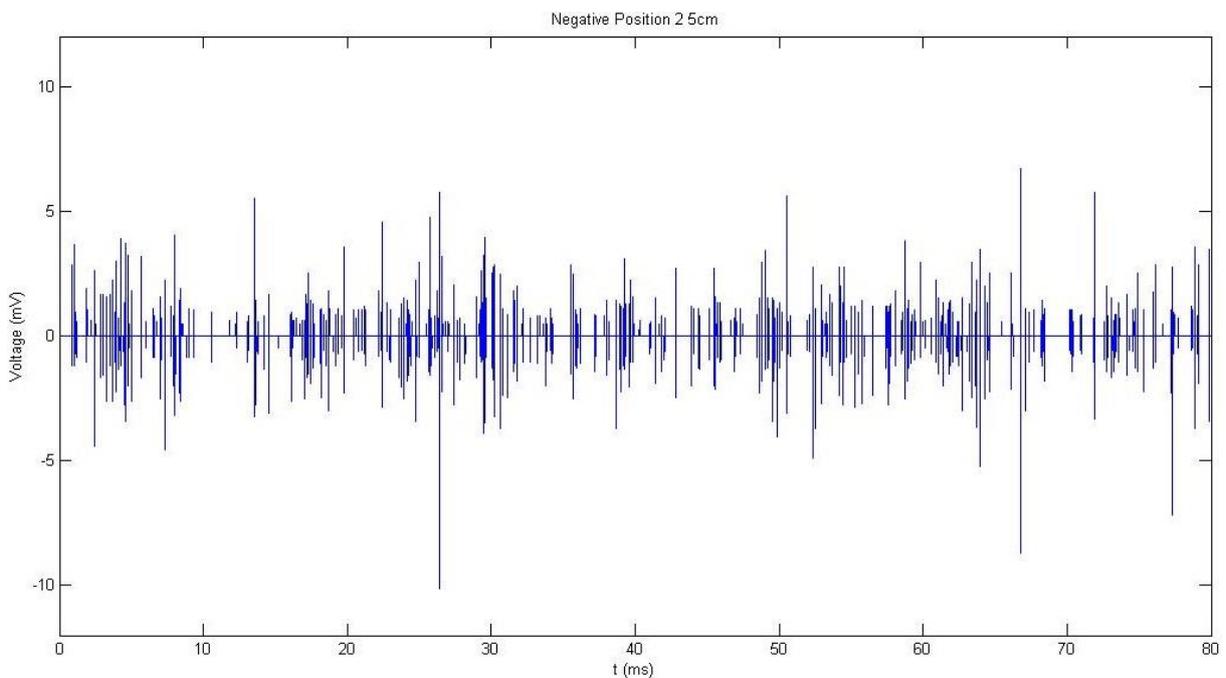


Abb. 85: Aufgenommenes Signal bei Position 2 und 50mm Eindringtiefe [25]

Ergebnisse

Beim Vergleich des aufgenommenen Signals an Position 2 (Abb. 85) mit dem der Position 3 (Abb. 84) wird klar, dass zwar ausreichend Peaks aufgezeichnet wurden, der Pegel in Position 2 jedoch extrem niedrig war. Offenbar wurde in einem Bereich niedriger Signalenergie gemessen, man kann daher diese eine Messung als Messfehler klassifizieren. [25]

Dank der gleitenden Darstellung der Spektren kann nun festgestellt werden, dass die Multimodenausbreitung innerhalb der GIL sich nicht störend auf die Spektren auswirkt, da sonst grobe Unregelmäßigkeiten zu erkennen wären, die nicht durch Messfehler zu erklären sind. Man kann die Spektren zur weiteren Untersuchung wieder in Bänder einteilen (Abb. 86).

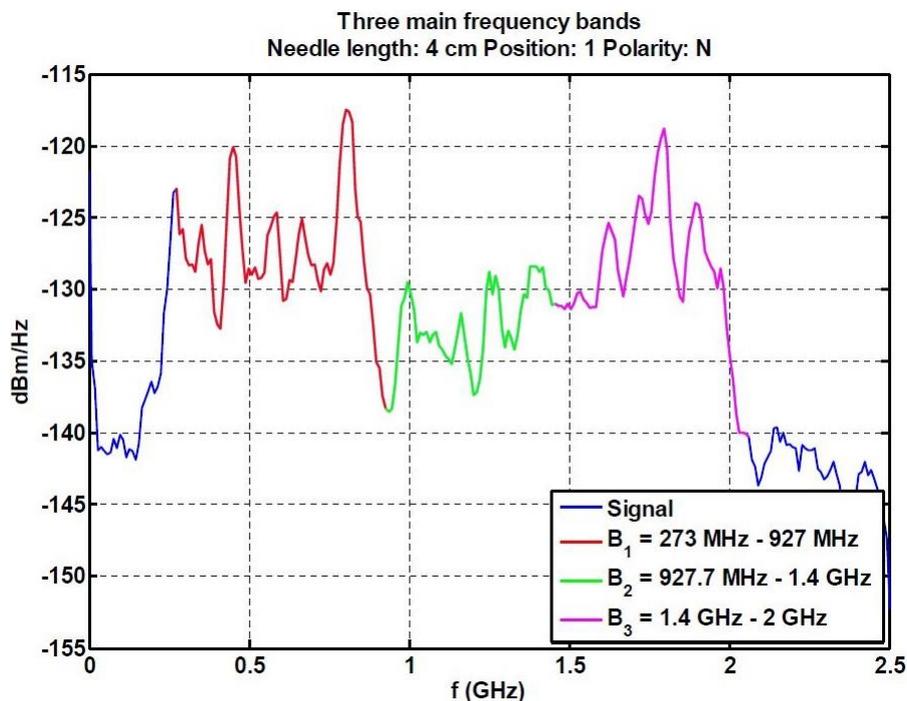


Abb. 86: Definition der Bänder am Beispiel der 40mm Nadel an Position 1 bei negativer Polarität [24]

Nun kann für die unterschiedlich stark ausgeprägten Bänder die Signalenergie bei den verschiedenen Eindringtiefen über die Positionen betrachtet werden (Abb. 87, Abb. 88). Man erkennt, dass die Signalenergie in den einzelnen Bändern relativ konstant bei allen Positionen verläuft. Es ist in jedem Fall eine Multimodenausbreitung vorhanden, die geringen Abweichungen entlang der Positionen zeigen jedoch, dass sich diese entlang der betrachteten Strecke nicht übermäßig auswirken, als dass die Signalenergie in einem bestimmten Punkt völlig zusammenbricht. [24]

Ergebnisse

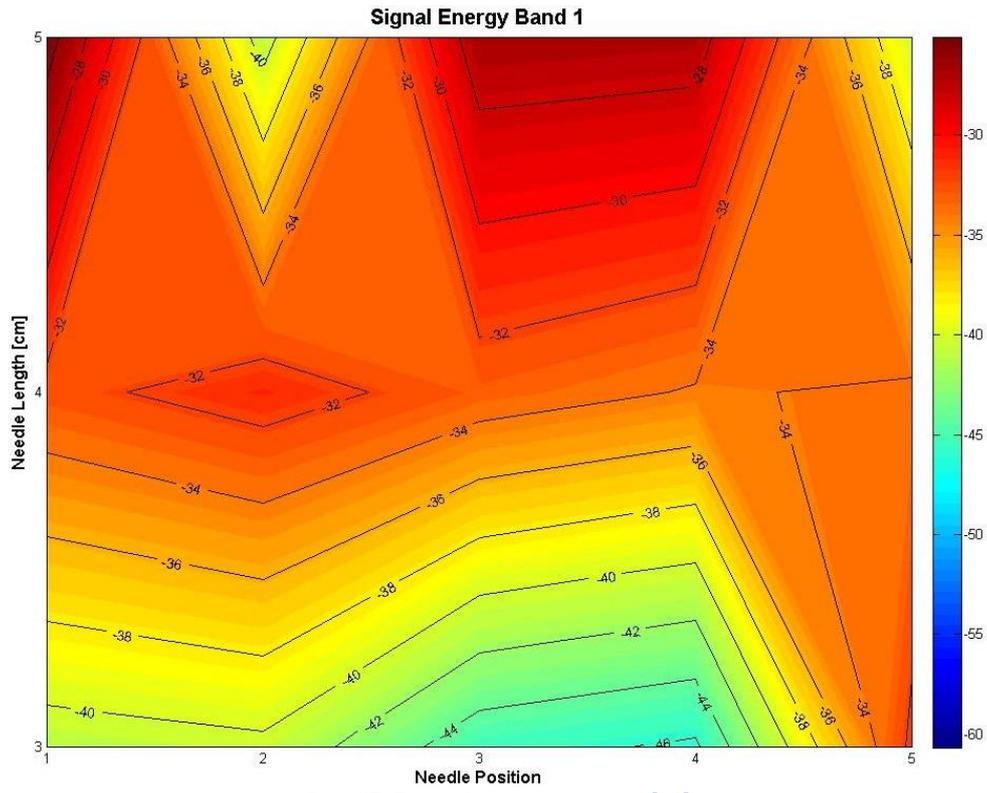


Abb. 87: Erstes Signalenergieband [24]

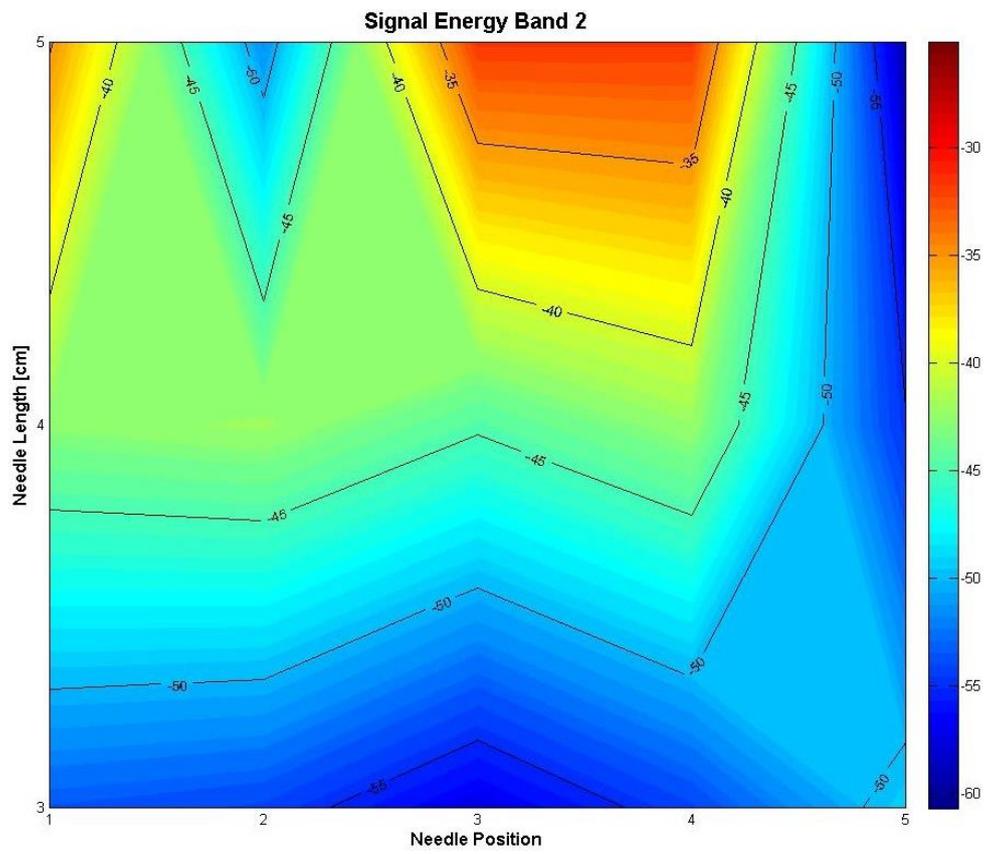


Abb. 88: Zweites Signalenergieband [24]

6.2.4. Ergebnisse

Bei der Messung des gleichen Defekts an verschiedenen Positionen wurde darauf geachtet, reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen. Die Messergebnisse sind mit denen der Nadeln bei der ersten Messreihe vergleichbar. Obwohl die Auswertung der Spektren anhand der Messergebnisse der Gleichspannungsversuche erfolgen sollte, wurden wieder einige Punkte zu späteren Vergleichszwecken mit Wechselspannung geprüft.

Die Auswertung der Spektren durch das Institut für Hochfrequenztechnik hat gezeigt, dass sich die Ausbreitung mehrerer Moden in keinem Punkt so auswirkt, dass das Nutzsignal beeinträchtigt wird. Die Multimodenausbreitung ist somit ein kalkulierbarer Störfaktor.

6.3. Resümee

Mit den gewonnenen Erkenntnissen durch die Messreihen können für weiterführende Untersuchungen am selben Aufbau einige Aussagen getroffen werden.

Aufgrund der höheren Messempfindlichkeit kommt bei UHF-Verfahren ein abgestimmtes Schmalbandmesssystem mit variabler Mittenfrequenz zum Einsatz. Das Frequenzfenster, in dem TE gemessen werden sollen, wird durch die Art des Defektes und dem verwendeten Sensor bestimmt. Die Mittenfrequenz des Messsystems wird auf das gefundene Fenster zentriert und fixiert, sowie die Bandbreite auf z.B. 3MHz eingestellt. [7]

Daher ist der Messvorgang bei schmalbandigen UHF-Messsystemen folgendermaßen:

- Die Mittenfrequenz für die höchste Signalenergie ist zu ermitteln
- Die Messung ist bei dieser Mittenfrequenz durchzuführen
- Bei vergleichenden Messungen muss diese Mittenfrequenz beibehalten werden

Bei der untersuchten Nadel liegt das Band mit der höchsten Leistungsdichte bei etwa 0,8GHz (Abb. 82, Abb. 83), daher ist es sinnvoll, in diesem Bereich die Mittenfrequenz einzustellen. In weiteren Untersuchungen soll festgestellt werden, ob sich diese auch für alle anderen Defektarten, die bei der verwendeten Messkonfiguration eingebracht wurden, eignet. Für eine optimierte Sonde mit hoher Messempfindlichkeit sollen im Frequenzfenster die TE aller zu untersuchender Defekte zuverlässig und bei günstigem Verhältnis von Signal zu Störabstand gemessen werden können. Alle Messungen wurden mit der bestehenden Sonde durchgeführt, die aufgrund ihrer Eigenschaften im UHF-Bereich als nicht besonders hochwertig einzustufen ist (Abb. 52, Abb. 53, [22]). Durch einen verbesserten Reflexionsfaktor kann eine optimierte Antenne (Abb. 41) in den entsprechenden Frequenzbändern eine bessere Signalausnutzung erzielen, die aufgezeichneten Spektren müssen aber mit jenen der vorhandenen Sonde verglichen werden.

7. Zusammenfassung

Um ein Verständnis der Auswirkungen von Teilentladungen im HF-Bereich zu erlangen, wurden in dieser Arbeit am Prüfaufbau mit einer vorhandenen UHF-Sonde die Spektren von einigen charakteristischen Defekten bei +/- DC und AC untersucht. Die Auswahl der Defekte wurde daher vorab zusammen mit einem groben Ablauf der anstehenden Messungen in einem Konzept erarbeitet. Die Aufzeichnung der UHF-Signale und die Erstellung der TE-Spektren wurden vom Institut für Hochfrequenztechnik übernommen. Bei der ersten Messreihe stand im Vordergrund, die Beschaffenheit der Spektren zu ermitteln und deren Charakteristika untereinander zu vergleichen. Es hat sich herausgestellt, dass ob der Masse an Messergebnissen vorerst nur ein Defekt, die verstellbare Nadel, zur Bewertung herangezogen werden konnte. Die nähere Betrachtung der Messergebnisse dieses Defekts bei negativer Gleichspannung haben sich als zielführend erwiesen, da sich im Gegensatz zu den Messungen mit positiver Gleichspannung der Signalpegel ausreichend hoch vom Rauschen abhob, und die störende 50Hz-Komponente der Wechselspannungsmessungen wegfiel. Der verwendete GIL-Aufbau ist aus hochfrequenztechnischer Sicht ein komplexes System, welches mit den Ergebnissen einer Referenzmessung in groben Zügen zu beschreiben gelang. Allerdings sind hier noch genauere Untersuchungen notwendig, um das gesamte System hochfrequenztechnisch beschreiben zu können und die Ergebnisse in Simulationen einfließen zu lassen. Durch die Ergebnisse der Untersuchungen des Instituts für Hochfrequenztechnik konnten nun weitere Schritte überlegt werden. Die Auswirkungen einer Multimodenausbreitung innerhalb der GIL war dabei ein wesentlicher Punkt, den es zu untersuchen galt. Da bei der ersten Versuchsreihe die Positionen der eingebrachten Defekte nicht festgelegt wurde, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass es an anderen Stellen entlang des Rohres zu signalverzerrenden Auslöschungen durch sich überlagernde Moden kommt. Vonseiten der Hochfrequenztechnik kam der Vorschlag, den gleichen Defekt an vielen definierten Stellen entlang der GIL-Achse zu messen. Im Zuge der Planung der zweiten Messreihe wurde entschieden, die Nadel als repräsentativen Defekt zu wählen. Zusätzlich zur vorhandenen ortsfesten Nadel, die verstellbar und ausfahrbar ist, wurden drei weitere bewegliche Nadeln unterschiedlicher Größe auf Sockeln angefertigt, die an vorher festgelegten Positionen eingestellt werden können. Bei dieser Messreihe war somit eine Reihe an vergleichbaren Messungen möglich, die Nadel wurde an mehreren Positionen gemessen und die Spektren untersucht. Auch hier lag der Fokus auf die Auswertung der Messergebnisse der negativen Gleichspannungsversuche, zu späteren Vergleichszwecken wurden die Defekte auch bei positiver Gleichspannung und Wechselspannung aufgenommen. Das Institut für Hochfrequenztechnik kam zum Schluss, dass die Modenausbreitung in keinem der gemessenen Positionen große Auswirkungen auf das Spektrum hatte. Die Messungen an den festgelegten Positionen wurden bei drei

Eindringtiefen der Nadel durchgeführt, dadurch ergab sich eine Menge an Messergebnissen, die vergleichende Schlüsse zulässt.

8. Ausblick

Trotz der umfangreichen Messungen sind die Ergebnisse dieser Arbeit lediglich der erste Schritt, die UHF-Teilentladungsdetektion zu verbessern. Ein Fernziel ist, mit den gewonnenen Erkenntnissen eine neuartige Antenne zu entwickeln, und diese mit denselben Parametern zu testen. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, muss das System durchcharakterisiert werden. Man muss also über die Eigenschaften der Wellenausbreitung im Prüfaufbau, der für weiterführende Messungen herangezogen wird, genauestens Bescheid wissen. Neben der Antenne selbst muss auch die gesamte Messkette betrachtet werden. Die Ergebnisse der Auswertung der Spektren beziehen sich nur auf die nadelförmige fixierte Spitze auf der Kapselung. Für die Entwicklung einer Antenne, die universell einsetzbar sein soll, müssen die Spektren aller möglichen Defekte genauer untersucht werden. Das muss vor allem auch den häufigsten Defekt, bewegliche Partikel, mit einschließen, auf deren Spektren in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden konnte. Ferner wurden in dieser Arbeit in besonderem Maße auf starke Teilentladungssignale Bezug genommen, um die Auswirkung von hohen Teilentladungen im HF-Bereich am verwendeten Aufbau zu untersuchen. Ein Anspruch an eine optimierte Sonde ist aber auch, dass niedrige TE zuverlässig erkannt werden. Die konventionelle elektrische Teilentladungsmessung und die Aufnahme des UHF-Signals zur späteren Erstellung der Spektren sollten für weiterführende Untersuchungen synchronisiert werden, für den besseren Vergleich der beiden Messsysteme. So kann der exakte Spannungs- und scheinbare Ladungswert während der Aufnahme des UHF-Signals gemessen werden. Aufgrund des hohen Prüfungspensums bei gleichzeitig begrenzter Prüfzeit wurden nur wenige Messreihen mehrmals durchgeführt. Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können, muss für zukünftige Messungen ausreichend Zeit zur Verfügung stehen. Zu diesem Zwecke kann aus der Fülle von behandelten Defekten der repräsentativste ausgewählt und eingehender untersucht werden.

Leider lässt der derzeitige Stand der Untersuchungen keine Bewertung eines Verbesserungspotentials zu, da zu viele beeinflussende Faktoren noch nicht berücksichtigt werden konnten. Für den näher untersuchten Fall der Nadel, kann eine Mittenfrequenz gefunden werden, bei der die Sonde schmalbandig und genau arbeitet, jedoch ist noch unklar, ob diese Mittenfrequenz für alle möglichen Störfälle geeignet ist. Schließlich soll ein optimiertes System jede Teilentladungsquelle zuverlässig erkennen können. Der Weg zu einem optimierten UHF-Teilentladungssystem ist ein langer, aber diese Arbeit kann als Grundlage für weitergehende Untersuchungen dienen.

9. Literaturverzeichnis

References

- [1] A. Küchler, *Hochspannungstechnik, Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2005.
- [2] R. Woschitz, "Skriptum der VO Hochspannungsleitungen," *Institut Für Elektrische Anlagen Und Hochspannungstechnik, TU Graz, WS 2002/03*.
- [3] Lukas Graber and Matthias Kudoke, "SF6 in der Hochspannungstechnik, Vom verantwortungsvollen Umgang und einem neuen Monitoringkonzept," *Bulletin SEV/AES*, pp. 9-15, 19/2008.
- [4] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, "DIN EN 62271-203 (VDE 0671-203) Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 52kV (IEC 62271-203:2011); Deutsche Fassung EN 62271-203:2012," 2012.
- [5] M. Wohlmuth, *Einfluß Beweglicher Partikel Auf Das Isolationsverhalten Gasisolierter Schaltanlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1996.
- [6] R. Schwarz, "Skriptum der VO Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik," *Institut Für Hochspannungstechnik Und Systemmanagement, TU Graz, SS 2012*.
- [7] S. Hoek, A. Kraetge, O. Kessler and S. Neuhold, "UHF-TE-Messung an GIS mit abstimmbaren Messfilter mittlerer Breite," *OMICRON Electronics GmbH, 2013*.
- [8] G. Wanninger, *Ultrahochfrequente Teilentladungssignale in Gasisolierten Schaltanlagen (GIS)*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1998.
- [9] K. Kark, *Antennen Und Strahlungsfelder - Elektromagnetische Wellen Auf Leitungen, Im Freiraum Und Ihre Abstrahlung*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [10] R. Kurrer and K. Feser, "The application of ultra-high-frequency partial discharge measurements to gas-insulated substations," *Power Delivery, IEEE Transactions On*, vol. 13, pp. 777-782, 1998.
- [11] Siemens Aktiengesellschaft, "Betriebsanleitung - Feldsonde für metallgekapselte gasisolierte Schaltanlage," 1999.
- [12] S. M. Neuhold, M. L. Schmatz, M. Hassig, M. M. Spuhler and G. Storf, "Combined broad and narrow band multichannel PD measurement system with high sensitivity for GIS," in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. no. 467)*, 1999, pp. 152-155 vol.5.
- [13] M. Ono, Y. Matsuyama, N. Otaka, T. Yamagiwa and T. Kato, "Experience of GIS condition diagnosis using partial discharge monitoring by UHF method," in *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference On*, 2008, pp. 1108-1110.
- [14] M. D. Judd, O. Farish and B. F. Hampton, "Broadband couplers for UHF detection of partial discharge in gas-insulated substations," *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, vol. 142, pp. 237-243, 1995.

Literaturverzeichnis

- [15] S. Kaneko, S. Okabe, M. Yoshimura, H. Muto, C. Nishida and M. Kamei, "Detecting characteristics of various type antennas on partial discharge electromagnetic wave radiating through insulating spacer in gas insulated switchgear," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions On*, vol. 16, pp. 1462-1472, 2009.
- [16] S. Meijer and J. J. Smit, "UHF defect evaluation in gas insulated equipment," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions On*, vol. 12, pp. 285-296, 2005.
- [17] S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek and S. M. Markalous, "Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions On*, vol. 15, pp. 1544-1552, 2008.
- [18] G. Schoffner and W. Boeck, "PD measurements in N₂-SF₆ gas mixtures with the UHF method," in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. no. 467)*, 1999, pp. 86-89 vol.5.
- [19] S. M. Hoek, S. Coenen, M. Bornowski and S. Tenbohlen, "Fundamental differences of the PD measurement according to IEC 60270 and in UHF range," in *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference On*, 2008, pp. 79-81.
- [20] D. Gautschi, "Besonderheiten des Überspannungsschutzes in GIS," *VDE-AK10 Überspannungsschutz in Elektroenergiesystemen*, 2012.
- [21] M. Vorderderfler, M. Gadringer and P. Freidl, "Breitbandige Sonde für Teilentladungsmessungen," *Institut Für Hochfrequenztechnik, TU Graz*, 2014.
- [22] M. Gadringer and P. Freidl, "Reflexionsfaktor und Smithdiagramm der UHF-Feldsonde," *Institut Für Hochfrequenztechnik, TU Graz*, 2013.
- [23] M. Vorderderfler, M. Gadringer and P. Freidl, "Auswertung der Störstellenmessungen," *Institut Für Hochfrequenztechnik, TU Graz*, 2014.
- [24] M. Vorderderfler, M. Gadringer and P. Freidl, "Auswertung der neuen Störstellenmessungen," *Institut Für Hochfrequenztechnik, TU Graz*, 2014.
- [25] M. Vorderderfler and M. Gadringer, "Messung und Analyse von Teilentladungen in gasisolierten Hochspannungsleitungen und deren Auswirkungen im HF-Bereich," *Institut Für Hochfrequenztechnik, TU Graz*, 2014.

10. Anhang

Im Anhang werden weitere ausgewählte Punkte wie Diagramme und Messtabellen angeführt, die als Ergänzung zum Hauptteil dienen sollen.

10.1. Referenzmessung

Die Referenzmessung diente dazu, das Verhalten der Anordnung bei hohen Frequenzen zu ermitteln. Diese Messung ist nötig, um ein korrektes Simulationsmodell der komplizierten Anordnung zu erstellen. Die Messung wurde spannungslos und ohne eingebrachten Defekt durchgeführt. Zuvor wurden die Messleitungen mit definierten Abschlüssen (Kurzschluss, Leerlauf) auf den Messbereich angepasst, damit nur das Signal des Versuchsaufbaus gemessen wird.

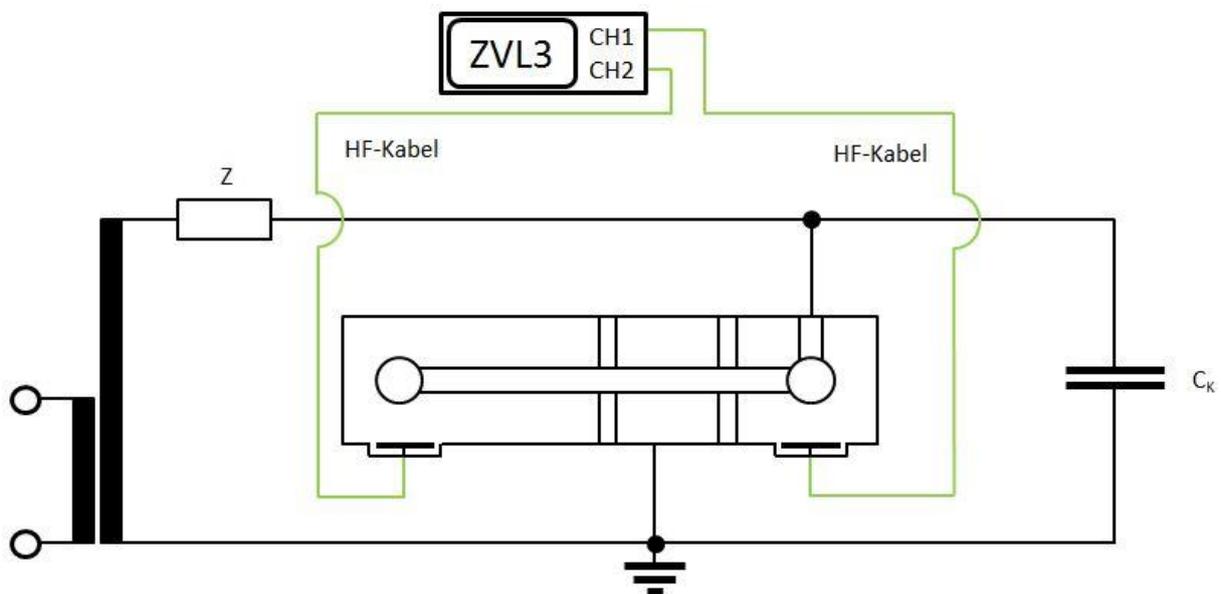


Abb. 89: Referenzmessung am spannungslosen Prüfaufbau

Mit dem Netzwerkanalysator ZVL3 der Firma Rhode und Schwarz konnte wechselweise bei beiden Sonden eingespeist und aufgenommen werden.

Messpunkt	Gasraum Durchführung	Gasraum Rohr
1	0,6MPa SF ₆	5kPa SF ₆
2	0,6MPa SF ₆	97,3kPa Luft

Tab. 19: Messpunkte der Referenzmessung

Die Messung wurde nach dem Rückspeichern des Schutzgases durchgeführt, deshalb befanden sich beim ersten Messpunkt noch 5kPa SF₆ im vorderen Gasraum. Der zweite Messpunkt wurde nach dem Belüften der Anlage auf Atmosphärendruck durchgeführt. Da die relative Permittivität von Schwefelhexafluorid und Luft annähernd $\epsilon_r \approx 1$ ist, gab es wie erwartet keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Messergebnissen. [24]

10.2. Vollständige Messtabellen der zweiten Messreihe

Die durchschnittlichen Werte sind in Kap. 6.3.2. angeführt.

Position	Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
5	-400	-340	-301	32
4	-400	-270	-204	14
3	-400	-265	-227	15
2	-400	-259	-230	15
1	-400	-260	-240	16
Mittelwert	-DC	-279	-248	18,4
4	+500	+479	+450	2,4

Tab. 20: Messwerte und Mittelwerte bei Gleichspannung und 30mm Eindringtiefe der Nadel

Wie bereits erwähnt, wurde die Messung bei positiver Gleichspannung aufgrund des geringen Pegels nur in einer Position durchgeführt.

Position	Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
5	-300	-255	-202	25
4	-300	-250	-230	45
3	-300	-250	-220	40
2	-300	-261	-220	60
1	-300	-265	-230	60
Mittelwert	-DC	-256	-220	46
5	+500	+470	+395	4,0
4	+500	+365	+350	4,7
3	+500	+365	+270	5,0
2	+500	+360	+260	5,1
1	+500	+365	+260	4,7
Mittelwert	+DC	+385	+307	4,7

Tab. 21: Messwerte und Mittelwerte bei Gleichspannung und 40mm Eindringtiefe der Nadel

Position	Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
5	-300	-188	-184	80
4	-300	-260	-180	100
3	-300	-199	-190	134
2	-300	-180	-180	130
1	-300	-191	-180	80
Mittelwert	-DC	-204	-183	105
5	+500	+390	+340	4,0
4	+500	+260	+290	5,1
3	+500	+340	+270	4,5
2	+500	+345	+270	5,5
1	+500	+270	+275	4,8
Mittelwert	+DC	+321	+289	4,8

Tab. 22: Messwerte und Mittelwerte bei Gleichspannung und 50mm Eindringtiefe der Nadel

Anhang

Position	Zielspannung kV	Einsetzspannung kV	Aussetzspannung kV	Scheinbare Ladung pC
4	~250	~180	~180	2,8
3	~250	~136	~150	3,7
2	~250	~150	~135	3,6
1	~250	~150	~125	4,0
Mittelwert	AC	-279	-248	3,6

Tab. 23: Messwerte und Mittelwerte bei Wechselspannung und 40mm Eindringtiefe der Nadel

10.3. Weitere Diagramme zur Analyse der Spektren der zweiten Messreihe

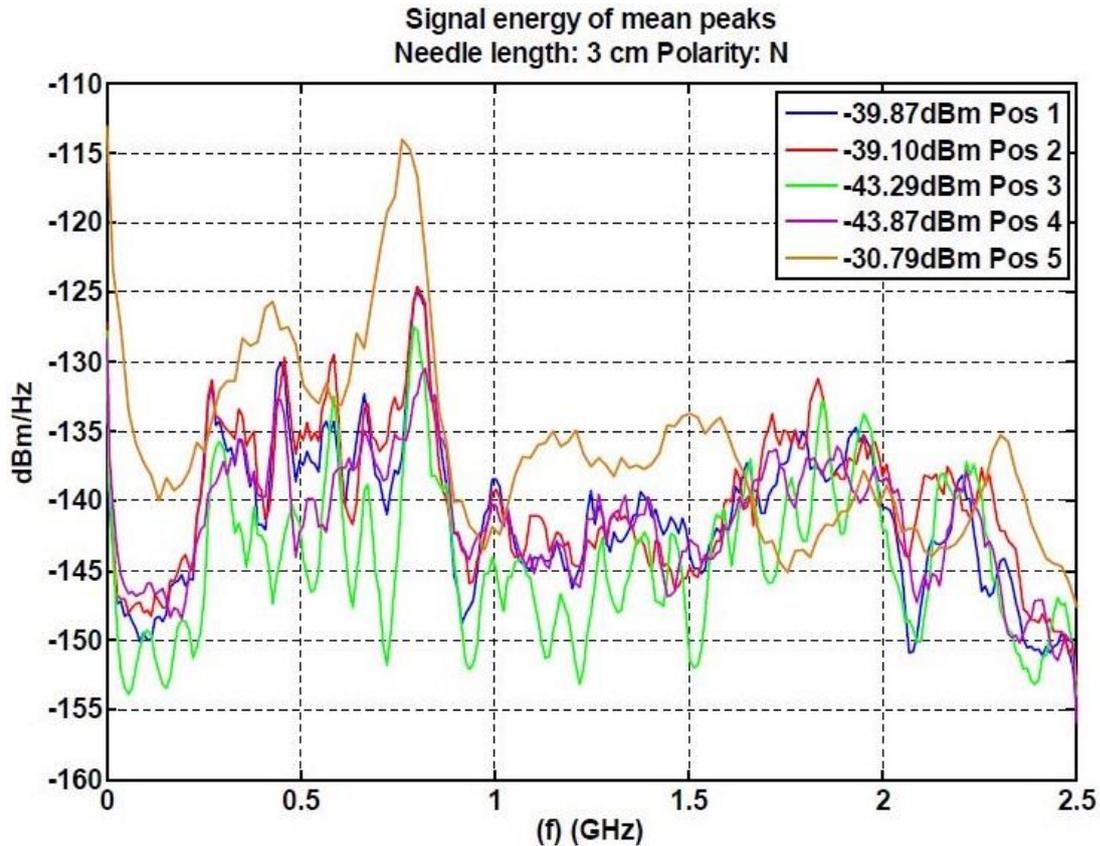


Abb. 90: Gemeinsame Spektren aller Positionen bei 30mm Eindringtiefe [24]

Anhang

Signal energy of mean peaks
Needlelength: 5 cm Polarity: N

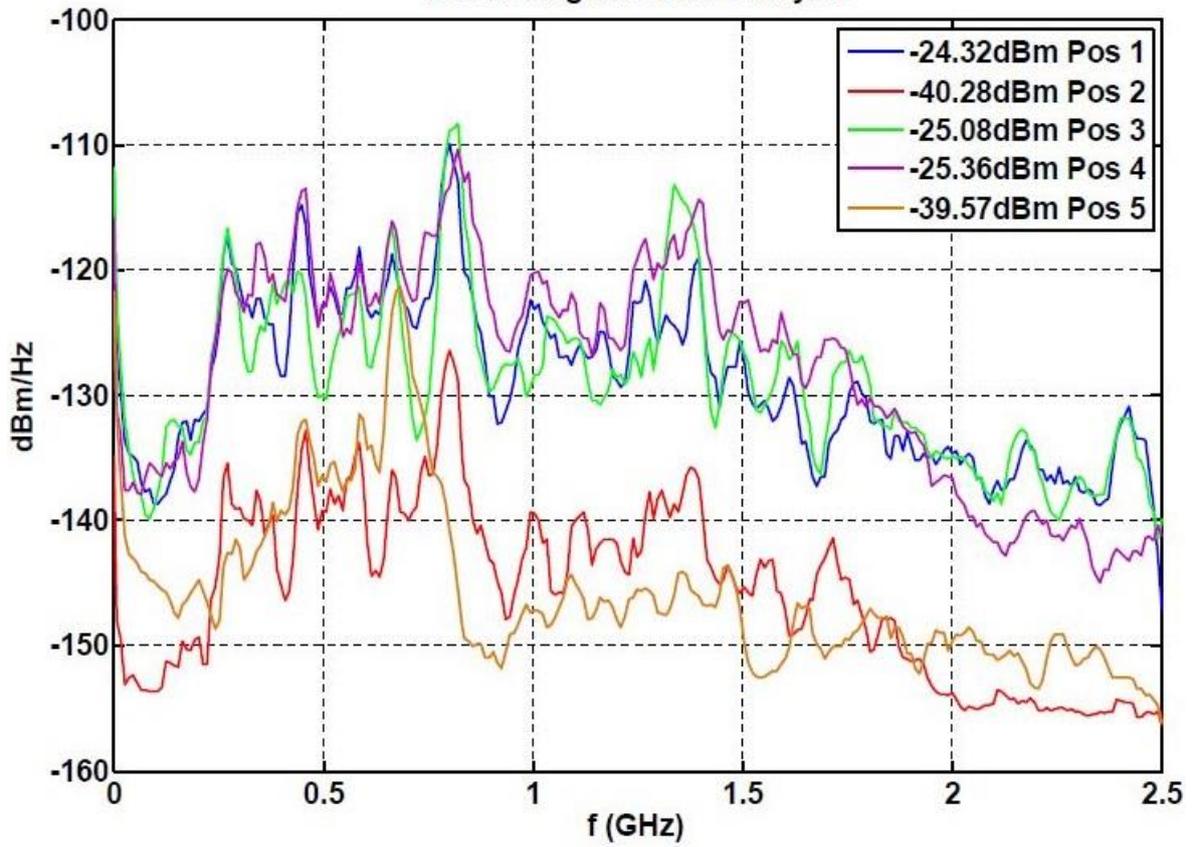


Abb. 91: Gemeinsame Spektren aller Positionen bei 50mm Eindringtiefe [24]

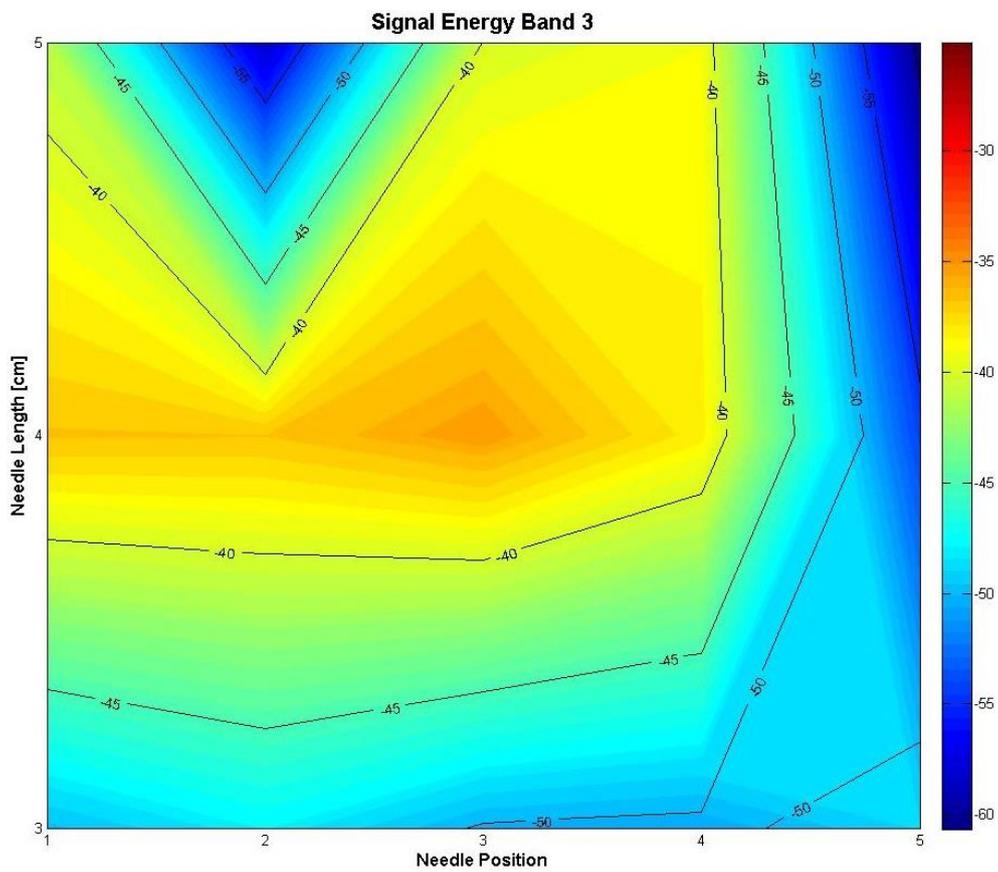


Abb. 92: Drittes Signalenergieband [25]